

生体電磁環境に関する検討会 報告書案

# 先進的な無線システムに関する 電波防護について

2018年2月

先進的な無線システムに関するワーキンググループ

# 目次

はじめに .....	1
第1章 先進的な無線システム等の新たな電波利用動向 .....	2
1.1. 新たな電波利用動向の概要 .....	2
1.2. WPT の動向 .....	2
1.2.1. システムの概要 .....	2
1.2.2. 利用周波数帯 .....	3
1.2.3. 研究開発・国際標準化 .....	4
1.3. 5G の動向 .....	7
1.3.1. システムの概要 .....	7
1.3.2. 利用周波数帯 .....	8
1.3.3. 研究開発・国際標準化 .....	10
1.4. 60GHz 帯無線システム（WiGig 等）の動向 .....	12
1.4.1. システムの概要 .....	12
1.4.2. 利用周波数帯 .....	12
1.4.3. 研究開発・国際標準化 .....	13
1.5. 車載レーダの動向 .....	15
1.5.1. システムの概要 .....	15
1.5.2. 利用周波数帯 .....	17
1.5.3. 研究開発・国際標準化 .....	17
第2章 海外における電波防護に関する検討状況 .....	19
2.1. 各種国際ガイドラインの検討の動向 .....	19
2.2. WHO の動向 .....	19
2.3. ICNIRP の動向 .....	20
2.4. IEEE の動向 .....	20
2.5. IEC の動向 .....	20
2.6. 各国の検討状況 .....	22
2.6.1. FCC の動向 .....	22
2.6.2. EU の動向 .....	23
第3章 新たな電波利用に向けた電波防護に関する研究状況 .....	26
3.1. 国内外における主な研究の現状 .....	26
3.1.1. 現状分析における留意点 .....	26
3.1.2. 中間周波の影響 .....	27
3.1.3. 高周波の影響 .....	28
3.1.4. 超高周波数（ミリ波、サブミリ波）の影響 .....	35

3.1.5. 各周波の研究動向の総括 .....	37
3.1.6. 生体電磁環境研究及び電波の安全性に関する評価技術研究の動向 .....	37
3.2. 6GHz以上の人体ばく露評価 .....	39
3.2.1. 局所SARと入射電力密度とのギャップ .....	39
3.2.2. 電波領域と光領域のギャップ .....	40
3.2.3. 入射電力密度の平均化時間 .....	41
3.2.4. 入射電力密度の平均化面積 .....	42
3.3. 防護対象 .....	43
3.3.1. 植込み型の医療機器や金属 .....	43
3.3.2. 新たな電波利用形態への対応 .....	43
3.4. 今後の研究課題 .....	57
第4章 新たな電波利用に向けた電波防護指針 .....	70
4.1. 新たな電波利用に向けた電波防護指針の在り方 .....	70
4.1.1. 刺激作用を考慮した電波防護指針（10MHz以下） .....	70
4.1.2. 熱作用を考慮した電波防護指針（100kHz以上） .....	72
4.1.3. 局所吸収指針対象周波数の拡張 .....	73
4.1.4. 眼への入射規制 .....	74
4.2. 電波防護指針（管理指針）の改定の方向性 .....	76
4.2.1. 考え方 .....	76
4.2.2. 電磁界強度指針 .....	76
4.2.3. 補助指針 .....	77
4.2.4. 局所吸収指針 .....	77
4.2.5. その他 .....	78
第5章 適合性評価方法 .....	82
5.1. 中間周波における適合性評価方法 .....	82
5.2. 高周波（6GHz以上）における適合性評価方法 .....	83
5.3. 高周波（6GHz以上）における数値シミュレーション等による適合性評価方法 .....	85

## はじめに

近年の社会・経済活動の発展及び情報通信技術の進歩に伴い、我が国の電波利用が急速に拡大するとともに、中間周波数帯を用いるワイヤレス電力伝送（WPT）、超高周波帯を用いる超高速無線 LAN や第 5 世代移動通信サービス（5G）等の先進的な無線システムの普及が見込まれている。

また、電波の人体への安全性に関しては、我が国では電波防護指針を策定し、これに基づいた電波法令による規制を行うことにより、あらゆる分野での電波利用が急速に進展する中で、安心・安全な電波利用環境を維持している。この電波防護指針における基準値等については、世界保健機関（WHO）の動向や国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）が策定した国際ガイドラインを参考にして、国際的な整合性を確保している。

一方で、先進的な無線システムの普及が進展すると、例えば、これまで人体近傍で用いられてこなかった周波数帯の利用が行われることが想定され、電波利用環境が従来から大きく変化することが見込まれることから、電波防護指針やその適合性評価方法に関して、その変化に迅速に対応することが重要な課題となっている。

このような背景を受け、平成 28 年 9 月に「生体電磁環境に関する検討会」（座長：大久保千代次 電磁界情報センター所長）の下に「先進的な無線システムに関するワーキンググループ」（主査：平田晃正 名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻教授）を設置し、約 1 年半の議論を経て、本報告書を取りまとめたところである。

本報告書は、同ワーキンググループで議論してきた内容を中心に、5G や WPT 等の先進的な無線システムの新たな電波利用形態、WHO や ICNIRP 等の関連する国際機関、国際標準化組織及び諸外国の動向をはじめ、国内外における生体電磁環境に関する最新の研究状況を把握するとともに、新たな電波利用形態に対する電波防護指針や適合性評価方法において議論すべき課題や想定される方向性を抽出して、電波防護指針の見直しの在り方等について論点毎にとりまとめたものである。

## 第1章 先進的な無線システム等の新たな電波利用動向

### 1.1. 新たな電波利用動向の概要

近年、スマートフォンの普及や無線通信の高速化、大容量化に伴い、電波利用の需要は急速に高まっている。また、「モノ」がネットワークにつながる IoT (Internet of Things) 時代の到来により、電波の利用は幅広い産業分野の中で多様化している。

電波利用の需要拡大に伴い、有限な電波資源を最大限に有効活用するため、先進的無線技術に基づく、新たな電波利用システムの実用化に向けた開発が進んでいる。現在使われている第3世代(3G)、第4世代(4G)を発展させた次世代の移動通信システムである第5世代移動通信システム(5G)は、準ミリ波・ミリ波帯と呼ばれる6GHz以上の高い周波数帯も活用することが想定されている。また、同じくミリ波帯を利用する超高速無線LANシステムや車載レーダ技術はすでに一部実用化段階を迎えている。一方、中間周波数帯(300Hz~10MHz)を用いるワイヤレス電力伝送(WPT)は、実用化に向けた開発等が進められているところである。

本節においては、これら新たな電波利用システムの最新動向について、利用周波数帯や研究開発及び標準化の観点から整理する。

### 1.2. WPTの動向

#### 1.2.1. システムの概要

無線技術を活用して充電を行うWPTは、モバイル・ICT機器から家電、電気自動車(EV)に至るまで、様々な分野での活用が期待されている。

WPTは無線技術を応用することで、接触することなく電力伝送を可能とする技術であり、表1.2-1に示す4方式が主流となっている。

表 1.2-1 WPTシステムの伝送方式

方式	特徴
電磁誘導方式	送電側のコイルに電流を流すと磁束が生じ、受電側のコイルにも電流が流れることにより充電する。
磁界結合方式	送電側と受電側にコイルを設置し、適切な周波数の磁界によるコイルの共振結合を利用して、電力を伝送することにより充電する。
電界結合方式	送電側と受電側にそれぞれ電極を設置し、電極が接近したときに発生する電界を利用して電力を伝送することにより充電する。
電波受信方式	受信した電波を整流回路で電気エネルギーに変換することにより充電する。

出所) 電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件(平成27年7月情報通信審議会答申)

特に、2007年にマサチューセッツ工科大学が発表した磁界結合方式のWPT装置の研究<sup>(1)</sup>を契機に国内外の研究開発が加速している。我が国においては、「電波新産業創出戦略」（2009年7月）でWPTが取り上げられ、同月、民間団体のブロードバンドワイヤレスフォーラムが設立された。同団体はWPTの実用化に向けた活動を実施している。同団体の検討も踏まえて、「電波の有効利用の促進に関する検討会」報告書（2012年12月）において、「電気自動車に対応したワイヤレス給電システムについては、2015年の実用化を目指すなどロードマップを参考に円滑な導入に向けて、官民が連携した役割の下、国際協調を図りながら、我が国の技術優位性を維持した取組を加速させる必要がある」と示されており、2015年の実用化を目指し取り組まれることとなった。この結果として後述のとおり、2016年に一部のWPTシステムの制度化が実施されており、今後WPTシステムの普及が進むことが見込まれている。2016年に取りまとめられた電波政策2020懇談会報告書では、特に電気自動車用WPTシステムについて普及を図るため、2020年までに周波数共用検討等の結果に基づき、WPTシステムの利用周波数及び妨害波許容値について国際標準化を推進するとともに、システムの互換性を確保するための規格・仕様の標準化を進めるとしている。

### 1.2.2. 利用周波数帯

総務省の情報通信審議会・情報通信技術分科会電波利用環境委員会に設置されたワイヤレス電力伝送作業班の議論を経て、WPTシステムの技術的条件に係る情報通信審議会一部答申（2015年1月及び7月）がなされ、2016年3月に、電気自動車用WPTと、6.7MHz帯磁界結合型の家電機器用WPTシステムと400kHz帯電界結合型のモバイル機器用WPTについて、高周波利用設備の型式指定として制度化（省令改正）が行われた（表1.2-2）。

表 1.2-2 国内の制度化実施済みの WPT システム

対象	電気自動車用 非接触電力伝送装置	一般用非接触電力伝送装置	
		6.7MHz帯磁界結合型 非接触電力伝送装置	400kHz帯電界結合型 非接触電力伝送装置
給電対象・ システム イメージ	電気自動車 	スマートフォン、タブ レットPC 等 	ノートPC 等 
電力伝送 方式	磁界結合方式		電界結合方式
伝送電力	~7.7kW	~100W	~100W
使用 周波数	79kHz~90kHz	6.765MHz~6.795MHz	425~524 kHz (アマチュア無線、海上無線、 中波ラジオ放送に割り当てら れた周波数帯は除く)
送受電 距離	0~30cm程度	0~30cm程度	0~1cm程度

出所) 先進的な無線システムに関するワーキンググループ (第1回) 事務局資料

国際的な利用周波数帯としては、2017年9月にWPTの周波数範囲を記載するITU-R勧告が承認され、磁界結合方式のモバイル・携帯機器用WPTの周波数範囲については6.78MHz帯と同勧告で示されている<sup>(2)</sup>。また、世界無線通信会議WRC-15において、EV用のWPTがITU-Rで緊急の対処を要する研究(urgent studies)と位置付けられ、その研究結果を2019年のWRC-19の無線通信局長レポートを審議する議題の対象とすることが合意されている。現在、利用または利用が検討されているWPT向け周波数帯を表1.2-3に示す。

表 1.2-3 利用/利用検討されている主な WPT 向け周波数帯

利用形態	グローバルな標準化団体など	個別地域
モバイル・IT機器	6765-6795kHz (ITU, AirFuel Alliance) 110-205kHz (WPC)	6765-6795kHz: 日本 (磁界結合方式) 425-524 kHz: 日本 (電界結合方式)
EV	79-90 kHz (ETSI <sup>(3)</sup> , IEC 61980) 81.38-90 kHz (SAE J2954)	19-21 kHz: 韓国 (バスなどの重量車) 59-61 kHz: 韓国 (バスなどの重量車) 79-90 kHz: 日本

出所) APT レポート<sup>(4)</sup>等を基に作成

### 1.2.3. 研究開発・国際標準化

既にWPT機器として実用化・普及しているモバイル・IT機器向けのワイヤレス充電の標準化に関しては、業界のアライアンスやコンソーシアム形式での標準化が行われている。団体の合併等を経て、現在は表1.2-4に示す「Qi」を推進するWireless Power Consortiumと、「Rezence」及び「Powermat」を推進するAirFuel Allianceの2団体が標準化を牽引している。

表 1.2-4 業界アライアンスによる WPT 標準化団体

標準化を行う業界団体	概要
Wireless Power Consortium (WPC) <会員数：約 300>	2008 年に設立され、電磁誘導方式の「Qi」を推進。既に 800 以上が製品化。数 kW クラスの家電応用も検討中。また、新たに磁界結合方式の規格化も検討している。2017 年 2 月には Apple が WPC に加盟。
AirFuel Alliance <会員数：約 150>	磁界結合方式の規格「Rezence」を推進してきた Alliance for Wireless Power (A4WP) と電磁誘導方式の規格「Powermat」を推進してきた Power Matters Alliance (PMA) が合併する形で 2015 年 11 月に発足。2017 年 3 月には Huawei や Motorola Solutions が新たに加盟。

出所) WPC 及び AirFuel Alliance ウェブサイト情報を基に作成

上記の標準化団体が策定する主な規格を表 1.2-5 に示す。現在実用化されているのはモバイル・IT 機器向けの近距離の充関連製品が主だが、各団体においてはより給電距離が長く、給電能力が高い規格の検討も行われている。

また、IEC/TC100 において、上述の WPC の Qi に関係するものが IEC PAS63095-1<sup>(5)</sup>に、AirFuel Alliance に関係するものが IEC 63028<sup>(6)</sup>に国際標準化されている。

表 1.2-5 モバイル/IT 機器向け規格の比較

団体 / 規格	WPC / Qi	AirFuel / Powermat	AirFuel / Rezence
給電方式	電磁誘導方式	電磁誘導方式	磁界結合方式
周波数帯	110-205kHz	277-357kHz	6.78MHz 帯 (ISM)
給電電力	Low Power ~5W Medium Power ~15W	~5W	~50W
最大給電距離	5mm	5mm	50mm
同時給電可能台数	1 台	1 台	複数
制御方法	負荷変調	負荷変調	Bluetooth による Out-of-Band 通信

出所) WPC 及び AirFuel Alliance の資料を基に作成

EV 向け WPT に関しては、自動車・航空機の標準化団体 SAE International 及び IEC/ISO がそれぞれ連携しながら標準化作業を進めている。

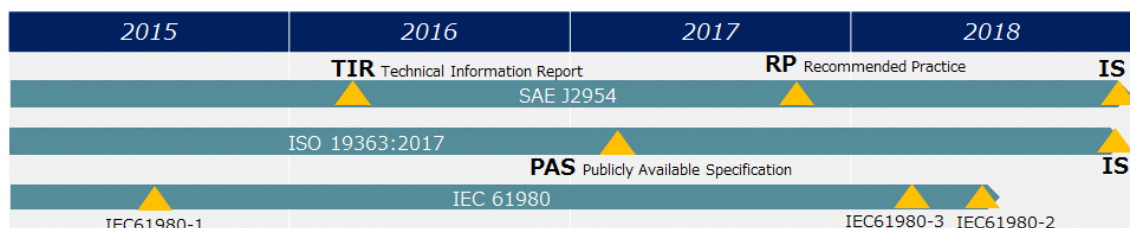
SAE は、2016 年に技術文書 TIR J2954 を発行、同年 TIR に基づくテスト検証を行った上で、2017 年 11 月に発行された推奨ガイドライン (Recommendation Practice: RP) において 11kW までの WPT における設計及び評価方法等が示された<sup>(7)</sup>。さらに、RP の次段階とし



て、実車のテストデータを反映した国際規格が 2018 年中に発行される予定となっている。

そのほか、EV 向けワイヤレス充電に関する IEC 61980 についても 2018 年に技術文書が発行される予定となっている。

図 1.2-1 に主な EV 向け国際標準化のスケジュール、表 1.2-6 に EV 向け WPT 規格の策定状況を示す。



出所) SAE International, ISO TC22/SC37, IEC/TC69 の資料を基に作成

図 1.2-1 EV 向け WPT 国際標準化スケジュール (見込み)

表 1.2-6 EV 向け WPT 規格の策定状況

EV 向け WPT 規格	内容
SAE TIR J2954 <2016.5> Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology	一般自動車用 WPT の製品ガイドラインとしての技術文書 (TIR) WPT システムの EMC/EMF の評価方法に関する内容も含む。互換性確保のため、周波数帯として 81.38-90 kHz を決定。
ISO/PAS 19363:2017 <2017.1> Electrically propelled road vehicles -- Magnetic field wireless power transfer - - Safety and interoperability requirements	EV 用 WPT の車両側の安全性及び相互運用性に関する一般仕様書
IEC 61980 <策定中> Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems	ワイヤレス充電システムの規格 IEC61980-1 : 一般要件・・・2015年7月発行 IEC61980-2 : 制御通信・・・2018年8月発行予定 IEC61980-3 : 磁界結合 WPT・・・2018年3月発行予定

出所) SAE International、ISO TC22/SC37 及び IEC/TC69 の資料を基に作成

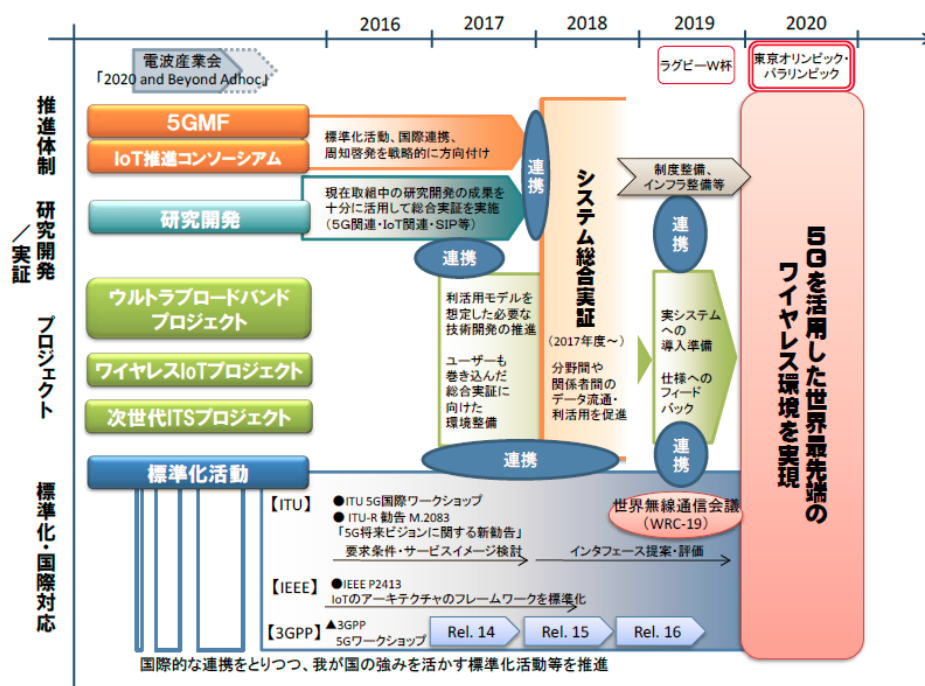
### 1.3. 5G の動向

#### 1.3.1. システムの概要

5G は、超高速だけでなく、超低遅延、多数同時接続といった新たな特徴を持つ次世代の移動通信システムであり、IoT 時代の ICT 基盤として、早期実現が期待されている。5G の主要性能を以下に示す。

- ・「超高速」：最高伝送速度 20Gbps（現行 LTE の 100 倍）
- ・「超低遅延」：1 ミリ秒程度の遅延（現行 LTE の 1/10）
- ・「多数同時接続」：100 万台/km<sup>2</sup>の接続機器数（現行 LTE の 100 倍）

我が国においては、産学官の連携により 5G 実現に向けた活動を推進することを目的として、平成 26 年 9 月、「第 5 世代モバイル推進フォーラム (5GMF)」が設立され、5G の要素技術、要求条件、利活用が想定されるアプリケーション等をまとめるとともに、ワークショップの開催、MoU 締結等により、5G 推進団体間の国際連携を強化している。また、総務省が平成 26 年に開催した電波政策ビジョン懇談会の最終取りまとめでは、①第 5 世代モバイル推進フォーラム (5GMF) による活動、②産学官連携による 5G 関連技術の研究開発の推進、③ITU 等における 5G 標準化活動の 3 つを柱にして、2020 年の第 5 世代移動通信システムの実用化に向けて取り組むこととする「第 5 世代移動通信システム推進ロードマップ」が示された。さらに、平成 28 年の電波政策 2020 懇談会報告書においては、各プロジェクト推進のためのロードマップが図 1.3-1 のように示された。



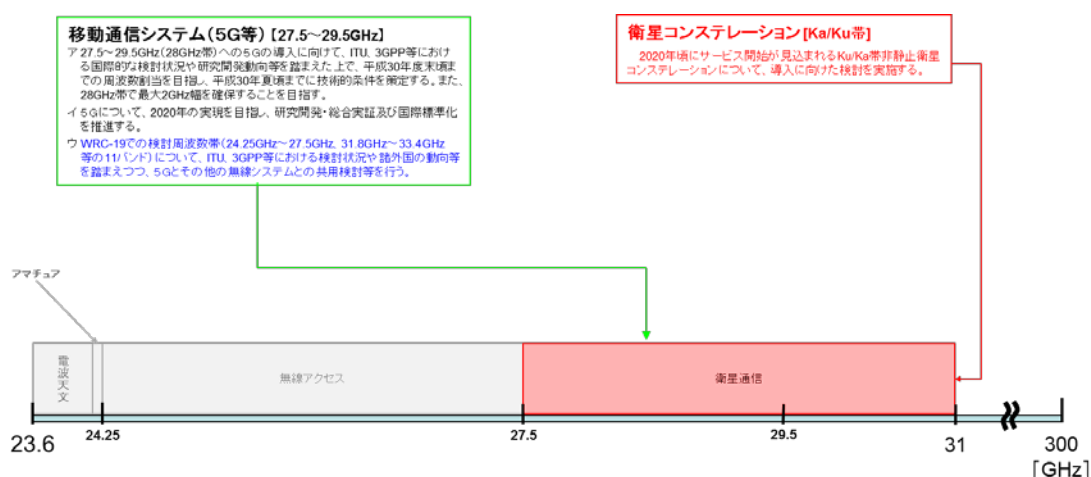
出所) 電波政策 2020 懇談会報告書 (平成 28 年 7 月)

図 1.3-1 5G 実現のためのプロジェクト推進のためのロードマップ

### 1.3.2. 利用周波数帯

5G では、従来の移動通信システムでの利用が困難であった 6GHz 以上の高周波数帯、特にミリ波帯の有効利用が大きな技術的特徴である。国際的な利用周波数帯に関しては、2015 年の ITU 世界無線通信会議（WRC-15）において、2019 年開催予定の WRC-19 の議題 1.13 として、2020 年以降の IMT の将来開発に向けて、24.25 GHz から 86 GHz までの 11 の周波数帯について、IMT 用周波数として追加特定を検討することが合意されている<sup>(8)</sup>。

