

# **「生体電磁環境に関する研究戦略検討会」 第一次報告書 概要(案)**

---

# 1 無線システムの発展動向

## 生活環境における無線システムの普及

- ◆ これまでの経緯は、電子レンジのほぼ全世帯への普及が1995年、携帯電話の契約数が1億を超えたのが2007年。IH調理器やRFID等も普及が進んでいるところ。
- ◆ 現状は、4GやWi-Fi、Bluetooth等の無線システムが家庭内でも広く普及。電波環境として高密度化している状況。
- ◆ 今後は、IoTや5G、WPTなどのような先進的な無線システムなどの普及が始まり、利用形態の多様化が一層進展。人体の周辺において、複雑高度な電波環境が形成。

## 新たな無線システムの概要と普及予測

- ◆ 超高周波を利用した5Gシステムが2020年に開始。あらゆる場所で5Gやセンサーネットワーク、車載レーダー等が普及。
- ◆ 居住空間では、EVと充電用のWPTが普及。急速充電へのニーズが大きく高出力型システムの登場も予想。室内では、7Gbpsの高速通信による超高精細映像の大画面への伝送でWiGigが利用されることが想定。
- ◆ 身体周辺では既にBluetoothを使ったウェアブルデバイスが普及し始めているが、各種バイタルセンサはさらに利用が拡大。感覚補助機器やアクセサリ等の直接身に付けて、クラウドと通信するものや、通信／非接触給電機能を持った埋め込み型体内デバイスの出現も想定。

## 利用周波数と技術概要

- ◆ IoTは農場から商業エリアまで幅広く普及し、サブGHz帯や6GHz帯で増大。特に市街地での高密度化が進展。
- ◆ 将来的に、5GはIoTでも一部利用され、国内では3.7GHz帯、4.5GHz帯の他、28GHz帯など6GHz以上の周波数が利用される予定。5G導入当初は、既存のLTEと組み合わせてのネットワーク構築が進められ、人が持ち歩く端末だけではなく5Gモジュール搭載のセンサー等のデバイス間での通信も増大。
- ◆ 車載レーダーでは、現在、ミリ波レーダーとして76~79GHzの利用が進展。一方、室内での高速伝送ではWiGigの60GHz帯が利用されるようになり、超高周波の利用が急速に拡大。
- ◆ EV用WPTについては85KHz帯、スマートフォン等のWPTには6.7MHz帯や100-200kHzが、既に利用開始されており、中間周波での普及が拡大。

## 2 重点研究課題の変遷

### 国際機関

- ◆ WHOでは、1990年代以降の携帯電話の急速な普及に伴い、電波ばく露による健康影響の可能性についての関心が高まり、電磁界ばく露についての健康リスク評価書である「環境保健クライテリア」(Environmental Health Criteria: EHC) の発刊を目的として、1996年に国際電磁界プロジェクトを発足。
- ◆ WHOでは、電波のリスク評価のために必要な研究課題のとりまとめも行っており、1998年、2003年、2005年、2006年、2010年に策定し、これに沿った研究の実施を各国に推奨。
- ◆ 研究課題については、携帯電話使用に関連した脳腫瘍のリスクから、中枢神経系機能などへの影響に重点が移行。評価対象は成人から子どもや若年層へ、対象周波数帯は高周波から中間周波や超高周波に拡大。

### 国内

- ◆ 医学・生物分野の研究者と工学分野の研究者が密接に連携し、高品質な研究によりリスク評価に貢献。
- ◆ 特に工学分野の研究では、国際的な安全基準の妥当性確認・適合性評価方法の確立に大いに貢献。
- ◆ 近年では、世界に先駆けてEV用WPT（中間周波）や5G（超高周波）の導入が進められており、これらのシステムの周波数帯を対象とした研究において、我が国が研究を主導。

