

今後の研究課題について ～高周波、超高周波 ヒト研究～

平田 晃正
名古屋工業大学

国際動向について(1)

◆ WHO Research Agenda for Radiofrequency Fields (2010)

Human studies

- Further RF EMF provocation studies on **children of different ages**
- Provocation studies to identify neurobiological mechanisms underlying possible effects of RF on brain function, including sleep and resting EEG

◆ SCHENIHR (2015 Jan)

- The number of studies investigating **potential biological, non-thermal effects of THz fields is small**, but has been increasing over recent years due to the availability of adequate sources and detectors.
- Some theoretical mechanisms have been proposed, but there is no experimental evidence for them. Considering the expected increase in use of THz technologies, **more research focusing on the effects on skin (long-term, low-level exposure) and cornea (high-intensity, short-term exposure) is recommended.**

国際動向について(2)

～ICNIRPガイドラインより～

The following general variables were considered in the development of safety factors for high-frequency fields:

- effects of EMF exposure under severe environmental conditions (high temperature, etc.) and/or high activity levels (環境)
- the potentially higher thermal sensitivity in certain population groups, such as the frail and/or elderly, infants and young children, and people with diseases or taking medications that compromise thermal tolerance (年齢など医学的個人差)

The following additional factors were taken into account in deriving reference levels for high-frequency fields:

- differences in absorption of electromagnetic energy by individuals of different sizes and different orientations relative to the field (年齢、体形など個人差)
- reflection, focusing, and scattering of the incident field, which can result in enhanced localized absorption of high-frequency energy (電波環境など)

国際動向について(3)

～ICNIRP Thermal Damage Workshop より～

1. Definition/Specification of the threshold for thermal damage:

- a) with respect to - **the whole body**, - **parts of the body** (limbs, trunk, head), - different organs (i.e. brain, eye, testis, skin etc.) - different tissues (muscle, fat, nerve, connective tissue)
- b) regarding frequency dependence (電波環境)
- c) with respect to **external conditions** (**cold and hot environment, humidity, clothing**) (環境)
- d) with respect to internal/individual conditions (**interindividual variations, age-dependence, health status, metabolic status, medication, compromised thermoregulation, pregnancy,...**) (医学的個人差)

2. **Definition of the health relevant quantity** (SAR, power flux density, temperature) (物理指標)

3. Is our **thermoregulation** (evolved to respond to physical work and hot environments) effective in responding to local (internal) HF-induced heating? (温熱生理)

4. Is the **averaging time of 6 min** and the **averaging mass of 10g** of contiguous tissue appropriate? (物理指標)

5. Has exposure duration to be taken into account (even at low exposure levels)? (非熱効果)

今後の研究課題について ～一部:高周波 ヒト研究～

平田 晃正
名古屋工業大学

* 総務省・先進WGにおける研究課題より抜粋、改変のものあり

研究課題名:「高周波**全身ばく露**に関する年齢および環境に対する閾値変動の調査」

【対象周波数】10 MHz～6 GHz

【現状・課題】

- 人体モデルシミュレーションを用いた最新の温熱生理研究において、体温に代表される一部生理反応は年齢や環境温湿度条件(例:熱中症環境)に大きく左右されることが示されている。
- 異なる年齢層の被験者および異なる環境温湿度、活動条件のもとで人体全身ばく露実験を実施し、ばく露強度閾値についての変動を調査する。
- **全身平均SAR0.4W/kgの根拠となるばく露実験はなく、低減係数の設定が十分ではない。**

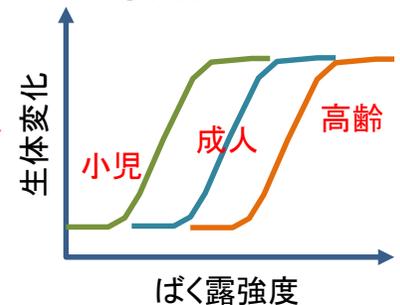
【想定される研究成果、効果】

- 先行研究で取得されている環境温度に対する反応より、生体反応閾値は年齢層による差異を定量化。
- **現在の電波防護指針の妥当性、国際的なガイドラインとの整合性の検証**
- WHO基準制定が期待される中、年齢、周辺環境、更には複合的な電波ばく露に対する影響を考慮することは策定に対して重要な寄与となりうる。

