

生体電磁環境に関する
研究戦略検討会

第一次報告書

平成30年6月

目次

はじめに	1
1 これまでの取組と昨今の環境の変化	2
1-1 これまでの取組	2
1-2 環境の変化	3
1-2-1 多様な無線システムの普及	3
1-2-2 様々な環境における無線システムの発展	4
1-2-3 無線システムごとの特色	5
2 リスク分析の研究の枠組みと研究動向	7
2-1 リスク分析の上での研究の枠組み	7
2-1-1 リスク評価	7
2-1-2 リスク管理	10
2-1-3 リスクコミュニケーション	11
2-1-4 対象とする周波数帯の分類	11
2-2 国際機関における重点研究課題のこれまでの変遷	12
2-2-1 世界保健機関 (WHO)	12
2-2-2 新興及び新規に同定される健康リスクに関する科学委員会 (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks : SCENIHR)	18
2-2-3 重点研究課題のこれまでの変遷	21
2-3 国内における重点研究課題のこれまでの変遷	24
3 今後の研究の方向性	32
3-1 基本的な考え方	32
3-2 周波数帯ごとの方向性	33
3-2-1 中間周波	33
3-2-2 高周波	33
3-2-3 超高周波	33
3-3 リスク評価に関する研究	34
3-3-1 疫学研究	34
3-3-2 ヒト研究	40
3-3-3 動物研究	46
3-3-4 細胞研究	52
3-3-5 工学研究	58
3-4 リスク管理に関する研究	66

3-4-1	安全指針値の策定	66
3-4-2	安全指針値への適合性評価	69
3-5	リスクコミュニケーションに関する研究	73
4	研究推進のための中長期的なロードマップ	79
4-1	リスク評価に関する研究	79
4-1-1	疫学研究	79
4-1-2	ヒト研究	82
4-1-3	動物研究	84
4-1-4	細胞研究	86
4-1-5	工学研究	88
4-2	リスク管理に関する研究	95
4-2-1	安全指針値	95
4-2-2	適合性評価方法	100
4-3	リスクコミュニケーションに関する研究	105
4-4	総括ロードマップ	107
5	生体電磁環境に関する研究の更なる発展に向けて	109
5-1	研究の品質・手法、人材育成等	109
5-2	研究の国際連携	109
5-3	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	110
	おわりに	111
別紙	生体電磁環境に関する研究戦略検討会構成員名簿	112

はじめに

電波は、携帯電話やテレビ放送をはじめ、国民生活の身近にあり、国民にとって欠くことのできないものとなっており、国民が安全に安心して電波を利用することができる環境の整備が必要である。このため、総務省では、電波防護指針を定めるとともに、電波の人体に与える影響を生体電磁環境の課題として20年以上に渡り調査研究を行い、電波ばく露による健康影響の防止等の電波の人体に対する安全性の確保のために必要な施策を講じてきた。

近年、電波を利用した新たなサービスとして、Internet of Things (IoT)、ワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer : WPT) 等のサービスが登場しつつあり、また、2020年には第5世代移動通信システム (5G) のサービスの開始が予定されている。今後の技術開発の進展によって更に社会・経済活動を飛躍的に向上させるサービスが創出されることも期待されており、国民生活において電波の利用がより一層拡大するとともに、利用形態が多様化することが見込まれていることから、電波の人体に対する安全性の確保がますます重要となってきた。

このような中で、総務省では、過去およそ20年間に渡り携帯電話の導入・普及とともに実施されてきた国内外における生体電磁環境に関する研究動向等を分析した上で、電波を利用した新たなサービスの発展動向も踏まえつつ、2040年頃までを見据えた電波の人体に対する安全性に関する中長期的な研究のあり方について検討するため、「生体電磁環境に関する研究戦略検討会」(座長：上野照剛 東京大学名誉教授)を設置した。本検討会では、2018年1月以降、計5回の会合を開催し、無線システムの発展動向や国内外における研究動向を把握するとともに、今後の研究の方向性に関する基本的な考え方を整理し、研究手法ごとの具体的な研究の方向性や中長期的なロードマップ等について議論を行った。本報告書は、本検討会におけるそれらの議論の内容を取りまとめたものである。

1 これまでの取組と昨今の環境の変化

1-1 これまでの取組

電波については、非常に強い強度でばく露された場合、「刺激作用」と「熱作用」といった科学的に確立されている作用が起こり得ることが分かっている。「刺激作用」とは、電波によって誘導される体内の電界が、神経や筋に電位差を生じさせることにより、それらの活動に影響を与える作用のことである。また、「熱作用」とは、人体に電波のエネルギーが吸収されることにより、体温（深部体温及び局所の組織温度）が上昇する作用のことである。これらの作用については、これまでの研究で、周波数によって生じる作用が異なっていることが分かっている¹。また、人体への作用には閾値が存在し、閾値以下の電波ばく露ではこれらの作用は起こらないことが確認されている。

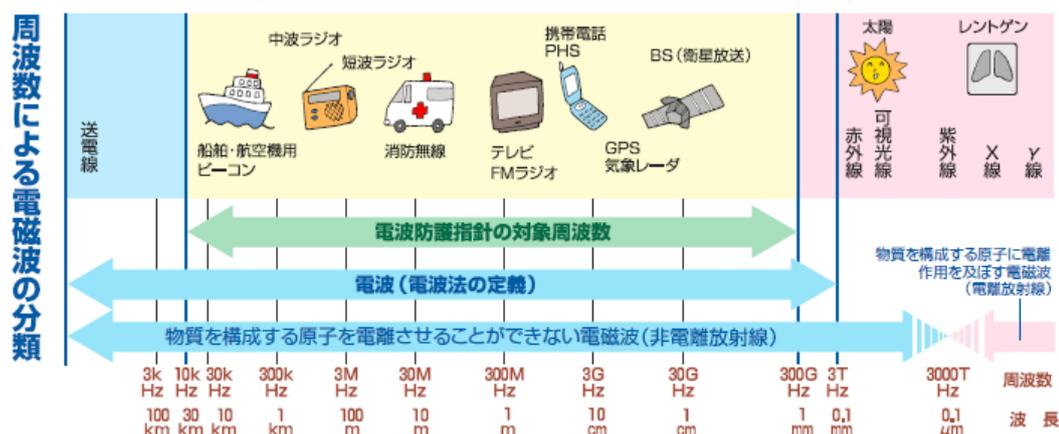


図 1-1：周波数による電磁波の分類

上記作用による健康への影響を防止するために、確認された閾値に安全率（又は低減係数）を考慮して算出した電波の安全指針に関するガイドラインが国際非電離放射線防護委員会（International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection：ICNIRP）等により策定されている。世界保健機関（World Health Organization：WHO）は、電波ばく露の人体への健康影響を防止するための措置として、ICNIRP 等による国際的なガイドラインの指針値の採用を推奨してきている。

我が国では、総務省において、電波ばく露による人体への健康影響を防止することを目的として、電波の強さの指針値等を定めた「電波防護指針」を策定

¹ 刺激作用は約 10MHz 以下の周波数において、熱作用は約 100kHz 以上の周波数において、それぞれ起こることが分かっている。

している²。この電波防護指針における指針値等は、これまでの研究により明らかにされた熱作用・刺激作用による人体への影響の閾値から、十分な安全率（最大 50 倍）を考慮し、人体への健康影響を確実に防止できるものとして設定しており、ICNIRP のガイドラインの指針値と同等の指針値等を採用してきている。電波防護指針の一部は電波法令による規制として導入されており、携帯電話基地局や携帯電話端末、放送局等の国民の身近に存在する電波利用設備からの電波は、電波防護指針の指針値を満たすことが担保されている。これらの措置により、通信や放送等に使用される電波の人体に対する安全性が確保されてきたところである。

また、電波ばく露による熱作用・刺激作用以外の未知の作用による人体への影響については、これまで 60 年以上に渡り国内外で研究されてきた。その結果、これまでのところ、国際的なガイドラインの根拠となっている熱作用・刺激作用の閾値よりも弱い電波ばく露条件においては、健康に好ましくない影響を示す科学的根拠は確立されていない。一方で、熱作用・刺激作用以外の作用による人体への影響を懸念する声は依然として存在しており、この未知の作用による影響が存在する可能性を指摘する研究結果も、限定的ながら報告されている³。そのため、熱作用・刺激作用以外の作用の有無について、現在でも世界中で科学的な検証が積み重ねられている。

総務省では、電波の健康影響に関する研究を平成 9 年度から実施している。研究の成果は、学術論文誌掲載等により国内外に発信されるとともに、WHO の国際電磁界プロジェクト（2.1 項参照）に報告されており、総務省の研究は、電波ばく露による健康影響に関する国際的なリスク評価に貢献してきている。

1-2 環境の変化

1-2-1 多様な無線システムの普及

電波は、携帯電話やテレビ・ラジオ放送をはじめ、電子レンジ、無線 LAN、気

² 平成 2 年 6 月に電気通信技術審議会答申諮問第 38 号「電波利用における人体の防護指針」で策定され、以降、電波利用の進展や国際ガイドラインの改定等に対応して、随時、追加・改定が行われてきている。現在、電波防護指針は、以下の 4 つの答申から構成されている。

- ・電気通信技術審議会答申 諮問第 38 号「電波利用における人体の防護指針」（平成 2 年 6 月）
- ・電気通信技術審議会答申 諮問第 89 号「電波利用における人体防護の在り方」（平成 9 年 4 月）
- ・情報通信審議会答申 諮問第 2030 号「局所吸収指針の在り方」（平成 23 年 5 月）
- ・情報通信審議会一部答申 諮問第 2035 号「電波防護指針の在り方」のうち、「低周波領域（10kHz 以上 10MHz 以下。）における電波防護指針の在り方」（平成 27 年 3 月）

³ 例えば、WHO の専門組織である国際がん研究機関（International Agency for Research on Cancer : IARC）は平成 23 年（2011 年）、携帯電話等の電波をグループ 2 B（possibly carcinogenic to humans : 発がん性があるかもしれない）に分類している。

象レーダー等、国民生活の身近で使われており、国民にとって欠くことのできないものとなっている。近年では、第4世代移動通信システム(4G)やWi-Fi、Bluetooth等の無線システムが家庭内でも広く使われるようになるとともに、電磁調理器(IH(Inductive Heating)調理器)や電子タグ(Radio Frequency Identification:RFID)の普及も進み、電波環境の高密度化が進んでいる。

今後は、IoTや5G、WPT等のような先進的な無線システムの普及が始まり、利用形態の多様化が一層進展することが見込まれており、人体の周辺において、更に複雑な電波環境が形成されていくことが予想される。

1-2-2 様々な環境における無線システムの発展

① 市街地等の外部環境におけるシステム

今後、路上や商業施設、生産現場等、様々な外部環境で、センサーネットワークや車載レーダー等が普及していくことが見込まれる。例えば、車載レーダーについては、先進運転支援システム(Advanced Driver Assistance Systems:ADAS)の2030年の普及率が40%程度と予想されており⁴、これに組み込まれて普及していくことが想定される。

電気自動車(Electric Vehicle:EV)については、2030年には販売シェアが7%に至るとの予測がある⁵。市街地では、パーキングエリアやコンビニエンスストア、ガソリンスタンドの一部が充電用設備を装備している状況であり、その一部でEV用WPTが活用される可能性がある。

2020年には5Gのサービスが我が国でも開始される予定であり、市街地においては、高速大容量と低遅延の性能を実現するために、現在の基地局の設置密度が高められることが想定されている。

② 住宅や居室におけるシステム

今後EVの普及が見込まれる中で、住宅の駐車場にEV用WPTが設置されることが想定される。これについては、充電用ケーブルの接続動作が不要になる利便性に加えて、急速充電のニーズ等により、家電用のバッテリーシステムと連動した大電力型システムの登場も予想される。

居室では、8K(現行ハイビジョンの16倍の画素数の映像)対応テレビが登場し、高速無線通信による超高精細映像の大画面への伝送でWiGig(IEEE802.11ad)が利用されることも想定される。5Gモジュール搭載センサー等の登場も予想される中で、無線システムを活用するロボット型家電やヘルスケアデバイスのほ

⁴ 富士カメラ総研による予測：http://www.group.fuji-keizai.co.jp/press/pdf/160610_16049.pdf

⁵ デロイトトーマツによる予測：<https://response.jp/article/2017/10/11/300895.html>

か、家電向けの小電力 WPT も連動して普及していく将来像も考えられる。

③ 身体周辺におけるシステム

身体周辺では、既に Bluetooth を使ったウェアラブルデバイスが普及し始めている。今後、身体周辺で活用される各種センサーは、介護用途等も含めて、さらに利用が拡大すると考えられており、また、感覚補助機器や運動支援機器のほか、アクセサリ等の直接身に付けて、家庭内無線 LAN などのアクセスポイントに常時アクセスしつつ適宜クラウドと通信するデバイスの利用が拡大することや、通信や WPT 機能を持った埋込み型体内デバイスの出現が想定されている。

1-2-3 無線システムごとの特色

① IoT

IoT は、農場から商業エリアまで幅広く普及し、既に利用されている 13.56MHz の RFID、300MHz 帯の車両へのキーレスエントリー、920MHz 帯のテレメータ等のほか、サブ GHz 帯や 6GHz 帯で増大していくことが予想される。この他に、今後とも 2.4GHz 帯の Wi-Fi や Bluetooth、5GHz 帯の Wi-Fi、700MHz～3.5GHz 帯の 3.9-4 世代携帯電話 (Long Term Evolution : LTE) の活用で提供される LPWA⁶等の利用拡大が想定される。なお、これらのシステムの多くは、間欠的な通信により、時間平均電力は非常に小さいレベルとなることが一般的である。

② 5G、WiGig

現在使われている第 3 世代移動通信システム (3G)、第 4 世代移動通信システム (4G) を発展させた次世代の移動通信システムである 5G は、国内では 3.7GHz 帯、4.5GHz 帯のほか、28GHz 帯以上のミリ波帯も含め、6GHz 以上の周波数が利用されることが想定されている。5G の導入当初は、既存の LTE と組み合わせたネットワーク構築が進められるとともに、人が持ち歩く端末だけではなく、IoT でも一部利用され、5G のモジュールを搭載したセンサー等のデバイス間での通信も増大することが想定される。また、低遅延・高速大容量通信を実現するため、より高密度な基地局の設置が予想される。

室内での高速伝送では、スマートフォンやワイヤレス仮想現実 (Virtual Reality : VR) ヘッドセット等において 60GHz 帯の WiGig が利用されるようになる等、今後、WiGig 技術の新たな利用形態が更に広がっていくことが考えられる。

⁶ Low Power Wide Area : 様々なセンサー情報の伝送等の通信速度は低速ながらも低消費電力で数 km から数 10km の通信距離を持つネットワークシステム。

③ 車載レーダー

ミリ波帯を利用する車載レーダーは、既に一部実用化段階を迎えている。車載レーダーでは、24GHz/26GHz 帯超広帯域 (Ultra Wide Band : UWB) レーダーシステムは、最大検知距離が 30m かつ帯域幅が 4.5GHz 以上、分解能が 20cm と高精度な検知が可能であるが、他の無線システムへの干渉低減のため、空中線電力が低い値に制限され、普及率の上限及び使用期限が設定されてきた。

一方、79GHz 帯高分解能レーダーは、24GHz/26GHz 帯 UWB レーダーと同等の検知精度を持ちながら、検知距離も最大 100m 程度と長く、性能のバランスに優れている。そのため、他のミリ波レーダーは基本的には高速道路等の自動車専用道路における利用が中心だが、79GHz 帯高分解能レーダーに関しては、周辺環境が複雑な一般道での適用が期待されている。特に、歩行者や自転車等の他のレーダーでは検知しにくい小さい対象物を検知することで交通事故の低減に大きく貢献することが期待されており、車両だけでなく路側機にも利用されることが期待されている。

④ WPT

中間周波を用いる WPT としては、EV 用 WPT では 85kHz 帯、スマートフォン等の WPT では 6.7MHz 帯や 100-200kHz について実用化に向けた開発等が進み、中間周波での普及が拡大している。EV 用 WPT は、現在、最大 7.7kW までの電力伝送が中心であるが、バスやトラックといった大型車への給電を考慮すると、今後は更に大電力の電力伝送への需要が高まることが想定される。また、走行中給電についても研究が行われている。加えて、マイクロ波を用いて電力を空間伝送する形態の WPT についても開発が進んでおり、センサーや情報機器への給電をはじめとして、将来的には、ドローンへの給電、災害時における遠隔地への送電等、様々な形態での普及が進むことが予想される。

2 リスク分析の研究の枠組みと研究動向

2-1 リスク分析の上での研究の枠組み

電波の人体に対する安全性を確保するためのリスク分析は、「リスク評価」、「リスク管理」、「リスクコミュニケーション」の3つに分けられる。この3つの分野で必要な研究を進めるとともに、適切に組み合わせてPDCA (Plan-Do-Check-Act) サイクルに基づき継続的に改善することにより、国民が安全に安心して電波を利用できる環境の構築が図られてきている。それぞれの分野の目的と手法等を以下に記す。

2-1-1 リスク評価

リスク評価は、電波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電波ばく露評価等を通じて、健康影響の有無、量-反応関係、電波ばく露の実態等を明らかにすることを目的とするものである。

また、リスク評価のための研究手法は、「疫学研究」、「ヒト研究」、「動物研究」、「細胞研究」及び「工学研究」に分類することができる。

① 疫学研究

疫学研究は、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、電磁環境と疾病発生との関連性の有無を明らかにすることができること、また、電波防護指針により防護される対象であるヒトを対象とすることという点で、非常に重要な研究手法である。国際がん研究機関（IARC）の発がん性評価においては疫学による根拠が最も重要視されており、疫学研究による十分な証拠が存在する場合は、他の研究（動物研究や細胞等のメカニズム研究）の結果にかかわらず、発がん性評価は、グループ1とされる⁷。

一方で、電波ばく露と疾病との関連性を追究する際は、様々なバイアスや交絡因子の影響も配慮する必要があるとともに、電波ばく露量や実態をいかに把握して研究を進めていくかが非常に重要である。

② ヒト研究

ヒト研究は、ヒトを対象に、主として実験室等で行う研究であり、ボランティア研究、被験者研究とも呼ばれる。生体電磁環境研究としては、ヒトの局所又は全身を様々な電波にばく露し、その生体影響の有無に関するデータを客観的な

⁷ グループは、1（発がん性がある）、2A（おそらく発がん性がある）、2B（発がん性があるかもしれない）、3（発がん性を分類できない）、4（おそらく発がん性はない）の5分類である。

指標又は主観的な指標に基づいて収集する例が多い。疫学研究と同様に、ヒトを対象とする点で重要であるが、疫学研究と異なり、電波ばく露の強さや実験室の環境設定を一定にして実験を行う条件を揃えることが可能である。また、得られたデータを基に、数値人体モデルを用いたシミュレーションを行い、少ない被験者数から有益なデータを得ることも可能である。そのため、熱作用や刺激作用に関して科学的根拠を収集し、電波防護指針の妥当性を評価するための貴重な研究手法と考えられている。

なお、電波防護指針を満たす強度の電波ばく露又は電波防護指針を超える強度の電波ばく露のいずれの場合も、研究倫理審査委員会の承認を受け、被験者への事前の十分な説明と同意のもとに実施しなければならない。特に後者（電波防護指針を超える強度の電波ばく露）の場合には、被験者の受ける可能性のあるリスクの事前の説明と同意や保障の準備が必要であり、周到な実験計画が求められる。また、未成年者を対象とする場合は、親権者（保護者）への事前の説明と承諾も必要である。

③ 動物研究

動物研究は、適切に管理された環境で、遺伝的背景が同一の（又はほとんど同じである）実験動物を用いて行うため、ヒトで見られるような個人差等の様々な要因によるばらつきを抑えた実験が可能である。また、近年、遺伝子改変や薬物誘導等による疾患モデルも多く確立しており、対象疾患にターゲットを絞った研究も可能である。さらに、動物研究では、条件を満たせば、ヒトを対象とした実験では倫理的に困難な強い電波ばく露を与えることも許容されるため、生体反応の閾値を求める実験も可能である。我が国では、これまで、マウス、ラット、ウサギを用いて電波ばく露の確立された作用による影響の閾値の検討及び確立されていない作用による影響について多くの研究が実施されてきた。その中で、我が国での研究は、工学系の専門家と連携した実験動物の詳細な電波ばく露評価（ドシメトリ）を実施していることが特徴であり、国際的にも高い評価を得ている。

一方で、動物研究を取り巻く環境としては、動物愛護の観点から 3R の原則（動物の数の削減（Reduction）、動物を使用しない代替法の使用（Replacement）、実験手技の改善（Refinement））の遵守が「動物の愛護及び管理に関する法律」（動物愛護管理法）に定められており、これらに配慮した実験計画を立案し、実施することが肝要である。特に閾値を求める研究では、動物は最低限の数にしつつシミュレーション解析等を併用し、予測値の精度を高めることも必要である。

④ 細胞研究

細胞研究は、動物研究と同様に、電波ばく露環境を制御することが比較的容易であり、既に株化されている種々のヒト由来の細胞を用いて検討可能という利点がある。また、細胞や分子レベルで起きる事象を定量的に示し、その機序を明らかにすることが可能なため、疫学研究及び動物研究を相補できる実験系である。近年では、動物実験の代替法として細胞を用いた毒性評価の手法も多く開発され、化学物質の評価では国際的試験法に採用されている実験法もある。また、iPS 細胞⁸由来の機能性細胞の研究や、発がんに関わる遺伝子変異、omics⁹レベル（プロテオミクス¹⁰、メタボロミクス¹¹等）の解析が可能であるため、これらを応用して電波ばく露の人体に対する影響を追究する研究をさらに発展させることが期待される。一方で、細胞実験では単一の培養細胞を使うことが多く、この場合は、ヒトの健康影響への外挿に関しては限界がある。ただし、近年では、皮膚の3次元インビトロモデル（皮膚を構成する細胞を重層化して作成した皮膚組織を模したモデル）等の技術も発展してきており、一部では、単一細胞への影響のみならず組織としての実験も可能である。後述するように、皮膚は超高周波の電波ばく露の主要なターゲット組織になることから、電波の健康リスク評価にあたっては、今後3次元培養細胞が主要な実験手法になる可能性もある。

⑤ 工学研究

工学研究では、医学・生物研究（疫学研究、ヒト研究、動物研究及び細胞研究）で用いるヒト、動物及び細胞を対象とした電波ばく露装置の開発、改良、保守等や疫学研究のための電波ばく露量評価手法の開発とデータ取得作業等の取組を行う。高品質なリスク評価のためには、電波ばく露量の正確な評価及び制御が必要不可欠であり、工学研究の役割は大きい。

高精度な電波ばく露装置の開発では、被験者、実験動物及び細胞を培養しているシャーレや試験管内部に対する所望のレベルの電波ばく露を正確に行うことができる装置を開発することが必要であり、特に、実験動物や培養細胞は実際の人間に対してサイズが大きく異なる（小さい）ことから、同じアンテナを使った電波ばく露では異なる電波ばく露条件となることがあるため、それぞれの対象となる生体のサイズや領域を考慮した電波ばく露装置が必要となるものであり、

⁸ 山中伸弥京都大学教授が世界で初めて樹立した、体細胞に初期化（リプログラミング）させる因子を導入することにより、胚性幹細胞（ES細胞）に類似した、自己増殖能と身体を構成する全ての細胞に分化しうる能力（分化全能性）をあわせ持つようになった細胞。疾患モデル細胞の作製、疾患の原因解明、薬効・毒性の評価、創薬開発等に有用で、再生医療への応用が期待されている。

⁹ 遺伝子やたんぱく質等の生物データの「すべて」を集約し、解析する医科学研究領域の名称。

¹⁰ 細胞や組織で発現している全てのたんぱく質（プロテオーム）を系統的・網羅的に解析する研究や解析技術をいう。

¹¹ メタボローム（代謝物の総体）を対象とする学問、研究技術をいう。

アンテナ設計及び計測技術や生体内の電波ばく露量を正確に評価するための電磁界解析及び計測技術に関する高度な知見と設備が必要である。症例対照研究等の疫学研究では、過去に遡った電波ばく露量の推定が必要であり、工学研究では、限られた情報に基づいた電波ばく露量の推定手法の開発に加えて、推定手法の妥当性を検証するための前向きの電波ばく露評価の研究や不確かさ評価に関する検討が必要である。

我が国では、これまでに医学・生物研究に工学研究者が積極的に関与し、世界的にも最高品質の電波ばく露装置及び電波ばく露評価技術により、我が国の医学・生物研究や国際的疫学調査に貢献してきている。

また、リスク評価においては、実際の電波利用状況を想定した人体内における電波ばく露量の正確な評価に加え、動物研究等で得られた健康影響閾値の人体への外挿、量-反応特性の明確化等が必要であり、このためには高精度な人体への電波ばく露量の評価が必要である。我が国では、これまでに世界的にも最高性能の数値人体モデル群を開発し、これらの数値人体モデルを研究目的等に向け広く公開する等の取組により、高精度な電波ばく露評価手法に関する研究分野を牽引している。

2-1-2 リスク管理

リスク管理は、電波ばく露による健康影響から国民を防護するために、安全指針値¹²を策定すること（安全指針値の策定）及びその値への適合性の確認をすること（適合性評価）を目的とするものである。

安全指針値のうち電波防護指針の基礎指針値又は基本制限値は、体内物理量で示され、健康影響の閾値に低減係数を乗じることで導かれる。そこで用いられる低減係数は、防護すべき健康影響に関連付けられる人体への電波ばく露量の不確かさと変動量に基づき決定される。また、安全指針値のうち電波防護指針の管理指針値（電磁界強度指針値等）は、体内物理量で示された基礎指針値又は基本制限値を超えることがない体外の物理量で示した値であり、人体の電波ばく露等が最大となる条件に基づき決定される。

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（適合性）を確認することである。適合性評価の手法には、高い信頼性と再現性が求められる。高い信頼性とは、適合性の誤判定による電波防護指針を超過した電波ばく露が起ることのないように、評価手法の不確かさに対して十分なマ

¹² 本報告書内では、電波防護指針や国際ガイドラインにおける基礎指針値、基本制限値、管理指針値や参考レベルのことを指す。十分に安全なレベルを示した値であり、この値を超えたからといってすぐさま危険な状態になるものではない。

ージンをもって適合性評価ができること等の要件である。高い再現性とは、同一の電波利用システムに対して異なる試験機関での適合性の判断が相違することがないようにするため、いずれの機関で評価を実施しても同一の判断が得られるような評価条件・評価手順に対する要件である。

2-1-3 リスクコミュニケーション

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、電波の人体に対する安全性に関する国民の理解の深化に寄与することを目的とするものであり、それにより、結果的には、国民が安全に安心して電波を利用することができる環境が醸成される。

総務省では、電波の人体に対する安全性に関する国民のリテラシー向上のための施策として、ホームページやパンフレットによる情報提供、専門スタッフを設置しての電話相談受付、全国各地での定期的な説明会の開催等を通じ、国民の電波の安全性に関する理解の深化に努めてきており、このような活動・機能について、継続的に維持・発展させることが望まれる。

2-1-4 対象とする周波数帯の分類

1-1のとおり、電波については、非常に強い強度でばく露された場合には刺激作用や熱作用が起こり得ることが分かっており、そのうち、刺激作用は約10MHz以下の周波数において、熱作用は約100kHz以上の周波数において、それぞれ起こるものであり、中間周波に含まれる100kHzから10MHzにおいては刺激作用と熱作用の両方が起こる等、周波数によって起こり得る作用が異なっている。また、低い周波数の電波は人体の深部にまで浸透し、高い周波数の電波は人体の表面に吸収される等、電波の特性は、周波数によって異なっている。

このため、前述のとおり、国際ガイドラインや電波防護指針においても、周波数帯を分けて指針値等を規定しており、重点研究課題の検討に当たっても、周波数帯を分けて整理することとする。具体的には、中間周波（10kHz-10MHz）、高周波（10MHz-6GHz）、超高周波（6GHz-3THz）の3つに分類する。

2-2 国際機関における重点研究課題のこれまでの変遷

2-2-1 世界保健機関 (WHO)

1990年代以降、我が国をはじめ世界中において、電波を利用する機器が増加し、とりわけ携帯電話のように人体近傍で電波を発する機器の普及が広まった。これに伴い、電波ばく露によって健康影響が生じる可能性について、人々の関心が高まった。

こうした状況に対処するため、WHOは、1996年、無線通信等に使用される電波領域を含む周波数が0 Hz～300 GHzの電磁界の健康リスク評価を目的とする「国際電磁界プロジェクト」を発足させた¹³。

WHOでは、化学物質や重金属等の各種の健康及び環境リスク因子についても同様のリスク評価を実施しており、その成果は「環境保健クライテリア」(Environmental Health Criteria : EHC)として取りまとめられている。電磁界については、同プロジェクトの下で、静的(0 Hz)及び低周波(>0 Hz～100 kHz)に関するEHCを、それぞれ2006年及び2007年に刊行している¹⁴。