国内では 5G の候補周波数として、「周波数再編アクションプラン(2017 年 11 月改定版)」において、3.7GHz 帯(3.6~4.2GHz)及び 4.5GHz 帯(4.4~4.9GHz) の他、28GHz 帯(27.5~29.5GHz) について、ITU や 3GPP 等における国際標準化動向を踏まえた上で、2018 年度末頃までの周波数割当てを目指し、2018 年夏頃までに 5G の技術的条件を策定することとされている。



出所) 周波数再編アクションプラン (2017 年 11 月改定版)

図 1.3-2 ミリ波帯における 5G 周波数候補

一方、米国では、FCC が 2015 年、24GHz 以上の帯域における 5G 向けの周波数帯の候補として、①28GHz 帯、②37GHz 帯、③39GHz 帯及び④64-71GHz 帯を特定し、新たな運用規則を提案する規則制定提案告示 (Notice of Proposed Rulemaking: NPRM) を発表した。NPRM に基づく同規則の報告と命令 (Report and Order: R&O) に対して、2016 年 7 月、FCC の採決が行われ、全会一致で承認された。これにより、24GHz 以上の帯域におけるワイヤレスブロードバンドサービス (Upper Microwave Flexible Use) に関する新規則が正式に導入されるとともに、世界で初めて同周波数帯を次世代ワイヤレスサービス向けに開放することが決定された<sup>(9)</sup>。FCC によって特定された周波数帯の詳細を表 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 米国において 5G 向けに開放された 24GHz 以上の周波数帯

周波数帯	特徴
① 28 GHz 帯 (27.5-28.35 GHz) 及び ② 37 GHz 帯 (37-38.6 GHz)	移動体通信事業者向けに地理的サービスエリアごとに免許を発行する帯域。28 GHz 帯は全国レベルに展開するライセンス、37GHz 帯は Partial Economic Area (PEA) ベースのライセンスとなる。
③ 39 GHz 帯(38.6-40 GHz)	37～39 GHz 帯で継続的な商用事業を可能とする計画を採択。一部の軍用システム向けの帯域は維持されるものの、37-37.6 GHz においては、連邦政府ユーザとその他ユーザの共用アクセスを可能とする。なお、39.5-40 GHz における FSS (固定衛星業務) 及び MSS (移動衛星業務) は、引き続き軍用システム向けに維持される。
④ 64-71 GHz 帯	FCC 規則 Part 15 に定められる免許不要局向け帯域 57～64GHz に隣接する帯域として、同帯域と同様に免許不要局向け帯域とする。

出所) 総務省「世界情報通信事情」(米国)

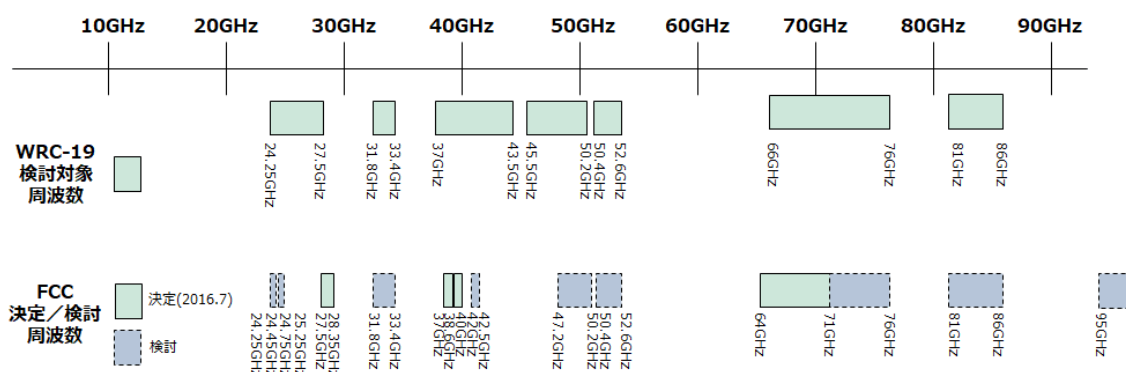
上記の周波数帯の特定にあたり同周波数帯における技術基準も規定され、ワイヤレスブロードバンドサービスを構成する 3 つのデバイスに対して、等価等方輻射電力 (EIRP) の上限値が表 1.3-2 に示すように決定された。3 つのデバイスのうち、端末を想定した Mobile Station に関しては、2015 年の NPRM の上限値のとおり値が設定された。一方、Base Station に関しては、NPRM で提案された 62dBm に対して、ミリ波帯においては、既存のモバイルバンドと比較して、電力スペクトル密度が低く抑えられ、5G 展開の障壁になるという産業界からの要望を踏まえ、75dBm に引き上げられた。さらに、産業界からの強い要望により、小型の基地局設備等を想定した新たな区分のデバイス Transportable Station が追加され、EIRP の上限値は 55dBm と設定された。

表 1.3-2 5G 向け周波数帯の技術基準

デバイスのクラス	EIRP 上限値
Base Station	75 dBm/100 MHz EIRP
Transportable Station * R&O 上の定義は、 “transmitting equipment that is not intended to be used while in motion, but rather at stationary locations”	55dBm EIRP
Mobile Station	43dBm EIRP

出所) FCC R&O (FCC 16-89) を基に作成

現在、24 GHz 帯以上で検討されている 5G 向け周波数帯を図 1.3-3 に示す。

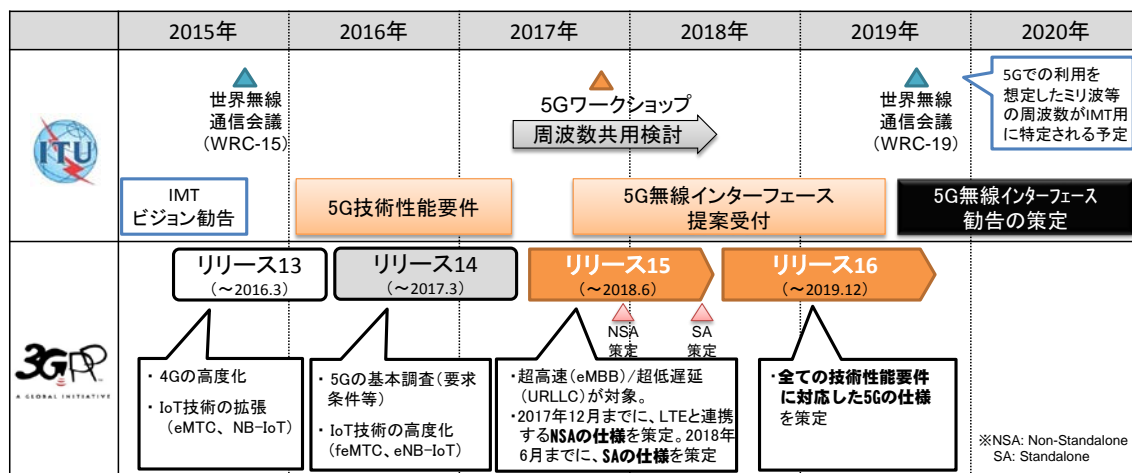


出所) FCC R&O (FCC 16-89) 及び「ITU 2015 年世界無線通信会議 (WRC-15) 結果概要」を基に作成

図 1.3-3 5G 向け周波数帯の検討状況

### 1.3.3. 研究開発・国際標準化

2020 年の 5G 実現に向けて ITU や 3GPP 等の国際標準機関において、5G に関する標準化活動が本格化している。3GPP では、リリース 14 において 5G に関する調査を開始し、リリース 15 で超高速/超低遅延に対応した 5G の最初の仕様を、リリース 16 で ITU IMT-2020 勧告に盛り込むことを想定し、全ての技術性能要件に対応した 5G の仕様を取りまとめる予定としている。5G の国際標準化のスケジュールを図 1.3-4 に示す。



出所) 情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会報告 (平成 29 年 9 月)

図 1.3-4 5G の国際標準化動向

国際標準化における検討と並行して、表 1.3-3 に示すように諸外国でも産官学連携による 5G 実現に向けた取組が活発に行われている。総務省においては 2017 年 5 月より 5G の実現による新たな市場の創出に向けて、通信事業者をはじめとして様々な利活用分野の関係者が参加する 5G の総合実証試験を開始している<sup>(10)</sup>。また、表 1.3-4 に示すように携帯電話事

業者による 2020 年の商用サービス開始に向けた実証等の取組も活発化している。

表 1.3-3 各国の 5G 実現に向けた取組状況

国	主な取組
日本	2017 年から総合実証実験を開始し、2017-2018 年は無線の基本技術に関する実証を実施予定。
EU	METIES (~2015) は、5G の無線システム設計、ロードマップ等を提案。METIS-II は 5G-PPP との連携枠組の中で実施。
中国	2015-2020 年の期間で産官の実証実験を遂行中。2016 年 9 月に第 1 フェーズ（主要技術検証）を完了 <sup>(11)</sup> 。
韓国	5G 研究開発プロジェクト（Core Technology Project, Giga Korea Project）を通じて、5G の新たな市場創出のため、中小企業の参加促進、技術移転支援等を実施。 2018 年平昌冬季オリンピックでは、韓国最大の通信事業者 KT が中心となり、世界最大規模の 5G サービスの実証試験が実施される予定。試験ネットワークは KT とパートナー企業で構成される PyeongChang 5G Special Interest Group (5G SIG) が定める共通仕様「Pyeongchang 5G Specification」に基づき構築 <sup>(12)</sup> 。

出所) 各国のプロジェクトの情報を基に作成

表 1.3-4 携帯電話事業者による 5G 商用サービス化に向けた取組

事業者名	主な取組
NTT ドコモ	2012 年 12 月に東京工業大学との共同研究で、世界初の屋外移動環境での 10Gbps 伝送に成功。2013 年より世界の主要ベンダとの個別協力による 5G 実験を開始し、2016 年 9 月現在では計 13 社との実験協力を合意。また、NOMA 技術の屋内外伝送実験や高周波数帯の電波伝搬測定など、ドコモ独自の実験も実施。2014 年にはドコモとしての 5G の目標性能、技術コンセプト、要素技術を示した 5G ホワイトペーパーを公表 <sup>(13)</sup> 。
Verizon	2015 年に 5G 技術に関するロードマップを公表 <sup>(14)</sup> 。複数のベンダと提携し 2020 年の 5G 技術の商用運用を目指し、2016 年フィールドテストを開始。
AT&T	2016 年 2 月に 5G ソリューションの研究開発において、エリクソンとインテルと提携することを明らかにし、同年 12 月にはテキサス州オースティン及びニュージャージー州ミドルタウンにおいて、15GHz 帯と 28GHz 帯における 5G のテストを開始。2017 年 1 月には、2017 年以降の 5G 関連技術の開発と実用化の目安となるロードマップを発表 <sup>(15)</sup> 。
T-Mobile US	2016 年 9 月サムスンとのデモや試験における提携を公表し、T-Mobile US が保有する 28GHz 帯とサムスンのビームフォーミングを搭載した 5G の概念実証システムを使った屋外試験を実施する予定。2017 年 5 月には、米国内で 2019 年より 5G 商用サービスを開始する計画を発表 <sup>(16)</sup> 。

出所) 各社の報道発表資料等を基に作成

## 1.4. 60GHz 帯無線システム (WiGig 等) の動向

### 1.4.1. システムの概要

60GHz 帯は近距離大容量通信用の周波数帯として普及が期待され、既に IEEE802.11ad (WiGig) 等の一部の無線通信方式において商用サービスも開始されている。

現状、60GHz 帯を用いる無線通信の通信距離は 10m 程度と短いものの、利用可能な周波数帯が非常に広く、また 60GHz 帯は国際的に免許不要周波数帯とされているため、様々なユースケースでの利用が期待されている。

我が国では、2014 年 11 月に設置された情報通信審議会 情報通信技術分科会陸上無線通信委員会 60GHz 帯無線設備作業班における議論を経て、2015 年 11 月の法改正により、60GHz 帯無線システムの技術基準が空中線電力の増力、占有周波数帯幅の拡大等の点で改正された。

米国においても、FCC が 2013 年 8 月 9 日、60GHz 帯 (57-64GHz) の使用にかかわる規則改正を行い、同帯域を利用する免許不要機器の出力レベルを上げることにより、最長 1 マイルの間で最大 7Gbps の通信が可能となっている。

諸外国における 60GHz 帯無線システムの技術基準を表 1.4-1 に示す。

表 1.4-1 諸外国における 60GHz 帯無線システムの技術基準

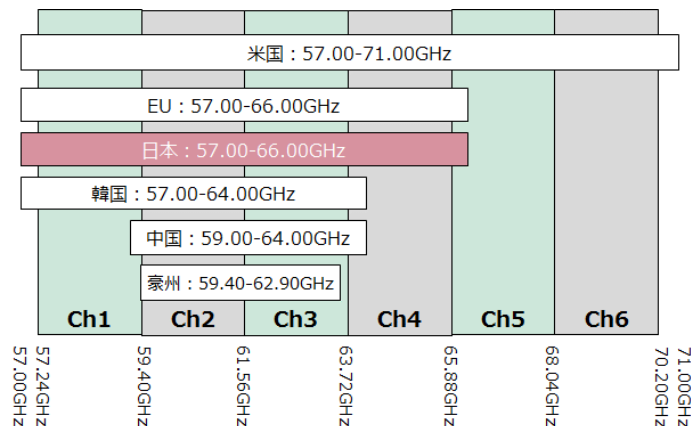
	日本	米国	EU	韓国
EIRP 上限値	40dBm (空中線電力 10dBm を超える場合)	屋内： 40dBm 屋外： 82dBm	40dBm (チャンネル帯域<1GHz の場合は、スペクトル密度に従い電力を制限)	43dBm または 57dBm (固定 P-to-P)
空中線電力 上限値	24dBm (250mW)	屋内： 27dBm(500mW) (送信帯域幅 <100MHz の場合は、スペクトル密度に従い電力を制限) 屋外： 規定なし	規定なし。	指向性アンテナを使う場合： 27dBm(500mW) 無指向性アンテナを使う場合： 20dBm(100mW)

出所) 60GHz 帯の周波数の電波を利用する無線設備の高度化に係る技術的条件 (平成 27 年 6 月情報通信審議会答申) 等を基に作成

### 1.4.2. 利用周波数帯

60GHz 帯は、近距離・高速データ通信用として、諸外国において免許不要帯域としての周波数割り当てが行われている。国内では 57GHz~66GHz が、小電力データ通信システムの無線局として割り当てられている。米国では、2016 年 7 月に決定された 24GHz 以上の利用に関する FCC の運用規則 (1.3.2. 参照) において、既存の 60GHz 帯に隣接する 64GHz~71GHz の 7GHz 幅が免許不要帯域として新たに割り当てられた。図 1.4-1 に諸外国における周波数

割り当て状況を示す。



出所) 60GHz 帯の周波数の電波を利用する無線設備の高度化に係る技術的条件(平成 27 年 6 月情報通信審議会答申)等を基に作成

図 1.4-1 60GHz 帯無線システムの周波数割り当て状況

### 1.4.3. 研究開発・国際標準化

60GHz 帯を用いる無線通信方式に関しては、表 1.4-2 に現在策定されている 60GHz 帯を用いる主な無線通信方式を示す。

表 1.4-2 60GHz 帯を用いる主な無線通信方式

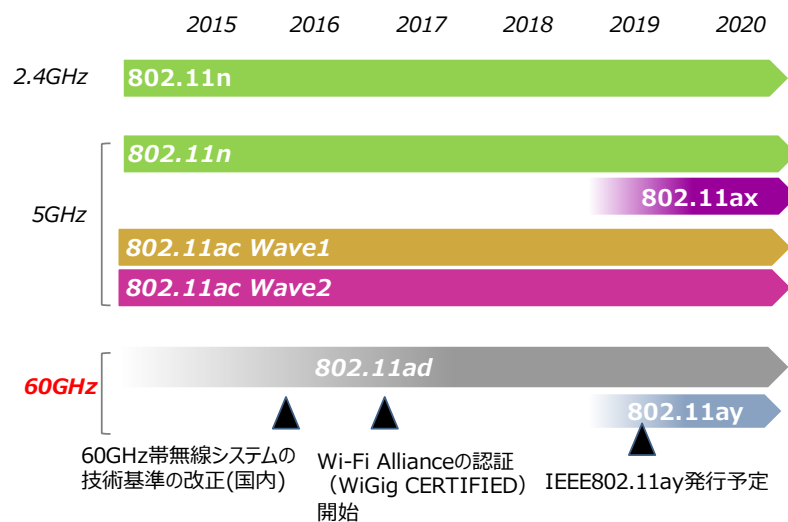
無線通信方式	IEEE802.15.3c	IEEE802.11ad (WiGig)	WirelessHD
カテゴリ	無線 PAN	無線 LAN	無線 PAN(VAN)
チャンネルプラン	Ch1:58.32GHz Ch2:60.48GHz Ch3:62.64GHz Ch4:64.8GHz	Ch1:58.32GHz Ch2:60.48GHz Ch3:62.64GHz Ch4:64.8GHz	Ch1:58.32GHz Ch2:60.48GHz Ch3:62.64GHz Ch4:64.8GHz
チャンネル間隔	2160MHz	2160MHz	2160MHz
伝送方式	SC (シングルキャリア) OFDM	SC (シングルキャリア) OFDM	OFDM
最大伝送速度	6Gbit/s (1ch.使用時)	7Gbit/s (1ch.使用時)	7Gbit/s (1ch.使用時)
最大伝送距離	10m 程度	10m 程度	10m 程度
アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテンツダウンロード</li> <li>高速ファイル転送</li> <li>ワイヤレスディスプレイ</li> <li>無線アドホックネットワーク</li> <li>PC 周辺機器間通信</li> <li>HD 動画の非圧縮伝送</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテンツダウンロード</li> <li>高速ファイル転送</li> <li>ワイヤレスディスプレイ</li> <li>無線アドホックネットワーク</li> <li>PC 周辺機器間通信</li> <li>HD 動画の非圧縮伝送</li> <li>ドッキングステーション</li> <li>無線 LAN</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>HD 動画の非圧縮伝送</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビームフォーミング機能</li> <li>15.3 MAC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低電力と高速の両機器対応</li> <li>ビームフォーミング機能</li> <li>シームレスマルチバンドオペレーション</li> <li>IEEE802.15.3c との共存機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビームステアリング機能</li> <li>NLOS 環境オペレーション</li> </ul>

出所) 60GHz 帯の周波数の電波を利用する無線設備の高度化に係る技術的条件(平成 27 年 6 月情報通信審議会答申)等を基に作成



議会答申)

2012年に策定された IEEE802.11ad/WiGig が実用段階に入ったことで、Wi-Fi は Tri-Band (2.4 / 5 / 60 GHz) 時代を迎えようとしている。2016年には、無線 LAN の業界団体である Wi-Fi Alliance が WiGig に対応した製品の認証制度「Wi-Fi CERTIFIED WiGig™」の運用を開始しており、2017年10月現在、6製品が認証を取得している<sup>(17)</sup>。国内でも2015年11月に60GHz帯無線システムの技術基準が改正されたことから、より柔軟なシステムの構築が可能となっている。さらに、図 1.4-2 に示すように、WiGig と同じく 60GHz 帯を使用し、WiGig の次世代規格と位置づけられる IEEE802.11ay の規格化完了が 2019年に予定されている<sup>(18)</sup>。



出所) Wi-Fi Alliance 資料等を基に作成

図 1.4-2 無線 LAN 技術のロードマップ

Wi-Fi Alliance では WiGig のユースケースとして、①大容量超高速データ転送、②ワイヤレスディスプレイ、③ワイヤレスドocking及び④インターネットアクセスの 4 つを提案している。2016年頃から③の PC 周りのワイヤレスドocking製品を中心に既に製品化が行われている。さらに、2017年9月には、Qualcomm のモバイルプラットフォームを採用した ASUS のスマートフォンが商用のスマートフォンとして初めて WiGig に対応することが発表されたほか<sup>(19)</sup>、HTC は Intel と共同で WiGig 技術を活用したワイヤレス VR ヘッドセットを開発するなど<sup>(20)</sup>、WiGig 技術の新たな利用形態が今後さらに広がっていく可能性がある。

## 1.5. 車載レーダの動向

### 1.5.1. システムの概要

高度道路交通システム（ITS：Intelligent Transport Systems）や現在実用化に向けて官民で取り組みが進む自動走行システムの実現において無線通信は欠かすことのできない技術であり、自動車に搭載される電波利用機器は表 1.5-1 に示すように非常に多岐にわたる。

本節では、特にミリ波帯を用いる車載レーダを対象にその動向をまとめる。

表 1.5-1 自動車の電波利用機器

電波利用機器		利用周波数
車内外の無線通信系	ITS（電波）	760 MHz
	DCM 通信モジュール	800 MHz, 2 GHz
	GPS	1.5 GHz
	ETC2.0 / DSRC	5.8 GHz
	Bluetooth, Wi-Fi（PDA リンク等）	2.4 GHz
	電話	800 MHz, 2 GHz
放送系	DTV（デジタル）	470～710MHz
	V-Low マルチメディア	99～108MHz
	AM/SW/FM/VICS	AM: 526～1629 kHz SW: 3～26 MHz FM: 76～95 MHz VICS(FM): 76～90 MHz
走行制御系	ミリ波レーダ	76～77 GHz
	後側方レーダ	24 GHz
ボデー制御系	スマートエントリ キーレスエントリ	312 MHz
	タイヤ空気圧センサ	315 MHz
	イモビライザ	134.2 kHz
	WPT 非接触充電	85 kHz

出所）先進的な無線システムに関するワーキンググループ（第5回）トヨタ自動車資料に基づき作成

我が国では、2017年5月に、国内のITS・自動運転技術の研究開発・実証事業・市場化に向けた中長期的なロードマップである「官民ITS構想・ロードマップ2017」（平成29年5月IT総合戦略本部）が策定され、2020年を目途とした「一般道路自動運転・高速道路準自動パイロットの市場化（SAEレベル2）」、2025年を目途とした「高速道路完全自動運転の市場化（SAEレベル4）」等が目標として示されている。

ITSシステムは、車両単独で実現される「自律型システム」と、人・道路・車両が協調して実現される「協調型システム」（例：路車間通信、車車間通信）に大別され、これら自律型及び協調型のシステムが連携することで実現される。