電波**全身ばく露**



①閾値評価



②モデル解析

$$T_B(t) = T_{B0} + \int_0^t \frac{Q_{BT}(t) - Q_{BT}(0)}{C_B \rho_B V_B} dt$$

研究課題名:「高周波**局所ばく露**に関する年齢および環境に対する閾値変動の調査」

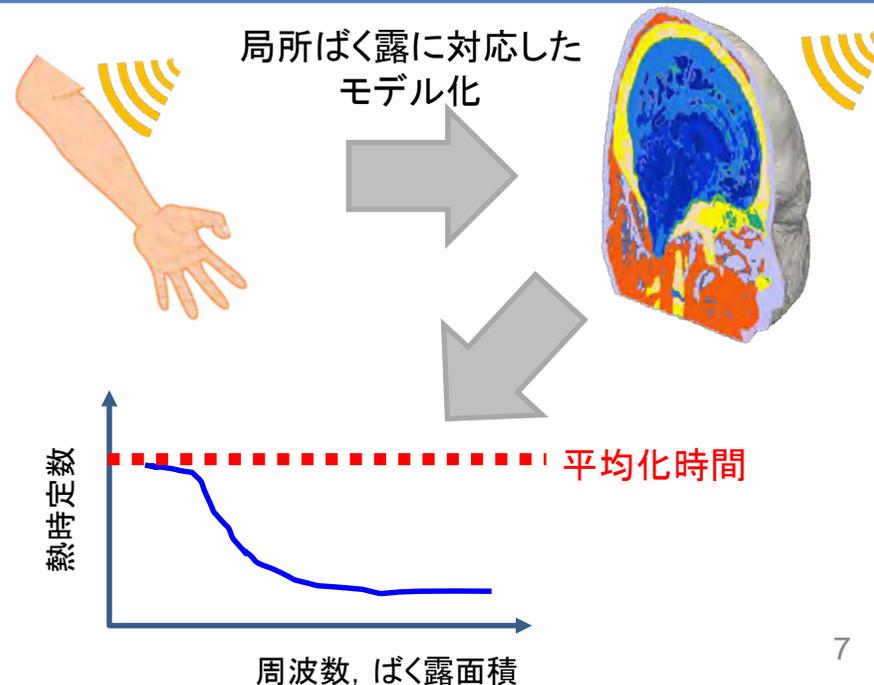
【対象周波数】10 MHz～6 GHz

【現状・課題】

- 局所(内部)ばく露において、温熱生理機能が働くとの報告はあるものの定量化は十分ではない。現在は**温熱生理反応を無視**して指針値を導出。また、**生理反応**の年齢や環境温湿度条件、部位により大きく左右されることが予測される。
- **中間周波数帯**から高周波数帯にわたる熱損傷閾値、また、6GHz近傍において電波防護指針、国際ガイドラインとの整合性の検証を既存周波数を中心に再検討することが必要である。
- SARの平均化時間について、6分間という設定の根拠が明確ではない。熱時定数は、ばく露面積やばく露強度、対象組織などに影響され、**多様な電波環境を考慮した再検討**が必要である。

【想定される研究成果、効果】

- 局所ばく露における温熱生理機能の調査については、ICNIRP Workshopでも言及されており、定量化が求められている。
- **現在の電波防護指針の妥当性、国際的なガイドラインとの整合性の検証**
- WHO基準策定が期待される中、年齢、周辺環境、各部位における熱時定数のばらつき、定量化は有用なデータとなる。



「接触電流による神経作用(痛覚閾値)の調査(中間周波～高周波)」

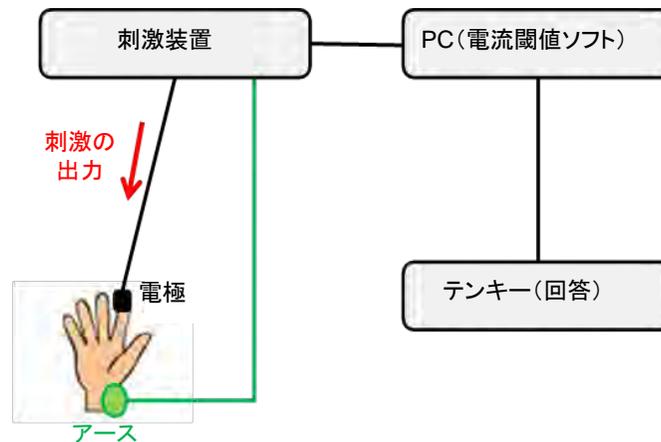
【対象周波数】3 MHz～110 MHz(最大1 GHz程度)