高周波(radiofrequency electromagnetic fields: RF EMF)については、1993年に現行版EHC(対象は300 Hz～300 GHz)を刊行しているが、上述のような電波利用環境の変化を反映するため、EHCの更新(対象は100 kHz～300 GHz)が予定されている¹⁵。その一環として、リスク評価の科学的根拠となる生物学的影響及び健康影響に関する知識の欠落を補うため、重点研究課題(Research Agenda)を1998年、2003年¹⁶、2005年¹⁷(子どもの健康影響に関する研究課題)、2006年¹⁸及び2010年¹⁹に策定し、これに沿った研究の実施を加盟各国に推奨している。WHOの高周波についての重点研究課題を、研究手法ごとに以下に示す。

① 疫学研究

疫学研究については、1998年の重点研究課題の策定当初は、携帯電話の成人の使用者の頭頸部におけるがんリスクに関する国際的に調整された大規模な症例対照研究が最優先とされていた。これは、仮に携帯電話の電波に発がん性があるとすれば、電波ばく露が集中する頭頸部でのがんとの関連が認められるであろうと考えられたこと、携帯電話の普及初期には使用者は主に成人に限定されたこと及び一部の国で実施された先行研究では長期間の携帯電話の使

¹³ http://www.who.int/peh-emf/project/EMF_Project/en/

¹⁴ http://www.who.int/peh-emf/research/health_risk_assess/en/index2.html

¹⁵ http://www.who.int/peh-emf/research/rf_ehc_page/en/

¹⁶ <http://www.who.int/peh-emf/research/rf03/en/>

¹⁷ <http://www.who.int/peh-emf/research/children/en/>

¹⁸ http://www.who.int/peh-emf/research/rf_research_agenda_2006.pdf

¹⁹ <http://www.who.int/peh-emf/research/agenda/en/>

用についてのデータが不十分であったことによる。これを受けて、WHO の専門機関である国際がん研究機関（IARC）の調整の下で、我が国を含む 13 か国の参加により、携帯電話使用者の頭頸部腫瘍に関する大規模な症例対照研究（通称インターフォン研究）が実施された²⁰。

その後の症例対照研究では、携帯電話を左右どちら側で使用していたかについてのアンケートで、症例（患者）は腫瘍を発症した側での使用を実際よりも過大に申告する傾向があること（想起バイアス）、腫瘍を発症していない対照（健常者）の参加率が低いこと（選択バイアス）等の問題点が明らかになってきたため²¹、2003 年以降の重点研究課題では、これらの問題点を排除できるコホート研究が推奨された。

携帯電話の更なる普及に伴い、使用者が子ども及び若年層に拡大したことから、2005 年以降の重点研究課題では、これらの年齢層についても同様に、国際的な大規模疫学研究が推奨されるようになった。

さらに、認知機能、記憶、行動、神経疾患等への影響についても、後述するヒト研究で関連が認められるようになったことから、2003 年以降の重点研究課題では、これらの影響についても疫学研究が推奨された。加えて、労働環境では、職種や労働時間の把握、職場での測定や電波ばく露メータの装着等により、電波ばく露データの正確な推定が可能であるという観点から、2006 年以降の重点研究課題では、労働者集団を対象とした疫学研究も推奨されるようになった。

WHO の疫学研究における重点研究課題は表 2-1 のとおりである。

表 2-1 疫学研究における重点研究課題

発行年	優先度等	重点研究課題
1998 年	-	頭頸部のがん等の調査のため、より高いレベルの電波ばく露を伴う、少なくとも 2 つの大規模疫学研究が必要。確かな電波ばく露評価が可能であれば、携帯電話使用者又は高い電波ばく露を受ける労働者集団を対象とすべき
2003 年	短期	各個人の総電波ばく露量の評価
	長期	携帯電話使用者の大規模前向きコホート研究 無線基地局等からの電波ばく露による睡眠・がん以外の慢性疾患への影響
2005 年	高優先度	携帯電話使用と脳腫瘍以外の全ての健康影響（認知機能や睡眠の質への影響等を含む）に関する前向きコホート（子どもへの健康影響）
		携帯電話使用者としての子どもと脳腫瘍に関する症例対照研究
		基地局及びラジオ・テレビ塔とがんに関する症例対照研究（ば

²⁰ <http://interphone.iarc.fr/>

²¹ http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44396/1/9789241599948_eng.pdf

		く露評価を盛り込むこと) (子どもへの健康影響)
2006 年	高優先度	携帯電話使用者に関する大規模な長期間の前向きコホート研究
		携帯電話の使用に関連する子どもの脳腫瘍リスクについての 大規模な多国間の症例対照研究
	その他	高い電波ばく露を受ける労働者の大規模研究。既存の大規模な症例対照研究における職業電波ばく露データの利用や、コホート研究を含む 子ども及び若年層の携帯電話使用者についての、脳腫瘍以外の全ての健康上のアウトカム (認知機能や睡眠の質への影響等) についての前向きコホート研究 全ての発生源からの集団電波ばく露を特徴付けるための調査
2010 年	高優先度	行動及び神経学的障害、がんを含めた影響に関する子ども及び青年の前向きコホート研究 十分に確立された人口集団ベースのがん登録を利用した脳腫瘍発生率トレンドのモニタリング研究 (可能であれば、人口集団の電波ばく露データと連結させる)
	その他	神経学的疾患の症例対照研究、ただし条件として、客観的なばく露データと交絡因子データが入手可能であり、妥当な参加率が達成される場合に限る

② ヒト研究

ヒト研究については、高周波の電波ばく露と睡眠時及び安静時の脳電図 (electroencephalogram : EEG) について、先行研究で陽性 (関連あり) と陰性 (関連なし) の矛盾する結果が認められるようになったことから、2003 年以降の重点研究課題では、その再現性の確認のための研究が推奨された。また、前述の疫学研究と同様、2005 年以降の重点研究課題では、子どもを対象とした研究も推奨されるようになった。

なお、いわゆる「電磁過敏症」(electromagnetic hypersensitivity : EHS) については、1998 年及び 2003 年の重点研究課題では、電波ばく露条件の制御の上での研究を推奨していたが、その後、EHS を自己申告した人々を対象とした複数の先行研究で電波ばく露と自覚症状との因果関係についての具体的な証拠が認められなかったことから²²、2006 年及び 2010 年の重点研究課題では更なるヒト研究は勧告されなかった。

WHO のヒト研究における重点研究課題は表 2-2 のとおりである。

表 2-2 ヒト研究における重点研究課題

発行年	優先度等	重点研究課題
1998 年	-	ホルモンレベル、眼・内耳・蝸牛への影響、記憶障害、神経変性疾患、神経生理について報告されている影響の再現性の確認のための研究：これらは動物で行うことができるが、可能であればヒトボランティアでの研究を行うべき 各種の不定愁訴を電波ばく露に関連付けている人々を調べる

²² http://www.who.int/peh-emf/research/rf_research_agenda_2006.pdf

		には、十分に制御された研究が必要
2003年	短期	睡眠について報告されている影響の再現・拡張 電波ばく露と頭痛との関連についての制御された実験室研究
	長期	全身加熱又は頭部の局所加熱による認識能力への影響
2005年	高優先度	脳波を含む認知機能への影響（子どもへの健康影響）
2006年	高優先度	倫理的承認が得られれば、実験室でばく露された子どもの認識及び EEG への急性影響
2010年	高優先度	様々な年齢の子どもを対象とした誘発研究の一層の推進
		睡眠時・安静時の EEG を含む脳機能への影響の可能性の基礎となる、神経生物学的機序を突き止めるための誘発研究

③ 動物研究

動物研究については、一部の先行研究で、疾病モデル動物等でのがんの増加、発がんプロセス（DNA 鎖切断を含む）や血液脳関門（blood brain barrier : BBB）の透過性等への影響が報告されるようになったことから、1998 年及び 2003 年の重点研究課題では、それらの再現性の確認のための研究が推奨されていた。これを受けて、例えば米国では国家毒性プログラム（National Toxicology Program : NTP）²³の下で大規模動物実験が実施された²⁴。動物研究では比較的高い電波ばく露レベルでの実験が可能であることから、2003 年以降の重点研究課題では、発がん性に加え、神経系、免疫系、生殖系、発生・発達等、広範な健康影響（幼若動物への影響を含む。）の有無の検討のための研究が推奨されるようになった。

WHO の動物研究における重点研究課題は表 2 - 3 のとおりである。

表 2 - 3 動物研究における重点研究課題

発行年	優先度等	重点研究課題
1998年	-	がんのイニシエーション、プロモーション、コプロモーション、プログレッションの試験には、NTP で一般的に実施されている少なくとも 2 系統の動物での 2 年間の標準的な大規模動物試験が必要。毎日 2-6 時間、温度変化を生じる可能性のあるレベルよりもやや低い範囲の電界強度を使用することが必要
		遺伝子組換え動物に見られる健康影響の示唆についての追跡研究が必要
2003年	短期	先行研究で示唆された免疫系への影響に関する追跡研究
		BBB 透過性、神経生理等について報告されている影響の再現研

²³ NTP は、環境中の物質の検査・評価のための米国政府の省庁間プログラムで、保健福祉省（Department of Health and Human Services : HHS）に属する国立衛生研究所（National Institutes of Health : NIH）傘下の国立環境衛生科学研究所（National Institute of Environmental Health Sciences : NIEHS）、疾病管理予防センター（Centers for Disease Control and Prevention : CDC）傘下の国立労働安全衛生研究所（National Institute of Occupational Safety and Health : NIOSH）、食品医薬品局（Food and Drug Administration : FDA）傘下の国立毒性研究センター（National Center for Toxicological Research : NCTR）の 3 組織で構成される（本部は NIEHS）。

²⁴ <https://ntp.niehs.nih.gov/results/areas/cellphones/>

		究
		睡眠への影響の追跡研究
		中枢神経系、特に大脳皮質への熱的影響に関するより定量的な研究
	長期	新しい信号について特定の生物学的活性が示唆される場合、げっ歯類での大規模研究
		41℃未満での熱的影響を決定するための組織学的損傷及び機能的変化の定量的評価
2005年	高優先度	幼若動物への長期電波ばく露の影響（中枢神経系、行動、シナプス形成、遺伝子）
		幼若動物への長期電波ばく露の影響（免疫系の発達）
	低優先度	胎児の電波ばく露とBBBに関する研究
	高優先度	中枢神経系の発達（特に皮質）への熱負荷の影響（子どもへの健康影響）
		未成熟の動物の電波ばく露による中枢神経系の成長・成熟、造血系・免疫系の成長に及ぼす影響を調べる機能的、形態学的、分子的エンドポイントを用いた研究。遺伝毒性的エンドポイントも盛り込むべき。実験プロトコルには、出生前又は出生後早期の高周波の電波ばく露を盛り込むべき
2010年	高優先度	発達と行動に対する出生後早期及び胎児期の高周波の電波ばく露の影響
		加齢と神経変性疾患に対する高周波の電波ばく露の影響
	その他	生殖器官に対する高周波の電波ばく露の影響

④ 細胞研究

細胞研究についても、1998年の重点研究課題の策定当初は、一部の先行研究で認められた影響の再現性の確認が推奨された。その後、携帯電話等に用いられる技術の変化に伴い、2005年以降の重点研究課題では、様々な変調・波形の信号を用いた研究が推奨されるようになった。また、解析技術の進展等により、2003年以降の重点研究課題では、新たな実験手法の活用も推奨されている。

WHOの細胞研究における重点研究課題は表2-4のとおりである。

表2-4 細胞研究における重点研究課題

発行年	優先度等	重点研究課題
1998年	-	細胞周期動態、増殖、遺伝子発現、シグナル伝達経路、膜変化に関して報告されている影響の再現性を扱う場合に有益である可能性がある
2003年	短期	哺乳類の細胞での熱ショックタンパク質（heat shock protein：HSP）の発現について報告されている影響の検証
	長期	タンパク質のリン酸化、遺伝子転写、タンパク質発現等に関する、網羅的な検出系を用いた特性評価
2005年	高優先度	骨髄細胞の造血細胞分化や脳神経細胞分化への影響（子どもへの健康影響）
	低優先度	パルス波と生体との相互作用（子どもへの健康影響）
2006年	高優先度	HSP及びDNA損傷に関して報告されている知見についての低

		レベル (2 W/kg 以下) 又は変調若しくは間欠信号を用いた独立した再現研究。影響の比吸収率 (Specific Absorption Rate : SAR) ²⁵ レベル及び周波数への依存性を盛り込むべき
	その他	細胞分化、脳薄片／培養神経を用いた神経細胞の成長への影響
2010 年	その他	新技術に利用される高周波の電波ばく露、環境的因子と高周波の共電波ばく露の後に生じる細胞の反応を検出するために最適な実験的検査法の明確化 遺伝的背景と細胞型の影響に関する研究の一層の推進：アーチファクト及び／又はバイアスの影響を受けにくい新たな高感度の手法を用いて、多様な細胞型に対する携帯電話の高周波ばく露の影響可能性を調べること

⑤ 工学研究

工学研究については、健康リスク評価において電波ばく露量の把握は必須であることから、1998 年の重点研究課題の策定当初から最優先課題の一つとされ、特に、電波ばく露評価の精度向上、現実的な人体モデルの構築、その根拠となる人体の誘電率特性の解明等についての研究が推奨されていた。その後の電波利用環境の変化に伴い、2005 年以降の重点研究課題では、子どもや妊婦の電波ばく露パターンの研究や、様々な電波ばく露シナリオ(労働環境を含む。)の検討に推奨範囲が拡大している。

WHO の工学研究における重点研究課題は表 2 - 5 のとおりである。

表 2 - 5 工学研究における重点研究課題

発行年	優先度等	重点研究課題
1998 年	最優先	長期に渡る個人の電波ばく露を簡便・正確に測定できる手段・評価方法の開発
2003 年	短期	一般環境及び労働環境での電波ばく露の実態を説明する科学的モデル
		組織固有の電波ばく露パラメータ (SAR、温度負荷) の特定化のためのドシメトリ研究 がん組織、年齢依存性等についての誘電率特性データベースの補強
	長期	細胞又はそれ以下のレベルでのドシメトリ技術
2005 年	高優先度	携帯電話と脳腫瘍の症例対照研究での電波ばく露量の把握 (子どもへの健康影響)
2006 年	高優先度	特に子ども及び胎児の身体の各部位での電波ばく露パターンの研究 (多重ばく露を含む)
		様々な年齢の子ども及び妊婦のドシメトリ・モデルの研究、体温調節反応の適切なモデルとの組合せ
	その他	生物学的に関連のある電波ばく露の標的について新たな洞察をもたらすかもしれないマイクロドシメトリ (細胞、亜細胞レベル)
		新規・新興の高周波技術を対象にした電波ばく露の特性、電波

²⁵ 生体が電磁界にさらされることによって、単位質量あたりの組織に単位時間に吸収されるエネルギー量をいう。

2010年	高優先度	ばく露シナリオと電波ばく露レベルの評価；確立した技術の利用が変化した場合に関しても、同様に評価すること 広範な高周波発生源からの個人の電波ばく露の定量化及び一般人口集団の電波ばく露の決定要素の明確化
	その他	労働者の個人の電波ばく露のモニタリング

⑥ 社会学的研究

2006年以降の重点研究課題では、科学的な健康リスク評価に加えて、高周波の電波ばく露によるリスクに対する一般公衆の認知等についての社会学的研究も推奨されるようになった。その理由として、2006年の重点研究課題では、「電波の健康への悪影響の可能性についての懸念が、リスク管理及び科学的な健康リスク評価の公衆の受容性に影響を及ぼしている。理性的なリスク管理は、科学的リスク評価と、十分に系統立てられた研究を通じてこの懸念を調査する社会的研究からの洞察の両方に由来する証拠に基づいて構築すべきである」とされている。

WHOの社会学的研究における重点研究課題は表2-6のとおりである。

表2-6 社会学的研究における重点研究課題

発行年	優先度等	重点研究課題
2006年	-	個人のリスク認知(信条の形成、高周波ばく露と健康との関連についての認知に関する研究を含む。)
		高周波関連の技術、政策、リスクコミュニケーション・リスク管理戦略に対する利害関係者・一般公衆の信用・信頼の条件 用心政策が公衆の懸念に及ぼす影響
2010年	-	高周波の健康懸念への関心と健康リスクの認知の決定要素と精神的原動力の研究
		高周波の電波ばく露の健康影響の科学的証拠及びリスク情報についての公衆とのコミュニケーションの様々な形式の効果の研究
		高周波による健康リスクの公衆の認知が公衆の安寧度に影響を与えるか、どのように与えるかの研究 より大きな社会的背景における高周波技術の取扱いに関する研究

2-2-2 新興及び新規に同定される健康リスクに関する科学委員会 (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks : SCENIHR)

欧州連合(EU)の行政執行機関である欧州委員会では、公衆衛生政策は保健・食品安全総局(DG SANTE:2015年に保健・消費者保護総局(DG SANCO)から改組)が担当している。DG SANTEは、「欧州を、消費者が自分たちの利益が保護されていると確信できるような、より健康で、より安全な場所にする。ゼロリ

スク社会は可能ではないかもしれないが、消費者に対するリスクを可能な限り低減・管理できるようにすること」を目標としている²⁶。

電磁界の健康リスク評価については、DG SANTE（元 DG SANCO）の下に設置された SCENIHR²⁷が、2007年²⁸、2009年²⁹及び2015年³⁰に、電波ばく露によって健康影響が生じる可能性についての意見書（Opinion）を刊行し、その中で、まだ知識が一部欠落している重点研究課題を推奨している。

SCENIHR の意見書における重点研究課題を、周波数範囲及び研究分野ごとに以下に示す。

[中間周波]

中間周波については、一貫して研究データの欠落が指摘されている。特に、労働環境での電波ばく露に関する疫学研究が推奨されている。また、電波ばく露の潜在的なバイオマーカの調査（ヒト研究か動物研究かは明示せず。）が推奨されている。

SCENIHR の意見書の中間周波における重点研究課題は表 2-7 のとおりである。

表 2-7 中間周波における重点研究課題

発行年	重点研究課題
2007年	中間周波の健康影響についてのデータはほとんどない。疫学研究と実験研究の両方で、この問題に対処することが望ましい。
2009年	中間周波の健康影響についてのデータはほとんどない。特に労働者における中間周波ばく露が増加していることに鑑み、この欠落を補うことが重要である。そのような研究では、この周波数範囲における集団の改変されたばく露条件の調査に焦点を絞ることが望ましい。
2015年	この分野の研究は非常に限定的であり、健康上のアウトカムに関するデータは、皆無に等しい。2009年の意見書では、店舗の盗難防止装置による妊娠のアウトカムへのリスクに焦点が当てられた。これは、ばく露される身体の部位が胎児に近いこと、電波ばく露が参考レベルを超えるかもしれないこと、そうした職業（店舗従業員）に就労する若年女性の数が多いことに鑑みてのことであった。新たな疫学データがないことから、電波ばく露が十分に合理的な規模の労働者集団を同定でき、その電波ばく露を十分に特徴付けることができるのであれば、この研究は依然として高優先度である。

²⁶ https://ec.europa.eu/info/departments/health-and-food-safety/what-we-do-health-and-food-safety_en

なお、EUにおける科学的研究（電磁界の健康影響に関するものを含む。）の助成は、研究・イノベーション総局（DG RTD）が、数次にわたる枠組みプログラム（Framework Programme：FP）の一環として担当している。https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation_en

²⁷ https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging_en

2016年に、「環境及び新興リスクに関する科学委員会」（Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks：SCHEER）に改組。

https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/scheer_en

²⁸ https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_007.pdf

²⁹ http://ec.europa.eu/health/archive/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_024.pdf

³⁰ https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/emerging/docs/scenihhr_o_041.pdf

これらの研究では、適切な対照群を選択できるのであれば、電波ばく露の潜在的なバイオマーカーを調査することも望ましい。この研究を、より広範な電波ばく露を用いた実験研究で補足することが望ましく、そのような研究が中優先度として推奨される。

[高周波]

高周波については、WHO と同様の重点研究課題に加えて、疫学では前提条件付きで男性の生殖能に関するコホート研究、ヒト研究では高周波が原因とされる自覚症状の機序研究、動物研究では精子の活性酸素種への影響に関する研究が推奨されている。

SCENIHR の意見書の高周波における重点研究課題は表 2－8 のとおりである。

表 2－8 高周波における重点研究課題

研究手法	優先度	重点研究課題
2007 年の意見書		
疫学研究	--	がんについての長期的な前向きコホート研究
動物研究	--	子どもの電波ばく露の健康影響（未成熟動物での研究）
工学研究	--	人口集団における電波ばく露分布の評価
2009 年の意見書		
疫学研究	--	がんについての長期的な前向きコホート研究
ヒト研究	--	神経系への影響についての再現・拡張研究
動物研究	--	子どもの電波ばく露の健康影響（未成熟動物での研究）
工学研究	--	個人の電波ばく露全体の評価
2015 年の意見書		
疫学研究	高優先度	携帯電話使用に関連した高周波の電波ばく露の長期的な影響（頭頸部のがん、脳血管疾患、神経変性疾患）を調査する成人の前向きコホート研究
		携帯電話使用に関連した高周波の電波ばく露の影響と子どもにおける脳腫瘍についての更なる研究
	--	男性の生殖能への影響に関するコホート研究。潜在的な交絡因子と携帯電話の使用に関する記憶想起バイアスを克服できる研究デザインが利用可能であり、適切な電波ばく露評価があることが条件
ヒト研究	高優先度	ヒトボランティアでの神経生理学的研究。広範な年齢を網羅し、女性と男性のデータに個別に着目し、可能であれば病人の集団（例：睡眠についての研究では不眠症の患者又は神経変性疾患を含む神経学的疾病の患者）を含めることが望ましい。
	中優先度	携帯電話の使用と子どもの発育、認識機能及び行動に及ぼす影響についての更なる研究。これらの研究には、母親と子ども及び思春期層の電波ばく露パターンの特徴付け並びに検証されたばく露評価を盛り込むことが望ましい。 高齢者、子ども及び思春期層の被験者を用いた、睡眠、睡眠時 EEG、覚醒時 EEG、認識への影響についての更なる研究

動物研究	低優先度	高周波にばく露した精子における活性酸素種への影響を調査する動物研究。僅かな変化を検出するのに十分なパワーを有し、精巣における吸収電力を特徴付けるための詳細な計算手法を採用することが条件
細胞研究	中優先度	高周波の電波ばく露後の DNA 損傷に対する影響についての更なる研究
工学研究	高優先度	個別の推奨なし（疫学研究、ヒト研究及び動物研究の個別項目で工学的側面に言及）

[超高周波] (2015年の意見書のみ)

超高周波については、その生体組織への吸収が表面付近に限定されることから、眼部及び皮膚への影響に関する研究（ヒト研究か動物研究かは明示せず。）が推奨されている。

SCENIHR の意見書の超高周波における重点研究課題は表 2-9 のとおりである。

表 2-9 超高周波における重点研究課題

研究手法	重点研究課題
疫学研究	電波ばく露が十分かつ良好に特徴付けられた適切な規模の電波ばく露群及び適切にマッチングした対照群を同定できるのであれば、皮膚及び眼の変化並びに疾病についての職業電波ばく露グループのモニタリングが中優先度として推奨される。
実験研究	THz 技術の利用の増加が予想されることから、あるかも知れない皮膚及び角膜への悪影響に関する実験研究が高優先度として推奨される。特に、ヒト研究及び動物研究では、皮膚に対する長期的な低レベルの電波ばく露及び角膜に対する高強度の短期的な電波ばく露に焦点を当てることが望ましい。これまでの研究では、比較的狭い周波数範囲 (0.1-1 THz) が用いられており、更なる研究ではより高い周波数も用いることが望ましい。

[その他] (2015年の意見書のみ)

上述の周波数範囲の分類に該当しない項目として、発がん補助因子 (co-carcinogen) としての電波ばく露の役割、電離放射線の影響に対する防護作用、他の発がん因子との複合電波ばく露についての研究が中優先度として推奨されている。

2-2-3 重点研究課題のこれまでの変遷

WHO 及び SCENIHR における重点研究課題のこれまでの変遷の要点は、以下のとおりである。

- ・ 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等への影響に重点が移行しつつある
- ・ 評価対象が成人から子どもや若年層に拡大している

- ・ 対象周波数帯が高周波から中間周波や超高周波に拡大している

図 2-1 に WHO 及び SCENIHR における主な重点研究課題のこれまでの変遷を示す（横軸の年数は目安）。

2-3 国内における重点研究課題のこれまでの変遷

我が国では、「生体電磁環境研究推進委員会」³¹（平成9年度～平成18年度）及び「生体電磁環境に関する検討会」³²（平成20年度～）における医学、生物学、電波ばく露レベルを高精度に評価する工学の専門家による議論を踏まえ、我が国の強みを生かしつつ、2-2で述べた国際動向にも沿った形で各種研究が進められてきた。

平成9年度から平成18年度にかけては、表2-10に示すとおり、電気通信技術審議会答申「電波利用における人体防護の在り方」（平成9年4月24日）³³において今後研究を進めることが必要な項目として示されている研究課題と、WHOの国際電磁界プロジェクトから示された優先的に行われるべき研究課題の中より、（1）追試の必要性が認められる過去の研究が提起した研究課題、（2）携帯電話端末による電波ばく露に特徴的な研究課題、（3）社会的に要求の高い研究課題の3つの優先的観点を踏まえた研究が実施された。

表2-10 平成9年度から平成18年度にかけて実施された研究課題

研究手法	実施年度	研究課題	対応する国際的な重点研究課題
疫学研究	平成11年度	携帯電話の使用と脳腫瘍の発生との関係に関する疫学予備調査	WH01998（大規模疫学研究）
	平成12～16年度	携帯電話の使用と脳腫瘍の発生との関係に関する国際共同疫学調査の実施	WH01998（大規模疫学研究）
ヒト研究	平成14～16年度	神経生理学的影響評価試験	WH01998（神経生理）
	平成16～18年度	ヒト感受性に関する調査（神経心理学・反応時間に関する研究）	WH01998（神経生理）
		ヒト感受性に関する調査（生理機構に関する研究）	WH01998（神経生理）
	平成17～18年度	ヒト眼球運動への影響評価試験	WH01998（神経生理）
動物研究	平成9～10年度	高周波ばく露がラットの脳に及ぼすBBBに対する影響	WH02003（BBB透過性）
	平成10年度	電磁波ばく露による生物学的影響に関する研究～電磁波ばく露の脳腫瘍微小循環動態に及ぼす影響	--
	平成11～17年度	長期局所ばく露実験（1.5GHz PDC方式、2GHz W-CDMA方式）	WH01998（がん）
	平成12～13年度	高周波電磁波ばく露による脳高次機能への生物学的影響評価	--
		電磁波照射の脳微小循環動態に及ぼす生物学的影響評価	--
平成13～16年度	電波の眼への影響評価実験	--	

³¹ <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/com/protect/>

³² http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/seitai_denji_kankyou/

³³ <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/material/dwn/guide89.pdf>

	平成 14～16 年度	睡眠及び免疫機能影響評価試験	WH01998 (神経生理)
	平成 14～18 年度	脳微小循環動態への影響の直視的評価試験	--
	平成 17～18 年度	パルス波・ミリ波による眼球への影響評価試験	--
		内分泌攪乱様作用評価試験	--
		生殖・発生・発達に対する 2GHz 帯電磁波ばく露の修飾作用(電磁波照射実験予備検討)	WH02005 (幼若動物)
		生殖・発生・発達に対する 2GHz 帯電磁波ばく露の修飾作用(妊娠ラットの生殖機能(妊娠維持)及び胎・胎児発生に対する 2GHz 帯電磁波ばく露の修飾作用)	WH02005 (幼若動物)
細胞研究	平成 14～18 年度	細胞生物学的影響評価試験(細胞影響評価と機構解析)	WH01998 (細胞周期動態等)
	平成 15～16 年度	生体防御機能へのマイクロ波影響の調査	WH01998 (細胞周期動態等)
	平成 17 年度	生体ラジカル発生へのマイクロ波影響の実験調査	--
工学研究	平成 9～10 年度	ラット用頭部局所ばく露装置の開発とばく露評価	WH01998 (がん)、WH02003 (BBB 透過性)
	平成 14～18 年度	細胞生物学的影響評価試験(ドシメトリに基づく物理的影響メカニズムの検索)	WH01998 (細胞周期動態等)
	※ 他にも、上に示す複数の研究課題において、当該分野の研究者との密接な連携の下で研究を実施		

生体電磁環境研究推進委員会は、平成 19 年に発表した報告書³⁴において、「これらの研究で、電波による健康影響の可能性について、全てが解明されたわけではない。本委員会によるこれまでの研究では再現された例はないが、諸外国の一部の研究には、さらなる研究の必要性を示唆しているものもある。的確な実験計画の下で、引き続き研究を継続することが必要である。」と結論付け、「今後の取り組むべき研究課題等」として、表 2-11 に示すとおり提言している。