自律型システムでは、車両に搭載したセンサーやカメラにより見通し内の障害物や車両周辺の状況を検知し、ドライバーの運転支援を行う各種の技術が用いられ、先進運転支援システム（ADAS：Advanced Driver Assistant System）と総称される。自律型システムにおける電波利用機器の代表例が、ミリ波帯を使用する車載レーダである。ミリ波レーダは、送信し

た電波の反射時間から車間距離、送信波と受信波の周波数シフト（ドップラー効果）から相対車速、複数チャンネルで受信する際の位相差から方位を検出する。また、ミリ波レーダの場合、耐天候性が高いことが重要であり、この点においてもミリ波レーダは他のセンサーに比べて優れている。表 1.5-2 に主な先進運転支援システムに採用されるセンサーの例を示す。

表 1.5-2 主な先進運転支援システムと採用されるセンサーの例

先進運転支援システム	センサー
先進緊急ブレーキ（AEBS）	76GHz レーダ、ステレオカメラ、 レーザーレーダー（30km/h 以下）
車間距離制御装置（ACC）	76GHz レーダ、ステレオカメラ、単眼カメラ
全車速域 ACC	76GHz レーダ+カメラ、ステレオカメラ
後側方障害物警報	24GHz レーダ、カメラ 79GHz レーダ（開発中）
歩行者認識	ステレオカメラ、76GHz レーダ+単眼カメラ 79GHz レーダ（開発中）
車線維持支援装置	カメラ（ステレオまたは単眼）
ナイトビジョン （含む夜間の歩行者・動物認識）	近赤外線カメラ、遠赤外線カメラ
インテリジェントヘッドランプ	カメラ（対向車を認識）
信号・標識認識	カメラ
駐車支援	超音波センサー、カメラ

出所)「小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件」のうち「76GHz 帯小電力ミリ波レーダの高度化に関する技術的条件」（平成 27 年 4 月情報通信審議会答申）

レーダの性能の指標となるのは、「最大検知距離」及び「距離分解能」（帯域幅）である。長距離用のレーダとして用いられる 76GHz 帯レーダは、最大検知距離が 200m と大きいいため、車両等の大きな対象物の検知に適しており、ACC や衝突回避ブレーキに広く用いられている。

近・中距離用のレーダとして使われる 24GHz/26GHz 帯 UWB レーダ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。ただし、24GHz/26GHz 帯レーダは、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 帯高分解能レーダは 24GHz/26GHz 帯 UWB レーダと同等の検知精度を持ちながら、かつ検知距離も最大 100m と長く、上記の各レーダと比較して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、他のレーダ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適用されることが期待されている。

### 1.5.2. 利用周波数帯

車載レーダシステムにおいては、22GHz から 81 GHz に至るまで幅広い周波数帯が使用されている。主なミリ波レーダの周波数及び性能を表 1.5-3 に示す。

表 1.5-3 各種ミリ波レーダの概要

レーダ	主な方式	周波数 (GHz)	帯域幅 (Max)	空中線電力	アンテナ利得	分解能	距離
24/26GHz UWB	FMCW 方式 Fast FMCW 方式	22-29	4750MHz	-41.3dBm/MHz EIRP 以下		20cm	30m
76GHz	FMCW 方式 Fast FMCW 方式	76-77	1GHz	10mW 以下	40dBi	1-2m	200m
79GHz	FMCW 方式 Fast FMCW 方式 パルス圧縮方式	77-81	4GHz	10mW 以下	35dBi	7.5cm	100m

出所) ITU ジャーナル「高度道路交通システム (ITS) の世界的調和へのトレンド

—WRC-15 議題 1.18 と WRC-19 議題 1.12—」 Vol. 46 No. 6 (2016. 6) に基づき作成

2015 年の WRC-15 においては、議題 (1.18) として自動運転の実用化を加速する 79GHz 帯レーダへの周波数分配が取り上げられた。結果、77.5-78.0GHz の無線標定業務への一次分配が合意され、かつ自動車アプリケーションを含む幅広い用途の利用が可能になるとともに、出力電波についても過度な制限がかからないことが条件となった。これにより、ミリ波レーダに使用できる周波数が拡大されること、つまりレーダの高分解能化が可能となり、自動走行システム実現を加速するものと期待されている。

### 1.5.3. 研究開発・国際標準化

現在、ミリ波レーダを含む ITS に関する標準化は陸上移動通信の新技术を担当する ITU-R SG5 WP5A に設置された SWG-ITS で検討されている。76-81 GHz のミリ波レーダの技術仕様は勧告 ITU-R M.2057 (Recommendation ITU-R M.2057-0(02/2014) Systems characteristics of automotive radars operating in the frequency band 76-81 GHz for intelligent transport systems applications) に規定されている。

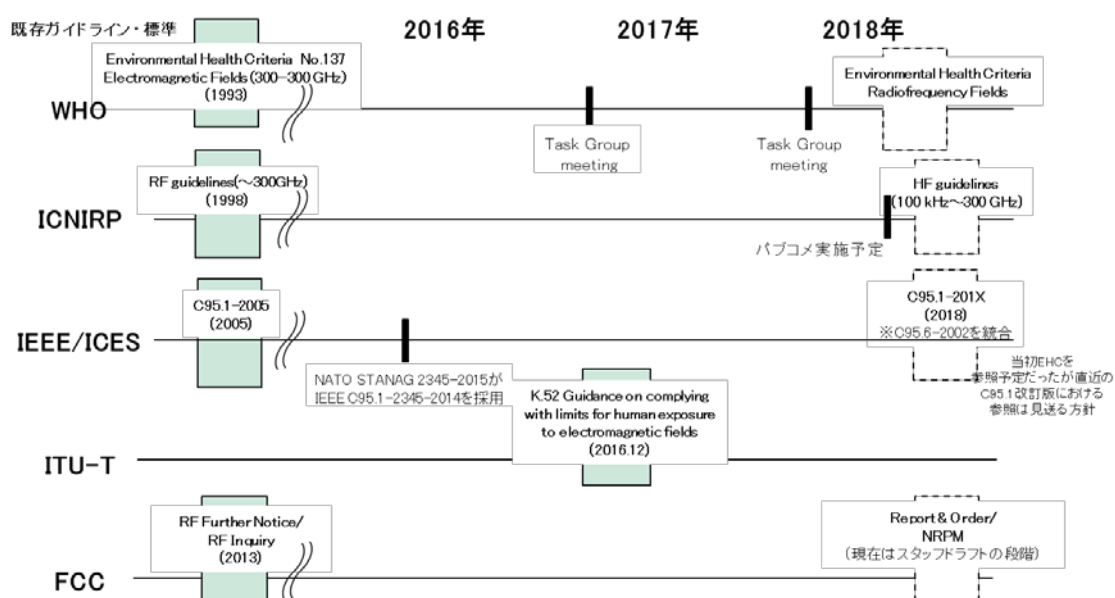
## 文献

1. A. Kurs et al., "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Vol.317, No.5834, pp.84-86, 6 July 2007
2. Recommendation SM.2110 : Frequency ranges for operation of non-beam Wireless Power Transmission (WPT) systems
3. ETSI TR 103 409 v1.1.1 :System Reference document (SRdoc); Wireless Power Transmission (WPT) systems for Electric Vehicles (EV) operating in the frequency band 79 - 90 kHz  
[https://portal.etsi.org/webapp/workProgram/Report\\_WorkItem.asp?wki\\_id=47584](https://portal.etsi.org/webapp/workProgram/Report_WorkItem.asp?wki_id=47584)
4. APT, "APT Survey Report on Wireless Power Transmission (WPT)", No. APT/AWG/REP-48, March 2014  
[http://www.appt.int/sites/default/files/Upload-files/AWG/APT-AWG-REP-48-APT\\_Survey\\_Report\\_on\\_WPT.docx](http://www.appt.int/sites/default/files/Upload-files/AWG/APT-AWG-REP-48-APT_Survey_Report_on_WPT.docx)
5. IEC/PAS-63095-1, "The Qi wireless power transfer system power class 0 specification - Parts 1 and 2: Interface definitions," 2017.
6. IEC63028, "Wireless power transfer - Airfuel alliance resonant baseline system specification (BSS)," 2017.
7. SAE Recommended Practice J2954 : Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology
8. 総務省「ITU 2015 年世界無線通信会議（WRC-15） 結果概要」  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000389780.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000389780.pdf)
9. Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking (FCC 16-89)  
[https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-16-89A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-16-89A1.pdf)
10. 総務省平成 29 年 5 月 16 日付け報道資料「5G 総合実証試験の開始」  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban14\\_02000297.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000297.html)
11. 中華人民共和國國務院, "China speeds 5G roll-out with world's largest test field", March 2017  
[http://english.gov.cn/state\\_council/ministries/2017/03/03/content\\_281475583661674.htm](http://english.gov.cn/state_council/ministries/2017/03/03/content_281475583661674.htm)
12. KT, "KT succeeds in connecting 5G network, device and service for the first in the world," October 2017  
[https://m.corp.kt.com/eng/html/promote/news/report\\_detail.html?hash=32&rows=10&page=1&datNo=113450](https://m.corp.kt.com/eng/html/promote/news/report_detail.html?hash=32&rows=10&page=1&datNo=113450)
13. 株式会社 NTT ドコモ「ドコモ 5G ホワイトペーパー –2020 年以降の 5G 無線アクセスにおける要求条件と技術コンセプト」  
[https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper\\_5g/DOCOMO\\_5G\\_White\\_PaperJP\\_20141006.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf)
14. Verizon, "Verizon sets roadmap to 5G technology in U.S.; Field trials to start in 2016", September 2015  
<http://www.verizon.com/about/news/verizon-sets-roadmap-5g-technology-us-field-trials-start-2016>
15. AT&T, "5G Evolution, AT&T Fiber, and Trials Advance Network Built for Video and Data", January 2017  
[http://about.att.com/story/att\\_details\\_5g\\_evolution.html](http://about.att.com/story/att_details_5g_evolution.html)
16. T-Mobile, "T-Mobile Announces Plans for Real Nationwide Mobile 5G", May 2017  
<https://newsroom.t-mobile.com/news-and-blogs/nationwide-5g.htm>
17. Wi-Fi Alliance, Wi-Fi CERTIFIED WiGig  
<http://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/wi-fi-certified-wigig>
18. Status of Project IEEE 802.11ay  
[http://www.ieee802.org/11/Reports/tgay\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/tgay_update.htm)
19. ASUS, "ASUS Announces ZenFone 4 Family in Europe", September 2017  
<https://press.asus.com/PressReleases/p/ASUS-Announces-ZenFone-4-Family-in-Europe#.Wdj3rlu0OM8>
20. HTC VIVE, "VIVE Partners with Intel to Make WiGig Wireless VR Accessory", May 2017  
<https://blog.vive.com/us/2017/05/30/vive-partners-with-intel-to-make-wigig-wireless-vr-accessory/>

## 第2章 海外における電波防護に関する検討状況

### 2.1. 各種国際ガイドラインの検討の動向

電磁界が人体に与える影響に関する様々な研究報告の蓄積及び先進的無線システムの普及等を踏まえ、人体への電磁界ばく露に関する国際的ガイドラインを策定する国際機関及び国際標準化団体において、各種ガイドラインの改訂が進められている。図 2.1-1 に示すように、2018 年以降、WHO の電磁界の環境保健クライテリア（EHC : Environmental Health Criteria）や ICNIRP の高周波ガイドライン等、電波防護に関する新たな健康リスク評価レビュー文書や国際ガイドラインが相次いで公表されると見られている。日本を含め諸外国における電波防護規制は国際ガイドラインとの整合性を確保するため、今後各国の規制動向にも大きく影響を与える可能性がある。



出所) 各機関の情報等を基に作成

図 2.1-1 各種国際ガイドラインの改訂スケジュール

### 2.2. WHO の動向

1996年から開始されているWHOの国際電磁界プロジェクト（International EMF Project）は、電磁界ばく露についての健康リスク評価書であるEHCの改定作業を推進している。WHOは1984年に超低周波（ELF）電磁界、1987年に静的およびELF磁界、1993年に100kHz以上の無線周波（RF）電磁界へのばく露についてそれぞれEHC<sup>(1)</sup>を発売しており、さらに国際電磁界プロジェクト発足後の2006年に静磁界、2007年にELF電磁界（100kHz以下）へのばく露について、それぞれEHCを発売している。現在、RF電磁界のばく露に関するEHCの改訂に向けて作業が進められており、2018年以降の発刊が予定されている。

また、WHO では複数の非政府機関が策定する非電離放射線（NIR）のばく露制限に関するガイドラインや国際規格が各国の規制に採用されている現状を踏まえ、電離放射線と同様に国際基本安全基準（BSS : Basic Safety Standards）の策定による国際的枠組みの実現可能性について検討を行っている。

### 2.3. ICNIRP の動向

ICNIRP においては 1998 年に、300GHz までを対象とする「時間的に変動する電磁界の人体ばく露量に関するガイドライン」<sup>(2)</sup>を発行し、2010 年には低周波電磁界（1Hz-100kHz）に関するガイドライン改定版<sup>(3)</sup>を発行している。100kHz 以上の高周波電磁界に関しては、前述の WHO が発行予定の EHC に基づいたガイドライン改訂の作業が進められており、2018 年 6 月以降にガイドライン改定案に対する意見募集の実施が予定されている。

中間周波数を含む低周波電磁界については、現行のガイドラインの策定において十分なデータが蓄積されていないとして、今後のガイドライン改定に向けて必要な研究課題（Data Gap）について検討している（4.1.1. 参照）。

### 2.4. IEEE の動向

0Hz-300 GHz の周波数帯の電磁界による生体安全性に関する国際規格を策定する IEEE/ICES 95 技術委員会は、2002 年、C95.6「0Hz～3kHz の電磁界への人体ばく露に関する安全レベルについての IEEE 規格」を発行し、2005 年には、C95.1「3kHz～300GHz の無線周波電磁界への人体ばく露に関する安全レベルについての IEEE 規格」の最新の改訂版を発行している。C95.1 は、1966 年にアメリカ合衆国規格協会（USA Standards Institute）の安全規格 USAS C95.1-1966 として初版が発刊された。その後、1982 年に米国規格協会（American National Standards Institute:ANSI）の規格 ANSI C95.1-1982 として改訂された際に電磁界ドシメトリの考えが導入され、1991 年に IEEE 規格 IEEE C95.1-1991 として改訂された際に公衆ばく露と職業ばく露の 2 段階の制限値が導入された。現在、C95.1、C95.6 規格は IEEE/ICES 95 技術委員会の SC3、SC4 でそれぞれ策定されているが、2018 年に両規格の統合規格を発行する予定である。

また、製品の適合性評価に関する国際規格を策定する IEEE/ICES 34 技術委員会では、数値計算に基づく適合性評価方法の標準化等を IEC と共同で検討している。

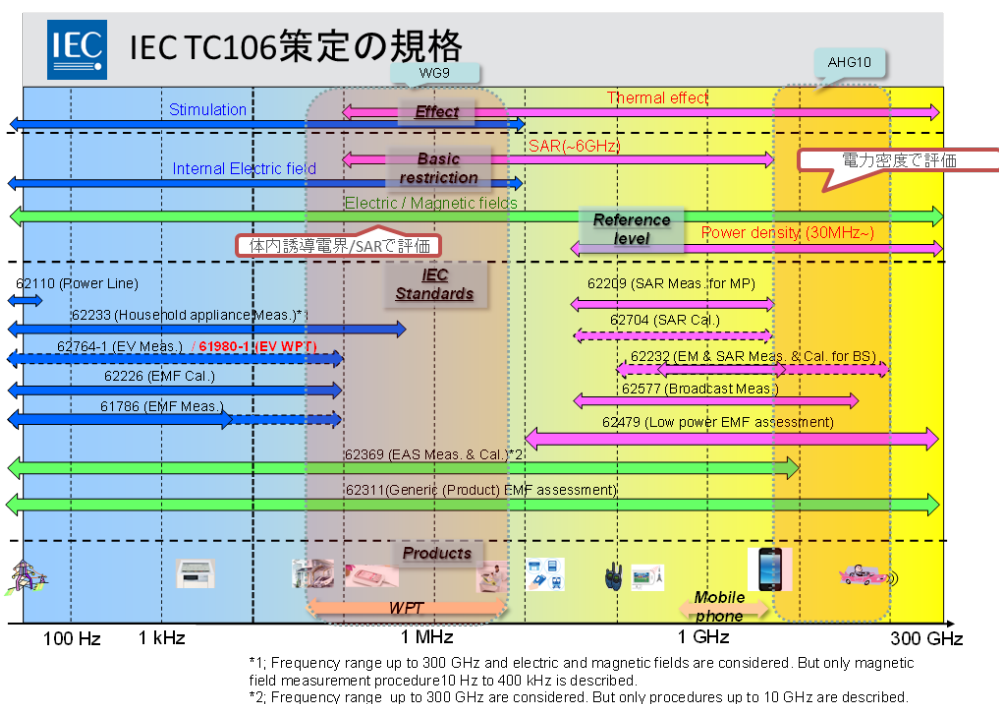
### 2.5. IEC の動向

IEC（国際電気標準会議）第 106 専門委員会（Technical Committee 106、TC106）は、人体ばく露に関する電界、磁界および電磁界の評価方法に関する国際標準規格（IS）を発行している。2010 年に IEC 62209-2 Ed.1（側頭部以外の SAR 測定法）を発行、2016 年には 2005 年に初版が策定された IEC 62209-1 Ed.2（側頭部 SAR 測定法）の改訂、2017 年には 2011 年に初版が策定された IEC 62232 Ed.2（基地局からの電磁界強度および SAR 評価法）の改訂を

行っている。また、2017年に、携帯無線端末からの数値シミュレーションによる SAR 評価方法に関する IS として、IEEE とのデュアルロゴの国際標準規格 (IEC/IEEE 62704-1、62704-2、62704-3) を発行した。

2016年のTC106総会において、人体の近傍で利用される携帯型無線機器に対する6GHz超の電力密度測定法の検討を行うアドホックグループ (AHG10) の設立が承認され、2018年9月までに技術報告書 (TR) を発行する予定としている。また、2017年のTC106総会において、当該技術に関するISを発行するための、IEEE/ICES TC34 とのジョイントワーキンググループ (JWG11 および JWG12) の設立が承認され、2020年にIECおよびIEEEとのデュアルロゴのISを発行する予定としている<sup>(4,5)</sup>。

また、2015年のTC106総会においては、WPTに関するワーキンググループ (WG9) 設置が承認され、日本主導で電磁界ばく露評価等に関する検討を行っている。WG9における検討に基づき、10MHz以下のEVやモバイル機器を想定したWPT評価方法に関するTRを作成しており、2018年に発行することが決定している。さらに上記TRに基づき、10MHz以下のWPT評価方法に関する新たな国際規格 (IS) の策定が議論されている。図 2.5-1 に IEC TC106 における規格策定状況を示す。



出所) 先進的な無線システムに関するワーキンググループ (第 6 回) IEC TC106 国内委員会資料に基づき作成

図 2.5-1 IEC TC106 策定の規格



## 2.6. 各国の検討状況

### 2.6.1. FCC の動向

米国における電磁界ばく露制限の FCC 規則は、連邦規則集 (CFR) の「第 47 編電気通信」の Part 1- §1.1307(b), §1.1310; Part 2 - §2.1091, §2.1093<sup>(6)</sup>に規定されている。

2013 年 3 月 29 日に FCC は、進展する技術・製品開発および市場・業界のニーズに適応するために、RF 電磁界ばく露規制の見直しに関する報告と命令の文書 FCC 13-39<sup>(7)</sup>を公表した。同文書は、2003 年に発表した「無線周波数電磁界に関する FCC 規則変更の提案」(ET Docket 03-137)<sup>(8)</sup>、今回の「FCC 無線周波数ばく露の制限と政策の再評価」(ET Docket 13-84)<sup>(9)</sup>を含み、改正された規則 (Report and Order) および再評価による修正提案 (Further Notice of Proposed Rulemaking) を告示し、さらに業界、専門家、一般からの規則の修正に関する意見募集をする調査告示 (Notice of Inquiry) を含むものである。

FCC 13-39 で確定した §1.1307, §1.1310, §2.1091, §2.1093 の改正部分 (付属書 A 記載) は、2013 年 6 月 4 日に連邦官報 (Federal Register)<sup>(10)</sup>で告知され 8 月 5 日に発効となった。今後は、FCC 13-39 の残りの修正提案 (付属書 B 記載) の検討、今回の改正への異議申し立て対処等の期間を含み、規則改正までに要する期間として、上記の例 (ET Docket 03-137 では 2003 年の提案から 10 年) を挙げ同様の年月を要すると示唆する業界団体<sup>(11)</sup>の見方がある。

今回改正された規則では、MPE と SAR の制限値の変更はないが、評価方法や手続きなどが修正されている。注目すべき点は、局所 SAR の四肢 (Extremity) に耳介 (pinna、目に見える耳の部分) を含むという定義の導入である。FCC 13-39 では、この定義を採用した根拠の一つに、IEEE 規格 IEEE Std C95.1-2005<sup>(12)</sup> の付属書 C2.2.2.3 節をあげている。

一方、FCC 13-39 の規則の調査告示部分に関しては、既存の電磁界ばく露規制の見直しに関する以下の論点について、意見募集が行われた。2017 年時点で意見募集を受けた規制の修正案は公表されていない。なお、2016 年 7 月の 5G 向け周波数帯に関する規則においてもミリ波帯における電磁界ばく露制限値に関する課題については、FCC 13-39 の調査告示のプロセスの中で検討を行うとして、制限値の見直し等に関する方針は示されていない。

(FCC 13-39 の調査告示において意見募集された規制見直しの論点)

1. 高周波電磁界ばく露制限値の妥当性 (「産業界に過度な負担を課すことなく、適切に公衆を守る」意図において現行の規制を修正する必要があるか。)
2. 高周波電磁界ばく露に関して、製造者等が消費者に提示すべき情報とその実施方法 (例: 現行の SAR 値の公開等)
3. ばく露低減のための方策 (ばく露制限値を引き下げる以外に、電磁界ばく露の潜在リスクを低減するための予防的措置があるか。)
4. 高周波電磁界ばく露の評価方法の妥当性
5. 端末と人体が密着した状態での測定方法の是非 (現在の端末の実態の使用方法に即した形で、端末と人体が密着した状態での測定方法を採用することの是非と想定されるデメ

リット（端末側の性能やデザインに対する影響）、SAR 評価と実際の使用方法に関する消費者への更なる情報提供の是非）

## 2.6.2. EU の動向

EU 加盟国における電波防護規制は、電磁界の公衆ばく露に関する理事会勧告 1999/519/EC<sup>(13)</sup> および職業ばく露に関する新 EU 指令 2013/35/EU<sup>(14)</sup>（旧 EU 指令 2004/40/EC<sup>(15)</sup> は 2013 年 6 月 29 日から廃止）に沿って行われる。