【現状・課題】

- 中間周波で生じる刺激作用帯の接触電流により生じる、温感・熱感・熱痛などの痛覚など人体の神経作用に関する科学的データが欠落している。
- 電磁界による知覚作用は、**刺激知覚と熱作用が拮抗しながら遷移**するため、様々な刺激条件での詳細な検討が必要になる。
- IEC規格において接触電流の評価法が定められる中、**IEEEおよびICNIRPの改定においても十分なデータがない**とされる項目である。

【想定される研究成果、効果】

- **現在の電波防護指針の妥当性、国際的なガイドラインとの整合性の検証**
- 医学・工学に基づいた生体モデル・シミュレーションにより、電波ばく露の知覚についての神経生理学的解明



Current flows from $\phi 1$ cm electrode
Current flows from $\phi 1$ cm electrode

研究課題名:「高周波パルスによる聴覚効果の検討」

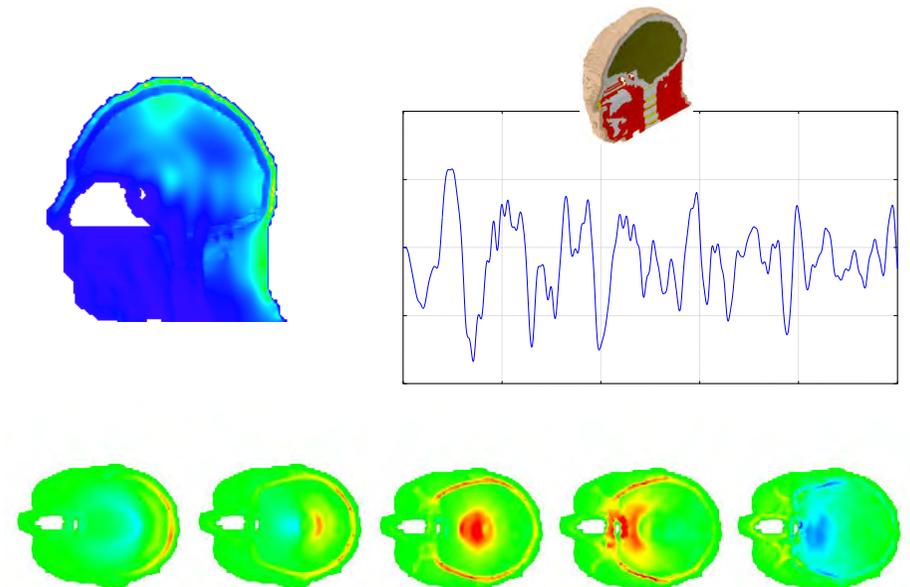
【対象周波数】 300 MHz ~ 6GHz

【現状・課題】

- マイクロ波聴覚効果は、マイクロ波パルスが頭部で吸収される際に生じる熱弾性波が聴覚器官によって感知される現象とされる。
- 1970年代に確立された現象とされる一方、現在でもこの現象に不安を抱く事例が多い。特に 日常環境の電波ばく露でも生じる現象であるという懸念がたびたび表明されている。
- 実験的に再検証し、シミュレーションとの比較によりメカニズムを定量的に明らかにする必要がある。さらに、知覚のためのばく露条件の詳細を明らかにし、具体的、定量的にこの現象の全体像を示す必要がある。

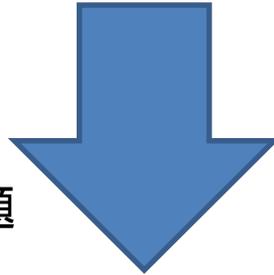
【想定される研究成果】

- マイクロ波聴覚効果のメカニズムについて、実験によって裏付けられた最新の数値解析技術によるシミュレーションを用いて定量的に理解、予測することが可能。
- マイクロ波聴覚効果についての実験的裏付けのある理解を深めることで、定量的かつ実証的にこの現象についての説明を可能とすることで、不安を和らげる効果が期待できる。



5年程度以内に取り組むべき課題

- 周辺の環境影響を考慮した研究 (WHO Standardに関連)
(電波に対する温熱調整作用)
- 6/10 GHz超のばく露 (SARと電力密度との整合性)
- 間接作用のばく露評価 (国際ガイドライン)
- 広帯域パルス電磁界の研究