# 3 基本的な考え方

## 研究重点化の切り口

- ◆ 全ての周波数帯において共通する方向性として、最優先すべきは電波防護指針の科学的根拠の妥当性（陽性研究の再現・検証実験を含む）と適合性の確保、それらの信頼性の向上。
- ◆ 確立されている作用（刺激／熱作用）の量－反応特性等に基づく電波防護指針の妥当性確保および適合性の評価と確立されていない作用（刺激／熱作用以外）の健康リスク評価に分類される。
- ◆ 電波防護指針の妥当性の確保と適合性の評価を行っていくなかで、日本の強みを活かせる研究分野や国際的に貢献できる研究を行うという国際協力の観点といった切り口で、重点的に研究を実施すべき。

## 電波のリスク分析

- ◆ リスク評価、リスク管理、リスクコミュニケーションの3つを適切に組み合わせ対応し、国民が電波を安全に安心して利用できる環境を構築することが必要。
- ◆ リスク評価は、ばく露装置開発等の工学研究と連携した医学・生物研究や工学研究でのばく露評価等を通じて、健康影響の有無、量反応関係、ばく露実態等を明らかにすること。
- ◆ リスク管理は電波ばく露による健康影響を防護するために、健康影響の閾値に適切な低減係数を考慮した電波ばく露限度値を策定し、その値への適合性確認をすること。
- ◆ リスクコミュニケーションはリスク分析の全過程において、リスク評価者、リスク管理者、消費者、事業者、研究者等、関係する人々の間での情報共有やコミュニケーションを通じて、国民の電波の安全性に関する理解の深化に寄与すること。
- ◆ これらの作業はPDCAサイクルに基づき継続的に改善することが重要。

(※) 本報告書における研究の方向性やロードマップについては、無線システムの発展動向や国際機関の動向等に応じて、一定期間後に見直しを行うことが望ましい。

## 4 周波数帯ごとの傾向

### 中間周波（10kHz-10MHz）

- ◆ 中間周波における研究は国際的に研究が進んでいない一方、我が国では、EV用WPT等世界に先駆けて中間周波の新たなシステムの導入が想定されているため、健康リスク評価やリスク管理に資する研究についても先行して取り組んでいる。引き続き、国際的な連携も図りつつこの分野において研究を進展させていくことが重要と考えられる。

### 高周波（10MHz-6GHz）

- ◆ 携帯電話を対象としたリスク評価のための研究は十分蓄積されてきている。一方で、今後、電波の利用形態の多様化に伴い、新たな技術に対応した電波防護指針への適合性確認のための研究を進めていくことは重要であると考えられる。なお、重要と思われる問題提起のなされた分野に対しては引き続き留意し対応していく必要があると考えられる。

### 超高周波（6GHz-3THz）

- ◆ 超高周波における研究は他周波数帯と比べて最も研究が進んでいない状況だが、我が国では2020年に超高周波を用いた5Gサービスが開始予定であり、世界に先駆けての普及が想定される状況を踏まえ、ばく露量計測等の研究にまずは注力しつつ、健康リスク評価についても将来に向けて長期的に取り組んでいくことが重要と考えられる。

# 5 今後の研究の方向性 5.1 リスク評価に関する研究 (1)疫学研究

## 研究の特徴

- ◆ ヒトを対象に生態学的（断面）研究、症例対照研究、コホート研究といった手法により、ヒトの疾病と電磁環境との関連性を明らかにすることが可能。
- ◆ 精度の高い研究を実施するためには、様々なバイアスや交絡因子の影響への配慮が必要であり、ばく露量や実態を如何に把握して研究を進めていくかが非常に重要。

## 今後の研究の方向性

- ◆ 電波ばく露において確立された刺激作用や熱作用に十分な安全係数を設けて作成された電波防護指針が遵守されている環境が研究対象であるため、確立されていない非刺激、非熱作用について電波ばく露の長期的影響を明らかにすることが主たる目的。
- ◆ 高周波については、携帯電話の電波の影響について多くの症例対照研究に係る成果が既に揃っていることから、今後は、長期的な疾病の傾向を調べる生態学的研究や、より強い電波のばく露を受けていた第一世代・第二世代携帯電話の利用者の発がんのような晩発性のリスクに係るコホート研究の実施が重要。
- ◆ 中間周波については、IH調理器やEV用WPTの普及状況に鑑み、低レベル・長期間のばく露量のモニタリングや、がん、神経変性疾患等との関連性に関する症例対照研究が優先的研究課題。
- ◆ 2020年に導入予定の5Gで使用が想定されている超高周波については、これまで疫学的知見がほとんどないことから、5Gの利用周波数を中心に皮膚や眼部に関する症例対照研究、ビッグデータ等を活用したがんに関する症例対照研究、企業等の協力を得た、5G利用者を含む集団の前向きコホート研究を推進すべき。
- ◆ 疫学研究では、国際共同研究として、一定の枠組みに則った研究手法により症例対照研究、コホート研究が実施されることも多く、こうした国際共同研究への参加は、国内の疫学研究の質を上げることに貢献しており、今後も機会があれば積極的に参画すべき。