表 2-11 生体電磁環境研究推進委員会報告書において提言された研究課題

1 ヒトへの短期的影響に関する研究
(1) 携帯電話端末からの電波による症状に関する研究 (2) 携帯電話基地局・端末からの電波による睡眠への影響 等
2 疫学研究
(1) 携帯電話使用者のコホート研究 (2) 子ども・若年期における携帯電話使用と健康に関する疫学調査 等
3 動物研究

³⁴ http://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/283520/www.soumu.go.jp/s-news/2007/pdf/070427_12_1.pdf

(1) 免疫システムの機能とその発達における電磁環境による影響の調査研究 (2) 頭部局所電磁波ばく露の及ぼす生体影響評価とその閾値の検索 (3) 複数の電波ばく露による電波複合ばく露の生体への影響 (4) ミリ波、準ミリ波眼部ばく露による影響の指針値妥当性の再評価 等
4 細胞研究
(1) 電波の細胞生物学的影響評価と構造解析 (2) ミリ波帯電磁波の生体電気特性の評価とインビトロばく露装置 (3) 免疫細胞及び神経膠細胞を対象としたマイクロ波照射影響に関する実験評価 等
5 ドシメトリ
(1) 子どもに対する人体全身平均 SAR と体内深部温度上昇の特性評価 (2) 実験に基づく電磁界強度指針の妥当性評価及び確認 等

平成 19 年度以降は、この提言や国際動向、無線システムの発展動向を踏まえ、表 2-12 に示した研究が実施されてきている。生体電磁環境に関する検討会は、平成 27 年に発表した第一次報告書³⁵において、「今後の利用の拡大が見込まれる中間周波数帯、ミリ波帯については、刺激作用及び熱作用の閾値の妥当性を検証する研究、長期的影響の可能性を探索する研究ともに数が限られており、引き続き研究を積み重ねていくことが必要である。加えて、これらの周波数帯を利用する機器に関して、指針値への適合性を評価する技術の確立が不十分であることも課題として挙げられる。そのため、我が国においても、適合性評価技術の研究を引き続き推進することにより、国際規格等における標準化に貢献していくことが必要である。」としている。

表 2-12 平成 19 年度以降に実施された又は実施中の研究課題

研究手法	実施年度（予定も含む）	研究課題	対応する国際的な重点研究課題
中間周波			
疫学研究	平成 29～33 年度	中間周波に係る疫学調査及び電波ばく露量モニタリング調査	SCENIHR2007、SCENIHR2009、SCENIHR2015（中間周波ばく露）
ヒト研究	平成 25～26 年度	刺激作用の周波数依存性の定量的評価	--
	平成 29～32 年度	中間周波における神経作用（痛覚閾値）の調査	--
動物研究	平成 27～29 年度	中間周波数帯の電磁界（特に 100kHz 帯の磁界）における非熱生体作用 ³⁶ の検討	--

³⁵ http://www.soumu.go.jp/main_content/000366587.pdf

³⁶ 電波ばく露によって生じる熱作用以外の生体作用であり、現在まで、その作用の科学的根拠は確立されていない。

細胞研究		なし	
工学研究	平成 22～24 年度	中間周波数帯の電磁界と人体との間接結合に関する数値ドシメトリ評価	WHO2006 (子ども・妊婦のドシメトリ)
	平成 27～29 年度	中間周波数帯の電磁界 (特に 100kHz 帯の磁界) における非熱生体作用の検討	--
	平成 28～32 年度	次世代電波利用システムからの電波の人体安全性評価技術に関する調査	WHO2003 (組織パラメータ)
高周波			
疫学研究	平成 19～21 年度 平成 22～24 年度	子ども・若年期における携帯電話端末使用と健康に関する疫学調査	WHO2006 (前向きコホート、子どもの脳腫瘍リスク)、SCENIHR2015 (子どもの脳腫瘍)
	平成 20 年度	成人の携帯電話使用者の追跡調査研究	WHO2006 (前向きコホート)、SCENIHR2009、SCENIHR2015 (前向きコホート)
	平成 25～26 年度	国際共同症例対照研究における症例データの整理・分析・評価	WHO2010 (子ども・成人の前向きコホート) WHO2010 (個人ばく露量定量化等)
	平成 27～29 年度	無線通信等による電波ばく露の定量的実態把握と脳腫瘍の罹患状況に基づくリスク評価	--
ヒト研究	平成 19～20 年度	携帯電話の電波ばく露に関わるヒトの症状に関する研究	--
	平成 19～21 年度	携帯電話端末からの電波によるヒトの眼球運動への影響	--
	平成 20～22 年度	携帯電話端末からの電波の睡眠に対する影響	WHO2010 (子どもが対象の誘発研究)
動物研究	平成 19～21 年度	2GHz 帯電波の多世代ばく露の脳の発達及び脳機能への影響	WHO2006 (未成熟動物)
		脳内免疫細胞に及ぼす電波ばく露の影響評価	WHO2006 (未成熟動物)
	平成 19～22 年度	頭部局所電波ばく露の及ぼす生体影響評価とその閾値の検索	--
	平成 20～21 年度 平成 22～24 年度	複数の電波ばく露による電波複合ばく露の生体への影響	--
平成 22～24 年度	電磁波のラット胎児の造血器への影響評価	WHO2006 (未成熟動物)	
	免疫システムの機能とその発達に関する影響調査	WHO2006 (未成熟動物)	
細胞研究	平成 19～21 年度	電波の細胞生物学的影響評価と機構解析	WHO2006 (細胞分化等)
	平成 20～22 年度	免疫細胞及び神経膠細胞を対象としたマイクロ波照射影響に関する実験評価	--

	平成 29～32 年度	遺伝的背景及び標準評価系を用いた細胞への影響調査	--
工学研究	平成 19～21 年度	子どもに対する人体全身平均 SAR と体内深部温度上昇の特性評価 実験に基づく電磁界強度指針の妥当性評価及び確認	WHO2006 (子ども・妊婦のドシメトリ) WHO2006 (子ども・妊婦のドシメトリ)
	平成 19～21 年度 平成 22～24 年度 平成 25～27 年度	電波の人体への安全性に関する評価技術	WHO2003 (組織パラメータ) WHO2006 (子ども・妊婦のドシメトリ) WHO2010 (新規技術の放射特性等) WHO2010 (個人ばく露量定量化等)
	平成 20～21 年度 平成 22～24 年度	複数の電波ばく露による電波複合ばく露の生体への影響	WHO2006 (子ども・妊婦のドシメトリ)
	平成 20～22 年度	免疫細胞及び神経膠細胞を対象としたマイクロ波照射影響に関する実験評価	WHO2006 (細胞レベル以下のドシメトリ)
	平成 27～29 年度	無線通信等による電波ばく露の定量的実態把握と脳腫瘍の罹患状況に基づくリスク評価	--
	平成 28～32 年度	次世代電波利用システムからの電波の人体安全性評価技術に関する調査	WHO2003 (組織パラメータ) WHO2006 (子ども・妊婦のドシメトリ) WHO2010 (新規技術の放射特性等) WHO2010 (個人ばく露量定量化等)
	超高周波		
疫学研究		なし	
ヒト研究	平成 27～29 年度	ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究	--
動物研究	平成 19～22 年度	ミリ波、準ミリ波電波の眼部ばく露による影響の指針値妥当性の再評価	--
	平成 23～26 年度	眼部への電波ばく露の定量的調査	WHO2010 (新規技術の放射特性等)
	平成 25～27 年度	6GHz 超の周波数帯における局所ばく露時の健康影響閾値の評価	WHO2010 (新規技術の放射特性等)、 SCENIHR2015 (皮膚・角膜への悪影響)
	平成 28～30 年度	超高周波の電波ばく露による眼部等の人体への影響に関する定量的調査 局所吸収指針の拡張のための生物学的根拠に関する調査	SCENIHR2015 (皮膚・角膜への悪影響) --
細胞研究	平成 19～21 年度	ミリ波帯細胞用ばく露装置開発を目的としたミリ波電波の生体電気特性の評価	WHO2006 (HSP 及び DNA 損傷)
	平成 25～27 年度	超高周波の電波ばく露による影響の調査	--

	平成 28～30 年度	テラヘルツ波等における非熱作用の有無に関する調査	--
工学研究	平成 19～21 年度	ミリ波帯細胞用ばく露装置開発を目的としたミリ波電波の生体電気特性の評価	WHO2006 (HSP 及び DNA 損傷)
	平成 19～21 年度	実験に基づく電磁界強度指針の妥当性評価及び確認	--
	平成 23～26 年度	眼部への電波ばく露の定量的調査	WHO2010 (新規技術の放射特性等)
	平成 25～27 年度	6GHz 超の周波数帯における局所ばく露時の健康影響閾値の評価	WHO2010 (新規技術の放射特性等)、SCENIHR2015 (皮膚・角膜への悪影響)
	平成 28～32 年度	次世代電波利用システムからの電波の人体安全性評価技術に関する調査	WHO2003 (組織パラメータ) WHO2010 (新規技術の放射特性等)
	平成 29～32 年度	準ミリ波・ミリ波ばく露時の生体作用の調査	--

また、平成 28 年に生体電磁環境に関する検討会の下に設置された「先進的な無線システムに関するワーキンググループ」では、今後の無線システムの発展動向を踏まえ、表 2-13 に示す今後の研究課題のニーズを挙げている。

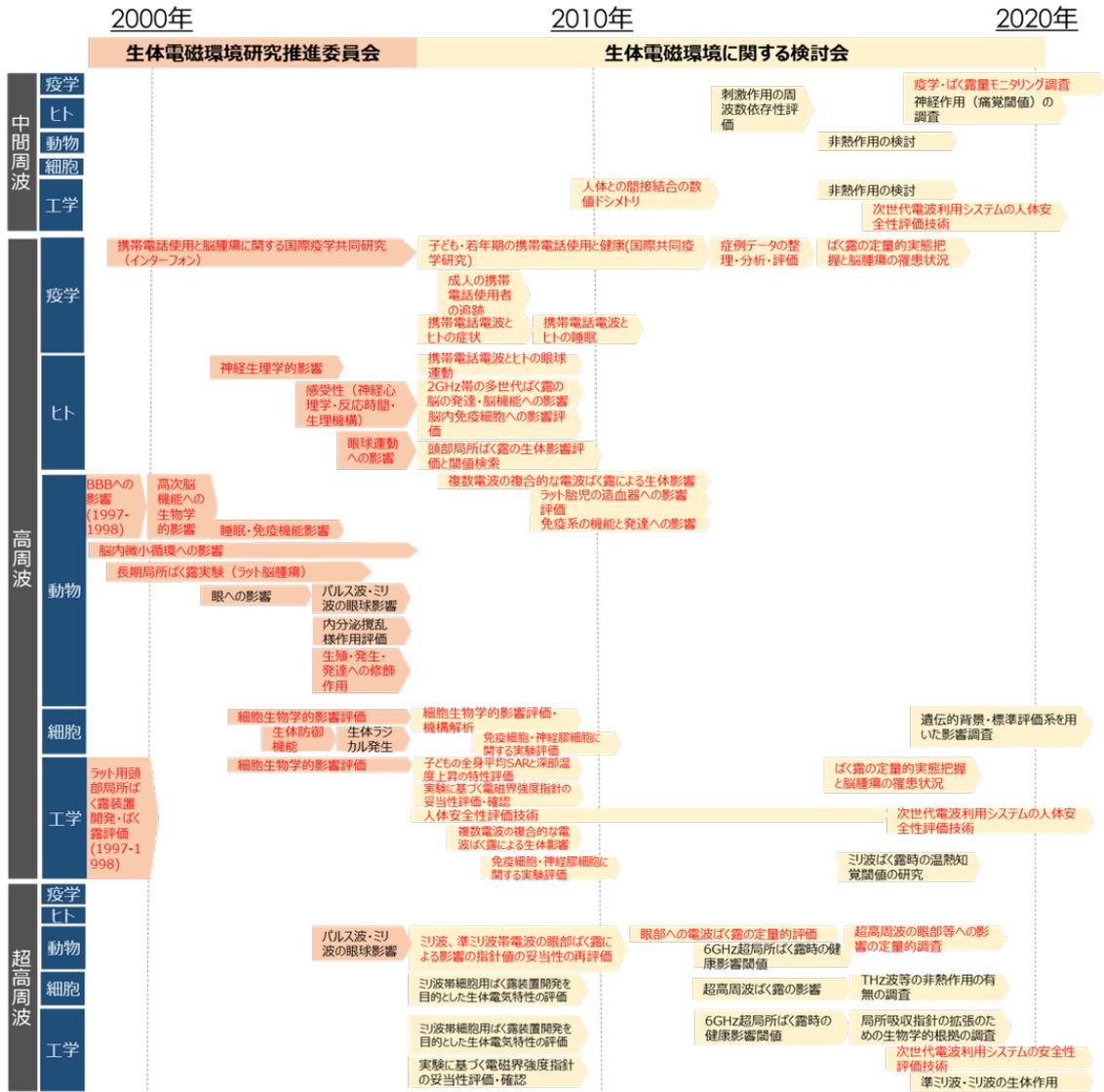
国内における重点研究課題は、これまで医学・生物分野の研究者と工学分野の研究者が密接に連携し、高品質な研究によりリスク評価に貢献してきた。近年では、特に中間周波と超高周波の研究においては、我が国における研究は、最先端のものであり、世界をリードするものとなっている。

図 2-2 に、国内における主な重点研究課題のこれまでの変遷を示す。

表 2-13 今後の研究課題のニーズ

超 高 周 波	中 間 周 波	研究課題名	方法	期待 される 成果 (※)
○	○	1. 電波ばく露における神経作用(痛覚閾値)の調査	ヒト研究	③
○	○	2. パルス電波ばく露に対する生体影響調査研究	動物・ヒト研究	①
○	○	3. 中間周波（特に100kHz帯）における非熱作用の健康リスクに関する調査	細胞・動物	①
○	○	4. 中間周波の痛覚閾値評価	細胞・動物	③
○	○	5. 中間周波不均一電波ばく露の刺激閾値及び行動に与える影響の調査	ヒト研究	①
○	○	6. 高周波・超高周波の複合的な全身電波ばく露に関する年齢及び環境に対する閾値変動の調査	ヒト研究	①
○	○	7. 国際的な環境条件に合致する電波による眼障害閾値検索	動物・ヒト研究	②
○	○	8. 高周波の電波ばく露によるエビジェネティックな変化の検索	細胞	①
○	○	9. マイクロ波聴覚効果の定量的研究	ヒト研究	①
○	○	10. 身の回りの電波環境による電波ばく露の定量化及び健康との関連の調査	疫学	①
○	○	11. 時間要素を考慮した超高周波電波の急性影響探索	細胞・動物	①
○	○	12. 超高周波帯パルス波の生体への作用調査	細胞・動物	③
○	○	13. 5G電波の皮膚電波ばく露の及ぼす生体影響とその反応閾値の実験的評価	細胞・動物	③
○	○	14. 5G電波人体局所電波ばく露に関する年齢及び環境湿度に対する閾値変動の調査	ヒト研究	③
○	○	15. 新しい無線通信等による人体の影響に関する疫学調査	疫学	①
○	○	16. テラヘルツ波電波ばく露による生体への非熱作用に関する調査	細胞・ヒト研究	①
○	○	17. 個人電波ばく露評価用次世代数値人体モデル開発	工学	工学
○	○	18. パルス電波ばく露に対する生体影響評価技術	工学	工学
○	○	19. マイクロ波を利用するワイヤレス電力伝送システムの適合性評価方法に関する研究	工学	工学
○	○	20. 新しい電波ばく露環境に対するリスク調査	工学	工学
○	○	21. 5Gシステムの電波防護指針適合性評価システム	工学	工学

(※) 期待される成果は、①リスク評価に貢献 ②国際ガイドライン改定等に貢献 ③その他（①と②の双方）に分類
 (出典) 生体電磁環境に関する検討会報告書「先進的な無線システムに関する電波防護について」（平成30年3月）を基に一部表現を修正



※赤字はWHO又はSCENIHRが推奨した重点研究課題への対応を示す

図2-2 国内における主な重点研究課題のこれまでの変遷

3 今後の研究の方向性

3-1 基本的な考え方

中長期的なロードマップの策定の基礎となる今後の研究の方向性に関する基本的な考え方を整理する。

まず、全ての周波数領域において共通する最優先すべき今後の研究の方向性は、今後も引き続き適切な電波利用環境を確保していくために、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。）と適合性を確保するとともに、それらの信頼性を向上させることである。

1-1のとおり、電波は、非常に強い強度でばく露された場合には熱作用及び刺激作用が起り得ることが分かっており、リスク評価に関する研究については、それらの確立されている作用の量-反応特性等に基づく電波防護指針の妥当性の確保と、確立されていない作用の健康リスク評価に分類して整理する。確立されている作用の量-反応特性等に基づく電波防護指針の妥当性の確保については、上述の確立されている作用の閾値の不確かさの改善や低減係数の改良等を通じて、電波防護指針の見直しにつなげていくことが求められる。確立されていない作用については、WHO等による包括的な健康リスク評価に必要な研究データを着実に蓄積することが求められる。

リスク管理は、2-1-2のとおり、安全指針値の策定及び適合性評価を目的としており、そのうち、安全指針値の策定のためには、安全指針値の根拠となる確立されている作用に関する人体への電波ばく露量の閾値や、閾値と適切に関連付けられる安全指針値の平均領域・平均時間の定義の検討等が必要となり、適合性評価のためには、信頼性と再現性に優れた評価方法の開発等が必要となる。

また、リスクコミュニケーションに関連する研究としては、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が挙げられる。

リスク評価、リスク管理及びリスクコミュニケーションから構成されるリスク分析を行っていく中で、我が国の強みを活かせる研究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である。

なお、3-2以下の具体的な今後の研究の方向性や4の中長期的な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。

3-2 周波数帯ごとの方向性

3-2-1 中間周波

中間周波については、国外ではほとんど研究が進んでいない。一方で、我が国では、EV用WPT等世界に先駆けて中間周波の新たな無線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、この分野における研究を進展させていくことが重要である。

3-2-2 高周波

高周波については、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、IoTやWPTの普及等の高周波における新たな技術を用いた電波の利用形態の多様化を踏まえ、それらの新たな技術に対応した適合性評価のための研究を進めていくことが重要である。なお、携帯電話等の利用における発がん性との関連等、重要と思われる問題が国際的に提起された課題に対しては、引き続き留意し対応していく必要があると考えられる。

3-2-3 超高周波

超高周波については、他の周波数帯と比べて最も研究が進んでいない状況である。我が国では2020年に超高周波を用いた5Gサービスが開始される予定で、世界に先駆けての普及が想定されており、そのような状況を踏まえ、まずは電波ばく露量計測等の研究に注力しつつ、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である。

3-3 リスク評価に関する研究

リスク評価に関する研究について、疫学研究、ヒト研究、動物研究、細胞研究及び工学研究の研究手法ごとに、中間周波、高周波、超高周波に対応した研究の方向性を示す。

なお、5年程度の比較的短い研究期間で一定の成果が見込まれる研究を「短期スパンで取り組むもの」として、10～20年程度の比較的長い研究期間が必要とされる研究を「中長期スパンで取り組むもの」として整理する。

3-3-1 疫学研究

[概要]

疫学研究は、電波ばく露の確立されている作用（刺激作用及び熱作用）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一般環境又は労働環境が研究対象であることから、確立されていない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となる。

2-1-2①のとおり、疫学研究において、電波ばく露と疾病との関連性を追究する際は、様々なバイアスや交絡因子の影響も配慮しなければならないが、かつ、電波ばく露量やばく露実態をいかに把握して研究を進めていくかが非常に重要であり、今後もその点を十分に配慮した研究を進めていく必要がある。

疫学研究においては、国際共同研究として、ある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、我が国も携帯電話の使用と頭頸部腫瘍に関する大規模な症例対照研究であるインターフォン研究や、若年者において携帯電話の使用と脳腫瘍に関する症例対照研究であるMobiKids研究のプロジェクトに積極的に参画してきている。このことは、我が国の研究結果の国際的な反映のみならず、我が国の電磁環境領域の疫学研究の質の向上に貢献しており、今後も国際共同研究の機会があれば積極的に参画していくべきである。現在、疫学研究においては、欧州諸国でCOSMOS研究と呼ばれる長期の国際コホート研究が実施されており、それに参画することも検討すべき課題の一つである。また、国内のコホート研究に関しては、関係省庁で実施している大規模な疫学調査等の質問票調査において電波の人体に対する安全性に係る項目を設ける等、関係省庁と連携して取り組むことが重要である。さらに、今後は、新規に複数の周波数帯を利用する機器が普及することが予想されるため、これらの機器から発せられる電波をモニタリングして、種々の疫学研究に活用する必要がある。後述するリスクコミュニケーションの研究で得られたモニタリングデータを十分に活用することが求められる。

なお、一般環境よりも強い電波ばく露を受けている労働環境を対象とする研

究の可能性を視野に入れることも必要である。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波については、中間周波を使用する IH 調理器が既に普及しており、妊娠や胎児の発育、その後の発達に関する前向きコホートを一部実施中である。また、1-2-3のとおり、今後、EV 用 WPT 技術の普及、さらなる大電力の伝送が予想されていることを踏まえると、一般環境や労働環境での中間周波の電波ばく露量が飛躍的に増大することが予想され、中長期スパンで取り組むものとして、中間周波の電波ばく露に関する生態学的研究やコホート研究、症例対照研究は、優先的研究課題である。

高周波では、これまでに携帯電話の電波の影響について多くの研究が実施されてきており、特に、症例対照研究については、国内的にも国際的にも多くの研究成果が揃っているため、現時点では、これ以上の研究は不要である。なお、第1世代、第2世代携帯電話の利用者はより強い電波ばく露を受けていたことから、短期スパンで取り組むものとして、これらの利用者のコホート研究の実施が必要である。また、中長期スパンで取り組むものとして、ICT 技術、医療データベース、ビッグデータの進化を考慮し、新たな疫学研究の設計の取組や IoT 等による最新技術を活用した電波ばく露モニタリングが必要である。

超高周波では、短期スパンで取り組むものとして、SCENIHR 報告で推奨されている皮膚や眼部に関しての疫学研究、ビッグデータを利活用した症例対照研究を進める必要がある。また、我が国では超高周波の使用も想定した 5G の導入について 2020 年を目標に作業が進められている。これまで超高周波に関しての疫学的知見はほとんど無いことを踏まえると、中長期スパンで取り組むものとして、5G での利用周波数を中心に生態学的研究、症例対照研究、コホート研究を推進すべきである。

なお、コホート研究は、幅広い周波数の電波ばく露について追究できることから、WPT、IoT、5G 等に用いられる周波数を含め、周波数横断的に実施すべきである。

[まとめ]

以上を踏まえた疫学研究の今後の方向性は表 3-1-1、取り組むべき疫学研究は表 3-1-2~4 のとおりである。

表3-1-1 疫学研究の今後の方向性

	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	○	△※	○

- ◎ : 日本で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

※ 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

表 3-1-1-2 取り組むべき疫学研究（中間周波）

確立されていない作用（刺激／熱作用以外）	
短期スパン （5年程 度）で取り 組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 低レベル・長期間の電波ばく露による発がんや神経変性疾患への影響の検討が必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ がんを含む疾病との関連についての症例対照研究 ◆ 神経変性疾患に関する疫学研究
中間周波	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ EVの爆発的増加及びその充電に使用されるWPTの普及等に伴う、一般公衆の中間周波への電波ばく露機会の増加 ◆ 刺激作用閾値以下の長期電波ばく露の影響の科学的データの収集が必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 中間周波の電波ばく露に関する生態学的研究 ◆ WPT・IoT・5G等新しい電波利用に伴う幅広い周波数の電波ばく露に着目した前向きコホート研究

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表 3-1-1-3 取り組みべき疫学研究（高周波）

高周波		確立されていない作用（熱作用以外）
短期スパン （5年程 度）で取り 組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 第1世代、第2世代は最近の端末に比べ電波ばく露量が格段に大きく、発がんのような晩発性のリスクについて検討が必要 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 第1世代、第2世代携帯電話システム利用者の晩発性疾患に関する研究 	
中長期スパン （10-20 年程度）で 取り組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ ICT技術、医療データベース、ビッグデータの進化を考慮し、新たな疫学研究の設計に取り組むことが必要 ◆ IoT等による最新技術を活用した電波ばく露モニタリングが必要 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 様々なデータの利活用による生態学的研究 ◆ WPT・IoT・5G等新しい電波利用に伴う幅広い周波数の電波ばく露に着目した前向きコホート研究 	

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表3-1-4 取り組むべき疫学研究（超高周波）

確立されていない作用（熱作用以外）	
短期スパン （5年程 度）で取り 組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ SCENIHR報告では、皮膚や眼部に関しての疫学研究を推奨 ◆ ビッグデータ（医療データベース、がん登録データベース等を含む）を活用した研究が可能になれば、それらデータを利 用した研究が必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 皮膚や眼部に関しての疫学研究 ◆ ビッグデータ等を活用した、がんに関する症例対照研究
中長期スパン （10-20 年程度）で 取り組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 5Gの導入によって生活環境中の電磁環境が大きく変化するため、健康影響の有無を幅広くモニタリングすることが 必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ WPT・IoT・5G等新しい電波利用に伴う幅広い周波数の電波ばく露に着目した前向きコホート研究

超高周波

※太字は早期に研究を開始すべき課題

3-3-2 ヒト研究

[概要]

ヒト研究については、我が国では、これまで眼球運動や睡眠脳波に関する研究及び電波の認知と症状に関する研究を高周波で行っている。また現在、中間周波及び超高周波の痛覚閾値の研究を実施しており、今後、更に詳細なデータを収集し、電波防護指針に反映させる必要がある。なお、ヒト研究で確立されていない作用を示唆する国外のヒト研究の結果が報告されているが、脳波の生理的変動内での変化と健康への直接的な関連が不明確なものであること及び子ども等を対象としたヒト研究は国内では困難であることという状況を踏まえ、ヒト研究に関する今後の方向性には確立されていない作用に関する研究課題は含めていない。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波では、今後 WPT 等での利用の増加が予想されることから、短期スパンで取り組むものとして、刺激作用の閾値の調査、接触電流の調査等について実測とシミュレーション技術を用いた研究を比較的早い段階で行うべきである。また、WPT 技術の走行中給電への応用等、中間周波を用いた新たな技術応用が具体化する可能性もあるため、中長期スパンで取り組むものとして、そのような技術が用いる周波数帯の刺激作用についての検討も必要である。また、中間周波数では熱作用及び刺激作用が共存する周波数帯があり、短期スパンで取り組むものとして、その領域の閾値の定義を明確化する研究が求められる。

高周波では、熱作用に関する課題として、ヒトの年齢又は環境による反応性の違いについての検討が不十分であることから、短期スパンで取り組むものとして、全身及び局所の電波ばく露に関する年齢及び環境に対する温熱閾値変動の研究が必要である。また、短期スパンで取り組むものとして、マイクロ波聴覚効果の定量的研究を行うことが求められる。

超高周波では、ミリ波帯の温熱感覚及び痛覚に関する研究、パルス波（秒単位の短い時間の電波ばく露）に関する研究が不十分であり、科学的知見が乏しいため、短期スパンで取り組むものとして、電波防護指針を根拠のある内容に発展的に改定する基礎データとしての研究が必要である。一方、5G の利用が始まって当面は 1 台の端末で 4G との併用が予想されることから、短期スパンで取り組むものとして、高周波と超高周波の共存下での複合的な電波ばく露の実施についても検討が必要である。また現在、利用方法が限定的なテラヘルツ波についても、温熱生理応答は未知な点が多く、中長期スパンで取り組むもの

として検討が必要である。

[まとめ]

以上を踏まえたヒト研究の今後の方向性は表 3-2-1、取り組むべきヒト研究は表 3-2-2～4 のとおりである。

表3-2-1 ヒト研究の今後の方向性

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

◎ : 日本で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

表 3-2-2 取り組みべきヒト研究（中間周波）

確立されている作用（刺激／熱作用）	
短期スパン (5年程度)で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 国際ガイドラインの科学的根拠を与える、刺激作用の検討が必要 ◆ 接触電流を原因とする温感・熱感・熱痛等の痛覚等人体の刺激作用に関する科学的データの欠落 ◆ 熱作用と刺激作用が共存する周波数帯での閾値の定義を明らかにする必要 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 刺激作用の閾値の調査、接触電流の調査等について実測とシミュレーション技術を用いた研究 ◆ 中間周波の熱・刺激の両作用を考慮した閾値に関する研究
中長期スパン (10-20年程度)で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 新たな中間周波システムによる刺激作用の防護 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 新たなシステムの電波ばく露形態を対象とした刺激作用の研究