公衆ばく露の理事会勧告は、法的強制力はないが、加盟国内で ICNIRP ガイドライン<sup>(16)</sup>を適用しその参考レベルを超えないよう勧告している。ほとんどの加盟国は、この理事会勧告に沿って国内に法規制またはガイドラインを導入している。また、職業ばく露の新 EU 指令 2013/35/EU によって、各加盟国は同指令に適合する国内の法令、規則、管理規定等を 2016 年 7 月 1 日までに整備・制定するよう要求されている。英国<sup>(17)</sup>、ドイツ<sup>(18)</sup>、フランス<sup>(19)</sup>等の主要国で 2016 年に国内法化を完了している。

なお、ICNIRP ガイドラインでは「参考レベル」（reference level : 「基準レベル」と同意）や「基本制限」（basic restriction）の規制値が規定されているが、職業ばく露の新 EU 指令では「ばく露制限値」（ELV: exposure limit value）の「健康影響ばく露制限値」（health effects ELV）や「感覚影響ばく露制限値」（sensory effects ELV）、および「アクションレベル」（AL: action level）について規制値が規定されている。

また、EU における無線設備の基準認証制度に関して、無線機器および電気通信端末機器指令 1999/5/EC (R&TTE 指令) が 2016 年 6 月 13 日に廃止され、新たに、無線機器指令 (RED) 2014/53/EU<sup>(20)</sup> が同日発効した。加盟国は 2016 年 6 月 13 日までに国内法の整備を行うことが求められている。なお、2017 年 6 月 13 日までは移行期間とされ、その間に EU 域内に市場投入される無線機器は、R&TTE 指令と RED のどちらでも適合宣言 (DoC : Declaration of Conformity) が認められるが、2017 年 7 月 13 日以降に市場投入される機器は RED のみ適合宣言が認められている。英国<sup>(21)</sup>（離脱交渉が完了するまでは加盟国との位置づけ）、ドイツ<sup>(22)</sup>、フランス<sup>(23)</sup>等含め、多くの加盟国で国内法化が完了している。

また、2017 年 11 月には RED の必須要求 Article 3(1)(a)（人及び家畜の健康及び安全の保護並びに財産の保護）への適合のための整合規格として、欧州電気標準化委員会 (CENELEC) 規格 (EN 50360, EN 50385, EN 50401, EN 50566) が発行されている<sup>(24-27)</sup>。

## 文献

1. 環境保健クライテリア No.137 300Hz-300GHz : Environmental Health Criteria Monograph No.137, Electromagnetic Fields (300Hz-300GHz)”, WHO (1993) .  
<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc137.htm>
2. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), ICNIRP (1998)  
(英文) <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>  
(和文) <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdljap.pdf>
3. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz), ICNIRP (2010)  
(英文) <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>  
(和文) [http://www.jeic-emf.jp/assets/files/pdf/whats\\_new/LFGuideline2010\\_Japanese.pdf](http://www.jeic-emf.jp/assets/files/pdf/whats_new/LFGuideline2010_Japanese.pdf)
4. IEC TC 106/JWG 11 Computational Methods to assess the power density in close proximity to the head and body  
[http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:20025,25](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:20025,25)
5. IEC TC 106/JWG 12 Measurement Methods to assess the power density in close proximity to the head and body  
[http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:14703258889082:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:21511,25](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:14703258889082:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:21511,25)
6. CFR Title 47 Telecommunication: Part 1- § 1.1307(b), § 1.1310; Part 2 - § 2.1091, § 2.1093.  
<http://www.fcc.gov/encyclopedia/rules-regulations-title-47>
7. FCC Review of RF Exposure Policies.  
<http://www.fcc.gov/document/fcc-review-rf-exposure-policies>
8. Proposed Changes in the Commission's Rules Regarding Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields.  
[https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/DOC-235835A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-235835A1.pdf)
9. Reassessment of Federal Communications Commission Radiofrequency Exposure Limits and Policies.
10. Federal Register Vol. 78, No. 107, June 4, 2013  
<http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2013-06-04/pdf/2013-12716.pdf>
11. Energy Telecommunications and Electrical Association (ENTELEC).  
<http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/ENTELECOMMUNITY/8f2d2458-2365-4566-b38f-ec5a21aa4d4b/UploadedImages/FCC%20RF%20Exposure%20Summary.pdf>
12. IEEE Std C95.1-2005, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, section C.2.2.2.3, Rationale for applying the peak spatial-average SAR values for the extremities to the pinna.  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1626482>
13. Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC). 「電磁界(0Hz～300GHz)への公衆のばく露の制限に関する理事会勧告 1999/519/EC (1999年7月12日)」  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999H0519&from=EN>
14. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC 「物理的因子(電磁界)から生ずるリスクへの労働者のばく露に関するの健康と安全の最低要求と指令 2004/40/EC の廃止に関する EU 指令」(2013年6月26日)  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN:PDF>
15. Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields).  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:184:0001:0009:EN:PDF>

16. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz) - 1998.  
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgd1.pdf>  
 日本語版「時間変化する電界、磁界および電磁界によるばく露を制限するためのガイドライン（300 GHz まで）」  
<http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdljap.pdf>
17. 職場での電磁波の管理に関する規則 : The Control of Electromagnetic Fields at Work Regulations 2016 (CEMFAW 規則)  
<http://www.hse.gov.uk/radiation/nonionising/emf-regulations.htm>  
[http://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/588/pdfs/uksi\\_20160588\\_en.pdf](http://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/588/pdfs/uksi_20160588_en.pdf)
18. 電磁波からの曝露からの保護についての法律案 : Erläuterungen zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern : Arbeitsschutz (EMFV)  
[http://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/a-232-emf-verordnung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/a-232-emf-verordnung.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
19. 労働者の電波防護を規定するための政令 No. 2016-1074 : Décret no 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques  
[https://www.legifrance.gouv.fr/jo\\_pdf.do?id=JORFTEXT000032974358](https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000032974358)
20. Directive 2014/53/EU of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of radio equipment and repealing Directive 1999/5/EC  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0053&from=EN>
21. 「無線機器規制 2017」 : Radio Equipment Regulations 2017  
<https://www.gov.uk/government/publications/radio-equipment-regulations-2017>
22. 「無線機器の市場投入に関する法律」 : Gesetz über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt - FuAG)  
<http://www.gesetze-im-internet.de/fuag/>
23. 「無線機器の市場投入に関する 2016 年 4 月 21 日の政令第 2016-493 号」 : Ordonnance n° 2016-493 du 21 avril 2016 relative à la mise sur le marché d'équipements radioélectriques  
[https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?jsessionid=A517AAC665CCC6D4AF3E421135A59E66.tpdila07v\\_3?cidTexte=JORFTEXT000032439614&dateTexte=29990101](https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?jsessionid=A517AAC665CCC6D4AF3E421135A59E66.tpdila07v_3?cidTexte=JORFTEXT000032439614&dateTexte=29990101)
24. EN 50360:2017, "Product standard to demonstrate the compliance of wireless communication devices, with the basic restrictions and exposure limit values related to human exposure to electromagnetic fields in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz: devices used next to the ear," 2017
25. EN 50385:2017, "Product standard to demonstrate the compliance of base station equipment with radiofrequency electromagnetic field exposure limits (110 MHz - 100 GHz), when placed on the market," 2017
26. EN 50401:2017, "Product standard to demonstrate the compliance of base station equipment with radiofrequency electromagnetic field exposure limits (110 MHz - 100 GHz), when put into service," 2017
27. EN 50566:2017, "Product standard to demonstrate the compliance of wireless communication devices with the basic restrictions and exposure limit values related to human exposure to electromagnetic fields in the frequency range from 30 MHz to 6 GHz: hand-held and body mounted devices in close proximity to the human body," 2017

## 第3章 新たな電波利用に向けた電波防護に関する研究状況

### 3.1. 国内外における主な研究の現状

#### 3.1.1. 現状分析における留意点

これまで、無線周波 (RF) 電磁界による健康影響・生体影響についての多くの研究成果が国際的な査読付き学術雑誌に報告されている。また、いくつかの国際専門組織や各国政府機関から、これらの研究を精査したレビュー文書が発行されている。本報告書では、2015年6月の「生体電磁環境に関する検討会第一次報告書（以下「第一次報告」と呼ぶ）<sup>(1)</sup>」以降の研究を中心に現状をまとめた。現状の分析にあたっては、スウェーデン放射線安全庁 (SSM) の電磁界に関する科学評議会がまとめた、電磁界と健康リスクに関する研究の現状第10次報告<sup>(2)</sup>（2015年6月発行）、同第11次報告<sup>(3)</sup>（2016年5月発行）および、それ以降の研究について2017年6月 WHO EMF-project の国際諮問委員会で最新の科学的知見として紹介された論文を中心に最近の研究動向を紹介する。

なお、第一次報告において、「生体電磁環境に関する研究論文を評価する上での留意点」として質の高い研究論文の条件として、以下の3つをあげているが、SSM 報告書においても同様のクライテリアを設定し条件を満たさない論文は除外されていることが述べられている。

- (1) ばく露条件に関する情報が詳細に記述されていること
- (2) 十分なばく露評価期間がとられた研究であること
- (3) ばく露と評価指標への影響との因果関係に関する分析が適切にされていること

すべての研究デザインにおいて、これら3つの条件が満たされていることが重要であるが、近年、論文中に十分に記載されていないとの指摘が多く、論文の科学的価値を下げることに繋がっている例も見受けられる。その点について Simko ら<sup>(4)</sup>は興味深い解析を実施している。彼らは過去の細胞実験論文を網羅的に精査し、実験装置の信頼性を含むばく露条件に関する明確な記載と細胞反応の有無との間に有意な負の相関が見られる、つまりばく露実験の質が高ければ細胞の影響がみられる例は少ないと報告している。また、その他の要因として、「影響なし」の結果の研究は論文査読において実験デザインの妥当性について厳しく評価され、一部の科学雑誌によっては掲載に消極的であるという、いわゆる **publication bias** が健康リスク評価において深刻な誤差要因となることも指摘されている。実験デザインに関して、Vijayalaxmi<sup>(5)</sup>は、RF ばく露の生物学的および健康的影響に関する調査を実施するためには、生物・医学に関する研究者と RF ばく露装置の設計および評価の専門知識を持つ研究者との緊密な連携が必要であるとし、質の高い論文を執筆するためには、実験研究や調査研究の詳細な事項を論文内に記載すべきであるとして、記載すべき内容のチェックリストを作成している。以上の議論があることを念頭に、実験や調査の質について、今後一層の注意を払い研究の内容を見ていくべきである点を改めて強調しておきたい。

本章では、以下に中間周波、高周波（10MHz～30GHz）、超高周波（30～300GHz）の研究動向についてまとめる。なお、ばく露条件等については、本文では簡潔に述べるが、詳細な条件については原著論文を参照していただきたい。

### 3.1.2. 中間周波の影響

中間周波について、ここでは主に電波防護指針の下限周波数である 10kHz 以上で 10MHz までの周波数を考える。この周波数範囲の電磁界の非熱作用による健康影響に関する実験的な研究は極めて少ないが、確固たる健康影響として考えられるものはない。その点については、第一次報告<sup>(1)</sup>からは大きな進展は見られず、SSM 第 10 次報告<sup>(2)</sup>、第 11 次報告<sup>(3)</sup>でも同様の見解が述べられている。以下、それぞれの研究分野に関しての最近の動向をまとめる。

#### 3.1.2.1. 細胞研究

中間周波（IF）電磁界ばく露に関する細胞研究は極めて少なく、現時点での実験データが不足していることから、非熱作用による健康リスクについて確定した結論は出すことはできない。現在までに、いくつかの報告がされており、Shi ら<sup>(6)</sup>は、ワイヤレス電力伝送（Wireless Power Transmission: WPT）で用いられる中間周波帯ばく露の実験を行っており、ヒト眼部水晶体の細胞に磁束密度 93.36 $\mu$ T、周波数 90kHz の IF 磁界をばく露し、細胞の生存率・アポトーシス・DNA ダメージに影響がないことを報告している。また、Koyama らは分化させたヒトの白血病細胞（HL-60）に 2mT、23kHz の IF 磁界ばく露を行い、細胞の走化性・貪食能を調べたところ、有意な差はないことを報告している<sup>(7)</sup>。このグループは過去の研究においても同様の装置を用いて、ヒト胎児由来の細胞に 100 $\mu$ T、23kHz の IF 磁界ばく露を行い、遺伝子発現について影響がないこと<sup>(8)</sup>やチャイニーズハムスター卵巣細胞で遺伝毒性への影響がないこと<sup>(9)</sup>を報告している。Yadegari-Dehkordi ら<sup>(10)</sup>は、銀ナノ粒子との複合ばく露による細胞への有意な影響を報告している例があるが、確固たる生体影響として見出されたものはない。

#### 3.1.2.2. 動物研究

動物実験についても細胞実験と同様、報告例は少なく今後の研究により安全性に関しての科学的根拠の積み上げが必要である。

Win-Shwe ら<sup>(11, 12)</sup>は、マウスの成体および胎児期・幼若期に 3.8mT、21kHz の IF 磁界のばく露を受けた際の海馬における記憶機能関連遺伝子の発現等について一部の遺伝子は一過性での変化の可能性があったが、組織学的には影響はないことを報告している。Ushiyama ら<sup>(13)</sup>は、ラットに 3.8mT、21 kHz の IF 磁界に全身ばく露を行い、血液パラメータ、および免疫学的指標の変化がないとしている。Nishimura ら<sup>(14)</sup>はラットに中間周波の正弦波磁界（0.20mT、20kHz 及び 0.10mT、60kHz）を全身ばく露し、急性ばく露、亜慢性ばく露ともに

毒性学的指標に影響がないとしている。

### 3.1.3. 高周波の影響

携帯電話システムの急速な普及に伴い、電波の安全性を担保する視点からこれまで多くの研究が実施されてきた。第一次報告<sup>(1)</sup>ではその時点での研究動向を総括し、「これまでのところ、国際的なガイドラインの指針値より弱い電波ばく露条件においては、熱作用・刺激作用以外の作用が存在することを示す確かな科学的証拠は見つかっていない。」と結論した。以下にそれぞれの実験デザインによる近年の研究動向をまとめたが、現時点までの研究を総括しても、その見解を変える必要はないと考えられる。

#### 3.1.3.1. 細胞研究

高周波 (RF) 電磁界ばく露に関する近年の細胞研究は、これまでの研究と同様にばく露と明確な因果関係がある結果については見られていない。しかし、一部の細胞研究において酸化ストレス、およびアポトーシスが一過性に上昇するという点が報告されており、これらについては再現性も含めた繰り返し実験が必要と考える。

Wang ら<sup>(15)</sup>は、マウス骨髄由来の細胞にパルス of 2.856GHz 高周波 RF 電磁界をばく露し、アポトーシス・細胞増殖・細胞周期への影響を調べたところ、影響は見られなかったことを報告している。Zuo ら<sup>(16)</sup>は、同様の RF 電磁界をラット副腎髄質由来の細胞腫 (PC12) に 6 時間ばく露したところ、30mW/cm<sup>2</sup>以上の電力密度でアポトーシスが有意に上昇したと報告している。また、アポトーシスに関連する因子の実験結果からミトコンドリア依存のカスパーゼ 3 が関連していることを示した。さらに、近年、Xing ら<sup>(17)</sup>は、マウス胎児皮膚由来線維芽細胞 (NIH/3T3)、ヒト脳由来グリア芽腫細胞に対して、1800MHz の RF 電磁界をばく露したところ、カスパーゼ 3 の活性によるアポトーシス上昇が見られることを示し、同様のメカニズムが働いている可能性を示唆している。また、Canseven ら<sup>(18)</sup>は、ヒト造血細胞由来の細胞に対する 1800MHz、SAR=0.35W/kg、24 時間の RF 電磁界ばく露でアポトーシスの上昇と細胞生存率の低下を報告している。他にアポトーシスをエンドポイントとした研究では、Hou ら<sup>(19)</sup>の NIH/3T3 細胞を使った実験がある。ここでは、RF 電磁界の間欠ばく露 (1800MHz、平均 SAR=2W/kg (5 分 ON/10 分 OFF)) を行い、アポトーシス・酸化ストレス・DNA ダメージを調べたところ、アポトーシスにおいて 1, 4, 8 時間のばく露で Sham ばく露と有意な差が見られたが、0.5, 2, 6 時間のばく露では差が見られないという結果が報告されている。また、細胞内の活性酸素種 (Reactive Oxygen Species: ROS) レベルにおいて、1, 4, 8 時間ばく露で有意な上昇が見られ、0.5, 1.5, 2, 6 時間のばく露では、差がないという結果であったが、DNA ダメージについては影響がなかったとしている。いくつかのヒト神経膠腫を使用したアポトーシス検出の実験で、ヒトグリア芽腫細胞において、RF 電磁界へのばく露で増加し、遺伝毒性は見られないという報告<sup>(20)</sup>が新しく見受けられる。また、ヒト胸部由来乳がん細胞に、RF 電磁界をばく露した際、ばく露装置からの距離依存的に、近いほど

アポトーシス上昇や ROS・カスパーゼ 3 生成、カスパーゼ 9 活性の上昇などが見られるという報告<sup>(21)</sup>がされている。ただし、SAR の表記に誤表示があり、確認できない部分もある。

900MHz 付近での RF ばく露では、細胞内 ROS の研究において、ヒト胎児腎細胞の RF 電磁界への短時間ばく露で ROS 生成の素早い上昇が見られる<sup>(22)</sup>という報告やヒト血液単核球で ROS 生成上昇<sup>(23)</sup>、同じく HL-60 細胞で ROS、8-OHdG 生成の上昇<sup>(24)</sup>、マウス神経芽細胞腫で ROS 生成上昇<sup>(25)</sup>というポジティブな結果となる報告がいくつか見られる。一方、神経細胞の RF 電磁界へのばく露で、一部わずかな ROS の上昇が見られたものの、高周波単独・複合、メナジオンや H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> などの薬剤との複合においても影響がないとの報告<sup>(26)</sup>やヒト脳由来の神経芽細胞腫に RF 電磁界をばく露した際、アポトーシスには影響が見られないという報告<sup>(27)</sup>も見られる。

Duan ら<sup>(28)</sup>は、マウス精母細胞由来の細胞に、RF 電磁界の間欠ばく露 (1800MHz、SAR=4W/kg (5 分 ON/10 分 OFF の間欠ばく露)) を行ったところ、FPG コメットアッセイにより DNA ダメージが有意に上昇する結果を報告しており、DNA への酸化ストレスを示唆している。また、近年では、毛細血管拡張性運動失調症の原因遺伝子が機能正常な、または欠損したマウス胎児線維芽細胞において、RF 電磁界 (1800MHz、SAR=4W/kg、1 時間) へのばく露で DNA 切断が見られるという報告<sup>(29)</sup>があり、さらに、HL-60 およびヒト造血幹細胞に 4、20、66 時間で RF 電磁界 (900MHz) をばく露したところ、4 時間ばく露で若干の DNA ダメージの減少が見られたとする報告<sup>(30)</sup>があるが、その実験においては、アポトーシス、酸化ストレス、細胞周期、DNA 修復で影響は見られず、その他 DNA への直接的な影響は見られないとする論文が多数を占めている<sup>(20, 31-33)</sup>。

以上、アポトーシス、酸化ストレス関連の論文が多数を占めるものの、それ以外のエンドポイントを指標とした論文もいくつか発表されている。タンパク質発現に関連した研究においては、Valbonesi ら<sup>(34)</sup>は、PC12 細胞の RF 電磁界 (1.8GHz、変調 GSM-217Hz、SAR=約 2W/kg、16、24 時間) へのばく露で HSP70 の mRNA 発現が上昇する結果を報告しており、同様のばく露で、アセチルコリンエステラーゼの酵素活性上昇も見出している<sup>(35)</sup>。また、Lu ら<sup>(36)</sup>は、マウスの神経系グリア細胞の一種であるミクログリア (小膠細胞) とアストロサイト (星状膠細胞) に、RF 電磁界への間欠ばく露 (1800MHz、SAR=2W/kg (5 分 ON/10 分 OFF)) を行ったところ、ミクログリアにおいて IL-1 $\beta$ ・IL-6・TNF- $\alpha$  などの炎症促進性サイトカインの転写産物発現が上昇する結果やアストロサイトにおいて IL-6 のタンパク質レベルでの発現上昇を報告している。一方、プレテオーム解析で RF 電磁界へのばく露が、ヒト線維芽細胞、骨肉腫、マウス胎児幹細胞に影響を与えないとする最近の報告も見られる<sup>(37)</sup>。

細胞増殖・分化に関連した報告では、900MHz、SAR= 2.287W/kg の RF 電磁界へのばく露が、マウス神経幹細胞の増殖、ニューロン形成に影響を与えるとするもの<sup>(38)</sup>やマウス胎児神経幹細胞への 1800MHz、SAR=4W/kg、3 日間 RF 電磁界ばく露で、神経突起の伸長分化が阻害されるという報告<sup>(39)</sup>、また、ヒト原発性肝細胞がん細胞に RF 電磁界への間欠ばく露 (900、1800MHz、SAR=2W/kg (15 分 ON/15 分 OFF)) を行ったところ、細胞増殖の減少と同時に乳酸脱水素酵素



(LDH) およびグルコースレベルの増加が見られている<sup>(40)</sup>。

その他の研究として、24時間のRF電磁界（1800MHz、SAR=4W/kg）へのばく露で、オートファジーのマーカーLC3-IIの増加やROS生成の増加の報告<sup>(41)</sup>がある。また、興味深い研究として、RF電磁界へのばく露の後、電離放射線の照射によって、ヒトリンパ球や骨髄間質細胞で遺伝毒性への影響が減少する適応応答に関する報告がなされている<sup>(42, 43)</sup>。

以上のように、いくつかの研究において、酸化ストレスによるDNAダメージを示唆する報告やアポトーシスの増加が比較的多く報告されており、一部の研究ではメカニズムに迫る報告を行うなどRF電磁界へのばく露によるポジティブデータがある一方、ばく露時間の依存性が見られず、解釈が難しい研究もあり、再現性の確保が求められる。また、ポジティブデータが見られた際の細胞への悪影響は、温度上昇による結果であるとする報告も多数みられ、RF電磁界へのばく露による非熱効果の影響ははっきりと確定されていない。上述と重なるが、異なる周波数や違う細胞種、評価方法の違いなど、散発的なポジティブ結果が見られることから、再現実験の必要性が求められる。