	中間周波	高周波	超高周波
生態学的研究	◎	○	◎
症例対照研究	◎	×	◎
コホート研究	○	△※1	○

- ◎：日本として優先的に実施すべき課題
- ：日本で実施すべき課題
- △：日本で実施すべき課題だが優先度は低い
- ×：十分に実施済みであり、研究は不要
- ：日本での研究は不可

※1 現在、欧州諸国でのCOSMOS研究（国際コホート研究）が進行中である。



## 5 今後の研究の方向性 5.1 リスク評価に関する研究 (2) ヒト研究

### 研究の特徴

- ◆ 実験室等において、ヒトを対象に、様々な電波を局所あるいは全身にばく露しその生体応答の有無を客観的・主観的指標に基づいてデータ収集することが一般的。
- ◆ 疫学研究と異なり、ばく露の強さや実験室の環境設定を一定にするなどの整った条件での実験や、人体数値モデルを用いたシミュレーションにより少ない被験者数からの有益なデータ取得が可能であり、刺激作用や熱作用に関して防護指針の妥当性検証等に適している。
- ◆ 電波防護指針を超える強さの電波のばく露には、研究倫理審査委員会の承認等が必須。

### 今後の研究の方向性

- ◆ 中間周波については、今後のWPTの普及等に鑑み、刺激作用の閾値や接触電流に関し、実測とシミュレーション技術を用いた研究や、熱作用・刺激作用の両作用を考慮した閾値に関する研究に早い段階で取り組むべき。
- ◆ 高周波については、マイクロ波聴覚効果の知覚特性の知見がなく、被験者による聴覚効果の定量化分析に取り組むべき。
- ◆ 超高周波については、ミリ波帯の熱感・温感・痛みに関する知見が不十分であり、電波ばく露における神経・知覚作用に関する研究を進めることが必要。また、5G開始後、当面は1台の端末で4Gの併用が想定されることから、高周波と超高周波の複合ばく露の生理応答に関する研究の推進が重要。このほか、将来的にはテラヘルツ領域の温熱生理応答についても研究を進めるべき。

	中間周波	高周波	超高周波
確立した作用に関する研究 ※1	◎ (-) ※3	△ (-) ※3	◎ (-) ※3
確立されていない作用に関する研究 ※2	△	△	△

- ◎ : 日本として優先的に実施すべき課題
- : 日本で実施すべき課題
- △ : 日本で実施すべき課題だが優先度は低い
- × : 研究は不要
- : 日本での研究は不可

※1 中間周波では刺激作用に基づく痛覚等、高周波・超高周波では熱作用に基づく温感、熱感等の研究

※2 刺激作用・熱作用でない、認知機能、行動、脳波、知覚、自己申告の症状等に関する研究

※3 子供を対象にする研究は研究倫理的な課題が多く、我が国では困難と考えられる。

## 5 今後の研究の方向性 5.1 リスク評価に関する研究 (3)動物研究

### 研究の特徴

- ◆ 実験動物を用いることで、ばく露条件、飼育環境等を揃えた実験が可能。
- ◆ ヒトを対象とした実験では倫理的に困難な、強いばく露下での生体反応閾値を求める実験も条件により可能。