10年程度を目安に取り組むべき課題

- 個々人の相違、周辺の環境影響を考慮した研究
- 間接作用のばく露評価 (多周波接触電流) に関する研究
- 広帯域パルス電磁界の研究

今後の研究課題について ～二部：超高周波 ヒト研究～

平田 晃正

* 総務省・先進WGにおける研究課題より抜粋、改変のものあり

「テラヘルツ波帯ばく露による生体への**非熱作用**に関する調査」

【対象周波数】 0.6 ~ 1 THz （**細胞研究との連携**）

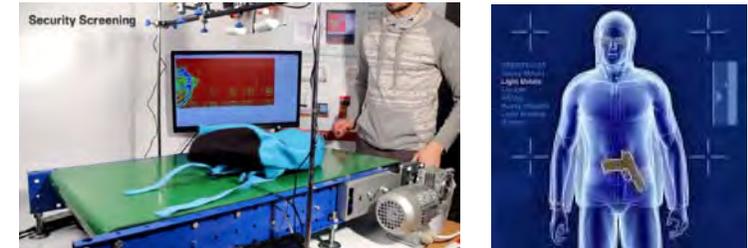
【現状・課題】

- 0.1 - 0.7 THz帯の**テラヘルツ波を用いた非破壊検査装置が欧米から発売され、「人体に無害」とされているが科学的根拠が希薄**である。
- 数百GHz～数THz帯での、郵便物検査装置、ウェアラブルなテラヘルツ端末、所持品検査装置などの実用化研究が急速に進んでいる。
- 機器から人体が浴びる様々なテラヘルツ波における生物学的ばく露評価に関する研究は、**限られた周波数**でしか実施されていない。
- **生体への安全評価法ならびにばく露量に関するガイドラインが確立されないまま**、テラヘルツ波を利用した機器の開発が先行している。

【想定される研究成果, 期待される効果】

- 1THzまでのテラヘルツ波帯における実際の電波利用環境(連続波・パルス波)で想定されるレベルでのばく露実験と非熱作用の可能性を明らかにする必要性。
- 非熱作用測定に適したばく露装置と測定手法の開発により、非熱作用の有無を判定できれば、非破壊検査装置やテラヘルツ端末機器など、テラヘルツ波を利用した実用装置の生体安全性に対する懸念を減らすことができる。
- **WHOやSCENIHRでは、テラヘルツ波帯の生体へのばく露データの不足を指摘**しており、特にもヒトの**皮膚や眼部**への影響調査を推奨している。

郵便物検査装置, 非破壊検査装置, セキュリティ検査



人体に装着可能なウェアラブルテラヘルツ端末の開発



「高周波・超高周波複合全身ばく露に関する年齢および環境に対する閾値変動の調査」

【対象周波数】6 GHz～300 GHz

【現状・課題】

- 人体モデルシミュレーションを用いた最新の温熱生理研究において、体温に代表される一部生理反応は年齢や環境温湿度条件(例:熱中症環境)に大きく左右されることが示されている。
- 5Gでは高周波、超高周波が併用されるが、電波の浸透深さが異なり、温熱生理反応も異なることが予想されている。
- ICNIRP, IEEEでは全身ばく露の対象周波数を、我が国の電波防護指針同様、300GHzまで拡張することを検討しており、新たな検討が必要となる。

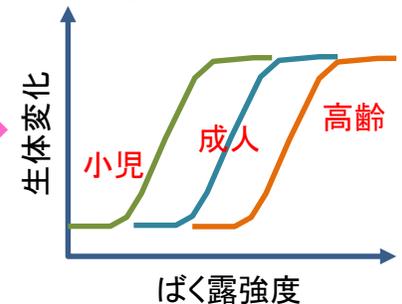
【想定される研究成果、効果】

- 先行研究で取得されている環境温度に対する反応より、生体反応閾値は年齢層による差異を定量化。
- 国内外を通して未だ明確になっていない5G電波の安全性評価の基礎知見が蓄積される。特に閾値に対する各種条件による差異は、ガイドラインの安全係数を考慮する上で重要なデータになることが期待される。
- WHO基準策定にあたり、有用な知見の提供が可能。

電波全身ばく露



①閾値評価



②モデル解析

$$T_B(t) = T_{B0} + \int_t \frac{Q_{BT}(t) - Q_{BT}(0)}{C_B \rho_B V_B} dt$$

「5G電波人体局所ばく露に関する年齢および環境温湿度に対する閾値変動の調査」

【対象周波数】28GHz – 60 GHz（更に高い周波数での可能性有）

【現状・課題】

- 現在、総務省委託研究事業において5G電波の人体皮膚局所ばく露影響に関する研究が実施されており、当該研究において、5G局所電波ばく露時の人体皮膚影響およびその影響閾値の解明が期待されている。
- 一方、人体モデルシミュレーションを用いた最新の温熱生理研究において、体温に代表される一部生理反応は年齢や環境温湿度条件（例：熱中症環境）に大きく左右されることが示されている。
- **動物実験**などとの比較、検討が必要。