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表 3-2-3 取り組みべきヒト研究（高周波）

確立されている作用（熱作用）	
高周波	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 体温等の生理指標は年齢及び環境に対して変動が大きいため、現在の低減係数の設定が不十分 ◆ マイクロ波聴覚効果の知覚特性についての知見がなく、科学的根拠が必要 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 高周波の全身及び局所電波ばく露に関する年齢及び環境に対する温熱閾値変動の研究 ◆ マイクロ波聴覚効果についての定量的研究
短期スパン （5年程度）で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点では取り組みべき課題はない <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組みべき研究が生じる可能性もある
中長期スパン （10-20年程度）で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点では取り組みべき課題はない <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組みべき研究が生じる可能性もある

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表3-2-4 取り組むべきヒト研究（超高周波）

確立されている作用（熱作用）	
短期スパン （5年程 度）で取り 組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ ミリ波帯における熱痛は研究が僅かであるため、今後の電波の適正な利用の妨げになる可能性 ◆ 超高周波（5Gを想定）と高周波の複合的な電波ばく露による温感（熱感）に関してデータが不十分 ◆ パルス電波ばく露（秒単位の電波ばく露）による生体への影響及び閾値に関するデータが不十分 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 超高周波の電波ばく露と温熱感覚・痛覚の閾値に関する研究 ◆ 高周波と超高周波の複合的なばく露の生理応答に関する研究 ◆ パルス電波ばく露による熱作用に関する研究
中長期スパン （10-20 年程度）で 取り組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ テラヘルツ波電波ばく露による温感を定義し電波防護指針の改定のための基礎データとすることが必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ テラヘルツ波電波ばく露の熱作用に関する研究
超高周波	

※太字は早期に研究を開始すべき課題

3-3-3 動物研究

[概要]

動物研究については、我が国ではこれまで、発がん性に対する長期的な局所の電波ばく露実験や複数の周波数の電波による複合的な電波ばく露の生体への影響、脳の発達及び機能、脳の血液循環、血液脳関門、記憶学習、内分泌攪乱様作用、免疫系等への影響に関する研究を高周波で、電磁界における非熱作用の検討を中間周波で行っている。また現在、超高周波の電波ばく露による眼部等の人体への影響に関する定量的評価を実施しており、今後、更に詳細なデータを収集し、リスク評価に寄与するとともに、電波防護指針に反映させる必要がある。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波では、これまでビデオディスプレイ、IH調理器から発生する磁界を想定したいくつかの研究が実施されているが、周波数も波形も非常に限定された研究であり、今後、EV用WPTの普及を想定すると、短期スパンで取り組むものとして、強い磁界での痛覚の閾値に関する研究を進める必要がある。

中間周波における確立されていない作用による影響については、国際的に合意の取れた実験手法の確立と、その手法に基づく研究が必要であり、化学物質のOECDテストガイドライン³⁷を参考に、電波ばく露の形態や強さ、エンドポイントとしての評価項目を明確にして中長期的に研究を進めることが望ましい。また、パルス波の影響については、電波ばく露の時間平均の概念で安全性評価をすることは困難であるため確立した作用の研究として、刺激作用等の検討を短期スパンで取り組む必要がある。さらには、中間周波同士又は他の高周波との複合的な電波ばく露に関する確立されていない作用についても検討する必要がある。

高周波では、これまでに国内外で多くの研究が実施されてきており、確立されていない熱作用以外の作用（非熱作用）については様々な議論が見られるが、概ね確定された影響はないと認識されている。一方で、2018年2月にNTPの長期発がん性試験の結果（一部の試験において心臓の神経鞘腫等が有意に増加）が公表され、その内容に注目が集まっているため、短期スパンで取り組むものとして、NTPの研究結果に関する確認研究を国際的な枠組みで実施する必要がある。また、諸外国で実施されている神経疾患との関係を明らかにする研究も、

³⁷経済協力開発機構（Organisation for Economic Co-operation and Development : OECD）が定めた、化学物質やその混合物の物理化学的性質、生態系への影響、生物分解及び生物濃縮、ならびにヒト健康影響等に関する知見を得るための国際的に合意された試験方法

短期スパンで取り組むものとして行う必要がある。

超高周波においては、特に 5G で使用される周波数帯の一部 (28GHz) 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について、短期スパンで取り組むものとして、高い優先度で実施されるべきである。熱作用に関しては、短期スパンで取り組むものとして 300GHz まで、将来的には 3THz までの温熱への反応閾値の研究、特に皮膚での温熱閾値やさまざまな実環境を想定した眼障害閾値に関する研究が必要である。また、非熱作用に関しては、短期スパンで取り組むものとして 300GHz まで、将来的には 3THz までの電波ばく露の影響を追究する必要があり、その際には、国際的に合意が取れた実験手法を確立して、その手法に基づく研究を行うことが推奨される。

[まとめ]

以上を踏まえた動物研究の今後の方向性は表 3-3-1、取り組むべき動物研究は表 3-3-2~4 のとおりである。

表 3-3-1 動物研究の今後の方向性

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

- ◎：日本で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

表 3-3-2 取り組むべき動物研究（中間周波）

中間周波	
短期スパン (5年程度)で取り組むもの	<p style="text-align: center;">確立されている作用（刺激／熱作用）</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現在の国際ガイドラインは刺激作用のシミュレーション結果に基づくものであり、実測データとの整合性が必要 ◆ パルス波（秒単位の電波ばく露）の影響について、時間平均の概念で安全性評価をすることが困難 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 中間周波の痛覚閾値の研究 ◆ パルス電波ばく露に対する生体影響の研究
中長期スパン（10-20年程度）で取り組むもの	<p style="text-align: center;">確立されていない作用（刺激／熱作用以外）</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 健康影響の新たなマーカーや評価手法が開発された際には電波の評価系に取り入れることが必要 ◆ 健康リスク評価に資する研究の結果の一部に不一致が存在。リスク評価を行うために標準的な、例えば化学物質の標準毒性試験法のような評価手法の仕組み作りが必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 新たな評価システムに基づく健康リスクに関する研究 ◆ 確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化
	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 電波ばく露影響に関する標準的評価手法に基づく研究が十分 ◆ 複数周波数の電波ばく露状況を考慮した評価も必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 標準化手法に基づく中間周波の電波ばく露の影響に関する研究 ◆ 中間周波同士及び中間周波と他の高周波の複合的な電波ばく露による確立されていない作用の研究

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表 3-3-3 取り組みべき動物研究（高周波）

高周波		確立されている作用（熱作用）	確立されていない作用（熱作用以外）
短期スパン （5年程度）で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組みべき課題はない <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組みべき研究が生じる可能性もある 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ NTP研究のような（一部）陽性研究に対して、結果を確認する研究が必要 ◆ 諸外国では、神経疾患と電波ばく露との関係についての研究があり、重要な課題 ◆ 健康リスク評価に資する研究の結果の一部に不一致が存在。リスク評価を行うため標準的な、例えば化学物質の標準毒性試験法のような評価手法の仕組み作りが必要 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ NTP研究の確認研究 ◆ 神経疾患モデル動物を用いた電波ばく露による影響に関する研究 ◆ 確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化 	
中長期スパン （10-20年程度）で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組みべき課題はない <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。今後の研究動向等により取り組みべき研究が生じる可能性もある 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 電波ばく露影響に関する標準的評価手法に基づく研究が十分 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 標準化手法に基づく高周波の電波ばく露の影響に関する研究 	

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表 3-3-4 取り組むべき動物研究（超高周波）

	<p>確立されている作用（熱作用）</p>	<p>確立されていない作用（熱作用以外）</p>
<p>短期スパン （5年程 度）で取り 組むもの</p>	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 超高周波の生体影響に関する知見、特に皮膚における炎症発生の閾値の明確化、かつ国際ガイドラインに示される平均化時間の科学的根拠の明確化が必要 ◆ 環境条件を考慮した熱作用による影響評価が必要 ◆ 技術進展に伴い、さらに高い周波数（～300GHz）による通信端末の利用を想定した熱作用の検討が必要 ◆ 今後利用される可能性のある電波利用技術への対応（～3THz） <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 皮膚への電波ばく露の影響とその反応閾値の研究 ◆ 実環境であり得る環境条件を考慮した電波による眼障害閾値に関する研究 ◆ 高い周波数（～300GHz）による熱作用の反応閾値に関する研究 ◆ 今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の熱作用の反応閾値に関する研究 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 技術進展に伴い、さらに高い周波数（～300GHz）による通信端末の利用を想定した非熱作用を検討すべき ◆ 今後利用される可能性のある電波利用技術への対応（～3THz） ◆ 健康リスク評価に資する研究の結果の一部に不一致が存在。リスク評価を行うために標準的な、例えば化学物質の標準毒性試験法のような評価手法の仕組み作りが必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 高い周波数（～300GHz）による非熱作用に関する研究 ◆ 今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の非熱作用に関する研究 ◆ 確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化
<p>中長期スパン （10-20 年程度）で 取り組むもの</p>	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組むべき課題はない <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組むべき研究が生じる可能性もある 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 電波ばく露影響に関する標準的評価手法に基づく研究が十分 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 標準化手法に基づき超高周波の電波ばく露の影響に関する研究

※太字は早期に研究を開始すべき課題

3-3-4 細胞研究

[概要]

細胞研究に関しては、これまで高周波を対象として国内外で多くの実験研究が実施され、既に高周波ではリスク評価のための十分なデータが得られている。一方で、中間周波と超高周波については研究例が少なく、多くの研究が必要とされており、健康リスク評価のための科学的根拠の一部となる研究について、中間周波及び超高周波を主たる対象として重点的に進めていくことが推奨される。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波における確立されている作用に関する研究では、短期スパンで取り組むものとして、神経系細胞に対する刺激作用の応答閾値を評価する研究の実施によるリスク評価を補う研究及び強いパルス電波ばく露の細胞への影響についての研究を実施し、科学的根拠を蓄積することが重要である。また、中間周波では、確立されていない作用に関する研究も必要であり、短期スパンで取り組むものとして、末梢神経系及び中枢神経系の細胞研究が必要であるととも、確立されていない作用に対する毒性影響評価については国際的な合意を得た研究手法の標準化を行う必要がある。また、中長期スパンで取り組むものとして、先に標準化された研究手法を用いた電波ばく露の影響評価を行う必要がある。この標準化手法は化学物質の安全性評価等を参考にしつつ、動物研究と細胞研究のいくつかの研究手法を組み合わせ、それぞれの研究結果から総合的な評価を行うことが考えられる。細胞での評価系は、例えば動物の中長期試験と比較すると短期スパンで評価ができるため、精度の確保のため十分な繰り返し実験を行うとしても、工学研究において電波ばく露条件が確立し、電波ばく露を実現する装置が開発されれば、必要な周波数帯域をカバーしつつ、動物研究と比較して短期スパンで評価することが可能であると考えられる。一方、将来的に、細胞を用いた新たな健康リスク評価手法が確立した場合には、それらの手法を適用し、中間周波の評価を行う必要がある。

高周波に関して必要な研究としては、神経変性疾患との関連性を検討する研究、エピジェネティック（遺伝子の後天的な修飾等）な変化の検索と発がん性を検討する研究等が挙げられるが、前述のとおり、高周波に関する研究の優先度は低い。

超高周波では、確立されている作用に関する閾値の明確化のために、短期スパンで取り組むものとして、SCENIHR で実施が推奨されている高強度・短時間

の電波ばく露による培養ヒト角膜上皮細胞を用いた研究が必要である。また、確立されていない作用に関して短期スパンで取り組むものとして、SCENIHR で実施が推奨されている皮膚組織を構築する 3 次元 (3D) インビトロモデルに対して、低強度・長時間の電波ばく露を行った際の非熱作用の有無の検討が必要である。さらに、確立されていない作用に関して中長期スパンで取り組むものとして、これまで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、リスク評価の科学的根拠として、国際的に合意形成された実験手法の標準化とその手法に基づいた研究が非常に重要であり、推進すべきである。超高周波のうちテラヘルツ波は、現状では技術応用が限られているが、今後 10 年単位で考えると利用が進む可能性もあるため、短期スパンで取り組むものとして、テラヘルツ波の熱作用、非熱作用に関する研究も考慮する必要がある。

[まとめ]

以上を踏まえた細胞研究の今後の方向性は表 3-4-1、取り組むべき細胞研究は表 3-4-2~4 のとおりである。

表 3-4-1 細胞研究の今後の方向性

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

- ◎ : 日本で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電波はく露レベルによる研究
 ※2 上記の刺激作用・熱作用の起こる電波はく露レベル以下で、遺伝毒性、非遺伝毒性、遺伝子発現等に関する研究

表 3-4-2 取り組むべき細胞研究（中間周波）

中間周波	確立されている作用（刺激／熱作用）	確立されていない作用（刺激／熱作用以外）
<p>短期又は （5年程 度）で取り 組むもの</p>	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 神経系への影響を細胞研究で実施することで、リスク評価を補うことが必要 ◆ 神経細胞単位での刺激応答の閾値を実験的に明らかにしシミュレーションの結果の妥当性を判定 ◆ パルス波（秒単位の電波ばく露）の影響について、時間平均の概念で安全性評価をすることが困難 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 神経細胞の応答閾値に関する研究 ◆ パルス電波ばく露による細胞影響に関する研究 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 神経細胞単位での影響で細胞への影響を明らかにする研究が必要（細胞単位でのドシメトリも含む） ◆ エピジェネティクス、がん幹細胞等新たなメカニズムに基づく発がんを調べる方法により発がんについての検討が必要 ◆ 健康リスク評価に資する研究の結果の一部に不一致が存在。リスク評価を行うために標準的な、例えば化学物質の標準毒性試験法のような評価手法の仕組み作りが必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 末梢神経系及び中枢神経系の細胞レベルでの確立されていない作用に関する研究 ◆ 新たな評価システムに基づく電波ばく露の影響に関する研究 ◆ 確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化
<p>中長期スパン （10-20 年程度）で 取り組むもの</p>	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組むべき課題はない <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組むべき研究が生じる可能性もある 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 電波ばく露影響に関する標準的評価手法に基づく研究が十分 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 標準化手法に基づく中間周波の電波ばく露の影響に関する研究

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表3-4-3 取り組むべき細胞研究（高周波）

	確立されている作用（熱作用）	確立されていない作用（熱作用以外）
高周波	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組むべき課題はない <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組むべき研究が生じる可能性もある 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 諸外国において、神経変性疾患についての動物研究の報告が行われており、細胞レベルでも研究することが必要 ◆ 電波によりエピジェネティックな変化が起きている可能性を念のため、研究として検討 ◆ 技術革新により高感度で影響を検知可能な新たな実験系が開発され、それを生体電磁環境研究に応用 ◆ 健康リスク評価に資する研究の結果の一部に不一致が存在。リスク評価を行うために標準的な、例えば化学物質の標準毒性試験法のような評価手法の仕組み作りが必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 神経変性疾患に関連した遺伝子レベルでの非熱作用に関する研究 ◆ エピジェネティックな変化の検索と発がんプロセスへの非熱作用に関する研究 ◆ 新たな実験系による電波の非熱作用に関する研究 ◆ 確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化
中長期スパン（5年程度）で取り組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組むべき課題はない <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組むべき研究が生じる可能性もある 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 電波ばく露影響に関する標準的評価手法に基づく研究が十分 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 標準化手法に基づく高周波の電波ばく露の影響に関する研究
中長期スパン（10-20年程度）で取り組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組むべき課題はない <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組むべき研究が生じる可能性もある 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組むべき課題はない <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組むべき研究が生じる可能性もある

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表3-4-4 取り組むべき細胞研究（超高周波）

超高周波	
<p>短期スパン (5年程 度)で取り 組むもの</p>	<p>確立されている作用（熱作用）</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ SCENIHR報告書では高強度・短時間電波ばく露による角膜への影響研究を推奨 ◆ 現在想定されていない電波利用技術への対応（～3THz） <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 高強度・短時間の電波ばく露に関する角膜細胞等を用いた熱作用に関する研究 ◆ 今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の熱作用の反応閾値に関する研究
<p>確立されていない作用（熱作用以外）</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ SCENIHRでは低レベル・長期の電波ばく露による皮膚への影響について研究を推奨 ◆ エピジェネティクスの影響分析が必要 ◆ 現在想定されていない電波利用技術への対応（～3THz） ◆ 健康リスク評価に資する研究の一部に不一致が存在。リスク評価を行うために標準的な、例えば化学物質の標準毒性試験法のような評価手法の仕組み作りが必要 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 低強度・長時間の電波ばく露に関する3D皮膚組織モデル等を用いた非熱作用に関する研究 ◆ 5G周波数を用いたエピジェネティクスの研究 ◆ 今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の非熱作用に関する研究 ◆ 確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 現時点で取り組むべき課題はない <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 該当なし。ただし、今後の研究動向等により取り組むべき研究が生じる可能性もある
<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 電波ばく露影響に関する標準的評価手法に基づく研究が十分 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 標準化手法に基づく超高周波の電波ばく露の影響に関する研究 	<p>※太字は早期に研究を開始すべき課題</p>

3-3-5 工学研究

[概要]

2-1-1⑤のとおり、リスク評価に関する医学・生物研究を進める上では、被験者、実験動物及び培養細胞に対する所望のレベルの電波ばく露を実現するための電波ばく露装置の開発と電波ばく露量の正確な評価といった工学研究が必要である。近年、大規模計算機能力の向上を背景とした有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time-Domain : FDTD 法) 等を用いた大規模電磁界数値シミュレーションにより、生体内部の電波ばく露量を評価することができるようになってきていることから、数値シミュレーションによる電波ばく露評価の正確性及び信頼性の向上のために、数値人体モデルや電気定数データベースの改良が必要である。

ただし、数値シミュレーションでは、解剖学的な構造を考慮した詳細な評価が可能である反面、実際の電波ばく露の放射源となる携帯電話端末等に内蔵されているアンテナや給電回路基板等の微細構造を忠実に考慮した評価は困難であるため、比較的単純な構造の電波放射源 (アンテナ) を用いたシミュレーションが行われていることから、数値シミュレーションによる評価の妥当性を検証するために、実際の電波ばく露放射源を用いた実験的な電波ばく露評価も必要である。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波では、確立されている作用 (特に刺激作用) のデータが十分でないため、安全指針値の信頼性及び有効性を向上させるための研究が必要である。具体的には、人体への電波ばく露量評価技術に関する研究として、「生体組織の電気定数の不確かさ改善」等が挙げられる。また、医学・生物研究のための電波ばく露装置開発及び電波ばく露評価に関する研究として、「接触電流刺激作用評価実験用の電波ばく露装置の開発と電波ばく露評価」等が挙げられる。

中間周波では、確立されていない作用についてのデータも不足しており、医学・生物研究のための電波ばく露装置開発及び電波ばく露評価が必要であり、また、標準化された毒性試験のための電波ばく露条件及び電波ばく露装置の開発のための検討や複数の周波数による複合的な電波ばく露の影響評価用の電波ばく露装置の開発のための検討が必要である。

上記を含む中間周波の課題のうち、「神経ネットワーク数値人体モデルの開発・改良」、「神経ネットワーク数値人体モデルを用いた刺激作用の多様性 (年齢・性別・部位等) についてのシミュレーション検討」及び「神経ネットワーク数値人体モデルを用いた時間変動波形の刺激閾値特性の検討」については、神経回路モデルと電磁界解析用数値人体モデルの連携という新たな評価手法

を開発するものである。「新たなシステムの電波ばく露形態を対象とした刺激作用のヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良」及び「複合的な電波ばく露評価試験のための電波ばく露条件検討と電波ばく露装置の開発・改良」については、従来とは異なる電波ばく露装置の開発となる可能性がある。「研究手法の標準化のための電波ばく露条件の確立」及び「標準化手法に基づく試験の電波ばく露装置の開発・改良」については、網羅的な検討を踏まえた上で標準的な電波ばく露条件の確立等の作業が必要である。「疫学研究のための電波ばく露評価手法の改良及び不確かさ評価」については、長期間の疫学研究のデータ取得や解析が必要である。以上のことから、これらの課題については、それぞれ中長期スパンで取り組む必要がある。

高周波では、確立されている作用（熱作用）のデータについては、携帯電話システム等の周波数を中心に十分に蓄積されてきている一方で、近年は、先進無線通信及びマイクロ波 WPT におけるビームフォーミング及び人体検知機能の導入により、比較的短時間に高強度の電波が人体の一部に照射される状況が予想されているため、熱作用に基づく安全指針値の信頼性及び有効性の向上が必要となっている。医学・生物研究のための電波ばく露装置の開発及び電波ばく露評価に関する研究として、「短時間、局所の電波ばく露による熱作用閾値評価のための電波ばく露装置の開発・改良」等が挙げられる。

高周波では、確立されていない作用についても携帯電話を対象に膨大な医学・生物研究データが蓄積されている一方で、IARC による発がん性評価の根拠となっている国際疫学調査における長時間の携帯電話の使用と脳腫瘍のリスク上昇との関連についての限定的な証拠や、NTP の研究における一部陽性報告への対応が必要となっており、また将来的には、高周波における新たな電波放射源として、IoT デバイスからの電波ばく露を想定した医学・生物研究のための工学研究、より信頼性の高い「研究手法の標準化のための電波ばく露条件の確立」、「標準化手法に基づく試験の電波ばく露装置の開発・改良」のための工学研究、複合的な電波ばく露評価試験のための工学研究が必要である。これらの検討に必要な医学・生物研究のための電波ばく露装置開発及び電波ばく露評価に関する研究として、「NTP 研究のフォローアップ（電波ばく露装置の不確かさ評価及び電波ばく露装置の改良）」等が挙げられる。

上記を含む高周波の課題のうち、「全身加熱・局所加熱評価モデルの開発・改良」については、電磁界解析と温熱生理シミュレーションの高精度な連携が必要であり、新たな手法開発を含むものである。「研究手法の標準化のための電波ばく露条件の確立」及び「標準化手法に基づく試験の電波ばく露装置の開発・改良」については、網羅的な検討を踏まえた上で標準的な電波ばく露条件

の確立等の作業が必要である。「IoT 電波ばく露環境（長期・低レベル・複数波源・複数周波数等）を想定した医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良」及び「複合的な電波ばく露評価試験のための電波ばく露条件検討と電波ばく露装置の開発・改良」については、従来とは異なる電波ばく露装置の開発となる可能性がある。以上のことから、これらの課題については、それぞれ中長期スパンで取り組む必要がある。

超高周波では、確立されている作用（熱作用）のデータが十分でないため、安全指針値の信頼性及び妥当性を向上させるための工学研究が必要である。また、将来的には、300GHz以上のテラヘルツ波を利用した電波システムに対する検討も必要である。具体的には、人体への電波ばく露量評価技術に関する研究として、「生体組織の電気定数の不確かさ改善」等が挙げられる。さらに、医学・生物研究のための電波ばく露装置開発及び電波ばく露評価に関する研究として、「熱知覚モデルの開発・改良」等が挙げられる。

超高周波では、確立されていない作用についてのデータも不足しており、リスク評価に必要な医学・生物研究のための電波ばく露装置の開発及び電波ばく露評価が必要であり、特に、5Gの導入スケジュールを考慮し、喫緊の課題として検討を進めるべきである。また、標準化された毒性試験のための電波ばく露条件及び電波ばく露装置の開発のための検討や複数の周波数による複合的な電波ばく露の影響評価用の電波ばく露装置の開発のための検討が必要である。これらの検討に必要な研究課題として、「5Gによる超高周波の電波ばく露条件を想定した医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良」等が挙げられる。

上記を含む超高周波の課題のうち、「熱知覚モデルの開発・改良」及び「熱知覚モデルを用いた熱知覚閾値特性の多様性解明」については、熱知覚という新たな評価モデルを開発し活用するものである。「テラヘルツ波電波ばく露評価方法（計算・測定）の開発・改良」については、計測装置等の開発動向を踏まえる必要がある。「最新の評価技術を用いた、パルス電波ばく露に対する熱作用のヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良」については、対応するヒト研究のスケジュールに合わせる必要がある。「研究手法の標準化のための電波ばく露条件の確立」及び「標準化手法に基づく試験の電波ばく露装置の開発・改良」については、網羅的な検討を踏まえた上で標準的な電波ばく露条件の確立等の作業が必要である。「5G/IoT 電波ばく露環境（長期・低レベル・複数波源・複数周波数等）を想定した医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良」及び「複合的な電波ばく露評価試験のための電波ばく露条件検討と電波ばく露装置の開発・改良」については、従来とは異なる電波ばく露装置の開発

となる可能性がある。以上のことから、これらの課題については、それぞれ中長期スパンで取り組む必要がある。

[まとめ]

以上を踏まえた工学研究の今後の方向性は表 3-5-1、取り組むべき工学研究は表 3-5-2～4 のとおりである。

表 3-5-1 工学研究の今後の方向性

	中間周波	高周波	超高周波
人体への電波ばく露量 評価技術	◎	△	◎
医学・生物研究のため の電波ばく露装置開発 及び電波ばく露評価	◎	△※	◎

- ◎：日本で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

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

表 3-5-2 取り組みべき工学研究（中間周波）

中間周波	確立されている作用（刺激/熱作用）	確立されていない作用（刺激/熱作用以外）
短期スパン (5年程度)で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性向上 ◆ 接触電流の安全指針値の信頼性・有効性向上 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 生体組織の電気定数の不確かさ改善 ◆ 数値人体モデルの改良（細胞膜等価回路モデル等） ◆ 神経刺激閾値評価モデルの開発・改良 ◆ 接触電流刺激作用評価実験用の電波ばく露装置の開発と電波ばく露評価 ◆ 電波ばく露における神経作用（痛覚閾値）のヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 中間周波の熱作用・刺激作用の両作用を考慮した閾値に関するヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 中間周波の刺激作用閾値評価に関する動物・細胞研究のための電波ばく露装置の開発・改良（ただし、継続的に実施） 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 医学・生物実験の信頼性向上 ◆ 疫学データの欠落 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良（ただし、継続的に実施） ◆ 疫学研究のための電波ばく露評価手法の開発
中長期スパン (10-20年程度)で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性向上 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 神経ネットワーク数値人体モデルの開発・改良 ◆ 神経ネットワーク数値人体モデルを用いた刺激作用の多様性（年齢・性別・部位等）についてのシミュレーション検討 ◆ 神経ネットワーク数値人体モデルを用いた時間変動波形の刺激閾値特性の検討 ◆ 新たなシステムの電波ばく露形態を対象とした刺激作用のヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 影響評価試験の標準化 ◆ 複合的な電波ばく露の影響評価 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 研究手法の標準化のための電波ばく露条件の確立 ◆ 標準化手法に基づく試験の電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 複合的な電波ばく露評価試験のための電波ばく露条件検討と電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 疫学研究のための電波ばく露評価手法の改良及び不確かさ評価

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表 3-5-3 取り組みべき工学研究（高周波）

高周波	確立されている作用（熱作用）	確立されていない作用（熱作用以外）
<p>短期スパン (5年程) 度)で取り 組むもの</p>	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 先進無線通信・マイクロ波WPTにおけるビームフォーミング・人体検知機能の導入 ◆ マイクロ波聴覚効果（熱弾性波）の定量的理解の不足 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 短時間、局所の電波ばく露による熱作用閾値評価のための電波ばく露装置の開発・改良 ◆ マイクロ波聴覚効果シミュレーション手法及び電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 高周波の全身及び局所電波ばく露に関する年齢及び環境に対する熱作用閾値変動のヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ IARCによる発がん性評価（限定的証拠） ◆ NTP研究における一部陽性報告 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ インターフォン疫学研究のフォローアップ（電波ばく露評価の不確かさ評価） ◆ NTP研究のフォローアップ（電波ばく露装置の不確かさ評価及び電波ばく露装置の改良） ◆ 神経疾患モデル動物による電波ばく露による影響の評価のため電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 高周波における細胞研究用電波ばく露装置の開発・改良（ただし、継続的に実施）
<p>中長期スパン (10-20 年程度)で 取り組むもの</p>	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性向上 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 全身加熱・局所加熱評価モデルの開発・改良 ◆ 全身加熱・局所加熱の閾値特性の詳細評価 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ IoTの普及・拡大 ◆ 影響評価試験の標準化 ◆ 複合的な電波ばく露の影響評価 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ IoT電波ばく露環境（長期・低レベル・複数波源・複数周波数等）を想定した医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 研究手法の標準化のための電波ばく露条件の確立 ◆ 標準化手法に基づく試験の電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 複合的な電波ばく露評価試験のための電波ばく露条件検討と電波ばく露装置の開発・改良