### 今後の研究の方向性

- ◆ 中間周波については、今後のEV用WPTの普及に鑑み、強い磁界での痛覚に関する閾値の研究が必要。また、短時間パルス波のばく露では、指標を明らかにし、生体影響の閾値に関する研究を進めることが求められる。
- ◆ 高周波については、国内外で多くの研究が既に実施されており、非熱作用で確定された影響はないと認識されている。一方、NTPによる長期発がん性試験の結果等の陽性研究に対しては、結果を確認する研究を実施することが必要。
- ◆ 超高周波については、特に5Gで使用が予定される周波数帯を中心に、熱作用及び非熱作用の双方から科学的根拠を明らかにする研究を高い優先度で実施すべき。
- ◆ 確立されていない影響については、化学物質の標準毒性試験法のような、国際的に合意が取れた実験手法の確立が重要。

	中間周波	高周波	超高周波
確立した作用に関する研究 ※1	◎	×	◎
確立されていない作用に関する研究 ※2	◎	◎	◎

- ◎ : 日本として優先的に実施すべき課題
- : 日本で実施すべき課題
- △ : 日本で実施すべき課題だが優先度は低い
- × : 研究は不要
- : 日本での研究は不可

※1 中間周波では刺激作用に基づく痛覚等、高周波・超高周波では熱作用に基づく組織障害等の閾値に関する研究

※2 上記の刺激作用・熱作用に基づかない、発がんに関する研究、生理指標に関する研究、遺伝子発現等に関する研究



## 5 今後の研究の方向性 5.1 リスク評価に関する研究 (4)細胞研究

### 研究の特徴

- ◆ ばく露環境の制御が比較的容易であり、ヒト由来の細胞も用いた検討も可能。細胞や分子レベルで起きる事象を定量的に示すことが可能なため、疫学・動物研究を相補できる実験
- ◆ iPS由来のヒト機能性細胞の研究や、遺伝子、omicsレベルの解析が可能。
- ◆ 単一の培養細胞を使うことが多く、人の健康影響への外挿に関しては限界有。

### 今後の研究の方向性

- ◆ 中間周波については、確立されている作用に関する研究では、神経系細胞に対する刺激作用の応答閾値を評価することによるリスク評価を補う研究や、短時間の強いパルス磁界ばく露の細胞への影響についての研究を実施することによる科学的根拠の蓄積が重要。非刺激・非熱作用については、末梢神経系及び中枢神経系の細胞レベルでの影響に関する研究の実施や、毒性影響研究について国際的な合意を得た評価手法による安全性評価の研究が必要。
- ◆ 高周波については、国内外で既に多くの実験研究が実施され、リスク評価のための十分なデータが得られている。
- ◆ 超高周波については、国際的にも実施が推奨されている高強度・短時間ばく露に関する熱作用の研究や、皮膚の3Dインビトロモデルを用いた低強度・長期ばく露に関する非熱作用の研究が必要。また、高周波で実施されてきた染色体、DNA、遺伝子発現、細胞膜等への影響について、実験手法の国際的合意形成とその手法に基づく安全性評価を実施すべき。

	中間周波	高周波	超高周波
確立した作用に関する研究 ※1	◎	×	◎
確立されていない作用に関する研究 ※2	◎	△	◎

- ◎ : 日本として優先的に実施すべき課題
- : 日本で実施すべき課題
- △ : 日本で実施すべき課題だが優先度は低い
- × : 研究は不要
- : 日本での研究は不可

\* 1 中間周波では刺激作用に基づく痛覚等、高周波・超高周波では熱作用が起こる以上のばく露レベルによる研究

\* 2 上記の刺激作用・熱作用の起こるばく露レベル以下で、遺伝毒性、非遺伝毒性、遺伝子発現等に関する研究

## 5 今後の研究の方向性 5.1 リスク評価に関する研究 (5) 工学研究

### 研究の特徴

- ◆ 高品質なリスク評価のために不可欠な、人体ばく露量の正確な評価技術を開発。
- ◆ ヒト・動物・細胞研究で用いる高品質なばく露装置の開発・改良・保守による、高精度なばく露量の評価・制御。
- ◆ 疫学研究のための、過去のばく露履歴の高精度評価手法の開発と取得データの検証。
- ◆ 我が国では、工学研究者が医学・生物研究に積極的に参画し、リスク評価に関する工学研究を国際的にも主導。