【想定される研究成果】

- **生体反応閾値は年齢層による差異が認められることが予想され、その差異の幅を示すことができる。**
- 生体反応閾値は環境温湿度に大きく左右されることが予想され、その差異の変動幅を示すことができる。
- 国内外を通して未だ明確になっていない5G電波の安全性評価の基礎知見が蓄積される。特に閾値に対する各種条件による差異は、ガイドラインの低減係数を考慮する上で重要なデータになることが期待される。
- WHOが今後基準を策定するにあたり、そのような知見が不足している。



「眼球への局所ばく露に対する障害閾値検索」

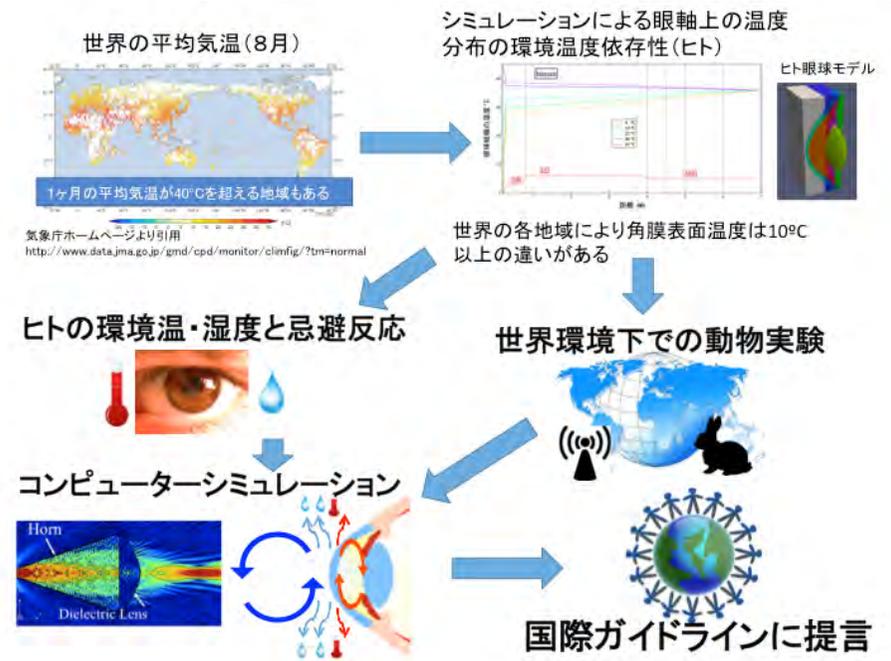
【対象周波数】18 GHz～95 GHz

【現状・課題】

- 国際的な電波防護に関するガイドラインは改訂の時期を迎えている。
- 現在のガイドラインは、一般的実験室でのデータから策定されている。
- 現行の国際ガイドラインにおいて、**高温・多湿環境の影響は十分考慮されていない。**

【想定される研究成果】

- 5G、WiGigで使用されるミリ波の高温・高湿度での眼障害閾値策定
- 環境条件によるヒトの忌避反応相違の有無の明確化
- シミュレーションによる現行国際ガイドラインの再検討
- 世界的環境条件に合致する実験条件で電波による眼障害実験をおこなうことにより、**国際的なガイドラインの改定時に根拠となる実験データを提供**することが可能となる。
- 今後策定が期待されるWHO基準などにおいて、低減係数の設定に関する有用なデータとなり得る。



「超高周波パルス電磁界ばく露に対する生体影響調査研究」

【対象周波数】6 GHz～300 GHz

【現状・課題】

- 現在のパルス波の指針値はほとんどが1970年代の研究成果に基づいており、最新の評価技術に基づく調査を実施し、根拠を検証する必要がある。
- 正確なばく露評価に基づく、人体や実験動物へのパルス波ばく露装置の開発と、同装置を用いた信頼性の高い医学・生物学的観点からの調査研究が必要である。