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表3-5-4 取り組みべき工学研究（超高周波）

超高周波	短期スパン (5年程度)で取り組みもの	確立されている作用（熱作用）	確立されていない作用（熱作用以外）
中長期スパン（10-20年程度）で取り組みもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性向上 ◆ テラヘルツ波利用システムの導入・普及 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 熱知覚モデルの開発・改良 ◆ 熱知覚モデルを用いた熱知覚閾値特性の多様性解明 ◆ テラヘルツ波生体組織電気定数データベースの構築 ◆ テラヘルツ波評価用人体モデルの開発・改良 ◆ テラヘルツ波電波ばく露評価方法（計算・測定）の開発・改良 ◆ 最新の評価技術を用いた、パルス電波ばく露に対する熱作用のヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良 ◆ テラヘルツ波電波ばく露の熱作用のヒト研究のための電波ばく露装置の開発・改良 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 5G/IoTの普及・拡大 ◆ 影響評価試験の標準化 ◆ 複合的な電波ばく露の影響評価 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 5G/IoT電波ばく露環境（長期・低レベル・複数波源・複数周波数等）を想定した医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 研究手法の標準化のための電波ばく露条件の確立 ◆ 標準化手法に基づき試験の電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 複合的な電波ばく露評価試験のための電波ばく露条件検討と電波ばく露装置の開発・改良 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 5Gシステムの導入 ◆ 医学・生物実験の信頼性向上 ◆ 疫学データの欠落 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 5Gによる超高周波の電波ばく露条件を想定した医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 医学・生物実験用電波ばく露装置の開発・改良 ◆ 疫学研究のための電波ばく露評価手法の開発 ◆ 疫学研究のための電波ばく露評価手法の改良及び不確かさ評価

※太字は早期に研究を開始すべき課題

3-4 リスク管理に関する研究

リスク管理に関する研究について、安全指針値の策定及び適合性評価のそれぞれについて、中間周波、高周波、超高周波に対応した研究の方向性を示す。

なお、3-3と同様に、5年程度の比較的短い研究期間で一定の成果が見込まれる研究を「短期スパンで取り組むもの」として、10～20年程度の比較的長い研究期間が必要とされる研究を「中長期スパンで取り組むもの」として整理する。

3-4-1 安全指針値の策定

[概要]

リスク管理は、2-1-2のとおり、安全指針値の策定及び適合性評価を目的としており、そのうち、安全指針値の策定のためには、安全指針値の根拠である電波ばく露量で示された健康影響の閾値と低減係数を決定するための医学・生物研究における電波ばく露量の不確かさ評価と人体への電波ばく露量の変動量の評価が必要となる。

一方で、人体内の電波ばく露量（体内誘導電界強度又は比吸収率）で示されている安全指針値は、直接的な評価が困難であることから、電波防護指針では、評価が容易な人体外部の電磁界強度で示された電磁界強度指針（ICNIRPガイドラインにおける参考レベル）を規定している。したがって、適切な電磁界強度指針を策定するために、様々な電波ばく露条件及び様々な人体条件における、人体内の電波ばく露量（体内誘導電界強度又は比吸収率）と対外入射電磁界強度との関係を明らかにすることが課題となる。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波における刺激作用に基づく安全指針値については、中間周波における刺激作用閾値についてのデータが十分には蓄積されていないため、人体への電波ばく露量の周波数特性に基づき、より低い周波数帯（50/60Hzの超低周波等）の安全指針値からの外挿により策定されている。しかし、中間周波は高周波と低周波のそれぞれの電波ばく露評価方法の適用限界付近となるため、中間周波における人体への電波ばく露量の不確かさの改善が必要であることが指摘されており、「安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量）の不確かさ評価）」が必要である。

様々な電波ばく露条件や人体条件（年齢・性別・体形・姿勢等）により、人体への電波ばく露量は大きく変動するものであり、これらの変動量の一部は低減係数に考慮されている。しかし、中間周波における人体への電波ばく露量の変動量についてのデータは必ずしも十分に蓄積されていないため、人体

への電波ばく露量の変動量についてのより詳細な検討を通じて、更に適切な低減係数を策定していくことが重要であり、「安全指針値根拠（低減係数）の高精度化」が必要である。

従来の刺激作用に基づく安全指針値については、平均化領域や平均時間の定義が国際ガイドライン間で必ずしも一致しておらず、異なる定義の国際ガイドラインに対して適合性評価方法が複雑化する場合があるため、刺激作用閾値との関連性や適合性評価の観点等を考慮して、「安全指針値の定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化」が必要である。

人体への電波ばく露量の評価のための人体モデルの違い（体外電磁界と刺激作用の閾値の指標となる体内誘導電界とを関連付ける誘導係数の差異）等により、国際ガイドライン間における参考レベル（対外の電磁界強度指針値）に大きな差異が存在していることから、国際的に整合した誘導係数の決定に資するため、「誘導係数評価（外部電磁界 - 体内誘導電界）の高精度化」が必要であり、また、その研究成果に基づき、「安全指針値の改良（国内外の整合性向上）」が求められる。

さらに、刺激が継続して発生する定常的な刺激の場合と単回の非定常な刺激の場合のそれぞれについて適切な人体防護のための安全指針値を策定する必要性が提起されており、将来的には、刺激作用の防護原則に関するより基礎的な検討が必要である。具体的には、単回の刺激については、静電気放電といった一般生活環境中でも通常見られる現象であることを考慮し、より柔軟な人体防護の可能性の検討のための基礎的な検討として、「定常刺激と非定常刺激に対する安全指針値の策定」が必要である。

上記を含む中間周波の課題のうち、「安全指針値根拠（低減係数）の高精度化」については、様々な条件を想定した網羅的な検討が必要である。「定常刺激と非定常刺激に対する安全指針値の策定」については、将来の抜本的な改定の可能性に向けた基礎的な検討として必要である。以上のことから、これらの課題については、それぞれ中長期スパンで取り組む必要がある。

高周波では、熱作用に基づく安全指針値が策定され、熱作用の閾値の指標である比吸収率で示されており、比吸収率に関する人体の電波ばく露評価の研究は、高周波では携帯電話等を中心に蓄積されてきている。一方で、近年は数値シミュレーションにより電波ばく露時の温度上昇を評価することが可能となっており、温度上昇は、比吸収率よりも熱作用についてより直接的な指標となるため、温度上昇数値シミュレーションにより、安全指針値の信頼性をより向上させることが期待でき、また、ヒト研究等では倫理的な制約から困難であった様々な電波ばく露条件及び人体の多様性を考慮した、よ

り詳細な検討も可能になるため、これらの検討を通じて、安全指針値の根拠の不確かさの改善や、より適切な低減係数の策定に寄与していくことが重要であることから、「安全指針値（閾値（人体への電波ばく露量）の不確かさ評価」及び「安全指針値（低減係数）の高精度化」が必要である。

また、高周波では、今後、IoT デバイスの導入により、より多様な電波の利用シーンがでてくることが予想され、IoT やマイクロ波 WPT 等の普及等を考慮し、将来的な安全指針値の更なる改良についての検討が必要とされており、適合性評価の観点からも安全指針値の定義の見直しが必要になると考えられることから、「安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化」が求められる。

上記を含む高周波の課題のうち、「安全指針値の根拠（低減係数）の高精度化」については、様々な条件を想定した網羅的な検討が必要であることから、中長期スパンで取り組む必要がある。

超高周波では、我が国では 300GHz までは熱作用に基づく安全指針値が策定されているが、超高周波における電波ばく露は体表に集中しており、これまでの検討は主に人体を単純な無限平面モデル（1次元モデル）と想定した基礎的なものがほとんどであり、高精度かつ信頼性の高い電波ばく露評価の方法は確立されていない状況であるため、超高周波における人体への電波ばく露量の高精度化や、不確かさの評価に関する検討が必要であり、「安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量）の不確かさ評価」が求められる。

また、超高周波では、それに加えて、体表の温度上昇と電波ばく露量との関係について、様々な電波ばく露条件や人体条件における変動量をより正確に明らかにし、安全指針値の根拠である低減係数の明確化にも寄与することが重要であり、「安全指針値根拠（低減係数）の高精度化」が必要である。

さらに、超高周波における安全指針値の定義（平均化領域・平均時間等）に国際ガイドライン間で差異があることから、超高周波における熱作用根拠（閾値）との関連性や適合性評価の観点等を考慮した安全指針値の定義についての検討も必要であり、「安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化」が求められる。

将来的には、300GHz を超えて、電波法の上限である 3THz までの周波数領域についての安全指針値の策定のために、「安全指針値の拡張（上限周波数をテラヘルツ波に拡張）」として、3THz までの人体への電波ばく露量評価に関するデータの取得等が必要である。

上記を含む超高周波の課題のうち、「安全指針値根拠（低減係数）の高精度化」については、様々な条件を想定した網羅的な検討が必要である。「安全指

針値の拡張（上限周波数をテラヘルツ波に拡張）」については、計測装置等の開発動向を踏まえる必要がある。以上のことから、これらの課題については、それぞれ中長期スパンで取り組むことが求められる。

[まとめ]

以上を踏まえた安全指針値に関する研究の今後の方向性は表 3-6-1、取り組むべき安全指針値に関する研究は表 3-6-2～4 のとおりである。

3-4-2 安全指針値への適合性評価

[概要]

電波利用システムについては、携帯電話に代表されるように、我が国だけでなく各国で広く利用されるものが増えてきており、適合性評価の方法は、国際的に標準化されていることが重要であることから、国際標準化に対する研究も必要である。その際には、先進国だけでなく、途上国等でも利用できる簡便・廉価な評価という観点からの検討も重要である。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波では、EV 用 WPT 等の導入が目前となり、これまで必ずしも明確でなかった WPT による具体的な人体の電波ばく露の状況が明らかになりつつあり、WPT の適合性評価方法の国際標準化も進められている。そのため、これまでに我が国が主導してきた適合性評価方法をベースに、より適切な方法についての検討を進めるため、「WPT の適合性評価方法の改良・標準化」を行うとともに、我が国における WPT 利用と齟齬が生じないように国際標準化活動にも貢献・主導していくことが重要である。

WPT の適合性評価に関する国際標準化では、適合性評価のコスト削減を考慮し、数値計算による適合性評価の方法についての検討も進められている。我が国では、これまで数値計算に基づく適合性評価を認めてはいないが、信頼性を確保した方法となるように、関連の研究として、「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」を進めるとともに、国際標準化活動に貢献していく必要がある。

現在用いられている又は検討されている適合性評価の方法では、刺激作用の基本制限値の指標である体内誘導電界を直接に測定することが困難であることから、最悪の条件等を想定した代替の評価方法を用いているため、本来であればより大電力の電波利用が可能であるものの、実際にはより小さな電力しか利用できていない場合がある。一方で、今後、大型自動車への走行中

給電等のより大電力の WPT の開発が予想されるため、将来的には、現在の技術では著しく困難な刺激作用の「基本制限（体内誘導電界）の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化」に取り組む必要がある。

上記を含む中間周波の課題のうち、「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」及び「基本制限（体内誘導電界）の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化」については、新たな評価原理に基づく適合性評価方法の開発であり、網羅的な検討が必要であることから、中長期スパンで取り組む必要がある。

高周波では、熱作用に基づく適合性評価方法は確立され、国際標準化も行われている。しかし、次のような新たな電波利用システムに対する適合性評価の方法の改良・開発が必要である。

近年導入された 4G/LTE 携帯電話端末では、多数の通信方式・変調条件を自動的に設定して通信が行われるため、膨大な通信条件から、人体への電波ばく露量が最大となる条件を総当たりで評価する必要があり、適合性評価にかかる時間とコストを著しく増大させている。これらを解決するために、適合性評価方法の高速化・効率化に関する検討と国際標準規格への反映が必要であり、「4G/LTE 端末等の適合性評価方法の改良（高速化等）と標準化」が必要である。

また、高周波におけるマイクロ波 WPT の開発も積極的に進められており、マイクロ波 WPT では、携帯電話端末等よりもはるかに大きな電力を伝送するため、喫緊の課題として、「マイクロ波 WPT の適合性評価方法の開発と標準化」が必要である。

将来的には、高周波において IoT デバイスやウェアラブルヘルスケアデバイスの開発・普及が見込まれるため、「IoT・ウェアラブルヘルスケアデバイスの適合性評価方法の開発と標準化」が必要である。

さらに、適合性評価のコスト削減を考慮し、IEC 国際標準規格において、数値計算に基づく適合性評価方法が策定されたことを受け、我が国においても信頼性と再現性を有する数値計算に基づく適合性評価方法の策定に向けた検討として、「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」を進め、必要に応じて国際規格の改定に貢献する必要がある。

上記を含む高周波の課題のうち、「IoT・ウェアラブルヘルスケアデバイスの適合性評価方法の開発と標準化」については、現時点では想定できない多様な利用形態が現れることが予想され、その利用形態に基づく網羅的な検討を行う必要がある。「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」については、新たな評価原理に基づく適合性評価方法の開発であり、網羅的な検討

が必要である。以上のことから、これらの課題については、それぞれ中長期スパンで取り組む必要がある。

超高周波では、安全指針値の指標として、比吸収率ではなく、電力密度が用いられており、特に 5G に対しては、ミリ波帯携帯無線端末近傍（又は人体内）の電力密度に対する新たな評価方法を開発する必要がある。現在、5G の導入に向けて適合性評価方法策定に向けた国際標準化活動が進められており、我が国としても、「5G 等の適合性評価方法の開発と標準化」について積極的に研究を推進し、標準化に貢献する必要がある。

また、車載用ミリ波レーダーシステムが近く普及することが想定されており、ミリ波レーダーを対象とした適合性評価方法の開発と国際標準化も重要な課題であるため、「ミリ波レーダーの適合性評価方法の開発と標準化」が必要であり、特に、パルスレーダー等による間欠的な電波ばく露に対して、信頼性と再現性に優れた適合性評価方法を開発する必要がある。

将来的には、超高周波のウェアラブルデバイスの普及が見込まれることから、「超高周波ウェアラブルデバイスの適合性評価方法の開発と標準化」が必要であり、また同様に、将来的には 300GHz 以上のテラヘルツ波における電波利用が普及することが想定されるため、「テラヘルツ波利用システムの適合性評価方法の開発と標準化」が必要である。

超高周波のいくつかのシステムでは、ビームフォーミング技術を用いた人体の電波ばく露を回避する技術の導入が想定されており、短時間の高強度ビームによる電波ばく露の適合性を適切に評価するために、「基本制限の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化」も必要である。また、5G の適合性評価に関する国際標準化では、適合性評価のコスト削減を考慮し、数値計算による適合性評価方法についての検討も進められており、我が国においても信頼性と再現性を有する数値計算に基づく適合性評価の方法の策定に向け、「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」についての検討も必要である。

上記を含む超高周波の課題のうち、「超高周波ウェアラブルデバイスの適合性評価方法の開発と標準化」については、想定以上の多様な利用形態が出てくることが予想され、利用形態に基づく網羅的な検討が必要である。「テラヘルツ波利用システムの適合性評価方法の開発と標準化」については、新たな周波数領域における適合性評価方法の開発であり、網羅的な検討が必要である。「基本制限の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化」及び「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」については、新たな評価原理に基づく適合性評価方法の開発であり、網羅的な検討が必要である。以上の

ことから、これらの課題については、それぞれ中長期スパンで取り組む必要がある。

[まとめ]

以上を踏まえた適合性評価方法に関する研究の今後の方向性は表 3-6-1、取り組むべき適合性評価方法に関する研究は表 3-6-2～4 のとおりである。

3-5 リスクコミュニケーションに関する研究

[概要]

リスクコミュニケーションに関連する研究として、客観的な対話を通じたリスクコミュニケーションのために、人体への電波ばく露量に関する正確なデータの取得・蓄積・活用についての取組が必要である。この人体への電波ばく露量に関するデータは、疫学調査等のリスク評価の研究においても有用であり、データの相互活用についても留意すべきである。

[周波数ごとの今後の方向性]

中間周波では、今後近い将来に、EV用WPTが普及することが想定され、生活環境において大電力による人体の電波ばく露の機会が増え、たとえ電波防護指針に適合していても、導入時に人体の電波ばく露に対するリスク認知が高まる可能性がある。中間周波における人体防護に関するリスク管理を効果的に実施するために、特に新たな電波利用システムの導入による人体への電波ばく露量の増加についての正確なモニタリングデータが必要である。また、WPTは中長期に渡り普及していくことが予想されることから、中長期間（10～20年程度）に渡る人体への電波ばく露量に関するデータの取得ときめ細かなリスクコミュニケーションに関する取組が重要であり、「中間周波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用」に関する研究を推進することが望ましい。なお、これらのデータは、疫学研究においても有用であるため、将来の中間周波におけるリスク評価においても相互活用されることが望ましい。

高周波では、携帯電話や無線LAN等が普及しており、リスク評価及びリスク管理についての取組も継続的に進められてきている。一方で、携帯電話基地局に対するリスク認知は依然として高く、また、今後IoTデバイスの普及とともに、IoTデバイス単体からの電波ばく露は非常に微弱であるものの、生活環境や労働環境において、人体周辺に多数のIoTデバイスが存在している場合の人体の電波ばく露が、実態以上に増大するのではないかと不安等のリスク認知が高まる可能性がある。このため、高周波における人体防護に関するリスク管理を効果的に実施するために、中長期間に渡り、きめ細かなリスクコミュニケーションに関する取組が必要であり、特に、新たな電波利用システムの導入による人体への電波ばく露量の増加についての正確なモニタリングデータの取得及び客観的な人体の電波ばく露に関するデータの蓄積と、中長期間にわたる人体の電波ばく露に関するデータの取得が必要であることから、「高周波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活

用」に関する研究を推進することが望ましい。なお、これらのデータは、疫学研究においても有用であるため、将来の高周波におけるリスク評価においても相互活用されることが望ましい。

超高周波では、5G が近い将来に普及することが想定されており、新しくかつ比較的高強度の人体の電波ばく露の機会が増えることが想定される。さらに、5G の普及後もテラヘルツ波を含む新たな周波数帯における電波利用システムの導入が見込まれることから、継続的に新しい電波利用システムからの人体の電波ばく露の機会が増えていく状況になる。このため、今後長期に渡り、超高周波の電波による電波ばく露へのリスク認知が増大することが予想されることから、超高周波における人体防護に関するリスク管理を効果的に実施するために、中長期間に渡り、きめ細かなリスクコミュニケーションに関する取組が必要であり、特に、新たな電波利用システムの導入による人体への電波ばく露量の増加についての正確なモニタリングデータが求められ、客観的な人体の電波ばく露に関するデータの蓄積及び中長期にわたる人体の電波ばく露に関するデータの取得が必要であることから、「超高周波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用」に関する研究を推進することが望ましい。なお、このデータは、疫学研究においても有用であるため、将来の超高周波におけるリスク評価においても相互活用されることが望ましい。

[まとめ]

以上を踏まえたリスクコミュニケーションに関する研究の今後の方向性は表 3-6-1、取り組むべきリスクコミュニケーションに関する研究は表 3-6-2～4 のとおりである。

表3-6-1 安全指針値に関する研究、適合性評価方法に関する研究
及びリスクコミュニケーションに関する研究の今後の方向性

	中間周波	高周波	超高周波
人体への電波ばく露量 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	◎	○※	◎
リスクコミュニケーションに 関する研究	◎	◎	◎

- ◎：日本で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

※ 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

表 3-6-2 取り組みべき安全指針値に関する研究、適合性評価方法に関する研究
及びリスクコミュニケーションに関する研究（中間周波）

中間周波	
短期間（5年程度）で取り組みもの	<div style="background-color: #e0e0e0; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">安全指針値に関する研究</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性の向上 ◆ 国際ガイドライン間の安全指針値（参考レベル）の不整合 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量））の不確かさ評価 ◆ 安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化 ◆ 誘導係数評価（外部電磁界-体内誘導電界）の高精度化 ◆ 安全指針値の改良（国内外の整合性向上） </div>
中長期間（10-20年程度）で取り組みもの	<div style="background-color: #e0e0e0; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">適合性評価方法に関する研究</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ EV用WPTシステムの普及 ◆ WPTの適合性評価方法の改良・標準化 <p>[取り組みべき研究]</p> </div>
	<div style="background-color: #e0e0e0; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">リスクコミュニケーションに関する研究</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 適合性評価のコスト削減 ◆ 大電力WPT等の高強度電波利用の拡大 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 数値計算による適合性評価方法の開発と標準化 ◆ 基本制限（体内誘導電界）の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化 </div>
	<div style="background-color: #e0e0e0; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">新しい電波システムに対するリスク認知の増大</p> <p style="text-align: center;">中間周波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用</p> </div>

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表3-6-3 取り組みべき安全指針値に関する研究、適合性評価方法に関する研究
及びリスクコミュニケーションに関する研究（高周波）

高周波	
短期間（5年程度）で取り組みもの	<div style="background-color: #fff9c4; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">安全指針値に関する研究</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性の向上 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量））の不確かさ評価 ◆ 安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化 </div>
中長期間（10-20年程度）で取り組みもの	<div style="background-color: #e6f2e6; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">適合性評価方法に関する研究</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 4G/LTE端末の試験条件数増大 ◆ マイクロ波WPTの普及 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 4G/LTE端末等の適合性評価方法の改良（高速化等）と標準化 ◆ マイクロ波WPTの適合性評価方法の開発と標準化 </div>
	<div style="background-color: #e6f2e6; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">リスクコミュニケーションに関する研究</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ IoT・ウェアラブルヘルスケアデバイスの普及 ◆ 適合性評価のコスト削減 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ IoT・ウェアラブルヘルスケアデバイスの適合性評価方法の開発と標準化 ◆ 数値計算による適合性評価方法の開発と標準化 </div>
	<div style="background-color: #e6f2e6; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">リスクコミュニケーションに関する研究</p> <p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 基地局や新しい電波システム（特にIoT）に対するリスク認知の増大 <p>[取り組みべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 高周波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用 </div>

※太字は早期に研究を開始すべき課題

表 3-6-4 取り組むべき安全指針値に関する研究、適合性評価方法に関する研究
及びリスクコミュニケーションに関する研究（超高频波）

		安全指針値に関する研究	適合性評価方法に関する研究
超高频波	短期間（5年程度）で取り組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性の向上 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量））の不確かさ評価 ◆ 安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 5G等の導入 ◆ ミリ波レーダーの導入・普及 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 5G等の適合性評価方法の開発と標準化 ◆ ミリ波レーダーの適合性評価方法の開発と標準化
	中長期間（10-20年程度）で取り組むもの	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値の信頼性・有効性の向上 ◆ テラヘルツ波利用システムの導入・普及 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 安全指針値根拠（低減係数）の高精度化 ◆ 安全指針値の拡張（上限周波数をテラヘルツ波に拡張） 	<p>[課題・問題]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 超高频波ウェアラブルデバイスの普及 ◆ 高強度ビームの利用拡大 ◆ 適合性評価のコスト削減 ◆ テラヘルツ波利用システムの導入・普及 <p>[取り組むべき研究]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 超高频波ウェアラブルデバイスの適合性評価方法の開発と標準化 ◆ 基本制限の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化 ◆ 数値計算による適合性評価方法の開発と標準化 ◆ テラヘルツ波利用システムの適合性評価方法の開発と標準化
リスクコミュニケーションに関する研究			
		<p>[課題・問題]</p> <p>新しい電波システム（特に5G/6G）に対するリスク認知の増大</p>	<p>[課題・問題]</p> <p>新しい電波システム（特に5G/6G）に対するリスク認知の増大</p> <p>超高频波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用</p>

※太字は早期に研究を開始すべき課題

4 研究推進のための中長期的なロードマップ

前述の研究の方向性に基づきつつ、2040年頃までを見据えた中長期的な重点研究課題に取り組むための中長期的なロードマップを以下に示す。なお、ロードマップにおける各重点研究課題の開始時期は、2019年から2025年、2025年から2030年、2030年から2040年のそれぞれの期間内に開始するものとして示しており、必ずしも2019年、2025年、2030年から開始すべきことを示したのではない。

4-1 リスク評価に関する研究

4-1-1 疫学研究

疫学研究では、ヒトを対象にして環境要因（ここでは電磁環境）に一定期間ばく露された際に、その環境要因と関連のある疾病の発生を解析するため、現在まだ実用化されていない5G（又は超高周波）の影響を現時点で確認することは、原理的に不可能である。中間周波を使用する大電力のEV用WPTもまだ市場に出ておらず、直ちに疫学研究を開始することはできないため、「がんを含む疾病との関連についての症例対照研究」については、現在実施されている中間周波の疫学研究が終了した後に行うことが求められる。なお、「WPT・IoT・5G等新しい電波利用に伴う幅広い周波数の電波ばく露に着目した前向きコホート研究」は、5Gが2020年から開始される予定であること、WPTやIoTの普及も今後進むこと等を踏まえ、2020年以降なるべく早く、そして可能な限り長期にわたって調査をすることが望ましい。「神経変性疾患に関する疫学研究」については、2030年以降に開始することが望ましい。また、「中間周波電波ばく露に関する生態学的研究」については、2030年頃までにEV用WPTが一定程度普及する見込みであることを踏まえ、2025年以降に開始することが望ましい。

一方で、高周波における「第1世代、第2世代携帯電話システム利用者の晩発性疾病に関する研究」については、旧システム利用から十分な年数が経過している³⁸ことから、2019年頃から2025年頃までという比較的近い時期に研究を開始することが適切と考えられる。また、その研究で得られた知見に基づき、2025年以降に「様々なデータの利活用による生態学的研究」を開始する必要がある。

また、超高周波における「WPT・IoT・5G等新しい電波利用に伴う幅広い周波数の電波ばく露に着目した前向きコホート研究」については、5Gの導入が2020年

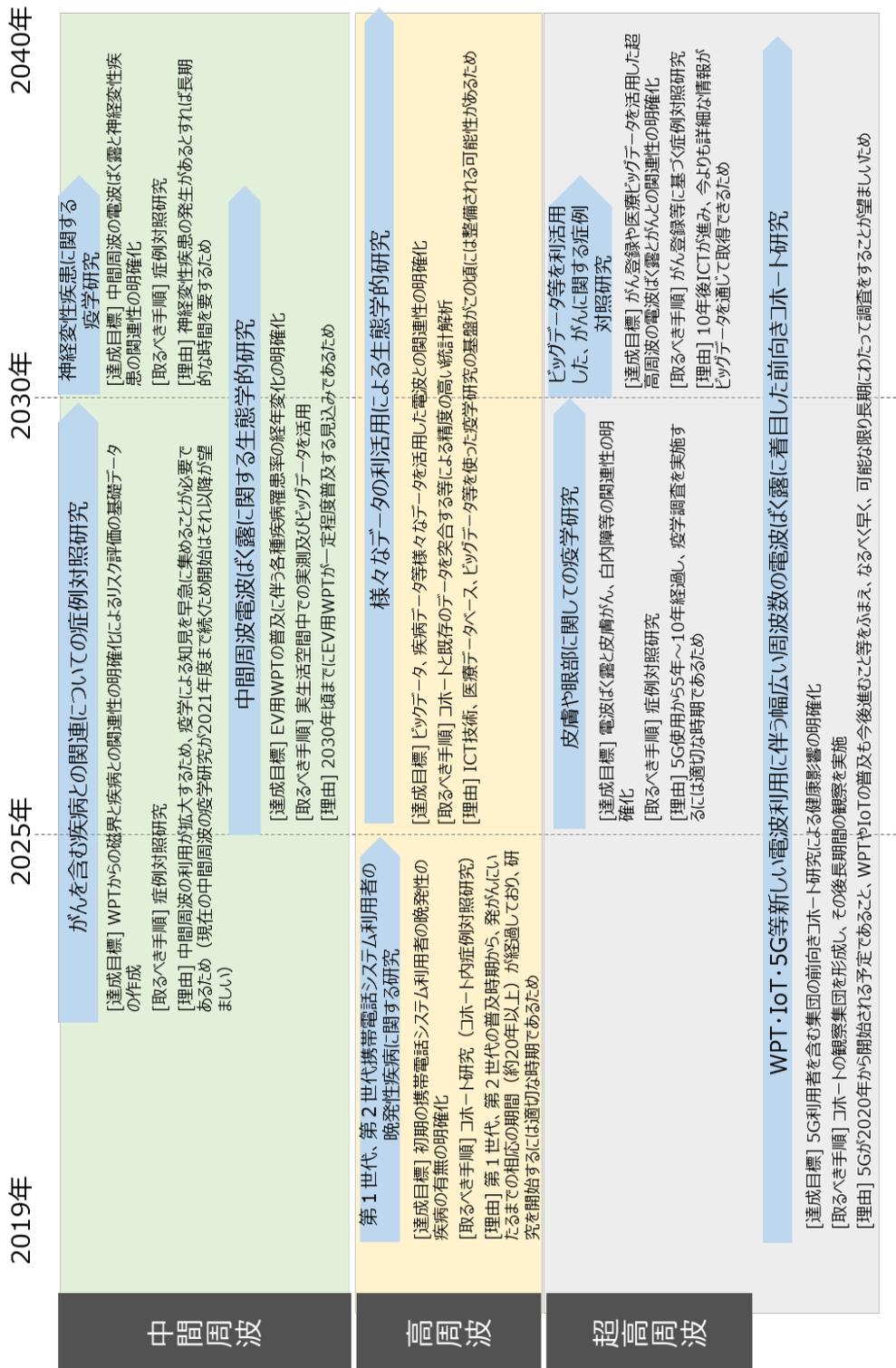
³⁸ 1994年に日本における本格的な普及（携帯電話端末の売り切制開始）、2001年に第3世代携帯電話の商用サービス開始、2012年に第2世代携帯電話サービスの終了。