### 3.1.3.2. 動物研究

動物実験においては、酸化ストレス、行動学的研究、精巣ならびに精子の質への影響などが検討されてきたが、いずれにおいても量反応関係などがみられるものではなく、因果関係とみなせるような生体影響として確定したものはないと評価できる。

脳や行動へのRF電磁界へのばく露影響について、Deshmukhら<sup>(44)</sup>による、ラットに対して900MHz～2450MHz（全身平均SAR=7×10<sup>-4</sup>W/kg）の非常に弱いRF-EMFを180日間ばく露した際の、ばく露群の認知機能の低下、熱ショックタンパク質の増加、DNA損傷についての報告、Tangら<sup>(45)</sup>による、ラットに900MHzのRF-EMF（全身平均SAR=0.016W/kg、頭部局所SAR=2W/kg）を、最大28日間ばく露した際のモリス水迷路試験での空間記憶の低下と脳の病理的变化の報告はいずれも陽性の結果であった。Zhangら<sup>(46)</sup>は、マウスの妊娠期間中（3.5日目から18日目）のRF-EMFばく露（9.417GHz、SAR=2W/kg）の後、ばく露群での出生仔の不安関連行動を報告しているが、オスのみに有意差が見られており合理的な科学的説明が不足している。また、ラットにRF-EMF（900MHz、全身平均SAR=0.024W/kg）の30日間ばく露後のラットの海馬アンモン角の錐体ニューロンの数の減少<sup>(47)</sup>、ラットへのRF-RMF（2.1GHz、全身平均SAR=0.4W/kg）ばく露により、脳の酸化的DNA損傷がばく露日数により増減すること<sup>(48)</sup>、ラットへのRF-EMF（900MHz、脳平均SAR=0.114W/kg；2.4GHz、脳平均SAR=1.03mW/kg）ばく露による脳の一部のマイクロRNA（miRNAs）の減少<sup>(49, 50)</sup>、マウスへのRF-EMF（1.8GHz）30分間の単回ばく露における全身平均SAR=2.2W/kg以上での新規物体認識タスクへの影響新規物体認識タスク（NORT）の指標への影響<sup>(51)</sup>、RF-EMF（900MHzおよび2450MHz）をラットの全身平均SAR（0.05～0.09W/kg）でばく露した際の脳の熱ショックタンパク質（HSP90および70）やカスパーゼ3の組織学的変化<sup>(52)</sup>についても報告がされているが、ばく露条件等に詳細な検討が必要であると考えられる。

一方で、影響なしとされる研究も報告されている。Masuda ら<sup>(53,54)</sup>の報告では、脳局所 SAR = 2.0 W/kg (1457MHz) のばく露でラット脳血流について影響は見られず、また血液脳関門 (BBB) の透過性も影響がないとしている。Jeong ら<sup>(55)</sup>の報告によればアルツハイマー病 (AD) 様の実験モデルマウスでは、長期 (8 ヶ月) の RF-EMF (1950MHz, 全身平均 SAR= 5W/kg) のばく露により、アミロイド前駆体タンパク (APP) の現象等病変の改善を報告している。

酸化ストレスについては、ラットの RF-EMF (1.8GHz, 全身平均 SAR=0.056W/kg) へのばく露で、酸化ストレス指標であるスーパーオキシドジスムターゼの血中濃度が増加するという報告<sup>(56)</sup>、マウスの RF-EMF (900MHz, 全身平均 SAR=0.05W/kg) へのばく露で抗生物質 (抗腫瘍剤) であるブレオマイシンを投与による酸化ストレスが相乗的に増加するという報告<sup>(57)</sup>、炎症性疼痛モデルのラットを用いて、RF-EMF (1.8GHz, 全身平均 SAR=0.024W/kg) への反復ばく露が組織の脂質過酸化の増加をもたらすという報告<sup>(58)</sup>がある。

発がんに対する影響については興味深い報告が 2 つある。一つは、Lerchl ら<sup>(59)</sup>による研究で、発がん物質を投与したマウスにおける RF-EMF へのばく露の腫瘍プロモーション作用を報告した先行論文<sup>(60)</sup>の再現実験である。この実験では、先行論文より、群毎の動物数を増やし、ばく露レベルも 2 段階追加し、全身平均 SAR を 0, 0.04, 0.4, 2W/kg とした。その結果、先行論文と同様に気管支肺胞がん、肝がん、リンパ腫の増加がみられたが、量反応関係は見られなかった。二つめは、査読付論文ではないが、最近注目されている研究としてアメリカの国家毒性プログラム (NTP) に基づく研究であり、現時点では中間報告書<sup>(61)</sup>のみが公表されている。研究責任者の Wyde らは、雌・雄のラットを対象に、900MHz の GSM 変調波または CDMA 変調波を全身平均 SAR=1.5, 3, 6W/kg で、胎生期から生後 2 年までの間、連日 9 時間のばく露を行い、がんの発生を調べたところ雄ラットにおいてのみ、低頻度ながら脳では腫瘍が、心臓では前がん病変が全身平均 SAR に依存する有意な増加が見られたと報告している。このことについて、ばく露装置およびドシメトリの妥当性、結果に性差があること、シャムばく露群のほうが全体的に短命であること、またシャム群のがん発生率が期待値よりも低いことなどが疑問としてあげられている。NTP 研究ではマウスのばく露実験も実施しており、結果の公表が待たれる。

生殖能力に関して、ラットに RF-EMF (900MHz, 全身平均=SAR 0.025W/kg) ばく露を行い、組織病理学的損傷を見た実験 (Odachi ら<sup>(62)</sup>)、精巣でのシグナル伝達経路と精子形成を解析した実験 (Sephehrimanesh ら<sup>(63)</sup>) では陽性の報告であるが、一方では、マウスの卵母細胞および精子の RF-EMF (1.95 GHz WCDMA 変調, ) へのばく露による体外受精率、胚発生を検討した実験では影響を認めなかった (Suzuki ら<sup>(64)</sup>)。病態モデルを使った実験では、糖尿病モデルにおいて、RF 電磁界へのばく露の影響がより明確であるという Kuzay らの報告<sup>(65)</sup>があるが、メカニズムは不明である。

免疫系への影響として、ラットの発達期 (子宮内発達期から授乳期、幼若期までの 9 週間) に RF-EMF (2.14GHz W-CDMA 変調, 全身平均 SAR=0.2W/kg) へのばく露をしたところ、CD4/CD8 T 細胞、活性化 T 細胞などの免疫指標には影響がないと報告している (Ohtani ら<sup>(66)</sup>)。

以上、動物実験をまとめると、脳や行動への影響は全身平均 SAR 値が電波防護指針値よりも低い全身平均 SAR 25mW/kg 程度で影響ありとの報告が見られるが、他の研究も含め総合的に見ると結果には一貫性が見いだせない。また酸化ストレスに関しても電波防護指針値よりも低い全身平均 SAR での影響をみているが、これらについても再現実験が行われるべきである。がんに関する影響も、量反応関係に欠けているデータである。動物実験の近年の傾向として、ばく露装置の情報が不足、ドシメトリの記述がない、適切な偽ばく露群（対照群）が設定されていないなど、電波の生体影響であることを論理的に示すため必須の情報および、Vijayalaxmi が示した再現実験に必要な情報<sup>(5)</sup>が不足している例が多く、実験条件が明確でないと研究結果は科学的エビデンスに乏しいといえる。

### 3.1.3.3. ヒト実験

近年の研究では脳波及び心拍変動についての検討が行われている。男性被験者の実験では、RF-EMF (900MHz, 頭部平均 SAR=2W/kg) へのばく露後の睡眠の脳波に影響が見られないという Lustenberger らの報告<sup>(67)</sup>がある。覚醒時の脳波においては RF-EMF (900MHz, 頭部での最大 SAR=0.49W/kg) へのばく露で閉眼時のみ  $\alpha$  波が減少するという報告<sup>(68)</sup>がある一方で、RF-EMF (385MHz, averaged peak spatial SAR=1.5, 6.0W/kg) へのばく露で緩徐皮質電位 (SCPs) などには影響しないという報告<sup>(69)</sup>がある。

認知判断への影響を調べた研究では、Sauter ら<sup>(70)</sup>、Malek ら<sup>(71)</sup>、Andrianome ら<sup>(72-74)</sup>、van Moorselaar ら<sup>(75)</sup>の研究があるが、いずれも気分や安寧感、生理的指標に関しては研究ばく露による差は見られていない。Malek ら<sup>(71)</sup>の研究では、基地局を想定し、電界強度 1V/m の典型的な GSM および UMTS 信号への短期ばく露が被験者の認知タスクの成績および生理学的なパラメータ（体温、心拍数、血圧）への影響を調べ、電磁過敏症症状をもつ者と持たない者の両群で、認知タスクの成績および生理学的パラメータの全てにおいて、真および擬似のばく露の間の差はなかったとしている。Andrianome ら<sup>(72-74)</sup>は、電磁界を原因と思う特発性環境不耐性 (IEI-EMF) と自己申告した人達 (IEI-EMF 群: 30 人) と過敏症でない対照群 (25 人) を対象に、RF-EMF へのばく露がない状況下でのメラトニンレベル等を比較した。全被験者は主観的睡眠質、睡眠量に関する 3 つの質問票に記入し、唾液中メラトニンおよび尿中メラトニン代謝物 (aMT6s) を定量した。その結果、睡眠に関しては IEI-EMF 群での有意なスコア低下が見られたが、唾液中メラトニンおよび尿中 aMT6s では差がなかった、と報告している。また心拍変動 (HRV) および皮膚の導電率 (SC) を評価し、ばく露の有無による HRV に差は認められなかった。SC は電波のばく露とは関係ない時間的なばらつきが認められたことからばく露はこれらの指標には影響を及ぼさないとした。van Moorselaar ら<sup>(74)</sup>は、過去の電磁過敏症者 (EHS) 誘発実験で指摘された問題点 (EHS 者に実験室への来訪を強いるためストレスが多い、試験信号の種類を EHS 者は選択できない等) を改善するため、EHS 者が在宅でばく露条件 (信号タイプ、強度、ばく露時間) を個別に設定して 2 重盲検法に則ったばく露ができる持ち運び型ばく露装置を作成し、それを用いて試験

した。結果として、被験者 42 人のうち 2 重盲検法において、「真のばく露」を偶然以上の確率で正確に言い当てることのできた人はいなく、被験者のフォローアップ調査では実験への参加体験を生かして症状を改善した人が一部存在することが報告されている。

生殖機能に関しては、不妊クリニック通院男性患者のコホート研究 (Lewis ら<sup>(76)</sup>)、および提供精子による RF-EMF (1950MHz, SAR=2.0, 6.0W/kg) へのばく露研究 (Nakatani-Enomoto ら<sup>(77)</sup>) があるが、いずれも RF-EMF 電磁界ばく露との関係は見出していない。

また血液脳関門 (BBB) への影響を調べた Soderqvist ら<sup>(78)</sup>の研究では、RF-EMF (890MHz, 脳の局所平均 SAR=0.2, 2.0W/kg) のばく露後の血清指標を検討したが、BBB への影響は見られなかった。

#### 3.1.3.4. 疫学研究

脳腫瘍についての新規の研究は多くなく、すでに公開されているデータの再解析の結果からは証拠の確からしさにほとんど変化がない状況である。小児における保護者の報告による症状について、携帯電話端末及び基地局からのモデル化されたばく露との関連を検討した研究が多く報告されているが、想起バイアスの影響など不確実性が大きく因果関係があるとは言えない。近年、リプロダクティブヘルスとの関連を検討した研究も増えているが、ばく露評価が不十分で質の高い研究とはいえない。

##### 3.1.3.4.1. 脳腫瘍

フランスの症例対照研究<sup>(79)</sup>において最も高いばく露量を持つグループにおいてリスクが増大するという、これまでの先行研究で指摘されていた結果と類似した結果が得られているが、研究デザインが後ろ向き研究であるため、想起バイアスが強く影響している可能性を排除できない。韓国の症例対照研究<sup>(80)</sup>、スウェーデンの通話の側性履歴に基づくデータ解析<sup>(81)</sup>により、携帯電話使用と前庭神経鞘腫の以前に観察された関連がバイアスを補正しても認められることを再確認した。前庭神経鞘腫は聴覚に影響するため、携帯電話使用者は疾患発現の初期段階で症状に気づき、診断を得られる可能性が高いと考えられる。

INTERPHONE 研究<sup>(82, 83)</sup>において携帯電話のヘビーユーザーにおける脳腫瘍のリスク増加に関する懸念が示されたが、カナダのデータの再解析<sup>(84)</sup>、神経膠腫の頭蓋内分布<sup>(85)</sup>、神経膠腫・髄膜腫・聴神経腫瘍に関する整合性解析<sup>(86)</sup>による検証が行われた。しかし、最近のレビュー<sup>(87)</sup>とトレンド解析<sup>(88)</sup>、point process model<sup>(89)</sup>、プール解析<sup>(90)</sup>によると、神経膠腫に関する証拠の確からしさはより限定的なものとなってきている。なお、聴神経腫との関連の可能性については、注目すべき研究の進展は見られていない。携帯電話使用および脳腫瘍リスクに関するトレンド解析が、スウェーデン<sup>(88)</sup>、日本<sup>(91)</sup>、およびオーストリア<sup>(92)</sup>のがん登録を利用して行われているが、証拠の評価における変化はほとんどない。英国の時系列解析で側頭葉の悪性腫瘍リスクの増加を報告している<sup>(93)</sup>が、1980年代から導入された CT、MRI による世界的な診断能の向上の影響は否定できない。

小児腫瘍と放送タワーからの中波 (0.5-1.6 MHz) と短波 (6-22 MHz) のばく露に関するスイスの大規模な研究<sup>(94)</sup>は、先行する症例対照試験<sup>(95, 96)</sup>と同様に関係性を否定するものであった。これらの3つの新しい症例対照研究では個々のばく露評価が実施されており、1990年代にこのような関連性を見いだした初期の生態学的研究よりも信頼性が高いものと考えられる。

下垂体腫瘍に関する症例対照研究<sup>(97, 98)</sup> 耳下腺腫瘍に関する症例対照研究<sup>(99)</sup>では携帯電話使用との関連は指摘されなかった。

#### 3.1.3.4.2. その他の腫瘍

スウェーデンのがん登録を用いたトレンド解析にて携帯電話導入後、甲状腺癌の増加が報告されたが、因果関係を示すものではない<sup>(100)</sup>。

#### 3.1.3.4.3. 生殖能力

新しい大規模なノルウェーの研究<sup>(101)</sup>により、妊娠中の母親の携帯電話使用は生殖に関する有害な影響のリスクではないことが示された。しかし、自然流産が増加するという報告<sup>(102, 103)</sup>もあり、胎児のRF電磁界へのばく露は有害な妊娠転帰に関連しているかという疑問に答えるため、さらに精巧なばく露評価方法が必要とされている。

精子の質と携帯電話の使用との関連に関する研究<sup>(104, 105)</sup>はいずれも研究の質が低く、RF電磁界へのばく露との潜在的な関連性を評価するには不十分である。この問題に関する多くの研究が発表されているが、睾丸のばく露について合理的な評価を試みた例はない。また、母体の携帯電話利用と子供の言語発達についての症例対照研究<sup>(106)</sup>も質が低く、新規の知見を加えるものではない。

#### 3.1.3.4.4. 認知機能と症状

複数の横断研究から、青少年における自己報告による携帯電話使用と、集中力低下<sup>(107)</sup>、不注意<sup>(108)</sup>など、症状の発生との関連が一貫して報告されている<sup>(109-111)</sup>。疲労などの自覚症状とメール送信数など<sup>(112)</sup>、通話時間に限定されず、エンターテインメントのための使用などの携帯電話使用の他の使用を含めた報告もあった。これは、毎夜の携帯電話使用による睡眠不足<sup>(113)</sup>、スマートフォンスクリーンからの青色光または過剰使用による休養不足など、RF電磁界へのばく露よりも他の因子がその状況において関係の可能性を示している。

携帯電話基地局のばく露に関しては、ばく露と症状、または自己申告によるelectromagnetic hypersensitivity(EHS)との因果関係はないとする報告が殆どである<sup>(114-116)</sup>が、非特異的症状および睡眠障害との関連<sup>(117)</sup>が報告されている。

固定送信機からのRF電磁界へのばく露と症状の関連性がないことはこれまでの知見で確認されてきたが、ばく露の方向性のない誤分類(non-differential exposure misclassification)はこれらの研究に関してもまだ課題である。

### 3.1.3.4.5. その他のアウトカム

若年者において携帯電話使用と関連して、コルチゾール分泌<sup>(119)</sup>は低下していたが、セロトニン分泌<sup>(120)</sup>、唾液酵素<sup>(121)</sup>、auditory brainstem-evoked potentials (ABR)との関連<sup>(122)</sup>への影響は認めなかった。一方、heat shock protein (HSP) 70 と C-reactive protein (CRP)の関連<sup>(123)</sup>が示唆された。基地局からのばく露と DNA 障害<sup>(124)</sup>、遺伝子障害<sup>(125)</sup>に関する横断研究では関連がないことが明らかとなった。レーダの健康影響については、フランスの後ろ向きコホート研究<sup>(126)</sup>による海軍の総死亡との関連は見られなかったが、アドレナリンの上昇<sup>(127)</sup>、空港のレーダ塔からのばく露と記憶反応時間との関連<sup>(128)</sup>が示唆された。いずれの研究もばく露評価が不十分、交絡因子の調整を行わない解析など研究の質が低く、根拠となる証拠とはならない。

### 3.1.4. 超高周波数（ミリ波、サブミリ波）の影響

超高周波数であるミリ波（30～300GHz）およびサブミリ波（300GHz～3THz）においては今後利用が拡大する可能性のある周波数帯であるが、非熱作用に基づく超高周波数帯の健康影響に関しては、現状では研究データの蓄積が少ない状況である。したがって現時点の見解としては一次報告書の時点と変わらず、超高周波数帯の健康影響については、現時点では結論を出せる段階にない。今後、体系的でかつ幅広い周波数帯を対象とした研究の早急な実施が望まれる。

#### 3.1.4.1. 細胞研究

##### 3.1.4.1.1. ミリ波

ミリ波ばく露に関する細胞研究は、近年増加する傾向にはあるが、依然として研究データは少ない。研究報告は、無線通信システムでの早期実用化が見込まれている 60 GHz 帯付近に集中しており、それ以外の周波数域の研究は少ない。これまでに、周波数 60.4 GHz のばく露実験としては以下の研究がある。ICNIRP のガイドライン上限である入射電力密度 20 mW/cm<sup>2</sup>をヒトケラチノサイトに 3 時間ばく露し遺伝子発現変化を調べた結果、温熱作用に対する細胞応答が見られたという報告がある<sup>(129)</sup>。一方で、入射電力密度 10 mW/cm<sup>2</sup>を 24 時間ばく露し神経突起の伸長を調べた研究<sup>(130)</sup>や入射電力密度 10 mW/cm<sup>2</sup>を神経様細胞に 24 時間ばく露し、たんぱく質発現解析を調べた研究<sup>(131)</sup>、入射電力密度 5 mW/cm<sup>2</sup>を 24 時間ばく露しドーパミン代謝を調べた研究<sup>(132)</sup>があり、いずれも影響がなかったことを報告している。また入射電力密度 1 mW/cm<sup>2</sup>から ICNIRP のばく露上限である 20 mW/cm<sup>2</sup>までをヒト皮膚培養細胞に 20 分間～24 時間ばく露し、細胞小器官における熱作用の解析により影響はなかったが、ばく露上限の 20 mW/cm<sup>2</sup>においては、いくつかの遺伝子発現を抑制する影響がみられたと報告している<sup>(133)</sup>。

周波数域の異なる研究としては、周波数 0.12 THz、5 mW/cm<sup>2</sup>をヒト角膜上皮細胞に 24 時

間ばく露し、遺伝毒性や細胞毒性を調べた結果、影響が見られない<sup>(134)</sup>という報告もある一方、周波数 0.1 THz と 0.15 THz、平均入射強度 0.40 mW/cm<sup>2</sup>をヒト線維芽細胞に 20 分間ばく露し、遺伝毒性や細胞毒性影響を調べた結果、染色体数に作用する可能性を示唆した報告<sup>(135)</sup>もある。

これらの細胞への影響においては、研究結果の蓄積は少なく、さらに解析した指標の違いやばく露した周波数域、強度も異なり、生体への影響評価を行うには不十分である。さらにばく露による作用機序を検証した研究も乏しく、今後、詳しい解析が必要である。

#### 3.1.4.1.2. サブミリ波

サブミリ波の細胞研究においては、ばく露と細胞への影響について明確な因果関係がある研究結果は見られていない。この周波数域は、水やタンパク質、炭水化物などの生体分子に特有の吸収を持っており、ばく露による影響研究にはこれらの吸収とそれに伴う熱作用を考慮した研究が必要となる。

これまでに、周波数 2.3 THz、平均照射電力 0.14 W/cm<sup>2</sup>をヒト胚幹細胞株に 1 時間ばく露し、DNA への損傷や転写に関して調べた結果、影響が見られなかったことを報告している<sup>(136)</sup>。その一方で、サルモネラ菌と大腸菌において周波数 2.3 THz、平均電力 1.4 W/cm<sup>2</sup>を 5～15 分間ばく露した結果、両者の細菌に遺伝毒性や突然変異性はないが、15 分間のばく露後にサルモネラ菌では細胞数が僅かに増加、大腸菌はβ-ガラクトシダーゼとアルカリホスファターゼが増加したという報告<sup>(137)</sup>や、大腸菌に周波数 2.3 THz、平均電力 1.4 W/cm<sup>2</sup>で 15 分間ばく露した結果、ストレス反応に関係する遺伝子を活性化し、酸化反応の恒常性に影響するという研究もある<sup>(138)</sup>。いずれにおいても研究例が少なく、再現性や作用機序の解明について今後、検討される必要がある。さらにばく露による影響報告は、熱作用を考慮した実験データも一部あるが、数は限られており、熱作用と非熱作用のそれぞれの検証も必要である。現時点では、サブミリ波ばく露による影響評価をできる状況にはない。今後の研究例の増加が期待される。