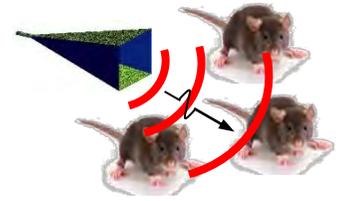
【想定される研究成果】

- 驚愕反射等を調査するためのパルス電磁界を用いたばく露装置を開発する。
- パルス波の生体影響を評価するための高精度ばく露装置。
- パルス波の生体影響の閾値特性。
- 国民に対してパルス電磁界ばく露に対する科学的に正しい知識を提供すると共に、正確なドシメトリによって国内の電波防護指針、国際ガイドラインの策定に貢献する。
- 電磁パルスを用いた新たな電波の有効利用技術を開発するための基礎データを提供することが期待される。

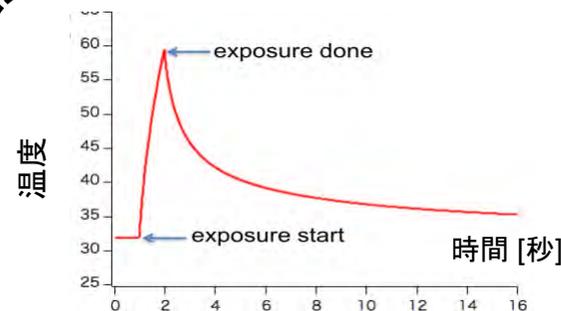
様々なパルス電磁界



ミリ波レーダー



動物を用いた生体影響調査



瞬時過熱の例

「いわゆる電磁過敏症の本態とそのメカニズムに関する人を対象とした研究」

【対象周波数】6 GHz～300 GHz

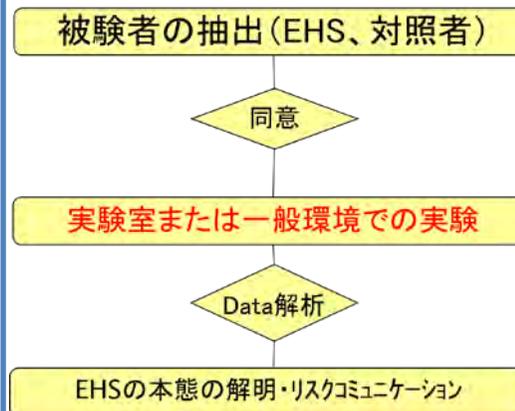
【現状・課題】

- これまでの国内外の人を対象とした研究において、現行の携帯電話利用周波数帯では電磁過敏症と電波ばく露の関連性を認めないとする報告が多く、WHOにおいても「**電磁過敏症には明確な診断基準がなく、電磁過敏症の症状を電磁界ばく露と結び付ける科学的根拠はない**」としている。(Fact Sheet 296(2007))
- 欧州委員会SCENIHR報告書(2015)では、過敏症症状が当事者のQOL(生活の質)に大きな有害影響を及ぼすことから、このメカニズムについて引き続き研究が必要であるとしている。
- 今後、次世代システム(5G, YGIG等)で利用される超高周波数帯については、既存研究がなく、将来的には公衆衛生学的な研究ニーズが発生すると考えられる。

【想定される研究成果、効果】

- **超高周波数帯の電波と電磁過敏症の症状との関連性について、初めての成果として世界に発信。**
- 関連性が認められないという結果は、リスクコミュニケーションの場で市民の電波への理解を促進。
- 関連性が認められる場合は、メカニズムを追求するとともに、科学的妥当性のあるメカニズムが解明されれば、過敏症当事者のQOLを改善できる可能性がある。
- 超高周波数帯電波の安全性評価の基礎知見が蓄積され、安全安心の情報提供および、国際ガイドライン、電波防護指針に反映できる。

研究の流れ図



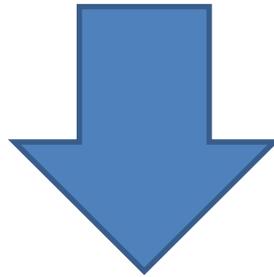
考えられる測定項目

- 電波と症状の関連性
- 生理指標(脳血流等)
- 心理的ストレス指標 等

「10年後、20年後の展望」

5年程度以内に取り組むべき課題(基礎研究)

- 周辺の環境影響を考慮した研究 (WHO Standardに関連)
(電波に対する温熱調整作用)
- 大強度短パルス電磁界の研究
- 300GHz超 (THz) の安全性に関する研究
- 電波過敏症など



10年程度を目安取り組むべき課題

- 電波 (超高周波) と光ガイドラインとの整合を指向
温熱調整、ドシメトリ技術などの融合