を目処に予定されていることから、2020年又はそれ以降に研究を開始し、可能な限り長期にわたって観察することが望ましい。その他の超高周波の症例対照研究である「皮膚や眼部に関する疫学研究」及び「ビッグデータ等を活用した、がんに関する症例対照研究」については、電波ばく露と疾病発生までの時間的な経過を考慮すると、2025年以降に開始すべき課題である。

これらの研究と平行して、国際的には、将来 WHO の環境保健クライテリアの更新及び ICNIRP ガイドラインの改定が予想されることから、それらの作業に合わせて、科学的な根拠を順次提供できるよう配慮が必要である。また、5G の普及が世界的に進めば国際共同研究も提案される可能性があり、その際には、我が国からの参加も推進されるべきである。

これらを踏まえた疫学研究推進のためのロードマップは図 4-1 のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

図 4-1 疫学研究推進のためのロードマップ



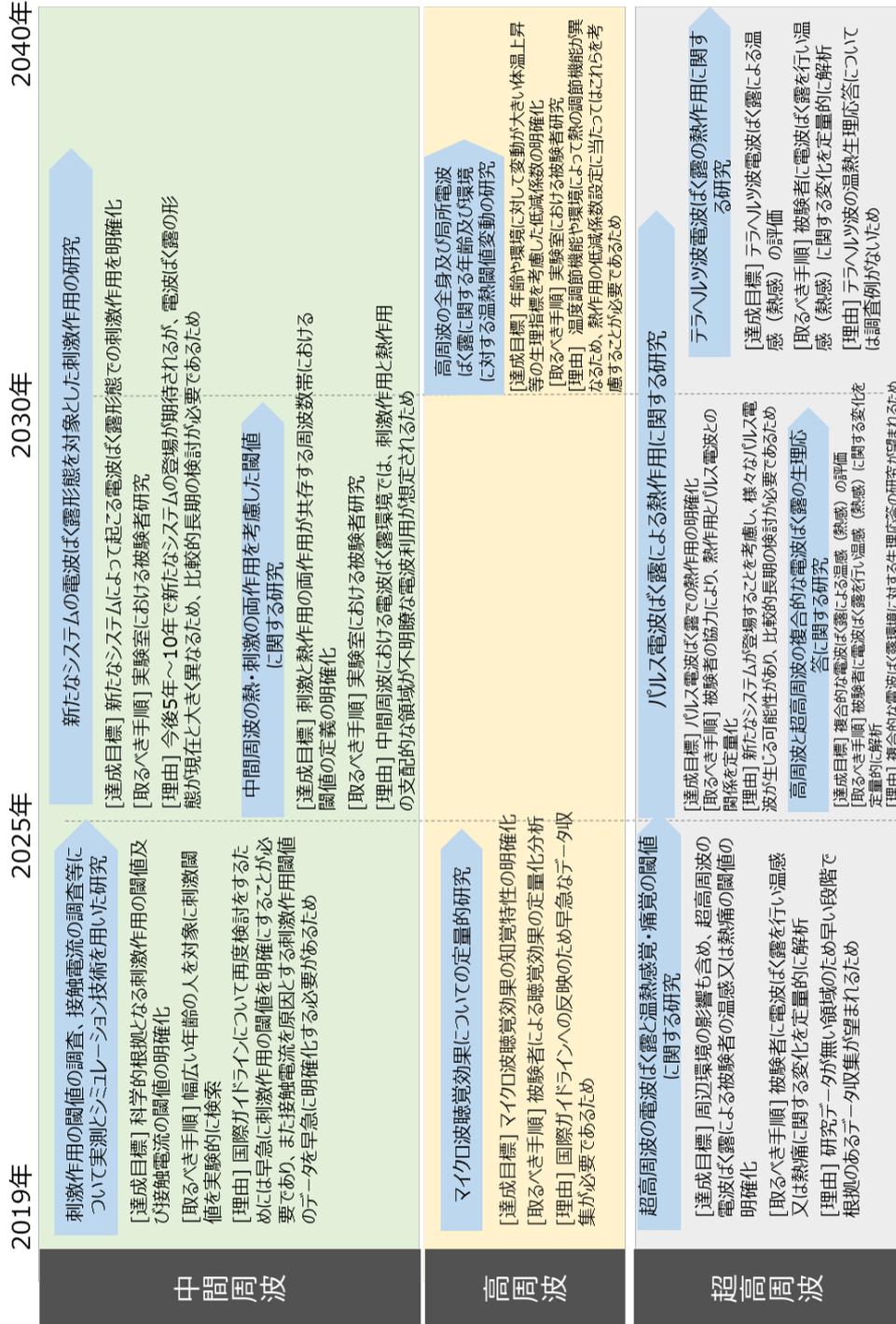
4-1-2 ヒト研究

ヒト研究での刺激作用や熱作用の閾値等に関する研究は、国際ガイドライン改定の際の確立された作用の根拠として非常に重要である。その観点から、中間周波の「電波ばく露における神経作用（痛覚閾値）の研究」及び「接触電流の刺激作用の閾値に関する研究」、超高周波の「超高周波の電波ばく露と温熱感覚・痛覚の閾値に関する研究」については、2019年以降早急に研究を開始して、国際ガイドライン改定の際の科学的根拠となる結果を提供すべきである。同様に、高周波における温熱作用閾値の「マイクロ波聴覚効果についての定量的研究」についても、刺激作用とはエンドポイントが異なるが、国際ガイドラインに反映すべき基礎的なデータを提供できるという点から、早期に取り組むべき課題である。

一方で、中間周波の「新たなシステムの電波ばく露形態を対象とした刺激作用の研究」及び「中間周波の熱・刺激の両作用を考慮した閾値に関する研究」、超高周波の「高周波と超高周波の複合的な電波ばく露の生理応答に関する研究」については、現在の国際ガイドラインでは十分に検討されていない領域を補足する研究であり、今後の技術動向や電波の利用状況の変化を見た上で、2025年以降に研究を開始すべきである。また、超高周波の「パルス電波ばく露による熱作用に関する研究」及び「テラヘルツ波電波ばく露の熱作用に関する研究」については、超高周波の電波利用技術の将来的発展を見据えて、2025年ないし2030年以降に、再度その時点での国際ガイドライン等の改定状況を見据えて研究の計画が行われることが望ましい。同様に、温熱負荷への適応能は年齢及び環境に対して変動が大きいため、現在の国際ガイドライン等の低減係数で十分か否かを検討する「高周波の全身及び局所電波ばく露に関する年齢及び環境に対する温熱閾値変動の研究」を実施することが望ましい。

これらを踏まえたヒト研究推進のためのロードマップは図4-2のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

図 4-2 ヒト研究推進のためのロードマップ



4-1-3 動物研究

動物研究におけるそれぞれの課題に係る研究の開始時期に関しては、研究対象の周波数帯の人体の電波ばく露が特に顕著となる時期（又は対象となる無線システムの導入が予定される時期）を考慮し、次のとおりとした。

閾値評価に係る研究は、国際ガイドラインの根拠として重要であることから、中間周波の「中間周波の痛覚閾値の研究」、超高周波の「皮膚への電波ばく露の影響とその反応閾値の研究」、「実環境であり得る環境条件を考慮した電波による眼障害閾値に関する研究」については、2019年以降早い段階で研究を開始すべきである。また、高周波の「NTP研究の確認研究」については、NTPの研究で示唆された一部陽性の研究結果の科学的解釈に関して国際的に議論を喚起していることから、2019年以降、国際的な取組として早急に進める必要がある。さらに、確立していない作用に関しては、特にこれまで研究の蓄積が少ない中間周波と超高周波において「確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化」を行うとともに、「標準化手法に基づく電波ばく露の影響に関する研究」について、今後長期にわたって議論及び研究を実施することが必要であり、それらにより得られた結果に関しては、随時、健康リスク評価のための科学的根拠として提示されるべきである。また中間周波では、今後の技術動向を踏まえて、「新たな評価システムに基づく健康リスクに関する研究」及び「中間周波同士及び中間周波と他の高周波の複合的な電波ばく露による確立されていない作用の研究」について、2030年以降に実施する必要がある。

中間周波では、「パルス電波ばく露の生体影響の研究」について、国際ガイドラインの改定に向けて、2025年以降に実施する必要がある。また高周波では、「神経疾患モデル動物を用いた電波ばく露による影響に関する研究」については、現在いくつかの国で実施されている研究を通じて新たに研究すべき問題が生じると考えられるため、我が国でも、2025年以降に研究を実施する可能性に留意する必要がある。さらに、超高周波において、5Gよりも更に高い周波数の技術開発が進むことを考えると、2025年以降に、「高い周波数（～300GHz）による熱作用の反応閾値に関する研究」及び「高い周波数（～300GHz）による非熱作用に関する研究」を実施することが必要であり、2030年以降には、更にその上の周波数である「今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の熱作用の反応閾値に関する研究」及び「今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の非熱作用に関する研究」を実施する必要がある。

これらを踏まえた動物研究推進のためのロードマップは図4-3のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

図 4-3 動物研究推進のためのロードマップ

	2019年	2025年	2030年	2040年
中間周波	<p>中間周波の痛覚閾値の研究</p> <p>[達成目標] 痛覚閾値を明確にし、科学的根拠を提供 [取るべき手順] 人には電波がく露することが難しい高いレベルの電波がく露による痛覚閾値を観察 [理由] 現時点では実験的なデータが少なく、データの充実が必要であるため</p>	<p>パルス電波がく露の生体影響の研究</p> <p>[達成目標] パルス電波の生体影響の閾値の明確化 [取るべき手順] 刺激作用等の検討 [理由] パルス波（秒単位のく露）の影響について、時間平均の概念で安全性評価をすることが困難いため</p>	<p>新たな評価システムに基づく健康リスクに関する研究</p> <p>[達成目標] 新たな手法に基づき確立されていない作用の検討 [取るべき手順] 新しい評価手法の適応 [理由] 今後10年程度で生体影響の評価技術に新しい手法が導入される見込みであるため</p>	<p>中間周波同士及び中間周波と他の高周波の複合的な電波がく露による確立されていない作用の研究</p> <p>[達成目標] 複合周波の電波がく露状況を考慮した評価を実施し、影響の有無の明確化 [取るべき手順] 動物に複合的な電波がく露を行い、生体反応を生理的指標や遺伝的指標を用いて検討 [理由] これまで複合周波の影響について検討が十分には行われてきていないが、将来の実生活空間では複合周波からの電波がく露を受けるため</p>
高周波	<p>NTP研究の確認研究</p> <p>[達成目標] NTP研究の結果についての妥当性の確認 [取るべき手順] NTP研究を踏襲する、あるいは一部改良した実験プロトコルによる実験 [理由] NTP研究の結果について慎重かつ迅速に精査する必要があるため</p>	<p>神経疾患モデル動物を用いた電波がく露による影響に関する研究</p> <p>[達成目標] 神経疾患（アルツハイマー等）のモデル動物を用いてリスク評価の基礎的知見の明確化 [取るべき手順] モデル動物を用い、電波をばく露したのちに病態を様々な手段で観察 [理由] 諸外国において、当該分野の研究の報告が行われており、精度の高いドシメトリに基づく実験が求められているため</p>	<p>今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の熱作用の反応閾値に関する研究</p> <p>[達成目標] 3THzまでの熱作用の反応閾値の明確化 [取るべき手順] 強い波源の下での変化を追従 [理由] 将来的に通信で利用されるであろう周波数帯の熱作用の反応閾値を明確にすることが必要であるため</p>	<p>今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の非熱作用に関する研究</p> <p>[達成目標] 3THzまでの非熱作用の検討 [取るべき手順] 弱い波源の下での変化を追従 [理由] 将来的に通信で利用されるであろう周波数帯の非熱作用を検討することが必要であるため</p>
超高周波	<p>皮膚への電波がく露の影響とその反応閾値の研究</p> <p>[達成目標] 皮膚における炎症発生の閾値の明確化 [取るべき手順] 動物の皮膚への電波がく露と炎症の病理変化、及び炎症バイオマーカーの変動 [理由] 現時点では閾値が明らかではないため</p> <p>実環境であり得る環境条件を考慮した電波による眼障害閾値に関する研究</p> <p>[達成目標] 環境条件が電波の眼障害閾値に及ぼす影響 [取るべき手順] 局所電波がく露障害モデルの使用 [理由] 環境条件により眼障害への差異があるため</p>	<p>高い周波数（～300GHz）による熱作用の反応閾値に関する研究</p> <p>[達成目標] 300GHzまでの熱作用の反応閾値の明確化 [取るべき手順] 当面は100GHz以下で、強い波源が揃えば300GHz以下の熱作用の変化を追従 [理由] 将来的に通信で利用されるであろう周波数帯の熱作用の反応閾値を明確にすることが必要であるため</p> <p>高い周波数（～300GHz）による非熱作用に関する研究</p> <p>[達成目標] 300GHzまでの非熱作用の検討 [取るべき手順] 当面は100GHz以下で、強い波源が揃えば300GHz以下の非熱作用の変化を追従 [理由] 将来的に通信で利用されるであろう周波数帯の非熱作用を検討することが必要であるため</p>	<p>標準化手法に基づく電波がく露の影響に関する動物研究</p> <p>[達成目標] 電波がく露（特に中間周波、超高周波）による非熱作用の有無を標準化された研究デザインによる明確化 [取るべき手順] 専門家により標準化の検討を行い、定めた試験法により影響の有無を調べる [理由] 化学物質で実施されているような標準的な生体影響評価方法を電波領域に応用することが早急に求められているため</p>	<p>標準化手法に基づく電波がく露の影響に関する動物研究</p> <p>[達成目標] 電波がく露（特に中間周波、超高周波）による非熱作用の有無を標準化された研究デザインによる明確化 [取るべき手順] 専門家により標準化の検討を行い、定めた試験法により影響の有無を調べる [理由] 化学物質で実施されているような標準的な生体影響評価方法を電波領域に応用することが早急に求められているため</p>

4-1-4 細胞研究

細胞研究では、確立されている作用について、今後生活環境に導入される機器で使用する周波数での研究を優先させる必要がある。具体的には、中間周波の「神経細胞の応答閾値に関する研究」、超高周波の「高強度・短時間の電波ばく露に関する角膜細胞等を用いた熱作用に関する研究」については、2019年以降早い段階で開始する必要がある。また、現在研究を実施中の課題を基礎に発展させて、「確立されていない作用の評価に必要な研究方法の標準化」という課題で、化学物質の安全性評価に適用されている標準的な毒性試験手法の電波のリスク評価への適用の方法を議論し、2023年以降、「標準化手法に基づく電波ばく露の影響に関する研究」を長期的なスパンで実施する必要がある。

2025年以降には、中間周波の「末梢神経系及び中枢神経系の細胞レベルでの確立されていない作用に関する研究」、超高周波の「低強度・長時間の電波ばく露に関する3D皮膚組織モデル等を用いた非熱作用に関する研究」を行うことが望ましい。その後、2030年以降に、その時点までの研究動向・電波利用の技術動向を踏まえ、中間周波の「新たな評価システムに基づく電波ばく露の影響に関する研究」及び「パルス電波ばく露による確立されていない作用に関する研究」、超高周波の「今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の熱作用の反応閾値に関する研究」及び「今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の非熱作用に関する研究」の実施を検討する必要がある。

なお、3-3-4において、高周波の研究の優先度は低いと整理したが、国際的な研究動向としては依然として多くの研究結果が報告されており、それらの研究動向を踏まえて、短期的には「エピジェネティックな変化の検索と発がんプロセスへの非熱作用に関する研究」、2025年以降に「神経変性疾患に関連した遺伝子レベルでの非熱作用に関する研究」、更に2030年以降に「新たな実験系による電波の非熱作用に関する研究」について、それぞれその時点における国際的な研究動向を踏まえて実施すべきかどうかを判断する必要がある。

これらを踏まえた細胞研究推進のためのロードマップは図4-4のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

図 4-4 細胞研究推進のためのロードマップ

	2019年	2025年	2030年	2040年
中間周波	<p>神経細胞の応答閾値に関する研究</p> <p>[達成目標] 国際ガイドライン改定に向け科学的根拠を提示 [取るべき手順] 人には電波ばく露することが難しい高いレベルの電波ばく露により神経細胞の応答閾値を評価 [理由] 現時点では実験に基づく応答閾値のデータが僅かであり、早急に実験により中間周波主帯にわたって閾値を確認する必要があるため</p>	<p>末梢神経系及び中枢神経系の細胞レベルでの確立されていない作用に関する研究</p> <p>[達成目標] 神経細胞での非刺激用量での電波ばく露による影響の有無の明確化 [取るべき手順] 電波ばく露による遺伝子や生化学的指標の評価 [理由] 神経系細胞への刺激応答以外の影響についての知見がなく、評価すべきであるため</p>	<p>新たな評価システムに基づく電波ばく露の影響に関する研究</p> <p>[達成目標] 新たな手法に基づき確立されていない作用の研究 [取るべき手順] 新しい評価手法の適用 [理由] 今後10年程度で評価技術に新しい手法が一般化する可能性があるため</p>	<p>新たな評価システムに基づく電波ばく露の影響に関する研究</p> <p>[達成目標] パルス電波の評価 [取るべき手順] パルス電波による細胞応答の評価 [理由] パルス波（秒単位のばく露）の影響について、時間平均の概念で安全性評価をすることが困難なため</p>
高周波	<p>エピジェネティックな変化の検索と発がんプロセスの非熱作用に関する研究</p> <p>[達成目標] エピジェネティックな変化を伴う発がんプロセスへの非熱作用の有無の明確化 [取るべき手順] 遺伝子レベルでの変化を確認 [理由] 近年の生物学の進歩で様々な解析手法が容易にできるようになってきたため</p>	<p>神経変性疾患に関連した遺伝子レベルでの非熱作用に関する研究</p> <p>[達成目標] 高周波と神経変性疾患の関連性の明確化 [取るべき手順] 電波ばく露と遺伝子応答等の解析 [理由] 諸外国において、当該分野の動物研究の報告が行われており、細胞レベルでも研究する必要性が高いため</p>	<p>今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の熱作用の反応閾値に関する研究</p> <p>[達成目標] 3THzまでの熱作用の反応閾値の明確化 [取るべき手順] 強い波源の下での変化を検出 [理由] 将来的に通信で利用される3THzまでの周波数帯の熱作用の反応閾値を明確化する必要があるため</p>	<p>新たな実験系による電波の非熱作用に関する研究</p> <p>[達成目標] 新たな手法に基づく非熱作用の検討 [取るべき手順] 新しい評価手法の適用 [理由] 今後10年程度で評価技術に新しい手法が一般化する可能性があるため</p>
超高周波	<p>高強度・短時間の電波ばく露に関する角膜細胞等を用いた熱作用に関する研究</p> <p>[達成目標] 高強度・短時間電波ばく露の角膜培養細胞等での変化を明確化 [取るべき手順] 角膜培養細胞等により明確化 [理由] 高強度で短時間の電波ばく露が眼に与える影響は大きいと考えられるため</p>	<p>低強度・長時間の電波ばく露に関する3D皮膚組織モデル等を用いた非熱作用に関する研究</p> <p>[達成目標] 低強度・長時間電波ばく露の皮膚インビトロでの変化を明確化 [取るべき手順] 3D培養皮膚モデルにより明確化 [理由] 低強度で長時間の電波ばく露の影響に関する知見はないが、健康リスク評価上は重要であるため</p>	<p>標準化手法に基づく電波ばく露の影響に関する細胞研究</p> <p>[達成目標] 電波ばく露（特に中間周波、超高周波）による確立されていない作用の有無を標準化された研究デザインによる明確化 [取るべき手順] 専門家により標準化の検討を行い、定めた試験法により影響の有無を調べる [理由] 化学物質で実施されているような標準的な生体影響の評価方法の電波領域への応用が求められているため</p>	<p>今後利用される可能性のある電波利用技術（～3THz）の熱作用の反応閾値に関する研究</p> <p>[達成目標] 3THzまでの熱作用の反応閾値の明確化 [取るべき手順] 強い波源の下での変化を検出 [理由] 将来的に通信で利用される3THzまでの周波数帯の熱作用の反応閾値を明確化する必要があるため</p>

4-1-5 工学研究

工学研究においても、WHOによる健康リスク評価（EHC文書）とその後のEHC文書に基づくICNIRPガイドラインの改定等の国際動向を踏まえた上で計画的な研究の推進と成果の報告を行う必要がある。

中間周波では、確立されている作用に関する研究及び確立されていない作用に関する研究のいずれも、EV用WPTの普及スケジュール等を考慮して、早期に研究を推進する必要がある。研究の成果は、2020年代後半に見込まれる国際ガイドライン改定版に反映させることが重要である。また、2030年代の研究成果は、2040年代に見込まれる国際ガイドライン改定に反映させることが重要である。

高周波における確立されている作用に関する研究では、現行の国際ガイドラインの根拠データの不足が指摘されているマイクロ波聴覚効果に関する研究を早期に開始することが望ましい。一方で、将来の国際ガイドライン改定が早くとも2030年代と見込まれることから、2030年代までの期間において計画的に研究を実施していくことが望ましい。

高周波における確立されていない作用に関する研究においても、2030年代の国際ガイドライン改定に向けて、着実に研究を実施していくことが望ましい。なお、IoT電波ばく露の環境を想定した医学・生物実験用の電波ばく露装置の開発及び改良は、IoTデバイスの普及時期を考慮して取り組むことが望ましい。

超高周波では、確立されている作用に関する研究及び確立されていない作用に関する研究のいずれも、5Gの普及スケジュール等を考慮して、早期に推進する必要がある。研究の成果は、2030年代に見込まれる国際ガイドライン改定版に反映させることが重要である。また、確立されている作用に関する研究のうちテラヘルツ波に係る研究の成果及び確立されていない作用に関する研究の成果は、更にそれ以降の国際ガイドライン改定又は新規策定（2040～2050年代）に反映させることが重要である。

なお、超高周波に係る検討は、電波利用システムの普及や計測装置の開発動向等を踏まえ、2025年頃までには概ね100GHzまで、2030年頃までには概ね300GHzまで、2040年頃までには3THzまでを想定し、計画的に推進することが望ましい。

これらを踏まえた工学研究推進のためのロードマップは図4-5～10のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