### 今後の研究の方向性

- ◆ 中間周波については、確立されている作用である刺激作用のデータが十分でなく、閾値評価のためのばく露装置の開発や数値人体モデルの改良が必要。確立されていない作用については、標準毒性試験のためのばく露条件・ばく露装置の確立や複合ばく露評価試験のためのばく露装置の開発が重要。
- ◆ 高周波については、これまでに十分なデータが蓄積されており、他の周波数に比べて優先度は高くない。ただし、熱作用に関しては、マイクロ波WPTによるばく露を想定した研究や定量的データが不足しているマイクロ波聴覚効果についての研究が重要。非熱作用に関しては、インターフォン疫学調査のフォローアップ研究や米国NTP研究に係るばく露装置の不確かさ評価が重要。
- ◆ 超高周波については、熱作用のデータが十分でなく、閾値評価実験のためのばく露装置の開発や、将来的にはテラヘルツ波評価用人体モデルやばく露装置の開発が重要。非熱作用に関しては、特に5Gシステムによるばく露装置の開発や、IoT環境を想定した複数波源・複数周波数等を想定したばく露装置の開発が重要。

	中間周波	高周波	超高周波
人体の電波ばく露量評価技術	◎	△	◎
医学・生物研究のためのばく露装置開発及びばく露評価	◎	△※1	◎

- ◎ : 日本として優先的に実施すべき課題
- : 日本で実施すべき課題
- △ : 日本で実施すべき課題だが優先度は低い
- × : 十分に実施済みであり、研究は不要
- : 日本での研究は不可

※1 NTP研究で用いられた反射箱型ばく露装置のばく露評価・改良については更なる検討が必要。

## 5 今後の研究の方向性 5.2 リスク管理に関する研究

### 研究の特徴

- ◆ 電波ばく露による健康影響から国民を防護するために、健康影響の閾値に適切な低減係数を考慮した安全指針値（電波防護指針や国際ガイドライン等）を策定し、その値への適合性確認（適合性評価）をすることを目的としたもの。
- ◆ 安全指針値に関する課題としては、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、体内電波吸収量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）の導出が挙げられる。
- ◆ 適合性評価は、実際の電波利用システムが電波防護指針を満足していることの確認であり、高い信頼性と再現性の確保が必須。

### 安全指針値に関する今後の研究の方向性

- ◆ 中間周波については、刺激作用閾値のデータ蓄積が十分でなく、人体ばく露量の不確かさ評価を進めることが重要。また、国際ガイドライン間の不整合を解消すべく、安全指針値の定義の高精度化が必要。
- ◆ 高周波については、携帯電話等を中心に既に多くの研究が蓄積。一方、IoTの普及等、今後の電波利用シーンの多様化を踏まえた、安全指針値の定義の高精度化に取り組むことが重要。
- ◆ 超高周波については、電波ばく露が体表に集中しており、これまでの検討は、人体を単純な平面モデルと想定した基礎的なものがほとんどであるため、今後は人体ばく露量の高精度化や不確かさ評価に関する研究を推進すべく、安全指針値の定義の高精度化が必要。

### 適合性評価に関する今後の研究の方向性

- ◆ 中間周波については、国際標準化の動きや今後のEV用WPTの普及動向に鑑み、我が国が主導してきた適合性評価方法をベースとした、より適切な評価方法についての検討を進めるべき。また、将来的には、刺激作用の基本制限値（体内誘導電解強度）の直接測定に基づく適合性評価方法の開発に取り組むことが重要。
- ◆ 高周波については、マイクロ波WPTやIoTデバイス、ウェアラブルヘルスケアデバイスの開発・普及が今後見込まれるため、これらの新たなシステムに対する適合性評価方法の開発・国際標準化が必要。
- ◆ 超高周波については、比吸収率ではなく電力密度が安全指針値の指標として用いられており、5Gの導入に向け、携帯電話端末近傍の電力密度を評価するための新たな手法を早急に確立することが必要。将来的には、テラヘルツ波帯利用システムの評価方法についても開発に取り組むことが必要。