#### 3.1.4.2. 動物研究

ミリ波の動物研究においては、マウスにおいて 4 Gy/min X 線と周波数 42.2 GHz、入射電力密度 0.1 mW/cm<sup>2</sup>、皮膚表面の SAR が 1.5 W/kg を 20 分間複合ばく露した実験では、42.2 GHz のばく露により胸腺の X 線ばく露後の影響を修正するという研究<sup>(139)</sup>や周波数 35 GHz、入射電力密度 75 mW/cm<sup>2</sup>をラットに 19～38 分間ばく露し、熱作用によって引き起こされる病態生理学的な変化を報告した研究<sup>(140)</sup>、周波数 40 GHz、電力 0.01 mW を 10 分間ばく露、10 分間休憩を 3 回行い、ラットの偏頭痛モデルとなる神経発火への影響<sup>(141)</sup>を調べた研究がある。しかし周波数域、照射パワーがそれぞれの報告で大きく異なっており、さらにミリ波ばく露による非熱影響なのか、熱影響であるかが明確でなく、熱作用と非熱作用を考慮した実験と研究例の蓄積が必要である。

サブミリ波の動物研究においては、周波数 2.7 THz、平均電力 260 mW/cm<sup>2</sup>をマウス耳介の皮膚に 30 分間ばく露し、急性炎症反応を検証した結果、影響があると報告している<sup>(142)</sup>。しかし、ばく露による熱生成と生体影響の因果関係が明確ではなく、さらなる調査が必要である。

### 3.1.4.3. ヒト研究

ミリ波のばく露による健康なヒトボランティアにおける疼痛に関する影響の研究があり、42.25 GHz、17.2 mW/cm<sup>2</sup>以下のミリ波電波を 20 名の男性被験者の皮膚に 30 分間ばく露し、実験的に誘発した寒冷昇圧試験 (CPT) を行った結果、痛みの感覚の増加や拡張期の血圧の上昇が認められた報告<sup>(143)</sup>があるが、研究例が僅かであり、また性別による検討なども行われていない。このため、確固たる生体影響として見出されたものはない。今後の研究の推進が期待される。

### 3.1.5. 各周波の研究動向の総括

3.1.2～3.1.4 では、電波防護指針が対象とする周波数帯 (10kHz～300GHz) の電波の健康影響への有無について最新の研究動向を把握した。上記で述べたように、周波数帯別、研究デザイン別に研究論文を精査したところ、一部で影響ありの研究報告はあるものの、それぞれの科学的根拠は十分ではないため、更なるデータ収集や研究が必要と考えられる。従って、上記で取り上げた最新の研究動向からは、現時点で電波防護指針における生物学的根拠を変える必要はないと考えられる。

### 3.1.6. 生体電磁環境研究及び電波の安全性に関する評価技術研究の動向

現在、総務省では、表 3.1-1 及び表 3.1-2 に示す生体電磁環境研究および電波の安全性に関する評価技術研究を実施し、現行あるいは次世代の電波環境の安全性確保に向けた研究が実施されている。

表 3.1-1 実施中の生体電磁環境研究の課題名と研究概要

課題名	研究開発目標の概要
ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究 (平成 27 年度～29 年度)	本研究課題では、10GHz-300GHz の対象周波数帯 (特に 10GHz～100GHz を重点化) における電波防護指針値の根拠をより明確化し、電波防護指針への適合性を適切に評価できるようにすることを目的として、対象周波数帯における温熱知覚閾値 (熱痛の閾値を含む。以下同じ。) 実験を行う。研究では被験者に対してミリ波帯の電波を正確にばく露し、ミリ波ばく露時の熱痛を含む温熱知覚閾値のデータを取得することにより、その特性を明らかにする。



課題名	研究開発目標の概要
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 27 年度～29 年度)	本研究課題では、日常生活における電波ばく露の実態をより定量的に把握する方法を開発するとともに、脳腫瘍の罹患状況を考察することにより、電波の健康リスクについての疫学的研究の精度を高めることを目的とする。また、電波の健康リスクに関する国際的研究と連携しつつ、集積したデータの整理・分析を行う。
中間周波数帯の電磁界（特に 100kHz 帯の磁界）における非熱的生体作用の検討 (平成 27 年度～29 年度)	本研究課題は、中間周波数帯における非熱的生体作用の有無及び作用メカニズムに関する調査研究を実施することにより、当該周波数帯のリスク評価に資することを目的とする。特に、電気自動車 (EV) 用 WPT 等により利用の拡大が見込まれる 100kHz 帯において、ICNIRP ガイドラインの刺激作用に基づく基本制限値以下の磁界による非熱的生体作用について検討する。
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 (平成 28 年度～30 年度)	本研究課題では、100GHz から 300GHz の超高波による人体への影響に関して、特に眼部における生物学的な影響について、動物実験やシミュレーションによる解析を通じて、解明する。これらの実験・解析やこれまでに報告されている研究的知見を総合的に評価することを通じて、現在の電波防護指針の妥当性を検証するとともに、今後の電波防護指針改定等のために必要な安全性評価の方向性を明らかにすることを目的とする。
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 (平成 28 年度～30 年度)	本研究課題では、10GHz から 30GHz の電波による人体への影響を明らかにするため、動物実験を行うとともにその結果のヒトへの外挿も検討し、局所吸収指針の根拠となる熱作用閾値を明確化する。これらを通じて、適用周波数上限の拡張等、局所吸収指針における改定の根拠を確立する。
テラヘルツ波等における非熱作用の有無に関する調査 (平成 28 年度～30 年度)	本研究課題では、主に 300GHz から 600GHz のテラヘルツ波等における非熱作用の有無を評価するための手法等、基礎的な検討を行うとともに、非熱作用の存在を肯定する研究報告について、検証実験を行うことを目的とする。これらを通じて、テラヘルツ波等における非熱作用の有無等を確認することで、電波防護指針の対象周波数の上限拡張の改定等に向けて、安全性評価の方向性を明らかにする。
準ミリ波・ミリ波ばく露時の生体作用の調査	本研究課題では、準ミリ波～ミリ波の電波ばく露に関する生体影響の調査及び評価、シミュレーションによる生体影響に

課題名	研究開発目標の概要
(平成 29 年度～32 年度)	関する安全性評価を行う。これらの実験・解析やこれまでに報告されている各種知見を総合的に評価することを通じて、現在の電波防護指針の妥当性を検証するとともに、今後の電波防護指針改定等のために必要な安全性評価の方向性を明らかにする。
中間周波に係る疫学調査及びばく露量モニタリング調査 (平成 29 年度～33 年度)	本調査研究では、中間周波のばく露が人体に与える影響について中間周波の健康影響に関する疫学研究、日常環境における中間周波等のばく露の実態調査、ばく露評価手法、評価装置及びモニタリング手法の開発をしてモニタリングを行うことで、中間周波の国際的なリスク評価に貢献する。
中間周波における神経作用（痛覚閾値）の調査 (平成 29 年度～32 年度)	本調査研究では、中間周波で生じる刺激作用に関し、中間周波における人体の神経作用と痛覚特性の調査、およびばく露評価手法及び評価装置の開発を行い、中間周波に関する健康リスク評価に貢献する。
遺伝的背景及び標準評価系を用いた細胞への影響調査 (平成 29 年度～32 年度)	本調査研究では、標準的な細胞実験手法を用いた電波の影響調査、遺伝子レベルでの電波の影響調査において、最新の科学技術や他分野で汎用的に用いられている手法を活用することで、細胞レベルでの電波の影響について明らかにし、国際的なリスク評価に貢献する。

表 3.1-2 実施中の電波の安全性に関する評価技術研究

課題名	研究開発目標の概要
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 (平成 28 年度～32 年度)	本調査研究において、次世代電波利用システムについて、様々な利用状況、条件下で人体のばく露量を正確に見積もることを可能とする評価手法、電波防護指針等との適合性を簡便かつ再現性良く評価する手法を開発するとともに、適合性評価手法の信頼性確保に関する検討を行う。

出所) 各研究課題の公募時の基本計画書に基づき作成

## 3.2. 6GHz 以上の人体ばく露評価

### 3.2.1. 局所 SAR と入射電力密度とのギャップ

我が国の局所吸収指針における適用上限周波数は 6 GHz であり、評価指標としては 10 g 平均の SAR が用いられている。また、電磁界強度指針の値については、電波放射源から 10cm 以上（300MHz 以下は 20cm 以上）離れた空間で適用することが推奨されており、また補助

指針の値についても同様に、電波放射源から 10cm 以上（300MHz 以下は 20cm 以上）離れた空間での適用が定められている。すなわち、6 GHz から 300 GHz までの周波数において、電波放射源より 10 cm 未満における指針値はない。

一方、ICNIRP 国際ガイドライン<sup>(144)</sup>、IEEE C95.1 規格<sup>(145)</sup>では、それぞれ、10GHz あるいは 3 GHz よりも高い周波数において、入射電力密度が用いられている。しかしながら、各国際ガイドライン間で規定する入射電力密度の平均化面積が異なっており、根拠となる文献も明示されていない。近年、Sasaki ら<sup>(146)</sup>の検討では、ICNIRP 国際ガイドラインにおいて評価指標が SAR から電力密度へ遷移する 10 GHz での局所 SAR の連続性について、均一な電磁界ばく露条件において確認された。また、Sasaki ら<sup>(146)</sup>の検討では 6—10 GHz の範囲においては、ICNIRP ガイドラインの参考レベルとして用いられる電力密度を評価指標として利用した方が、基本制限である局所 SAR を利用した場合よりも、体表での温度上昇が低くなることが示されている。以上のことから、双方の国際ガイドラインにおける電力密度に対する推奨値は安全側に定められていると考えられる。

Colombi ら<sup>(147)</sup>はその点に着目し、標準的なダイポールアンテナを考えた場合に、上述の局所 SAR から入射電力密度に遷移する周波数では、入射電力密度の制限値を満たすための出力電力が、局所 SAR の制限値を満たすための出力電力に比べて、最大で 6.5 dB 下がることを指摘している。さらに、標準的なダイポールと比較してより指向性の高いアンテナを利用する場合には、10 GHz 以上の周波数において、国際ガイドラインを満たすための出力電力が更に低下することを指摘している。6 GHz 以上の周波数帯での無線技術では、MIMO やビームフォーミングといった技術の適用が検討されており、実際の無線端末の指向性は標準的なダイポールアンテナと比較して、より高くなることが想定される。ただし、Colombi ら<sup>(147)</sup>の検討では、出力電力の各国際ガイドライン間での比較に留まり、適切な平均化面積を決定するための詳細な検討は実施されていない。従って、5G 無線システムの利用にあたり、科学的根拠に基づき、適切な面積で平均化した入射電力密度の指針値を定める必要がある。

### 3.2.2. 電波領域と光領域のギャップ

本節での議論は、光放射領域（赤外放射、可視光、紫外放射）および電波領域の双方のガイドラインを策定している ICNIRP 国際ガイドラインを対象とする。光放射領域におけるガイドラインは、レーザ光以外の光（通常光）<sup>(148)</sup>、レーザ光に対する<sup>(149)</sup>ものがある。共に、300 GHz 以上の周波数領域に適用される。下記に述べるように両者の対象は異なり、境界となる 300GHz においてばく露時間 10 秒以上の場合のレーザ光と電波のガイドラインの規制値は一致するが、通常光のガイドラインの場合には、単純な形の制限値としては決められていない。ここでの議論は、電波領域と光放射領域におけるガイドラインの種々の相違であるため、光放射領域の中で周波数が高い（波長が短い）領域において支配的となる光化学効果については言及しない。

電波と光放射領域のガイドラインの相違として、まず、前者は一般環境と職業環境の設定があるのに対し、後者ではその区分はないことが挙げられる。これは、電波ガイドラインにおける一般環境に対して付加的に適用される低減係数 5 を導入した場合、生活環境での光レベルを超過するためとされる。また、3.2.4 でも議論するが、電波ガイドラインでは平均化時間<sup>(1)</sup>が設定されているのに対し、通常光ガイドライン<sup>(149)</sup>ではその定義はなく、一部持続時間が定義されるのみであいまいさが存在する。無線通信などで用いられる電波と同様に、光放射でも入射電力密度は時々刻々と変化することから、光放射領域に時間軸における入射電力密度の定義の明瞭化が期待される。なお、連続波を想定した場合には入射電力密度の両ガイドライン値は合致するように設定されている。

一方、レーザー光に対するガイドライン<sup>(150)</sup>では、10 秒以下の高強度短時間パルスに対するガイドラインが設定されている。これは、300GHz 以上では電磁波の浸透深さは数 mm 程度であり、同じエネルギー密度を照射した場合、熱拡散が支配的になる前の 10 秒以内に過度な体表温度上昇を生じるためである（3.2.3 参照）。2016 年に開催された ICNIRP のワークショップでは、ICNIRP の電波ガイドラインの改定版において、レーザー光と同様に 10 秒以内の短時間ばく露に対する制限値の導入も検討されていることが報告されており、今後の動向を注視する必要がある。

### 3.2.3. 入射電力密度の平均化時間

電波がヒトに入射した際、電波の一部は人体内で吸収、熱に変換され、体温上昇を引き起こす。その体温上昇に要する時間は、部位、周波数などにより大きく変化する。

電波防護指針で定められている強度でのヒトへのばく露による実験は、Adair らによるもののみである（0.55 W/kg）<sup>(150-152)</sup>。一連の報告によると、深部体温の上昇は、ばく露時間（45 分）と同等あるいはそれ以上であることが示唆されている。計算により、ヒトの全身ばく露（管理環境における基礎指針である全身平均 SAR が 0.4 W/kg）を考えた場合、温度上昇の熱時定数（本節では、定常状態の体温上昇の 63%の値までに要する時間）は 22-52 分であった<sup>(153)</sup>。また、おおよそ 85%の体温上昇となるには、その 2 倍の時間（44-104 分）を要する。なお、温度上昇の熱時定数は、熱障害の時定数ではないことに留意する必要がある。この熱時定数は、入射電力密度が高くなるにつれて短くなる。これは、体温上昇に伴い発汗が生じ、結果的に早く体が冷却されるためである。

一方、ヒトの局所ばく露を考えた場合、熱時定数は、周波数および当該部位の血流に依存する。血流が多い部位では、熱時定数は短くなる一方、体温上昇も低くなる。また、体表面における時定数は周波数に依存し短くなり、数 GHz で電波防護指針における平均化時間 6 分程度となる<sup>(154)</sup>。また、30GHz 程度で 2-3 分程度となり、それより高い周波数では大きく変化しない。なお、脳など深部の組織では、体表付近で生じた熱が伝導するまでの時間があるため、体表面と比較し熱時定数が長くなる。

現在、300 GHz においてレーザーガイドラインにおける持続時間の 10 秒と合致するように

ICNIRP ガイドライン<sup>(144)</sup>、IEEE C95.1 規格<sup>(145)</sup>ともに 300GHz の平均化時間が 10 秒に定まっている。一方、前述のレーザガイドラインで想定されている平均化面積（直径 11mm の円）のような局所ばく露を考えた場合、熱時定数は 30 秒と推定されている<sup>(154)</sup>。これは、レーザガイドラインの持続時間と電波ガイドラインにおける平均化時間の定義の相違のためである。

### 3.2.4. 入射電力密度の平均化面積

3.2.1.で述べたように、我が国における局所吸収指針では、6GHz よりも低い周波数における局所ばく露の評価指標としては、SAR の 10g 平均の空間最大値が用いられているが、6GHz 以上の周波数における局所ばく露の評価指標は策定されていない。一方、国際ガイドライン・国際規格である ICNIRP ガイドライン<sup>(144)</sup>、あるいは IEEE C95.1 規格<sup>(145)</sup>では、入射電力密度の面積平均の空間最大値が用いられている。また、入射電力密度が適用される周波数帯も ICNIRP と IEEE で異なり、前者は 10GHz 以上、後者は 3GHz 以上である。この入射電力密度を評価指標として用いる際には、電波が当たる面を定義し、定めた面積にわたり入射電力密度を平均化した値の空間平均を用いる。面積の大きさもまた、ICNIRP と IEEE で異なる。具体的には、ICNIRP ガイドライン<sup>(1)</sup>では平均化面積を 20 cm<sup>2</sup>とし、許容値が 10 W/m<sup>2</sup>である。但し、1 cm<sup>2</sup>における入射電力密度が 200 W/m<sup>2</sup>を超えてはならないとしている。一方、IEEE C95.1 規格<sup>(145)</sup>では、3-30 GHz において  $100\lambda^2$  [cm<sup>2</sup>] ( $\lambda$ : 自由空間での波長[cm])、30 GHz 以上では 100 cm<sup>2</sup>と定められている。また、入射電力密度は、2-100 GHz において許容値が 10 W/m<sup>2</sup>であり、100 GHz 以上では  $(90f_G - 7000)/200$  [W/m<sup>2</sup>] ( $f_G$ : 周波数[GHz])と定められている。但し、1 cm<sup>2</sup>における入射電力密度が 1000 W/m<sup>2</sup>を超えてはならないとしている。しかしながら、これらの値の根拠は明確ではなく、ICNIRP ガイドラインや IEEE 規格にはその根拠となる文献は述べられていない。

Hashimoto らの研究<sup>(155)</sup>では、4 素子からなるダイポールアンテナアレイを人体から 15-40 mm 離れた位置に配置し、また、電力密度の平均化面積を変化させ、皮膚最大温度上昇との比の周波数特性を調査している。この報告によれば、平均化面積を 4 cm<sup>2</sup>とした場合、約 30 GHz までは温度上昇を面積平均入射電力密度で除した割合は、理想的条件（平面波が均質媒質に入射する状態を想定した 1 次元解析）の値に比べて小さかった。但し、30GHz を超えると、吸収電力の局在化により安全側ではない場合もあることが示されている。一方、IEEE C95.1 規格の平均化面積は局所温度上昇との相関はなく、また、ICNIRP における 20 cm<sup>2</sup>も過大となる場合があることが示されている。但し、ICNIRP ガイドラインの基本制限値を示す表の注に示されている空間最大値に適用する平均化面積（1 cm<sup>2</sup>）はいずれの周波数においても安全側の評価であった。Foster ら<sup>(156)</sup>は、2 次元の皮膚単層モデルを用いて理論解析を行い、皮膚温度上昇と相関の取れる電力密度の空間平均値は 1-4 cm<sup>2</sup>とした。以上より、Hashimoto および Foster の両者の数値解析の結果は概ね合致していると考えられる。また、人体に入射するミリ波のビーム幅が数 cm 以下の場合には、皮膚温度上昇は、入射電

力密度、ビーム幅に比例することが示されている。

以上のように、電力密度の空間平均化に用いる面積は重要な役割を果たし、最新の知見を考慮しても  $1\text{cm}^2$ （1辺  $1\text{cm}$ ）から  $20\text{cm}^2$ （1辺  $4.5\text{cm}$ ）であれば、熱効果の指標になりうることを示唆されている。したがって、許容入射電力密度は、平均化面積にも影響されるので、両者の関係を考慮した改定が望まれる。

### 3.3. 防護対象

#### 3.3.1. 植込み型の医療機器や金属

金属製の器具を体内に埋め込んでいるまたは身につけている人、あるいは、心臓ペースメーカーや除細動器などの植込み型医療機器を装着している人を対象とする電波防護指針の適用には注意が必要である。このような場合、指針値以下の強度のばく露電磁界でも予想外の局所的な発熱などを引き起こす可能性があることが報告されており<sup>(157-159)</sup>、さらに、能動型の植込み型医療機器では、電磁界の干渉により誤動作が生じる可能性があるためである。ただし、これらは製品安全性や電磁両立性（EMC）に関する課題であり、電波の人体への影響とは異なる。また、金属製器具や植込み型医療機器は、その形状、材料および機能において様々存在することから、防護のための取り扱いを統一的に決めることが現状は困難である。一方で、今後、植込み型の医療機器のさらなる普及や新たな体内植込み器具・機器の開発が見込まれるため、これらと電波利用拡大の調和を図っていくことが重要である。したがって、電波防護指針（平成2年6月電気通信技術審議会答申）に記されている注意事項の取扱いを踏襲した上で、今後、防護指針に適合した電波ばく露に対して電磁的耐性を有する医療機器の開発、あるいは、電波ばく露に起因する発熱を抑制するような材質や形状の器具・機器の開発など、さらに、これら器具・機器を装着している場合の継続的な指針適合性に関する評価検討がなされることが望ましい。なお、植え込み型医療機器の電磁干渉影響については、総務省が継続的に調査を実施しており、それらの結果に基づき公表されている「各種電波利用機器の電波が植込み型医療機器へ及ぼす影響を防止するための指針」<sup>(160)</sup>を参照されたい。

#### 3.3.2. 新たな電波利用形態への対応

##### 3.3.2.1. WPT への対応

###### 3.3.2.1.1. 電磁界ばく露制限に関する対応

WPT に関しては日本が世界に先駆けて制度化を実現しているが、国内で制度化された WPT システムが適合すべき指針については、ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件（平成27年7月情報通信審議会答申）において、表 3.3-1～表 3.3-3 のように整理されている。

表 3.3-1 WPT システムに適用すべき指針

(電気自動車用 WPT システム (100 kHz 未満のシステム))

人体が接触又は近接 (20cm 以内) したり、人体の一部が送受電コイル間に入る可能性：なし (又は極めて低い)									
接触ハザード		接触ハザードが防止されていない							
非接地条件		対象外							
評価方法の分類		パターン①	パターン②	パターン③	パターン④	パターン⑤	パターン⑥	パターン⑦	
適用が考えられる指針値及び根拠となるガイドライン等の組合せ	SAR	全身平均 SAR							
		局所 SAR							
	体内誘導電界強度	接触電流		接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針
		接触電流		接地金属体を用いた接触電流評価のみ実施	非接地金属体を用いた接触電流評価のみ実施	接地金属体および非接地金属体を用いた接触電流評価を実施	接地金属体を用いた接触電流評価のみ実施	接地金属体および非接地金属体を用いた接触電流評価を実施	接地金属体および非接地金属体を用いた接触電流評価を実施
	足首誘導電流								
	外部電界	電磁界強度指針表 3(b) <sup>*1</sup>	電磁界強度指針表 3(b)				電磁界強度指針表 3(b)		
		<sup>*1</sup> 不均一ばく露に関する補助指針	不均一ばく露に関する補助指針				不均一ばく露に関する補助指針		
	外部磁界	電磁界強度指針表 3(b) <sup>*1</sup> および接触電流に関する補助指針から算出される磁界強度(式 5.2-1) <sup>*2</sup>	電磁界強度指針表 3(b)	電磁界強度指針表 3(b)および接触電流に関する補助指針から算出される磁界強度(式 5.2-1) <sup>*2</sup>	電磁界強度指針表 3(b)	電磁界強度指針表 3(b)	結合係数による体内誘導電界強度の評価	結合係数による体内誘導電界強度の評価	
		<sup>*1</sup> 不均一ばく露に関する補助指針 <sup>*2</sup> ループ面積における空間平均の適用可	不均一ばく露に関する補助指針	不均一ばく露に関する補助指針 ループ面積における空間平均の適用可	不均一ばく露に関する補助指針	不均一ばく露に関する補助指針			