図4-5 工学研究推進のためのロードマップ（中間周波（確立されている作用））

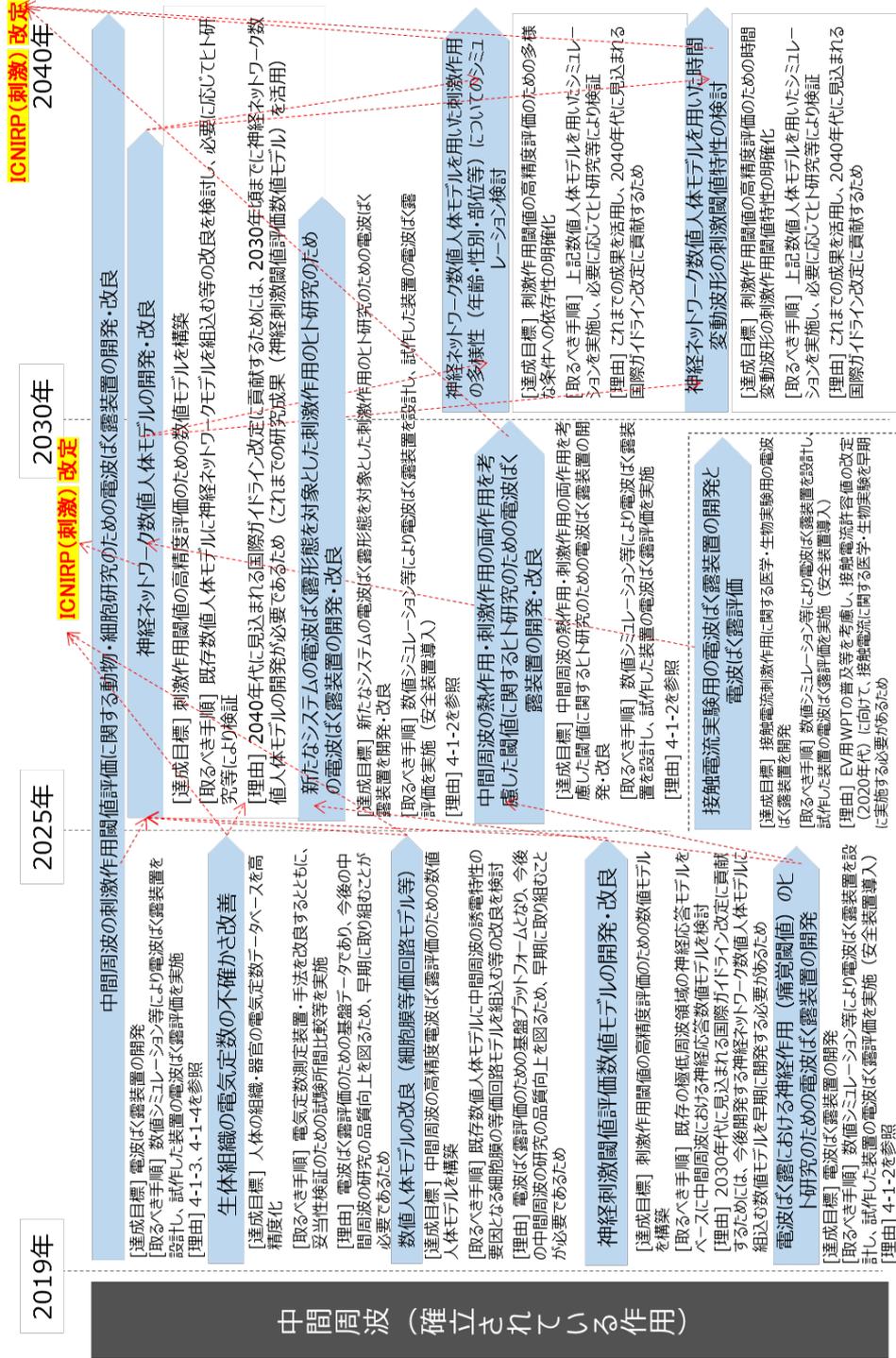


図4-6 工学研究推進のためのロードマップ（中間周波（確立されていない作用））

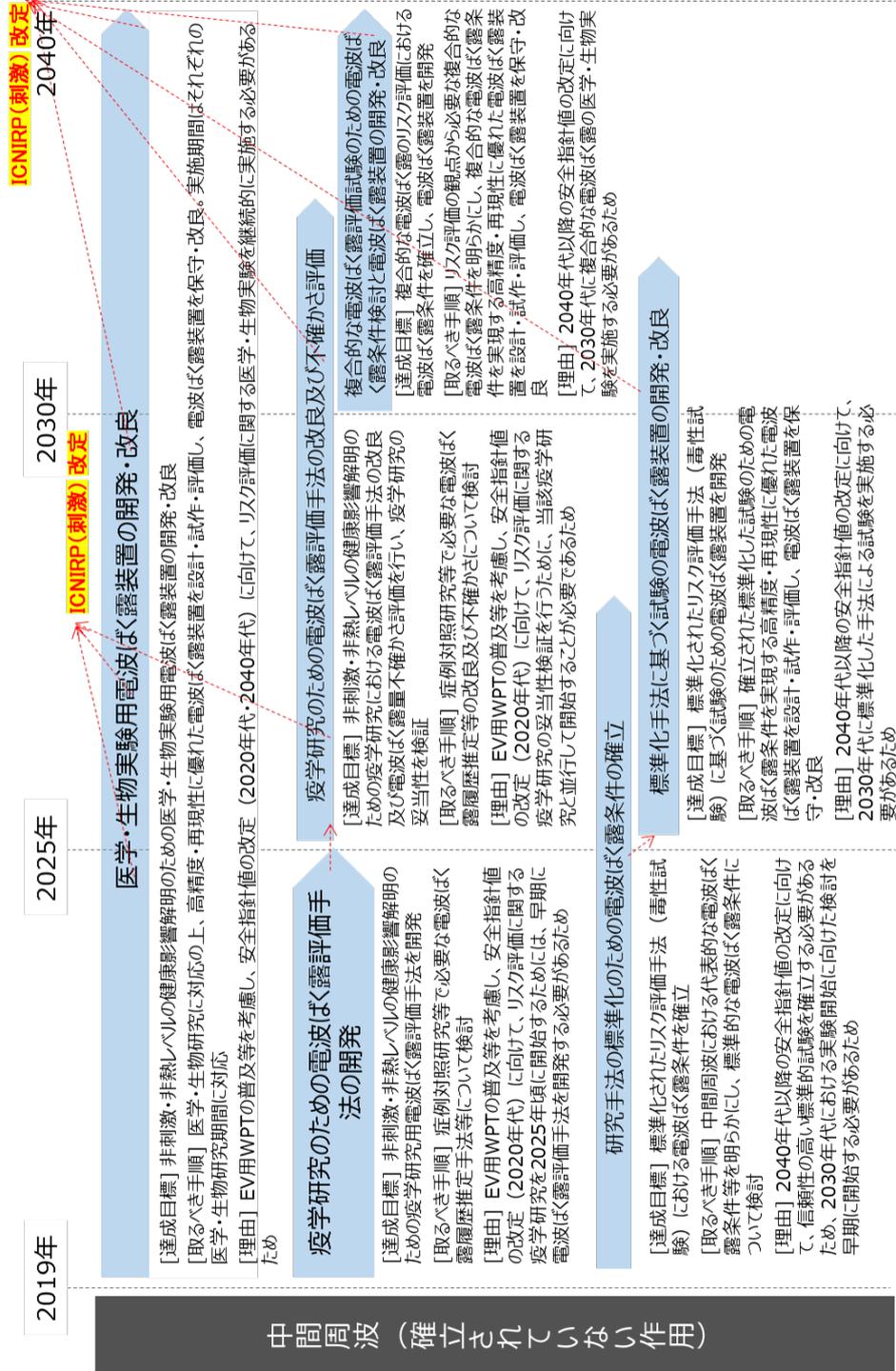


図4-7 工学研究推進のためのロードマップ（高周波（確立されている作用））

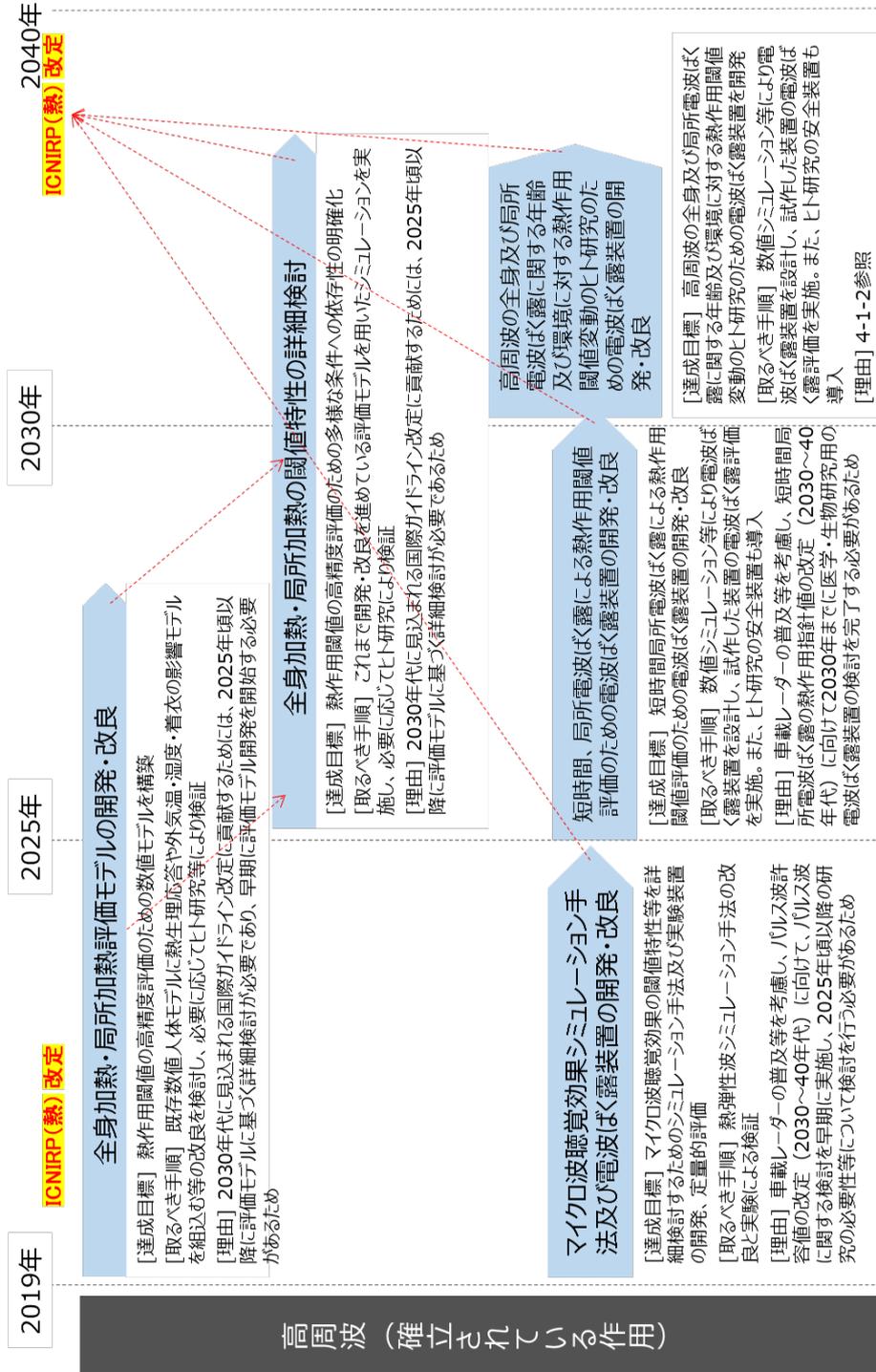


図4-8 工学研究推進のためのロードマップ（高周波（確立されていない作用））

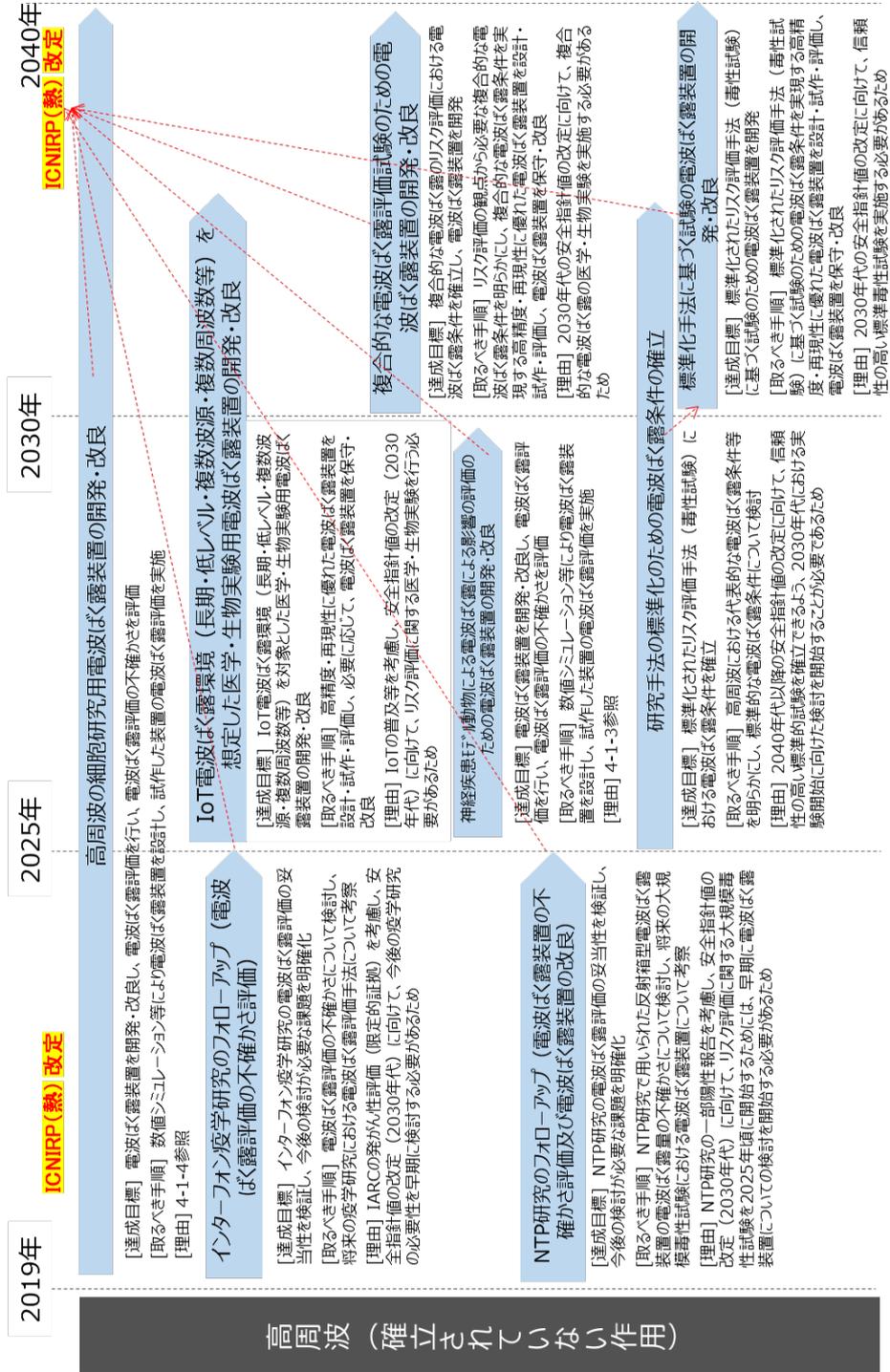


図4-9 工学研究推進のためのロードマップ（超高周波（確立されている作用））

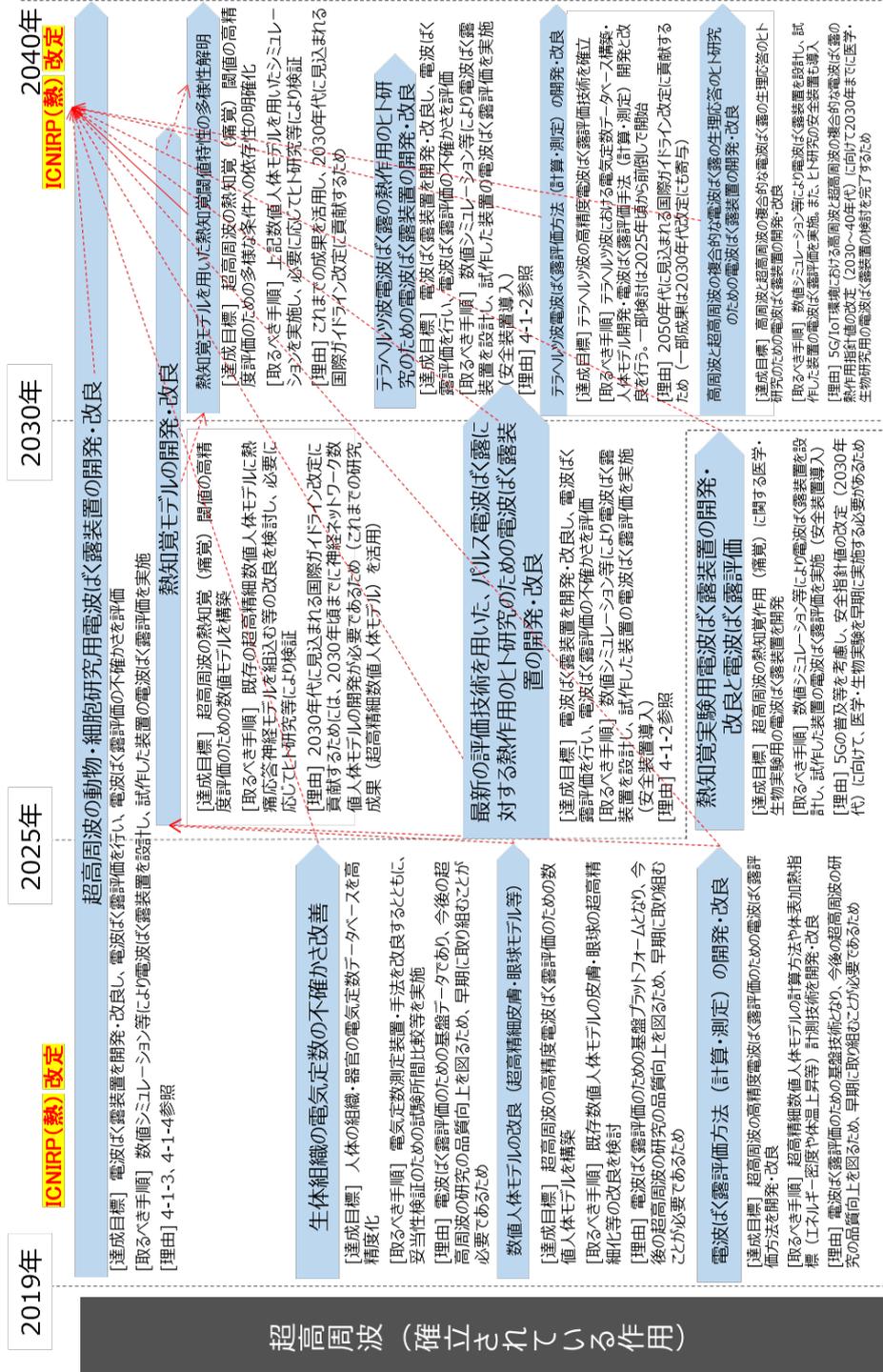
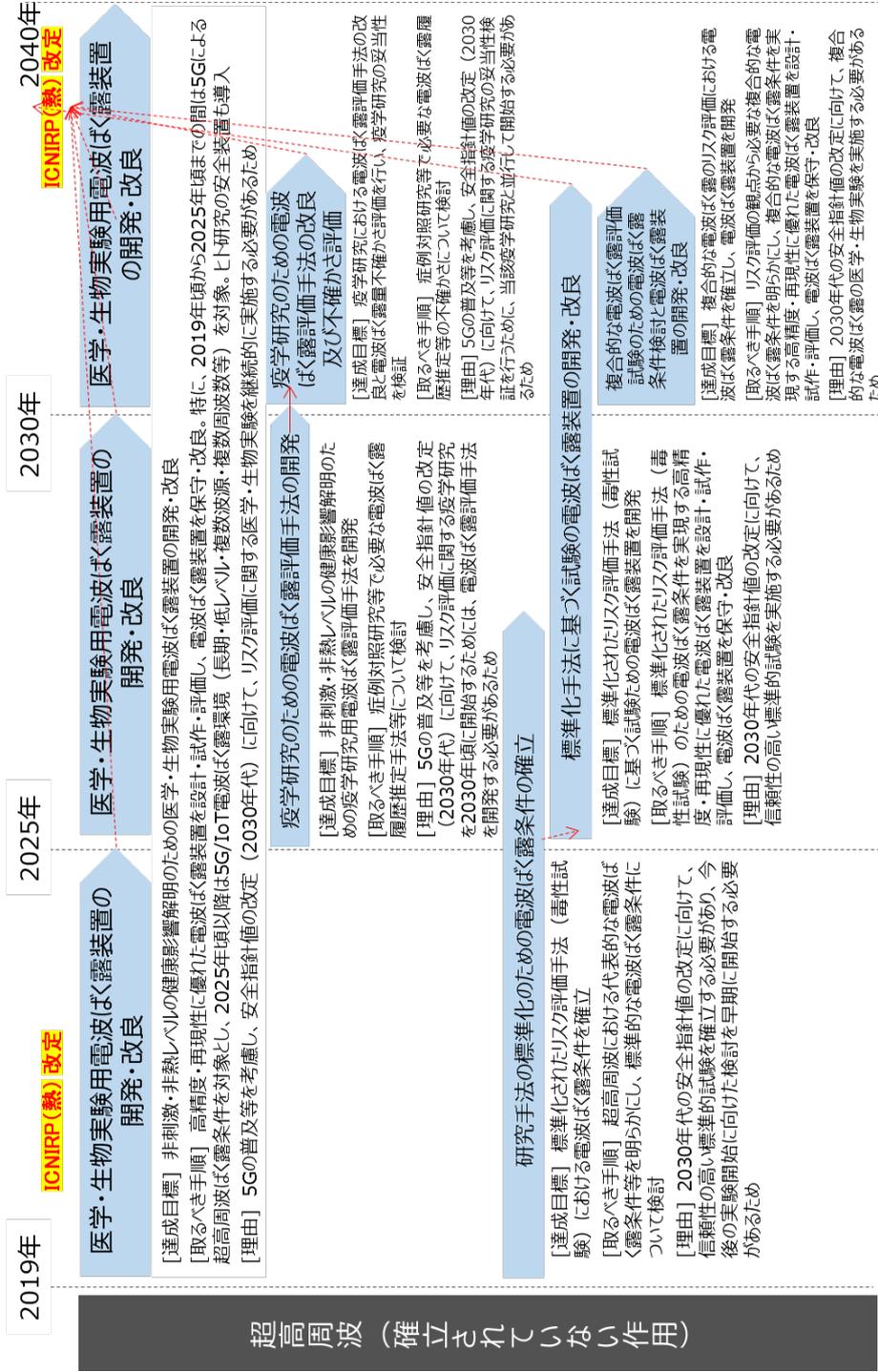


図4-10 工学研究推進のためのロードマップ（超高周波（確立されていない作用））



4-2 リスク管理に関する研究

4-2-1 安全指針値

〔中間周波〕

現行の安全指針値の定義を検証し、将来の国際ガイドラインの改定（2020年代後半を想定）に資するため、「安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化」については、2019年以降早い段階で開始することが必要であり、得られた成果は、2025年以降に開始する「安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量）の不確かさ評価）」に活用し、国際ガイドラインの改定版に提案する指針値の不確かさを明らかにし、さらにこれらの成果を活用し、2030年頃以降に開始する「定常刺激と非定常刺激に対する安全指針値の策定」を進める必要がある。また、「安全指針値根拠（低減係数）の高精度化」については、EV用WPT等大電力の電波が生活環境で用いられる将来に備え、従来以上に厳密な人体防護が必要となってくるため、その導入時期を踏まえ、早期に開始する必要がある。

将来の国際ガイドラインの改定（2020年代後半を想定）に当たっては、参考レベルの根拠となる体内誘導量の推定精度に関わる「誘導係数評価（外部電磁界－体内誘導電界）の高精度化」についても、2019年以降早期に開始する必要がある。得られた成果は、2025年以降に開始する「安全指針値の改良（国内外の整合性向上）」に活用し、国際的な調和に資するとともに、2030年以降に開始する「定常刺激と非定常刺激に対する安全指針値の策定」においても活用する必要がある。なお「定常刺激と非定常刺激に対する安全指針値の策定」については、当該項目が対象となると想定される国際ガイドラインの改定（2040年代を想定）に向けて、2030年頃から2040年頃までの間に開始し、完了する必要がある。

〔高周波〕

現行の安全指針値の定義を検証し、将来の国際ガイドラインの改定（2030年代後半を想定）に資するため、「安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化」については、2019年頃から2030年頃までの間に実施することが必要であり、得られた成果は、その後の「安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量）の不確かさ評価）」の研究に活用し、2035年頃までに国際ガイドラインの改定版に提案する安全指針値の不確かさを明らかにする必要がある。また、「安全指針値根拠（低減係数）の高精度化」については、IoTやマイクロ波WPTの普及等を考慮しつつ、安全指針値の定義の検証と合わせ、2019年頃から2035年頃までの間に実施する必要がある。

〔超高周波〕

5G 以降の超高周波の電波利用システムの普及等を考慮し、将来的な安全指針値の更なる改良についての検討が必要とされているため、将来の国際ガイドラインの改定（2030 年代後半を想定）に資する科学的根拠の提供を見据え、現行の安全指針値の定義を検証する「安全指針値定義（平均化領域・平均時間等）の高精度化」について、2019 年頃から 2030 年頃までの間に開始することが必要であり、得られた成果は、その後の「安全指針値根拠（閾値（人体への電波ばく露量））の不確かさ評価」の研究に活用し、国際ガイドラインの改定版に提案する指針値の不確かさを明らかにするため、2025 年頃から 2040 年頃までの間に開始する必要がある。

また、「安全指針値根拠（低減係数）の高精度化」については、5G の普及や国際ガイドラインの改定（2030 年代後半を想定）等を考慮しつつ、安全指針値定義の検証と合わせ、2019 年頃から 2030 年頃までの間に実施する必要がある。

「安全指針値の拡張（上限周波数をテラヘルツ波に拡張）」についても、将来の国際ガイドラインの改定（2030 年代後半を想定）を見据え、測定装置の開発動向等を踏まえた上で、2025 年頃から 2040 年頃までの間に実施する必要がある。

〔まとめ〕

これらを踏まえた安全指針値に関する研究推進のためのロードマップは図 4-11～13 のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

図 4-11 安全指針値に関する研究推進のためのロードマップ（中間周波）

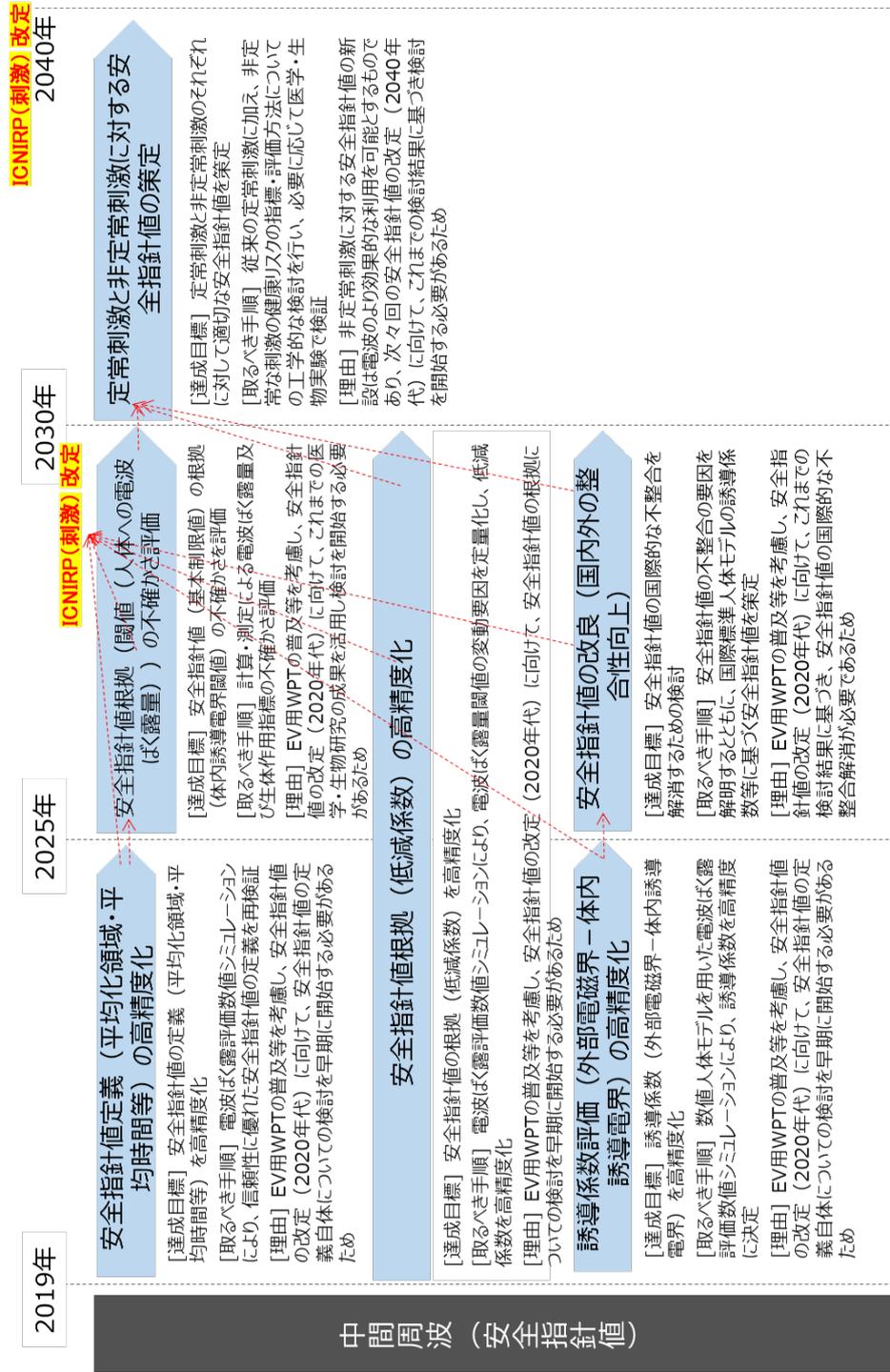


図 4-12 安全指針値に関する研究推進のためのロードマップ（高周波）

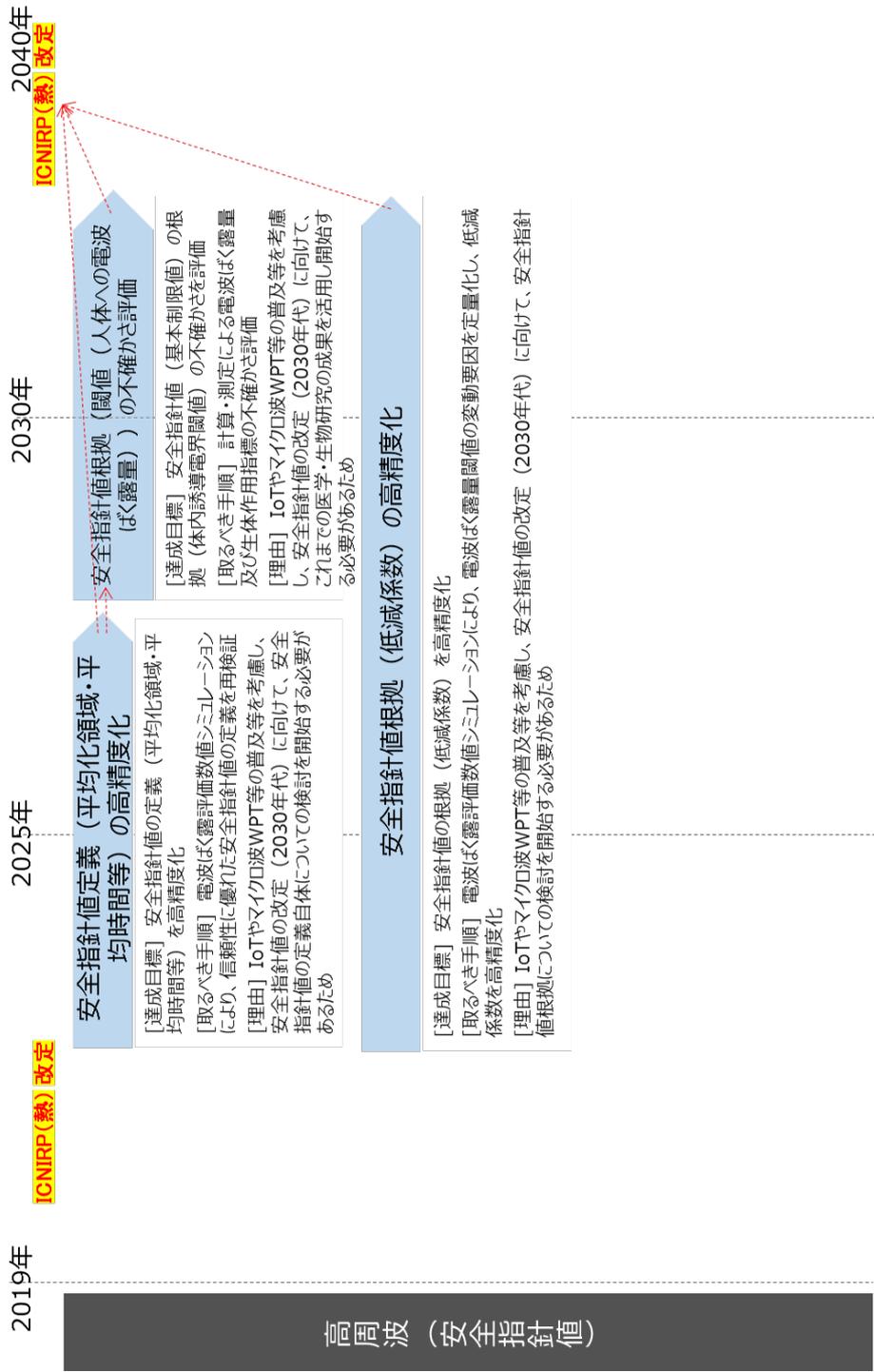


図 4-13 安全指針値に関する研究推進のためのロードマップ（超高周波）



4-2-2 適合性評価方法

〔中間周波〕

「WPT の適合性評価方法の改良・標準化」については、国際規格の発行及び改定（2020 年代）に向けて、我が国における WPT 利用と齟齬が生じないように国際標準化活動にも貢献・主導していくことが重要であり、2019 年以降早い時期に開始し、完了する必要がある。

また、新たな評価原理に基づく信頼性及び再現性に優れた適合性評価方法を開発するため、「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」についても、国際規格の発行・改定（2020 年代）に向けて、早期に開始する必要がある。

将来的な大型自動車等に対応した大電力の WPT の導入検討に際しては、基本制限値を直接評価することも必要とされるため、現在の技術では困難な刺激作用の基本制限値（体内誘導電界強度）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であり、「基本制限（体内誘導電界）の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化」について、2025 年頃から 2030 年頃までの間に検討を開始し、国際規格の発行及び改定（2020～2030 年代）に反映させることが望ましい。