	中間周波	高周波	超高周波
人体の電波ばく露量評価技術 (安全指針値に関する研究)	◎	△	◎
電波防護指針適合性評価技術	◎	○※1	◎

- ◎：日本として優先的に実施すべき課題
- ：日本で実施すべき課題
- △：日本で実施すべき課題だが優先度は低い
- ×：十分に実施済みであり、研究は不要
- ：日本での研究は不可

※1 基礎技術は確立しており、主に評価技術の改良・拡張に関する国際標準化活動への対応。

## 5 今後の研究の方向性 5.1 リスクコミュニケーションに関する研究

### 研究の特徴

- ◆ リスク分析の全過程において、リスク評価者、リスク管理者、消費者、事業者、研究者等、関係する人々の間での情報共有やコミュニケーションを通じて、国民の電波の安全性に関する理解の深化に寄与。
- ◆ 関連研究としては、リスク認知に関する研究やリスクコミュニケーションに必要なデータベースの構築等。

### 今後の研究の方向性

- ◆ EV用WPTやIoTデバイス、5Gシステム等の今後の普及に鑑み、中間周波、高周波、超高周波の各周波数帯において、リスク認知の増大が予想される。このため、新たな電波利用システムの導入による人体ばく露量の増加に係るモニタリングデータを蓄積するためのシステムの開発・運用の推進が望ましい。