出所) 電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件 (平成 27 年 7 月情報通信審議会答申)

表 3.3-2 WPT システムに適用すべき指針

(家電機器用 WPT システム① (6 MHz 帯の周波数を用いた磁界結合型ワイヤレス電力伝送システム))

人体が接触又は近接 (20cm 以内) したり、人体の一部が送受電コイル間に入る可能性：あり								
接触ハザード		接触ハザードが防止されていない						
非接地条件		非接地条件が満たされている						
評価方法の分類		パターン①	パターン②	パターン③	パターン④	パターン⑤		
適用が考えられる指針値及び根拠となるガイドライン等の組合せ	SAR	全身平均 SAR					局所吸収指針	
		局所 SAR					局所吸収指針	
	体内誘導電界強度	接触電流		接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針
		接触電流		接地金属体を用いた接触電流評価のみ実施	接地金属体を用いた接触電流評価のみ実施	接地金属体および非接地金属体を用いた接触電流評価を実施	接地金属体および非接地金属体を用いた接触電流評価を実施	
	足首誘導電流							
	外部電界	電磁界強度指針表 3(b)	電磁界強度指針表 3(b)	電磁界強度指針表 3(b)	電磁界強度指針表 3(b)			
		不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	不均一ばく露に関する補助指針の使用不可			
	外部磁界	電磁界強度指針表 3(a)および電磁界強度指針表 3(b)および接触電流に関する補助指針から算出される磁界強度 (式 5.2-2)	電磁界強度指針表 3(a)および電磁界強度指針表 3(b)	電磁界強度指針表 3(a)および電磁界強度指針表 3(b)	結合係数による局所 SAR 評価および結合係数による体内誘導電界評価	結合係数による局所 SAR 評価および結合係数による体内誘導電界評価	結合係数による体内誘導電界評価	
		不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	電界強度の影響が無視でき、全身平均 SAR の評価が不要の場合に限る	電界強度の影響が無視でき、全身平均 SAR の評価が不要の場合に限る			

出所) 電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件 (平成 27 年 7 月情報通信審議会答申)

表 3.3-3 WPT システムに適用すべき指針

(家電機器用 WPT システム③ (400 kHz 帯の周波数を用いた電界結合型ワイヤレス電力伝送システム))

人体が接触又は近接 (20cm 以内) したり、人体の一部が送受電コイル間に入る可能性：あり				
接触ハザード		接触ハザードが防止されていない		
非接地条件		非接地条件が満たされている		
評価方法の分類		パターン①	パターン②	
適用が考えられる指針値及び根拠となるガイドライン等の組合せ	SAR	全身平均 SAR	局所吸収指針	
		局所 SAR	局所吸収指針	
	体内誘導電界強度		局所吸収指針	
	接触電流		接触電流に関する補助指針	接触電流に関する補助指針
			接地金属体を用いた接触電流評価のみ実施	接地金属体および非接地金属体を用いた接触電流評価を実施
	足首誘導電流			
	外部電界	電磁界強度指針表 3(b)	電磁界強度指針表 3(b)	
		不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	
	外部磁界	電磁界強度指針表 3 (a) および電磁界強度指針表 3 (b) および接触電流に関する補助指針から算出される磁界強度 (式 5.2-2)	電磁界強度指針表 3 (a) および電磁界強度指針表 3 (b)	
		不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	不均一ばく露に関する補助指針の使用不可	

出所) 電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件 (平成 27 年 7 月情報通信審議会答申)

一方、諸外国においては WPT を想定した制度化も日本と比較して進んでおらず、電波ばく露制限の規制に対しても個別ケースごとに対応している状況となっている。現状の諸外国における WPT 機器の制度化及び電磁界ばく露への対応状況を表 3.3-4 に示す。



表 3.3-4 諸外国における WPT システムの制度化状況

国	WPT 機器の制度化	電磁界ばく露への対応
米国	WPT 機器というカテゴリの制度化はなく、WPT の試験に関する技術文書 KDB 680106 において、9kHz 以上で使用される小電力の充電器等に関しては、” intentional radiators “として、FCC Part 15 (通信機能) または FCC Part 18 (電力伝送機能) が適用される <sup>(※1)</sup> 。試験に際しては、FCC に対して ” wireless charging application inquiry “を提出し、FCC からのガイダンスを受ける必要がある。	電磁界ばく露制限への適合については、ガイドライン ( 680106 D01 RF Exposure Wireless Charging Apps v02) が提示されている。これによれば、機器の運用特性に基づき、FCC 規則 Section2.1091 (モバイル機器) 及び Section 2.1093 (ポータブル機器) に基づく制限値へ適合する必要がある。ただし、SAR と MPE の制限値はそれぞれ 100kHz 以下及び 300kHz 以下をカバーしないため、Section1.1307(c), (d) の規定に基づき、ばく露評価を判断する。
カナダ	産業省の技術基準 RSS-216: Wireless Power Transfer Devices において、以下の 3 タイプの WPT 機器/部品を規定 Type I:無線通信を行わない機器 (ISM 機器) Type II:電力伝送を行う周波数で負荷変調等を行う機器 (認証不要) Type III:Type I, II 以外の機器 (認証要)	保健省の RF 電磁界の人体ばく露制限 Safety Code 6 (安全規定 6) 及び産業省の無線機器適合性評価 RSS-102:Radio Frequency (RF) Exposure Compliance of Radiocommunication Apparatus (All Frequency Bands) の対象となる。
EU	現行の CE マークの規制枠組みの中で下記のように分類される <sup>(16)</sup> 。 ケース 1:充電の送受信機間に通信機能がない場合 →EMC 指令 ケース 2:充電の送受信機間に通信機能があり、同じ周波数帯で電力伝送を行う →無線機器指令 (RED) <sup>(※2)</sup> ケース 3:充電の送受信機間に通信機能があり、別の周波数帯で電力伝送を行う →ケース 1 とケース 2 の組み合わせ	EN 62311 (0Hz~300GHz における人体ばく露制限に対する電気電子機器の適合性評価)、EN 62479 (低電力機器の電磁界 (10 MHz ~300 GHz) の人体ばく露に関連する基本的制限事項を伴う低電力電子・電気機器の適合性評価) への適合が必要となる。

出所) 電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件 (平成 27 年 7 月情報通信審議会答申) 等を基に作成

(※1)下記の要件に全て合致するものは、電磁界ばく露量評価が免除されている。

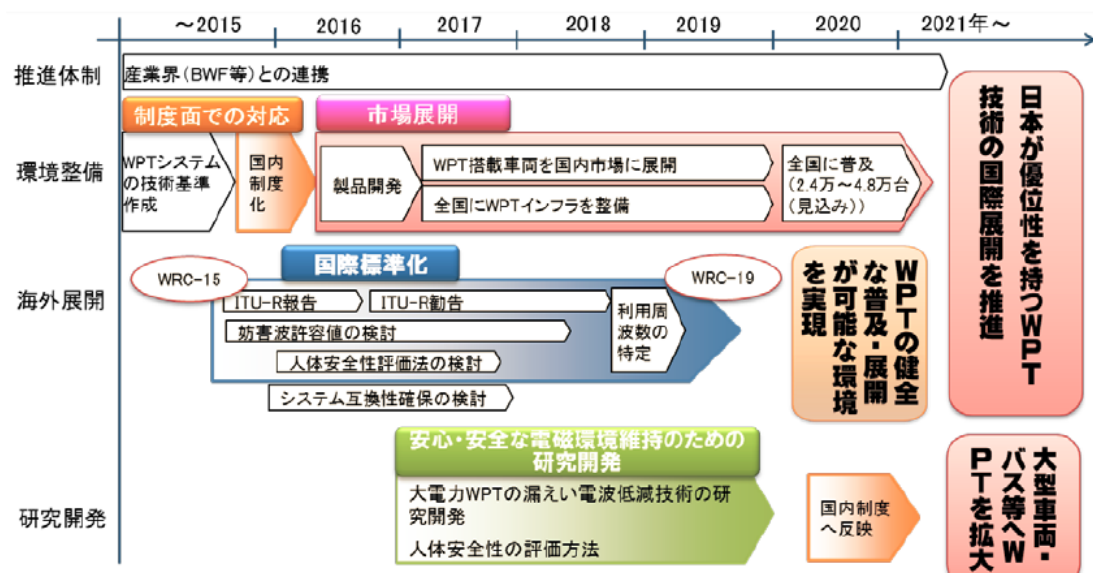
- ・電力伝送の周波数が 1MHz 以下であること。
- ・送受それぞれの主コイルの出力が 5 W 以下であること。
- ・送信システムは単一の主コイルと二次的コイル (単一又は複数) から構成されていること。
- ・クライアント端末は、充電中には送信システムに挿入又は直接接触していること。
- ・最大結合面積は 60 cm<sup>2</sup>から 400 cm<sup>2</sup>の範囲内であること。
- ・充電中のシステム周囲から 10 cm の距離での漏えい電磁界が最大許容電磁界 (MPE) の 30%未満であること。

(※2)2017 年 9 月に、RED 指令の要求に適合するための WPT システム (19 - 21 kHz, 59 - 61 kHz, 79 - 90 kHz, 100 - 300 kHz, 6 765 - 6 795 kHz) の技術的特性と測定方法に関する整合規格 ETSI EN 303 417 V1.1.1 が発行している。

### 3.3.2.1.2. 適合性評価方法への対応

一方、WPT に関しては、今後、異なる方式、大電力化、異なる周波数帯での実用化が予想される状況にあり、個々のシステムに対応した適合性評価方法の確立を行っていく必要がある。特に EV 等で利用が検討される 100 kHz 以下の周波数帯における大電力給電などは、既存の適合性評価法の大型車両を想定した有用性確認などが必要となる。電波政策 2020

懇談会報告書では、こうした課題解決に向けた取り組みとして、2020年までに実現することとして、安心・安全な電磁環境維持のための、漏えい電波の低減技術や人体安全性の評価方法等の技術開発、および国際標準化の推進などの方針（ワイヤレス電力伝送推進ロードマップ）が示されている。



出所) 電波政策 2020 懇談会報告書

図 3.3-1 ワイヤレス電力伝送推進ロードマップ

2015年のTC 106総会において、WPTに関する検討を行うグループとしてWG9(Addressing methods for assessment of Wireless Power Transfer (WPT) related to human exposures to electric, magnetic and electromagnetic fields)が設置され、WPT機器の評価方法に関する検討が開始されている。WGの検討に基づき技術報告書(TR)が2018年に発行する予定となっている。WG9の検討内容を以下に示す。

(IEC TC 106/WG 9 の検討内容)

- 電磁界ばく露に関して現状の確認
- ばく露評価に関する要求事項の確認
- 刺激作用 (～10MHz)
- 熱作用 (100 kHz～)
- 適用可能なばく露評価法のまとめ
- 新しく IEC 規格化が必要か判断
- 上記検討結果のまとめ (技術報告書作成)

この点に関して、ブロードバンドワイヤレスフォーラムでは、今後の新たなWPTシステ

ムの利用条件の拡大に向けて、電波防護指針に対する適合性評価方法に関して表 3.3-5 に示す観点で検討がされている。

表 3.3-5 WPT の適合性評価方法に関するブロードバンドワイヤレスフォーラムでの検討

項目	検討の必要性
電気自動車用 WPT システム (85kHz 帯磁界結合方式) の利用条件の拡大に伴う電波防護指針に対する適合性評価方法の検討の必要性	電気自動車用 WPT システム (85kHz 帯磁界結合方式) に関して、(a)EV バス応用など送電電力の大電力化 (例えば 100kW クラス)、(b)マイクロ EV、電動バイク、電動自転車、電動カートなどのパーソナルモビリティ用途や AGV (Automatic Guided Vehicle) などの産業用機器用途など、広範囲な利用形態においても、電波防護指針が適用できるような適合性評価方法の構築が必要となる。例えば、電波利用環境委員会報告書『「国際無線障害特別委員会 (CISPR) の諸規格について」のうち「ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件」のうち「電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件」』に記載されている電気自動車用 WPT システムに対する評価方法のパターン⑦ (基礎指針又は基本制限に関わる評価方法) は未検討だが、この評価方法の検討は大電力 WPT 実用化時には必要となる。
家電機器用 WPT システム① (6.78MHz 帯磁界結合方式) の利用条件の拡大に伴う電波防護指針に対する適合性評価方法の検討の必要性	家電機器用 WPT システム①に関して 100W を超える超小型モビリティ(1人～2人乗り程度の車両)への給電や、より距離が離れたモバイル機器・IoT 機器への給電などのより広範囲な利用形態においても、電波防護指針が適用できるような適合性評価方法の構築が必要となる。例えば、電波利用環境委員会報告書に記載されている家電機器用 WPT システム①に対する評価方法のパターン⑤ (基礎指針又は基本制限として SAR や体内誘導電界強度に関わる評価方法) は未検討だが、大電力 WPT 実用化時には必要となる。また、現在の電磁界強度の測定による評価だけでなく、SAR のシミュレーションによる評価も合わせて採用されることが期待される。
マイクロ波空間伝送 WPT システムに関する電波防護指針に対する適合性評価方法の検討の必要性	将来的な実用化に向けた検討が進むマイクロ波空間伝送 WPT システム (広角ビームによるモバイル機器・センサー機器応用等) に関して、システム利用を考慮した際に現実的な適合性評価方法の検討が必要となる。

出所) 先進的な無線システムに関するワーキンググループ (第 5 回) ブロードバンドワイヤレスフォーラム資料

マイクロ波帯を用いた WPT システムについては、近年、実用化に向けた取組が進んできているが、前述の技術的条件や IEC TC106/WG9 における技術報告書の対象システムとなっておらず、現状では適合性評価方法の検討が進められていない。マイクロ波帯 WPT システムで用いる周波数帯の人体防護のための指針値は既に定められており、熱作用を考慮した指針値への適合性を確認することになる。ただし、個々のシステムの仕様や利用形態により、適合性を確認すべき指針 (電磁界強度指針、補助指針及び局所吸収指針) が異なることが想定される。したがって、実用化されるマイクロ波 WPT システムの仕様や利用形態を把握し、それに対する適合性評価方法を確立することが求められる。

### 3.3.2.2. 5G への対応

#### 3.3.2.2.1. 電磁界ばく露制限に関する対応

1.3 で示したように 5G ではミリ波帯の活用が技術的特徴の 1 つとされているが、電磁界ばく露制限値に関する国際的なガイドラインや国際規格においては、6GHz (または 10GHz)

以上の周波数において、SAR ではなく電力密度による評価が適用される。SAR による評価が適用されない周波数帯においては、SAR と電力密度による評価の不整合（ギャップ）、また国際ガイドライン・国際規格間における制限値の条件の違いに起因する不一致性が論点となっており、産業界からその評価例が報告されている。

5G や 60GHz 帯無線通信システム等のミリ波帯を想定した、電磁界ばく露規制に関する研究の事例を表 3.3-6 に示す。

表 3.3-6 6GHz 以上の電磁界ばく露規制に関する研究事例

研究主体	研究論文	内容
Ericsson	D. Colombi ら(2015) <sup>(162)</sup>	基本制限のばく露指標が SAR から入射電力密度に移行した周波数帯(FCC:6GHz, ICNIRP:10GHz, IEEE:3GHz)において、制限値を満たす端末側の最大送信出力を検討。ICNIRP 及び FCC の制限値の場合、同周波数帯において、現行の LTE 等と比較して、端末の最大送信出力を数 dB 低くする必要があるとの評価例。(最新の IEEE 制限値の場合はその傾向は小さい)
	B. Thors ら(2016) <sup>(163)</sup>	5G で用いられるユーザ装置 (UE) や低出力型基地局のアンテナ (周波数範囲 : 10-60GHz) に対して、アンテナの諸条件を考慮しつつ、ICNIRP、FCC、IEEE の制限値を満たすアンテナの最大送信電力を、測定とシミュレーションで検証。近距離において人体に向かって直接送信するアンテナの場合、最大送信電力が、現行の 3G/4G の UE の送信電力よりも小さくなることを指摘。
NYU WIRELESS (5G のミリ波技術の研究に特化した NY 大学の研究センター、同学の工学系と医学系の大学院の連携により運営されており産業界からも 16 社が参加)	T.Wu ら(2015) <sup>(164)</sup>	ミリ波帯における電磁界の伝搬について解説するとともに、現行の FCC 及び ICNIRP の電力密度の評価指標の課題を指摘し、人体近傍においては体温上昇をベースとした評価を提案。さらに、ミリ波による眼球や皮膚への影響について現在の研究状況を解説。公衆向けの施策やヘルスケアに係る主要な決定において、独立に再現性が確認されていない報告をベースにすべきではないと指摘。
	T. Wu ら(2015) <sup>(165)</sup>	ミリ波の周波数帯における国際的な電磁界ばく露の制限値を整理した上で、60GHz 帯で人体がある状態における電磁界の伝搬特性をシミュレーションによって検証。ミリ波のデバイスが人体に近接して使用される場合、入射電力密度はばく露指標として適していないとし、体温上昇をベースとした評価手法を提案している。

出所) 各研究論文を基に作成

米国における 5G 向け周波数帯の特定に向けた意見募集 (1.3.2 参照) においても、産業界側からこの課題が多く指摘されたものの、2016 年 7 月に出された FCC の R&O の中では 5G 向け周波数帯の電磁界ばく露制限値について方針は示されていない。FCC は、同 R&O の中で、現状の電磁界ばく露制限値をミリ波帯で使用されるデバイスに適用する上で、課題があることは認識しているとしつつ、引き続き 2013 年から FCC が検討を行っている電磁界ばく露制限の在り方に関する調査告示 (3.6.1 節参照) の中で扱うとしている。また、2017 年に開催された GLORE 会合においても FCC から同様の見解が示されている。ただし、事業者において同周波数帯で利用されるデバイスの開発は進められているため、こうしたデバイスの評価方法に関しては、調査告示における検討と並行して、FCC の工学技術局 (OET) から発行されるガイダンスにより示していく方針としている。

また、5G の実現においては 5G の高密度ネットワークを実現するスモールセル (従来のマクロ基地局によるカバレッジを補完する小出力の小型基地局の総称) の導入が鍵となるが、特に欧州を中心に、スモールセルの導入を促進するための電磁界ばく露に関する規制 (電磁界ばく露制限値や無線設備の基準認証制度等) のハーモナイゼーションが強く求められている。

現在、欧州委員会 (EC) では、既存の欧州の電気通信に関する規制パッケージ EU Telecom package を更新するものとして、欧州電気通信法典 (European Electronic Communications Code: EEC Code) の策定が進められている。2016 年 9 月に公開されたドラフトでは、Article 56 において、狭域ワイヤレスアクセスポイント (small-area wireless access points) の設置、接続、運用を統一的に進めるため、EC として、2013/35/EU (職業電磁界ばく露に関する欧州指令) に準拠し、1999/519/EC (電磁界の公衆ばく露に関する EU 理事会勧告) の制限値を考慮に入れた技術基準 (サイズ、出力、電磁界特性及び外観デザイン等) を実施法として定めることができるとしている<sup>(166)</sup>。

同じく 2016 年 9 月に公開された欧州委員会の 5G に向けたアクションプランでは、5G 導入の課題として、密度の高い 5G アクセスポイントを迅速かつ効率的に構築する上で必要なスモールセル整備の妨げとなり得る課題の 1 つとして、EU 加盟国において電磁界の放射制限値が異なっていることが挙げられており、加盟国間の協調の必要性が指摘された<sup>(167)</sup>。こうした動きに前後する形で、通信事業者の業界団体においても、スモールセル導入の迅速化に向けた要望が相次いで示されている。

表 3.3-7 スモール導入促進に関する通信事業者の声明

団体	スモールセルに関する内容
欧州通信事業者各社 <i>5G Manifesto for timely deployment of 5G in Europe</i> <sup>(168)</sup>	2020 年までに欧州域内の各国 1 都市以上で 5G 商用サービスを開始することを目標に、産業界の計画、各国政府への要求を提示。欧州委員会の Action Plan 同様、密度の高い 5G のインフラ整備にお

	いて、電磁界の放射制限値を含めた、各国の様々な規制のハーモナイゼーション及び簡略化が必要と指摘している。
GSM Association <i>Improving wireless connectivity through small cell deployment</i> <sup>(169)</sup>	スモールセル導入促進のため、各国の政府に対して 7 つの Recommendation を提示。スモールセル設置にかかわる各種手続きの簡略化や財政上の負担軽減と併せて、高周波電磁界のばく露制限に関する規制導入においては、国際的に整合されたスモールセルのクラス分類に沿う形で実施するよう求める。(クラス分類として、GSMA が Small Cell Forum と取りまとめ、IEC 62232 Ed. 2.0 に記載されているスモールセル製品導入クライテリアを挙げている)
フランス通信業界 <i>Action Souveraineté Télécoms de la solution Confiance Numérique</i> <sup>(170)</sup>	フランス通信業界が共同で、スモールセル導入促進のための、行政手続きの簡略化、税制優遇に関する提案を提示。提案の 1 つとして、現状 EIRP < 1W の設備の場合は免除される適合宣言手続きに関して、国際標準 (ITU 勧告 K.52、 K.100、 IEC 62232 Ed2.0) における定義に合わせて、手続き免除の基準を 2W に引き上げることを挙げている。

出所) 各事業者団体の公表資料を基に作成

### 3.3.2.2.2. 適合性評価方法への対応

人体に近接して使用されるミリ波帯の通信デバイスの電波防護指針への適合性評価方法に関しては、シミュレーション及び測定に様々な評価手法が検討されているものの、両者とも技術的な課題が残されている。国際的にも研究段階にあり、国際的な動向を把握しつつ適合性評価方法へ対応する必要がある。国際的な動向として、例えば、IEC TC106 においては、6~100GHz における電磁界ばく露評価における電力密度測定に関する技術報告書を作成するためのアドホックグループ (IEC TC 106/AHG 10) の活動が 2016 年 11 月より開始されている (2.5. 参照)。