〔高周波〕

近年に急速に普及している新たな電波利用システムに対応する必要があることから、「4G/LTE 端末等の適合性評価方法の改良（高速化等）と標準化」については 2019 年以降早期に着手し、適合性評価方法の高速化・効率化を図るとともに、国際標準規格に反映させる必要がある。また、携帯電話端末等よりもはるかに大きな電力を伝送するマイクロ波 WPT の普及が見込まれている一方で、適合性評価方法が確立していないため、「マイクロ波 WPT の適合性評価方法の開発と標準化」を、2019 年以降早い時期に開始・完了する必要がある。

さらに、将来的には IoT・ウェアラブルヘルスケアデバイスの開発・普及に伴い適合性評価方法の確立と標準化が必要となるため、2019 年頃から 2030 年頃までの間の国際規格改定を見据えて、2025 年頃から 2030 年頃までの間に「IoT・ウェアラブルヘルスケアデバイスの適合性評価方法の開発と標準化」に着手する必要がある。

また、現在では予想できない IoT 機器の普及後の多様な電波の利用形態に対応することを目的として、新たな評価原理に基づき網羅的な検討を目指す「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」については、中長期の検討期間が必要となるため、2019 年以降の早い時期に開始し、信頼性及び再現性に優れた適合性評価方法を開発することが必要であり、得られた成果は将来的な国際規格の改定に反映する必要がある。

〔超高周波〕

5Gの適合性評価では、ミリ波帯携帯無線端末近傍の電力密度を評価する必要があるため、「5G等の適合性評価方法の開発と標準化」により適合性評価方法を確立するとともに、現在進められている国際標準化活動に成果を反映させるため、喫緊の課題として、2019年以降早い時期に研究を開始・完了する必要がある。

今後普及が予想される車載レーダー等については、新たに適合性評価方法が必要となることから、「ミリ波レーダーの適合性評価方法の開発と標準化」について、2019年以降早い時期に研究を開始・完了し、2020年代頃を想定したミリ波レーダーを対象とした適合性評価方法の国際標準化に反映させる必要がある。

将来的な準ミリ波・ミリ波帯のウェアラブルデバイスの普及に際しても、新たな適合性評価方法の確立が求められることから、「超高周波ウェアラブルデバイスの適合性評価方法の開発と標準化」については、2025年頃から2030年頃までの間に研究を開始し、2020年代及び2030年代頃に想定される国際標準化に成果を反映させる必要がある。

将来的に、精度の高い適合性評価方法として、誘導係数等の不確かさ要因を除くことができる基本制限の直接測定が考えられ、「基本制限の直接測定に基づく適合性評価方法の開発と標準化」については、2025年頃から2030年頃までの間に研究を開始し、2020年代及び2030年代に想定される国際標準化に向けてその成果を反映させる必要がある。

また、想定以上の多様な電波の利用形態に対応するため、新たな評価原理に基づき網羅的な検討を目指す「数値計算による適合性評価方法の開発と標準化」については、中長期の検討期間を要するため、2019年以降、早い時期に開始する必要がある、必要に応じて2020年代及び2030年代に想定される国際規格の改定に貢献することが重要である。

さらに、テラヘルツ波を利用するシステムの普及を見据え、新たな周波数領域に対応した適合性評価方法を確立するため、「テラヘルツ波利用システムの適合性評価方法の開発と標準化」を2030年頃から2040年頃までの間に開始し、2030年代に想定される国際標準化に向けて貢献することが重要である。

〔まとめ〕

これらを踏まえた適合性評価方法に関する研究推進のためのロードマップは図4-14~16のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

図 4-14 適合性評価方法に関する研究推進のためのロードマップ（中間周波）

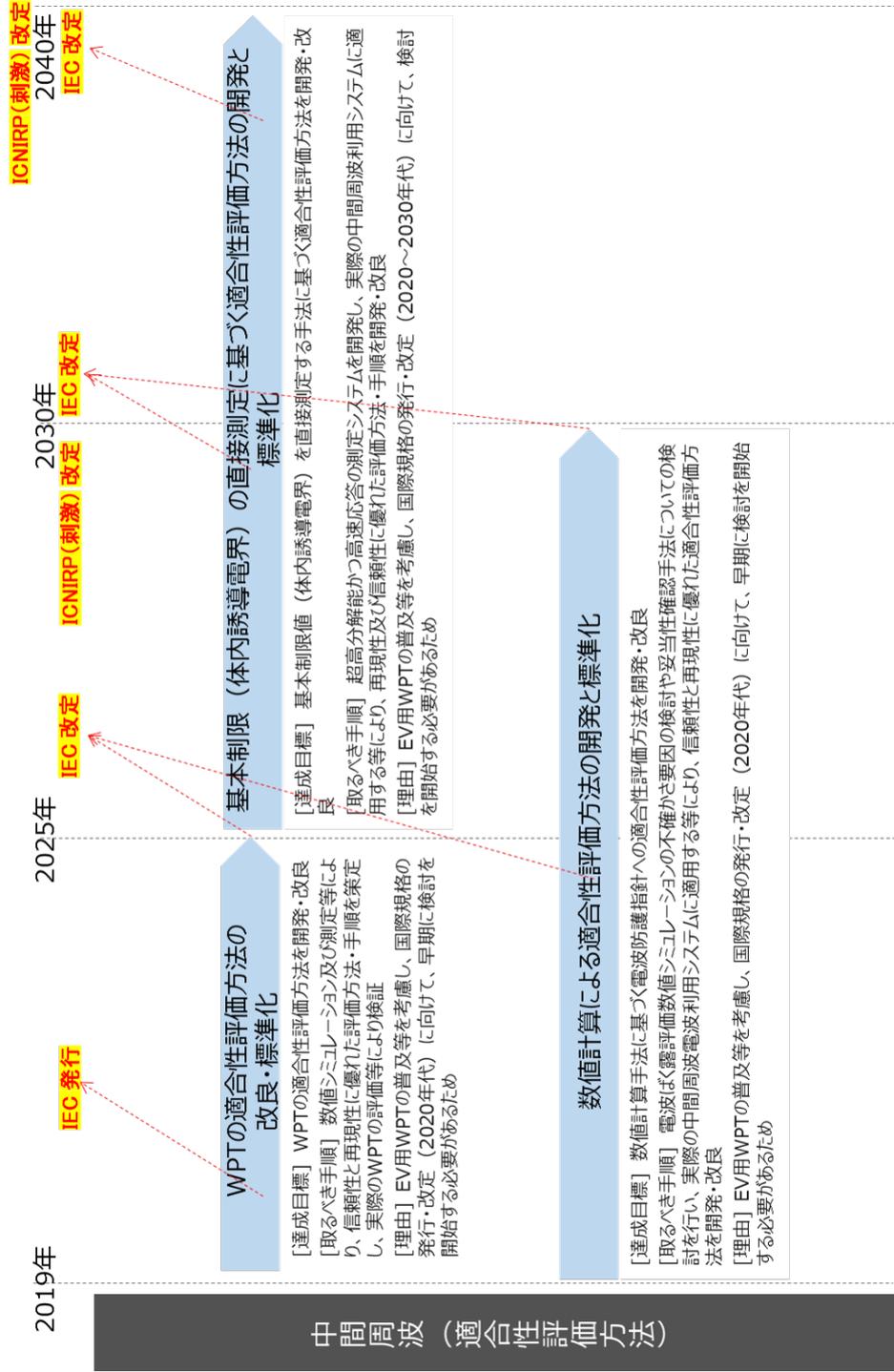


図 4-15 適合性評価方法に関する研究推進のためのロードマップ（高周波）

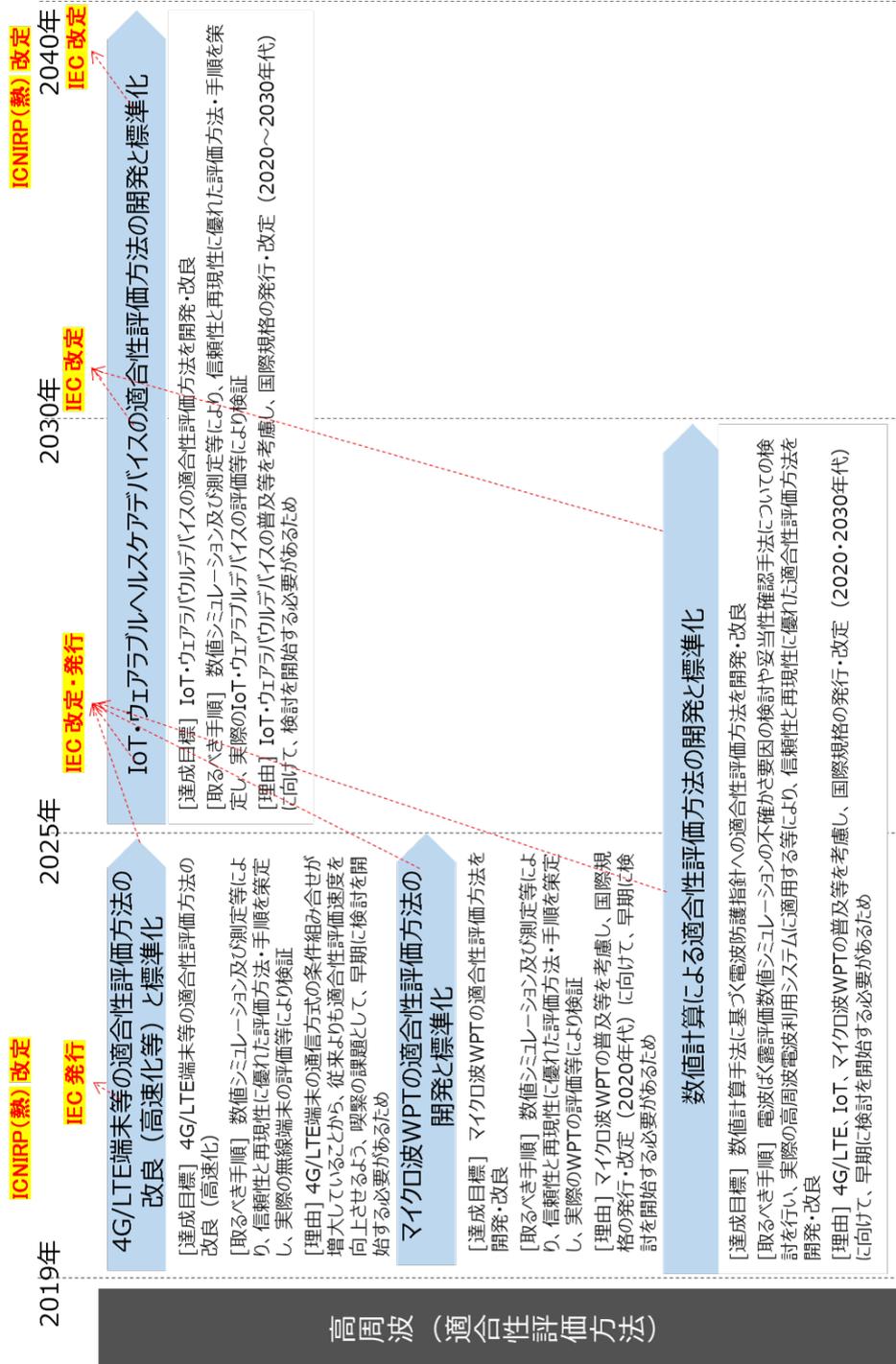
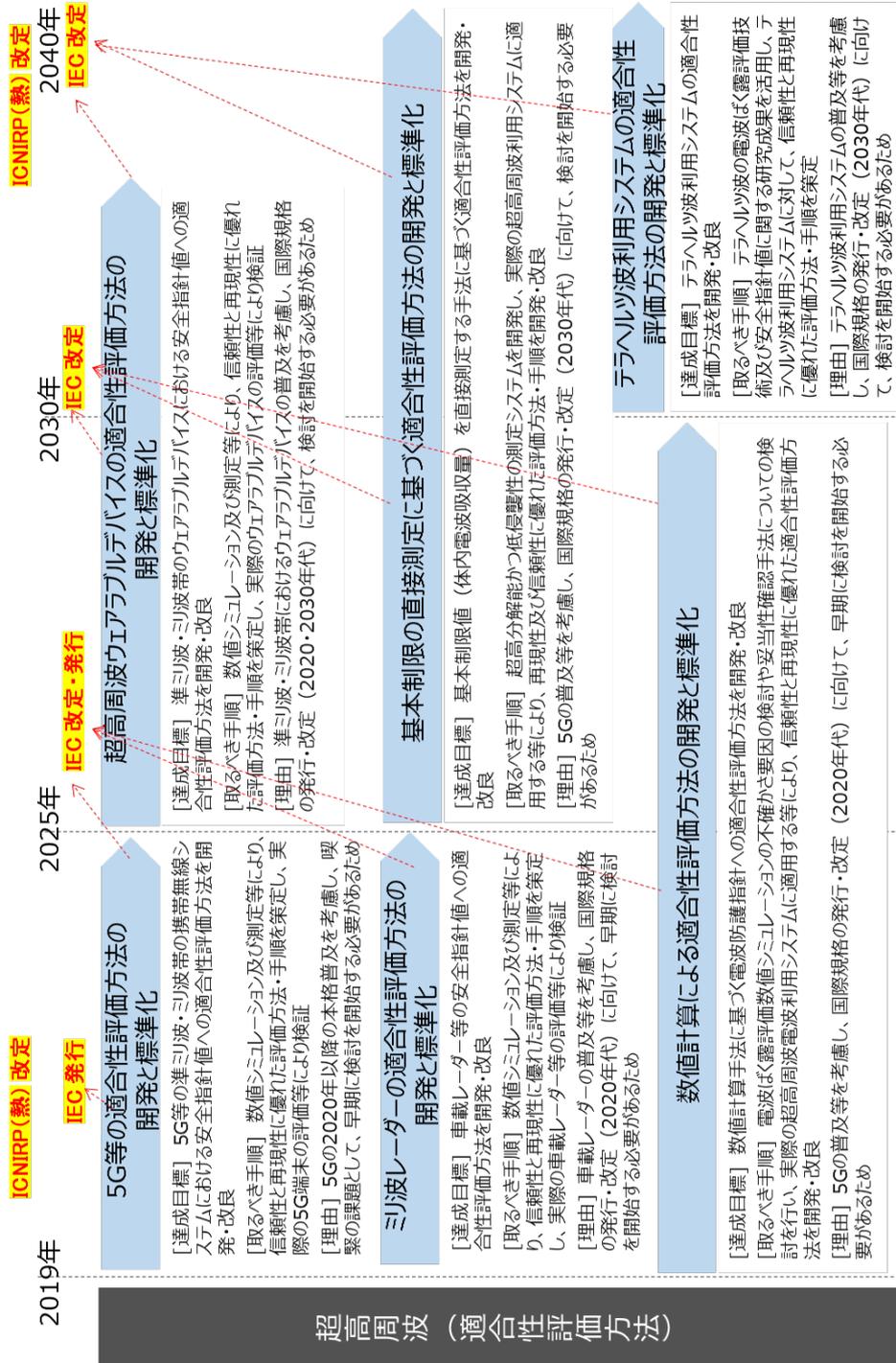


図 4-16 適合性評価方法に関する研究推進のためのロードマップ（超高周波）

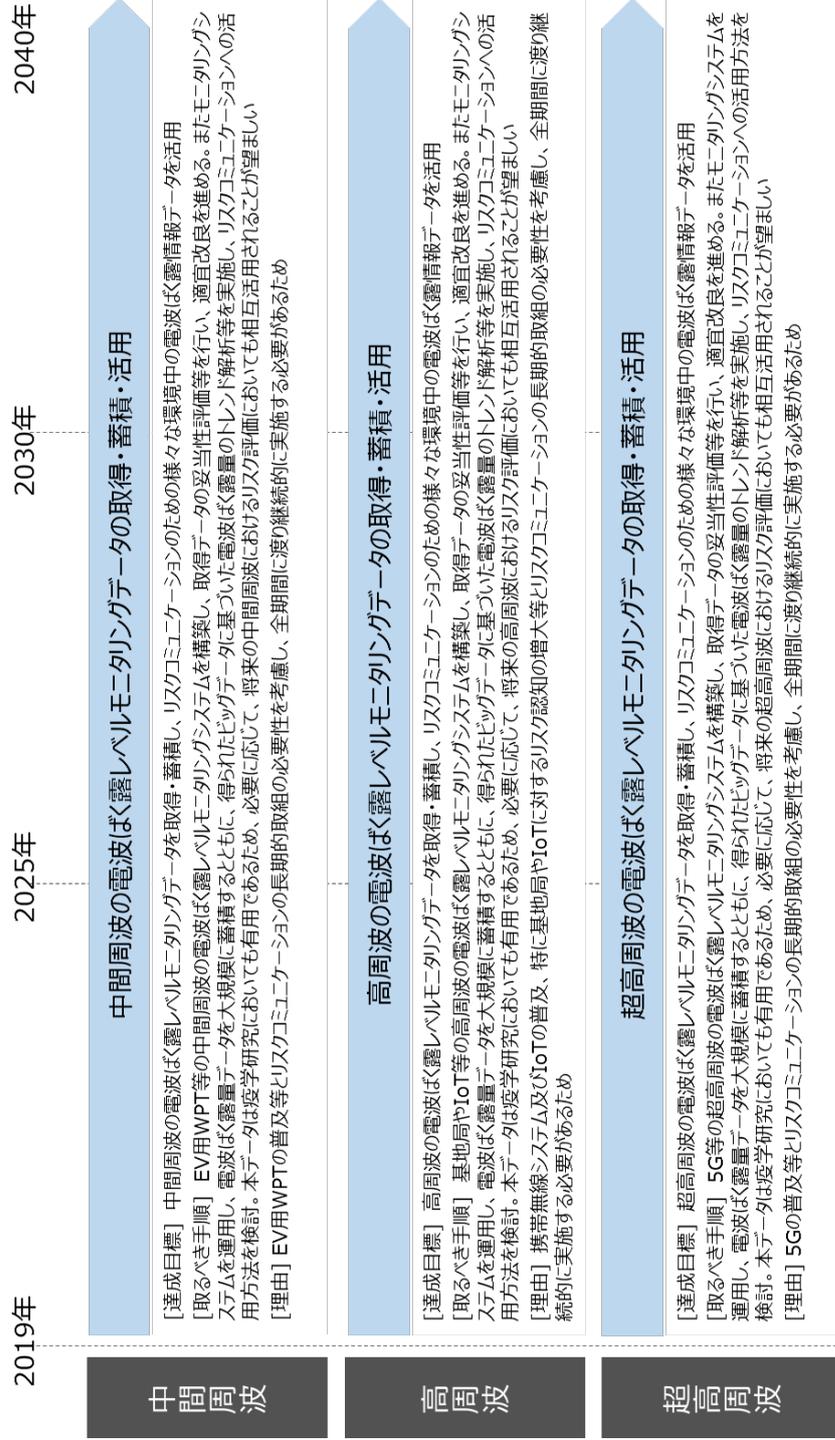


4-3 リスクコミュニケーションに関する研究

「中間周波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用」、「高周波の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用」及び「超高周波数の電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用」については、中長期に渡りデータを取得し、継続的にリスクコミュニケーションに活用する必要があるため、いずれも2019年以降早期に開始し、2040年頃まで継続的に実施する必要がある。モニタリングで得られた種々のデータは、各種の疫学研究を計画実施する際の貴重な基礎資料となるため、十分に活用されることが求められる。

これを踏まえたリスクコミュニケーションに関する研究推進のためのロードマップは図4-17のとおりであり、それぞれの研究の達成目標、取るべき手順とその理由に関しては、ロードマップ中の記載を参照されたい。

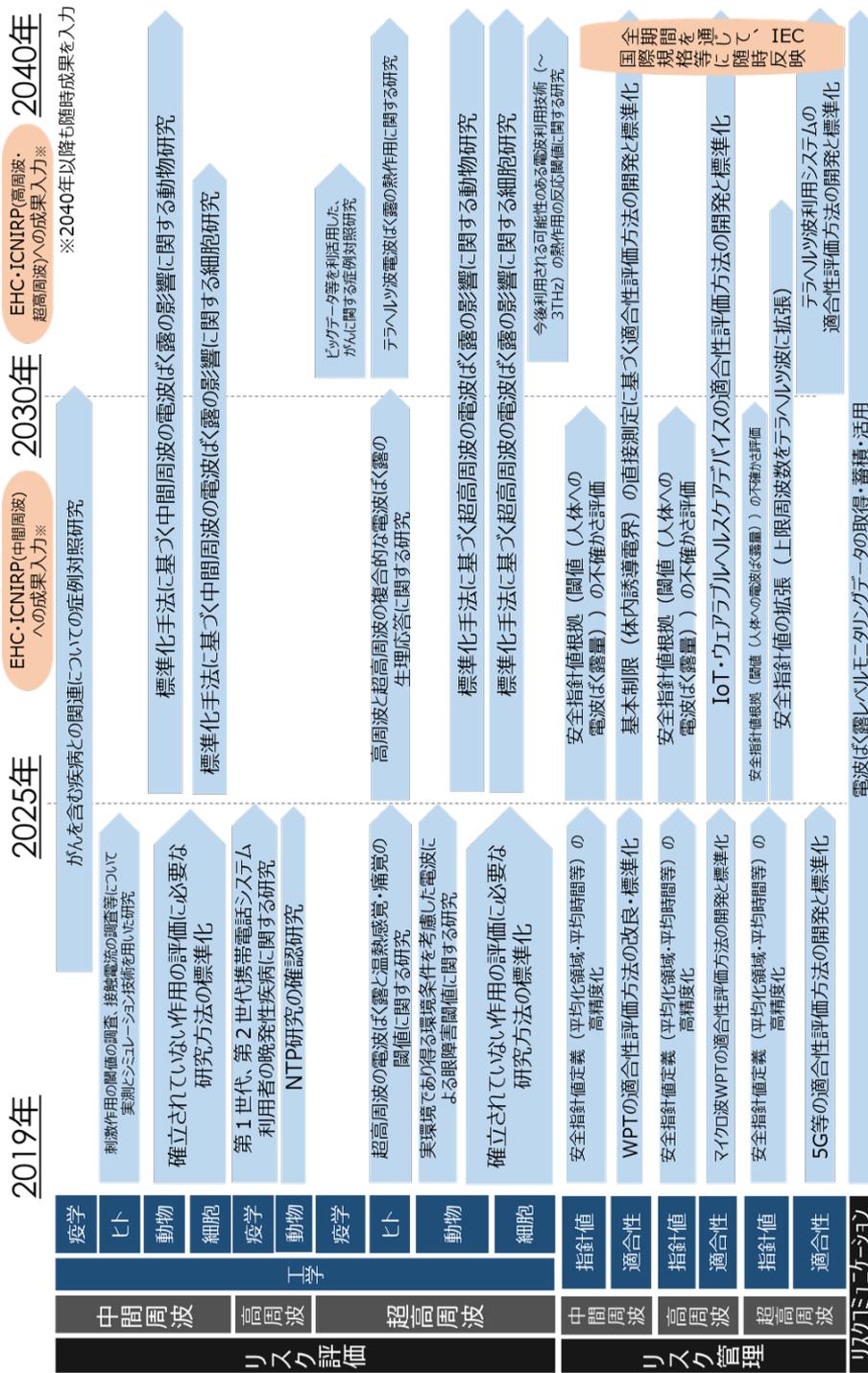
図 4-17 リスクコミュニケーションに関する研究推進のためのロードマップ



4-4 総括ロードマップ

以上の研究手法ごとの中長期的なロードマップを1つに取りまとめた総括ロードマップは、図4-18のとおりである。なお、総括ロードマップは最優先で取り組むべき研究を抽出したものであり、それ以外の各周波数に挙げた研究の実施にも最大限配慮する必要がある。

図 4-18 総括ロードマップ



※2040年以降も随時成果を入力

5 生体電磁環境に関する研究の更なる発展に向けて

5-1 研究の品質・手法、人材育成等

健康リスクを適切に評価するためには、質の高い研究に基づく科学的根拠が必要である。そのため、研究担当者は、WHOの研究アジェンダ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ことが求められる。

また、研究の品質を維持・向上させるためには、医学・生物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。一方で、生体電磁環境に関する研究分野は、医学・生物学系の研究者による認知度が低いことから、医学・生物学系の学会での周知等により、医学・生物学系の研究者を呼び込む必要がある。工学研究は、医学・生物学系の研究の正当性の基礎となる重要な分野であるが、生体電磁環境分野に習熟した工学系研究者は限られており、その育成が喫緊の課題である。これらの取組により、工学系の研究者と医学・生物学系の研究者が密接に連携して、生体電磁環境に関する研究を持続的に発展させていくことが期待される。

このような取組のほか、研究における指標や電波ばく露条件の整合を図る等の研究の系統化が品質を高める上で非常に重要であり、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である。

5-2 研究の国際連携

電磁界の健康影響に関する国際コーディネイト会合(Global Coordination of Research and Health Policy on RF Electromagnetic Fields: GLORE)は、国際協調の推進を図ることを目的として毎年一度開催される、電波の生体影響に関する国際会議である。GLOREは、平成9年に我が国の呼び掛けにより我が国と韓国の二国間で開催された生体電磁環境専門家会合を前身としており、平成11年よりEUが、平成13年より米国が参加して、現在の形に至ったものである。

このGLOREには、我が国を含む各国の専門家・行政官が出席し、最新の研究状況及び各国政府による施策の動向等について情報交換・意見交換を行っている。我が国を含む参加各国にとって、電磁界の健康リスク評価・管理を国際的な枠組みで推進していく上で重要な機会となっていることから、GLOREの機能を強化し、WHOの国際電磁界プロジェクトと連携しつつ、WHOに加えてGLOREに、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である。

5-3 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

将来的には、熱作用及び刺激作用が同時に発生する場合の健康影響評価についても検討を行うことが重要である。加えて、複数の周波数帯の電波による複合的な電波ばく露や、他の物理的・化学的な因子との複合的な電波ばく露についても検討することが望ましい。

また、近年の無線システムの発展スピードは著しく、新たな無線システムの開発に合わせて健康リスク評価を開始すると、技術の完成と健康リスク評価完了までの間にタイムラグが生じる可能性が高いため、将来的には、いくつかの標準的な電波ばく露モデル（通信信号の波形や電波ばく露条件等）を構築し、前もってこれらの標準的な電波ばく露モデルに対する検討を行うことで、健康リスク評価の迅速化・効率化が期待できる。

さらに、将来的には、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取り組んでいくことが期待される。

おわりに

生体電磁環境に関する研究は、我が国を含め、国際的に長年実施されてきており、これまでの研究成果により、国際ガイドラインや適合性評価方法がより信頼性の高いものになってきている。一方で、依然として研究の蓄積が必要な事項が残されている。今後、5G や超高速無線 LAN システム、車載レーダー技術等によるミリ波周波数帯の活用の進展に伴い、より一層高い周波数帯の電波による影響について研究を進めていく必要がある。また、中間周波についても、WPT 等の実用化に向けた開発が進められており、当該周波数帯の電波による影響についての研究を実施していくことが喫緊の課題である。

今後の研究の方向性として最優先すべき課題は、周波数に応じた動向を注視しつつ、電波防護指針の科学的根拠の妥当性と適合性を継続的に確保していくことである。この前提の下、本報告書において取りまとめられたロードマップに基づき、生体電磁環境に関する研究が着実に推進されていくことにより、電波防護指針の妥当性の維持や更なる国際貢献等に寄与することが重要である。また、本報告書が国内外の研究者や関連機関に広く周知されることにより、生体電磁環境に関する研究の相互の連携・活性化や研究に関わる人材の育成が図られることに期待したい。

なお、本報告書で取りまとめた今後の研究の方向性やロードマップについては、新たな無線システムの動向のほか、WHO や SCENIHR 等が示す優先課題、ICNIRP ガイドラインや IEC 国際規格の改定状況等の国際的な動向等を総合的に勘案し、一定期間を経た段階で、随時かつ継続的に、重点研究課題の見直しや新たな重点研究課題の選定を行うことが必要である。

生体電磁環境に関する研究戦略検討会 構成員

(敬称略、五十音順)

構成員名	所属
今井田 克己	香川大学 医学部腫瘍病理学 教授
上野 照剛 (座長)	東京大学 名誉教授
大久保 千代次 (座長代理)	一般財団法人電気安全環境研究所 電磁界情報センター所長
高口 鉄平	静岡大学 学術院情報学領域 准教授
澤谷 邦男	東北大学 産学連携機構イノベーション戦略推進センター 特任教授
中村 秀治	三菱総合研究所 参与 営業本部長
飛田 恵理子	特定非営利活動法人東京都地域婦人団体連盟 理事
廣川 二郎	東京工業大学工学院 教授
藤井 威生	電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター 教授
藤原 修	電気通信大学 産学官連携センター客員教授 名古屋工業大学 名誉教授
山根 香織	主婦連合会 参与
渡邊 昌	公益社団法人生命科学振興会 理事長