# 6 統括ロードマップ

2019年

2025年

EHC・ICNIRP(中間周波)  
への成果入力※

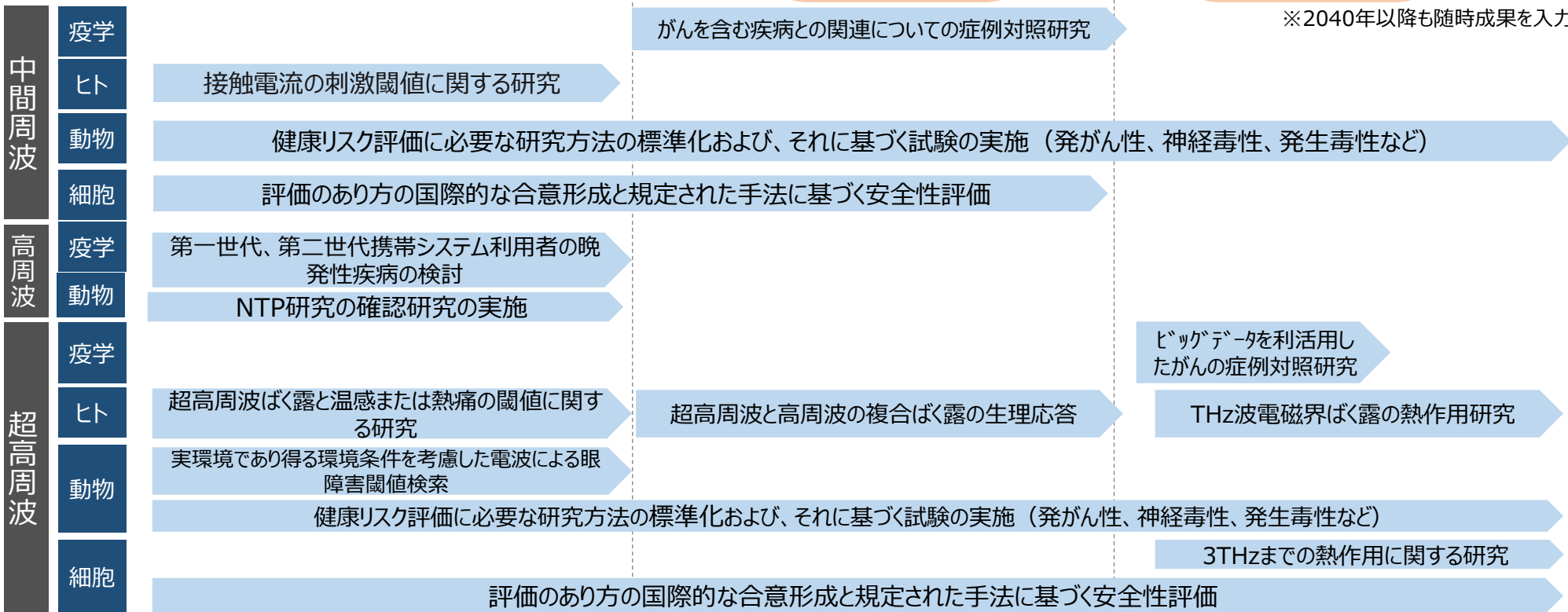
2030年

EHC・ICNIRP(高周波・  
超高周波)への成果入力※

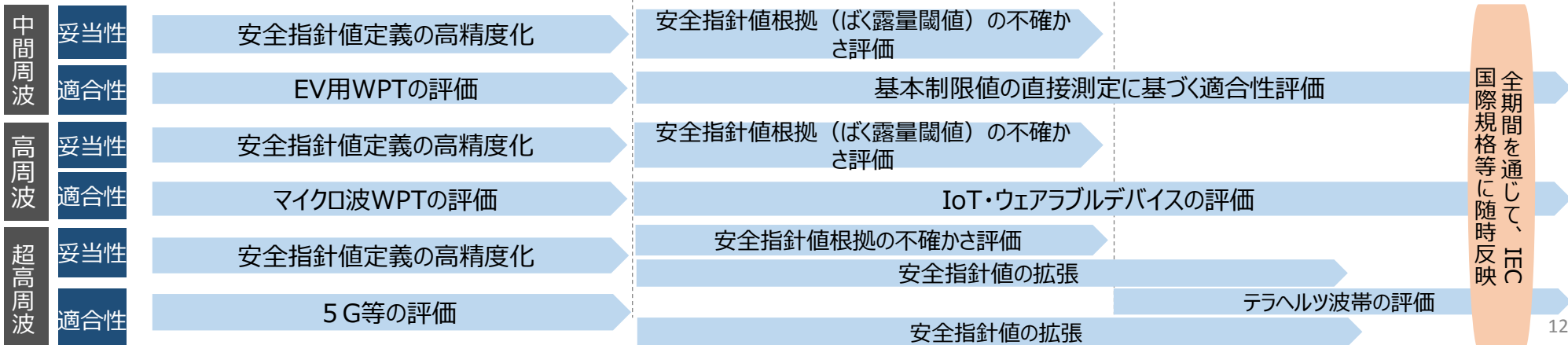
2040年

※2040年以降も随時成果を入力

リスク評価



リスク管理



全期間を通じて、EHCの国際規格等に随時反映

# 7 その他

## 研究の品質・手法等

- ◆ 質の高い研究を行うために、研究担当者は、WHO研究アジェンダ1998に示された「高品質の電磁界研究に関するガイドライン」等の研究の品質確保に関するガイドラインに沿って研究を進めるべき。
- ◆ 指標やばく露条件の整合を図るなど、研究の系統化が非常に重要であり、国際的に合意形成された標準的な実験体系の構築が必要。
- ◆ 質の高い研究を行うために、医学と工学が連携して研究を進めるための方策を検討することが重要である一方、本分野は医学系の研究者による認知度が低い。医学系学会での周知などを通じて連携を図るなど、医学系研究者を呼び込むことが重要。

## 研究の国際連携等

- ◆ WHOに加えて、GLORE（電磁界の健康影響に関する国際コーディネイト会合）の機能を強化し研究調整機能を持たせること等を通じて、国際的枠組みによる連携強化を図っていくことが重要。

## 長期的な見地からの研究課題や周波数横断的な研究課題等

- ◆ 複数の周波数帯の電波による複合したばく露や、ほかの物理的・化学的な因子との複合ばく露についても長期的には検討が行われることが望ましい。
- ◆ 新しい無線システムの開発に合わせてリスク評価を行うとタイムラグが生じる可能性が高いため、長期的には、いくつかの標準的なばく露モデル（通信信号波形やばく露条件等）を構築し、前もってこれらの標準ばく露モデルに対する検討を実施することで、リスク評価の迅速化・効率化が期待できる。
- ◆ 長期的には、国際的なガイドラインの動向を踏まえつつ、電波防護指針の適用範囲の拡充に資する研究についても今後取り組んでいくことが期待される。