### 3.3.2.3. 60GHz 帯無線システム (WiGig 等) への対応

#### 3.3.2.3.1. 電磁界ばく露制限に関する対応

ミリ波帯における電磁界ばく露の制限値は、我が国及び米国、欧州等の諸外国において、入射電力密度の制限値で規定されている。各国とも制限値を空間平均することを許容しており、その場合の制限値は 1mW/cm<sup>2</sup>であるが、その際の空間最大値の制限については各国で異なる。60GHz 帯無線システムに適用される電磁界ばく露制限値を表 3.3-8 に示す。

表 3.3-8 60GHz 帯無線システムに適用される電磁界ばく露制限値

	日本	米国 FCC	EU(ICNIRP)
入射電力密度の制限値 (空間平均適用)	1mW/cm <sup>2</sup>		
空間的最大値	体表：10mW/cm <sup>2</sup> 眼：2mW/cm <sup>2</sup>	不明	1 cm <sup>2</sup> 毎で平均した空間の最大電力密度は制限値の20倍以下
適用する空間	電波放射源、金属物体から10cm以上離れた人体の占める空間	(測定は波源から5cm以上としている)	波源からの離隔距離の規定はない
平均化時間	6分間	30分間	約1分間弱 (68/f <sup>1.05</sup> ) (fの単位はGHz)

出所) 情報通信審議会情報通信技術分科会陸上無線通信委員会 60GHz 帯無線設備作業班 (第3回) 事務局資料を基に作成

「60GHz 帯の周波数の電波を利用する無線設備の高度化に係る技術的条件」(平成 27 年 6 月情報通信審議会答申)の検討においては、60GHz 帯無線設備から発射される電波の強度が、電波防護指針に適合するかについて、①アクセスポイント(無線 LAN)、②PC 端末内蔵(無線 LAN、ワイヤレスドック)、③携帯電話端末、スマートフォン端末内蔵(無線 LAN)ごとに、電磁界強度の試算を行っている。

試算の結果、人体との一定の離隔距離が見込める場合(アクセスポイントや PC 端末等での利用)に関しては、時間率を考慮しなくとも指針値を概ね満足する結果となったが、携帯電話端末等、人体に近接して利用するシステムにおいては、時間率を考慮しない計算において、指針値を上回る結果となった。電波の人体への照射時間及び実態的な送信時間を短くする通信機能の実装を仕様とすることで、電波の人体へのばく露量を大きく低減させることが可能であると考えられ、このような機能等も考慮した上で、電波防護指針への適合性について個別に確認をすることが必要であるとしている。

一方で、今後、より人体の近傍における利用等の新たな利用ケースが拡大することや、アンテナ特性等によってはサイドローブが人体に照射される可能性についても懸念されるとして、利用ケースに応じて送信出力の低減、通信機能、送信時間を考慮する等、電波防護指針に適合するために必要な措置を講じていくことが必要であるとしている。

WiGig に基づく「60GHz 帯超高速スループットワイヤレス LAN システム」について規定した ARIB STD-T117 規格(2016 年 9 月策定)においては、人体への安全性を確保するための無線設備の機能及び構造について、製品開発にあたってのガイドラインが示されている。

表 3.3-9 製品開発にあたってのガイドライン

人体への安全性を確保するための無線設備の機能及び構造
以下の（ア）と（イ）を満足すること
（ア） 製品は想定される利用形態において電波防護指針の値を満足すること。
（イ） 製品が人体に近接した状態で使用される場合は、人体の方向への電磁界放射を速やかに避ける機能または構造を有することで人体への安全性を確保すること。 具体的には次のような機能・構造、またはこれに相当する機能・構造を有すること。
1) 人体頭部に近接して音声通話を行う時は、60GHz 帯の送信を停止する
2) アンテナパターンや送信出力を制御し、人体に近接して利用する場合に人体に向けた電波の放射を制限する。なお人体による遮蔽で 60GHz 帯の通信リンクの減衰が多い場合には、遮蔽物をさけた別方向のビーム形成を行い、60GHz での通信の継続が困難な場合は、電波の放射を停止、もしくは 2.4GHz 帯または 5GHz 帯の無線 LAN へ強制的に切り替える機能を有する。
3) アンテナパターンおよび端末の筐体による電波の減衰特性を用いて人体に近接する方向への電波の放射を制限する。

出所) ARIB STD-T117 小電力データ通信システム/60 GHz 帯超高速スループットワイヤレス LAN システム

### 3.3.2.3.2. 適合性評価方法への対応

3.3.2.2.2. で述べたとおり、人体に近接して利用されるミリ波帯通信デバイスの電波防護指針への適合性評価方法については、国際的にも検討段階にあり、IEC でも検討が進められている。WiGig に関しては既に製品が市場に出ているが、標準的な評価方法に関する蓄積が多くないため、現状は、各機器個別のばく露条件に基づき、ケース・バイ・ケースで測定とシミュレーションを組み合わせた評価が行われている状況である<sup>(17)</sup>。

FCC の機器認証を統括する OET は、WiGig デバイスに関して、シミュレーションにおけるデバイス（アンテナ）のモデル化の難しさや膨大な計算量、極近傍界における複雑な電磁界特性を正確に計測できる測定技術等の課題を指摘している。WiGig 機器のユースケースによってはアンテナアレイと人体の距離が近傍界となる場合があるが、当該周波数帯において近傍界の電力密度測定法は現時点では標準化されておらず、アンテナアレイ送信機を含めた電磁界シミュレーションを用いて近傍界の電力密度を推定するという方法を適用している。

今後スマートフォン等への WiGig 搭載が進んだ場合には、今までと異なる利用形態が出てくるようになるため、その際は当該システムの適合性評価方法への対応を検討する必要がある。



### 3.3.2.4. 車載レーダへの対応

表 3.3-10 に示すように、現在実用化されているミリ波帯を使用する車載レーダは、電波防護指針や米国 FCC ガイドラインに適合するものと考えられる。

表 3.3-10 自動車のミリ波レーダの電波防護指針・FCC ガイドラインへの適合について

	側方ミリ波レーダ	前方レーダ
周波数	24.05-24.25GHz	76-77GHz
空中線電力	10dBm 以下	10dBm 以下
等価等方輻射電力	20dBm (E.I.R.P) 以下	規定なし
空中線利得	20dBi 以下	40dBi 以下
占有周波数帯域	200MHz 以下	1GHz 以下
空中線電力の許容編差	±50%	上限+50% 下限-70%
周波数の許容編差	24.05-24.25GHz	指定周波数帯
電波防護指針への適合の考え方 61.4 V/m (1mW/cm <sup>2</sup> ) 以下 補助指針 (10 cm以上の距離) 体表 10mW/cm <sup>2</sup> 眼球 2mW/cm <sup>2</sup>	離隔距離 10cm において 2mW/cm <sup>2</sup> 以下であり、補 助指針を満足	離隔距離 10cm において 1mW/cm <sup>2</sup> 以下であり、電 磁界強度指針、補助指針 ともに満足
FCC への適合 電力密度限度値 1mW/cm <sup>2</sup> 等	FCC 47 1.1307b, 2.1091 (b) 20cm、1 mW/cm <sup>2</sup> に適合	FCC 47 1.1307b, 2.1091 (b) 20cm、1 mW/cm <sup>2</sup> に適合
車両搭載位置及び照射方向	リヤバンパ内に搭載 照射方向は車両の後側方 に照射	フロント エンブレム裏、 バンパ内など 照射方向は車両前方/前 側方/後方

出所) 総務省先進的な無線システムに関するワーキンググループ (第 5 回) トヨタ自動車資料に基づき作成

また、79GHz レーダに関しては、「79GHz 帯高分解能レーダの技術的条件」(平成 24 年 4 月情報通信審議会答申)の策定にあたり、電波防護指針の基準値に照らした適合性について検討がなされている。この結果、電磁界強度指針(一般環境)の基準値を超える送信空中線からの距離を算出した場合、

表 3.3-11 に示すように、7cm~13cm となる結果が得られている。車載レーダシステムの利用シーンは主に走行中の車両での利用となるため、電波発射中にこれらの距離以内に 6 分間以上人が立ち入ることは極めて稀であるとされている。

表 3.3-11 電波防護指針を満たす必要離隔距離

前提条件：		
79GHz 帯高分解能レーダの諸元		
・ 送信装置の空中線電力：10mW		
・ 送信空中線の最大輻射方向における絶対利得：35dBi		
電波の強度の算出式		
・ 無線設備から発射される電波の強度の算出方法及び測定方法（告示 平成 11 年 4 月 27 日第 300 号）より引用		
①	全ての反射を考慮しない場合	7cm
②	大地面の反射を考慮する場合	11cm
③	水面等大地面以外の反射を考慮する場合	13cm

出所) 79GHz 帯高分解能レーダの技術的条件 (平成 24 年 4 月情報通信審議会答申)

なお、上記は走行中の車両を想定した検討であるが、79GHz 帯高分解能レーダについては、将来的に一般道における歩行者や自転車等の検知への応用（車両及び路側機）が期待されており、高速走行時のみならず、低速走行時や停車時の車両、さらに路側機から電波が発射される利用シーンにおける、人体へのばく露を想定した検討を別途行っていく必要がある。

### 3.3.2.5. その他（ウェアラブル端末等）への対応

電波利用の拡大に伴い、従来想定されていなかった形態で電波が利用されるようになってきている。例えば、人体に装着した形で使うウェアラブル端末や VR 端末においても無線機能を有するものについては、電磁界ばく露制限に関する対応を検討する必要がある。

2017 年 5 月の「LTE-Advanced 等の高度化に関する技術的条件」に関する一部答申<sup>(172)</sup>においては、IoT 向け無線通信システム eMTC (enhanced Machine Type Communication) 及び NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) の技術仕様に関する検討が行われたが、eMTC 及び NB-IoT の移動局については、ウェアラブル端末や医療ヘルスケア端末など人体近傍（通常の使用状態で人体との距離が 20cm 以内）で利用されるユースケースが想定されていることから、これまで同様、SAR の許容値の規定を適用することが不合理であるものとして総務大臣が別に告示する無線設備<sup>(173)</sup>を除き、SAR の審査が必要となる無線設備とすることが適当であるとしている。

### 3.4. 今後の研究課題

ワーキンググループでの議論および国際動向を踏まえ、今後の研究課題について検討をおこなった。主として医学・生物学的研究および工学的研究分野について大別した。それらの想定される課題名を表 3.4-1 にまとめた。医学生物学的研究については研究の現状 (3.1. 参照) で示した周波数帯による分類を行った (表 3.4-2)。

医学・生物学的研究に関しては、細胞実験、動物実験、疫学研究、ヒト実験の4つの研究手法に分類できるため、それぞれの研究課題がどの手法に該当するのかも併記した。全体を俯瞰すると、①非熱的・非刺激的影響も含めてリスク評価にかかわる研究、②電波防護指針の根拠となる熱作用・刺激作用の反応・影響閾値を求める等の検討を行い、研究の結果によっては電波防護指針の改定にかかわる研究、③その双方にかかわる研究に分別できた。

高周波領域については、従前から多くの総務省委託研究が実施されてきており多くの知見が集積しつつあるが、引き続き、電波のばく露を受ける際の人々の年齢や物理環境 (温度・湿度等) の多様性を考慮した研究 (表 3.4-1 の整理番号 6,7) やエピジェネティックな変化の検索 (表 3.4-1 の整理番号 8) の情報を収集しデータを補完していくことが重要である。

中間周波数帯においては、研究動向 (3.1. 参照) にも述べたとおり、リスク評価に資する十分なエビデンスがなお不足しており、今後も海外の動向を注視しつつ研究を展開していく必要がある。中間周波数帯では神経刺激作用が優位な周波数も含むため、神経への影響を明確にし、電波防護指針へ反映するための基礎データとなる研究 (表 3.4-1 の整理番号 1,4,5) について検討が求められる。また、刺激作用以外の非熱的影響についても、十分に調査が必要である (整理番号 3)。

超高周波数帯については、5G システムなど次世代の先進的な無線システムで利用される見込みであり、今後公衆のばく露が増大する周波数帯であるが、安全性に関する科学的根拠が必ずしも十分でない。そのため、電波防護指針の根拠の信頼性向上に資する研究 (表 3.4-1 の整理番号 9,11,13 等) が重要であるとともに、併せてリスク評価に必要な研究 (表 3.4-1 の整理番号 15,16) も必要である。

超高周波数帯におけるもう一つの課題として、ICNIRP は、電波領域 (300 GHz 以下) と光放射領域 (300 GHz 以上) にガイドラインを有しており、両ガイドラインに相違が存在していることが挙げられる (3.2.2 参照)。したがって、電波領域と光領域の境界におけるガイドラインの相違を考慮し、超高周波数帯における電波防護指針を検討することが望ましい (表 3.4-1 の整理番号 16)。

具体的な課題名には記載がないが、3.1. の研究動向の分析によると、現在、諸外国においてリプロダクティブヘルスに関連する疫学研究、神経変性疾患に対する電波ばく露の影響に関する研究が多く報告されている。しかしながら、これらの研究については研究の質が決して高いとはいえない状況である。また神経変性疾患に関しては、WHO research agenda for radiofrequency fields (2010) において、動物実験領域で High priority research needs として、また疫学領域で other research needs として挙げられていることも勘案すると緊急性の高い研

究課題であるといえる。

医学・生物学的研究の実施において、ばく露条件等の詳細な情報はその研究の科学的価値を判断するための条件として挙げられている(3.1.1. 参照)。従って、我が国において実施する研究の質を確保する上で、工学分野の研究課題についても精査する必要がある。特に、多くの研究提案が挙げられたヒトボランティア研究、そして研究報告数が少なく、なおかつ科学的価値の優れた研究報告が限定的である疫学研究について、これらの研究への波及を想定した工学分野での研究課題として、ばく露評価技術に関する課題が挙げられる(表 3.4-1 の整理番号 17, 18, 20)。例えば、個人の限定的な身体情報から内部組織構造を推定する数値人体モデルの開発、パルス電磁界からのばく露量評価技術の開発、そして新しい電波利用技術の普及によって変化する電波環境を調査するための評価技術の構築、などが挙げられる。これらの研究成果は我が国で実施する研究の科学的価値を確保すると共に、WHO のリスク評価や正確な国際ガイドラインの策定等への貢献が期待される。

更に、工学分野での研究課題として、中間周波帯から高周波帯を利用する無線電力伝送システム(3.3.2.1. 参照)や超高周波帯を利用する5Gシステム(3.3.2.2. 参照)および60GHz帯無線システム(3.3.2.3. 参照)等の新しい電波利用技術への適合性評価に関する課題が挙げられる(表 3.4-1 の整理番号 19, 21)。

しかしながら、研究課題は多岐にわたり、また課題数も多いことから、国内外の研究動向を引き続き注視し、優先順位、実施時期、国際的連携など多角的要素を考慮した上で、ロードマップの作成を検討していく必要がある。

表 3.4-1 今後の研究課題ニーズの一覧

中 間 周 波	高 周 波	超 高 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	ヒト実験	③
○	○	○	2. パルス電磁界ばく露に対する生体影響調査研究	動物・ヒト実験	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. 中間周波不均一ばく露の刺激閾値および行動に与える影響の調査	ヒト実験	①
○	○	○	6. 高周波・超高周波複合全身ばく露に関する年齢および環境に対する閾値変動の調査	ヒト実験	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・ヒト実験	②
○			8. 高周波ばく露によるエピ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	ヒト実験	①
○			10. 身の回りの電波環境による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数帯電磁界の急性影響探索	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電波人体局所ばく露に関する年齢および環境湿度に対する閾値変動の調査	ヒト実験	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. テラヘルツ波帯ばく露による生体への非熱作用に関する調査	細胞・ヒト実験	①
○	○	○	17. 個人ばく露評価用次世代数値人体モデル開発	工学	工学
○	○	○	18. パルス電磁界ばく露に対する生体影響評価技術	工学	工学
○	○		19. マイクロ波帯を利用する無線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リスク評価にかかわるもの ②ガイドライン改定にかかわるもの ③その他 (①と②の双方) に分類  
 出所) 先進的な無線システムに関するワーキンググループ (第8回) 名工大資料

表 3.4-2 今後の研究課題ニーズの周波数帯別、研究デザイン別の分類 (重複あり)

	細胞実験	動物実験	ヒト実験研究	疫学研究
中間周波	2	3	4	1
高周波	1	2	6	2
超高周波	3	4	5	3

出所) 先進的な無線システムに関するワーキンググループ (第8回) 名工大資料

## 文献

1. 総務省「生体電磁環境に関する検討会 第一次報告書」(2015年)
2. 2015:19 Recent Research on EMF and Health Risk, Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Swedish Radiation Safety Authority; 2015 2016-05-19. Contract No.: 2015:19.
3. 2016:15 Recent Research on EMF and Health Risk, Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Swedish Radiation Safety Authority; 2016 2016-05-19. Contract No.: 2016:15.
4. Simko M, Remondini D, Zeni O, Scarfi MR. Quality Matters: Systematic Analysis of Endpoints Related to "Cellular Life" in Vitro Data of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure. *Int J Environ Res Public Health*. 2016;13(7).
5. Vijayalaxmi. Biological and health effects of radiofrequency fields: Good study design and quality publications. *Mutat Res*. 2016;810:6-12.
6. Shi D, Zhu C, Lu R, Mao S, Qi Y. Intermediate frequency magnetic field generated by a wireless power transmission device does not cause genotoxicity in vitro. *Bioelectromagnetics*. 2014;35(7):512-8.
7. Koyama S, Narita E, Shinohara N, Miyakoshi J. Effect of an intermediate-frequency magnetic field of 23 kHz at 2 mT on chemotaxis and phagocytosis in neutrophil-like differentiated human HL-60 cells. *Int J Environ Res Public Health*. 2014;11(9):9649-59.
8. Sakurai T, Narita E, Shinohara N, Miyakoshi J. Intermediate frequency magnetic field at 23 kHz does not modify gene expression in human fetus-derived astroglia cells. *Bioelectromagnetics*. 2012;33(8):662-9.
9. Miyakoshi J, Horiuchi E, Nakahara T, Sakurai T. Magnetic fields generated by an induction heating (IH) cook top do not cause genotoxicity in vitro. *Bioelectromagnetics*. 2007;28(7):529-37.
10. Yadegari-Dehkordi S, Sadeghi HR, Attaran-Kakhki N, Shokouhi M, Sazgarnia A. Silver nanoparticles increase cytotoxicity induced by intermediate frequency low voltages. *Electromagn Biol Med*. 2015;34(4):317-21.
11. Win-Shwe TT, Ohtani S, Ushiyama A, Fujimaki H, Kunugita N. Can intermediate-frequency magnetic fields affect memory function-related gene expressions in hippocampus of C57BL/6J mice? *J Toxicol Sci*. 2013;38(2):169-76.
12. Win-Shwe TT, Ohtani S, Ushiyama A, Kunugita N. Early exposure to intermediate-frequency magnetic fields alters brain biomarkers without histopathological changes in adult mice. *Int J Environ Res Public Health*. 2015;12(4):4406-21.
13. Ushiyama A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C. Effects of 21-kHz intermediate frequency magnetic fields on blood properties and immune systems of juvenile rats. *Int J Radiat Biol*. 2014;90(12):1211-7.
14. Nishimura I, Oshima A, Shibuya K, Mitani T, Negishi T. Acute and subchronic toxicity of 20 kHz and 60 kHz magnetic fields in rats. *J Appl Toxicol*. 2016;36(2):199-210.
15. Wang C, Wang X, Zhou H, Dong G, Guan X, Wang L, et al. Effects of pulsed 2.856 GHz microwave exposure on BM-MSCs isolated from C57BL/6 mice. *PLoS One*. 2015;10(2):e0117550.
16. Zuo H, Lin T, Wang D, Peng R, Wang S, Gao Y, et al. RKIP Regulates Neural Cell Apoptosis Induced by Exposure to Microwave Radiation Partly Through the MEK/ERK/CREB Pathway. *Mol Neurobiol*. 2015;51(3):1520-9.
17. Xing F, Zhan Q, He Y, Cui J, He S, Wang G. 1800MHz Microwave Induces p53 and p53-Mediated Caspase-3 Activation Leading to Cell Apoptosis In Vitro. *PLoS One*. 2016;11(9):e0163935.
18. Canseven AG, Esmekaya MA, Kayhan H, Tuysuz MZ, Seyhan N. Effects of microwave exposure and Gemcitabine treatment on apoptotic activity in Burkitt's lymphoma (Raji) cells. *Electromagn Biol Med*. 2015;34(4):322-6.
19. Hou Q, Wang M, Wu S, Ma X, An G, Liu H, et al. Oxidative changes and apoptosis induced by 1800-MHz electromagnetic radiation in NIH/3T3 cells. *Electromagn Biol Med*. 2015;34(1):85-92.
20. Al-Serori H, Kundi M, Ferk F, Misik M, Nersesyan A, Murbach M, et al. Evaluation of the potential of mobile phone specific electromagnetic fields (UMTS) to produce micronuclei in human glioblastoma cell lines. *Toxicol In Vitro*. 2017;40:264-71.

21. Cig B, Naziroglu M. Investigation of the effects of distance from sources on apoptosis, oxidative stress and cytosolic calcium accumulation via TRPV1 channels induced by mobile phones and Wi-Fi in breast cancer cells. *Biochimica et biophysica acta*. 2015.
22. Sefidbakht Y, Moosavi-Movahedi AA, Hosseinkhani S, Khodaghali F, Torkzadeh-Mahani M, Foolad F, et al. Effects of 940 MHz EMF on bioluminescence and oxidative response of stable luciferase producing HEK cells. *Photochem Photobiol Sci*. 2014;13(7):1082-92.
23. Kazemi E, Mortazavi SM, Ali-Ghanbari A, Sharifzadeh S, Ranjbaran R, Mostafavi-Pour Z, et al. Effect of 900 MHz Electromagnetic Radiation on the Induction of ROS in Human Peripheral Blood Mononuclear Cells. *J Biomed Phys Eng*. 2015;5(3):105-14.
24. Sun Y, Zong L, Gao Z, Zhu S, Tong J, Cao Y. Mitochondrial DNA damage and oxidative damage in HL-60 cells exposed to 900MHz radiofrequency fields. *Mutat Res*. 2017;797-799:7-14.
25. Wang X, Liu C, Ma Q, Feng W, Yang L, Lu Y, et al. 8-oxoG DNA glycosylase-1 inhibition sensitizes Neuro-2a cells to oxidative DNA base damage induced by 900 MHz radiofrequency electromagnetic radiation. *Cell Physiol Biochem*. 2015;37(3):1075-88.
26. Kang KA, Lee HC, Lee JJ, Hong MN, Park MJ, Lee YS, et al. Effects of combined radiofrequency radiation exposure on levels of reactive oxygen species in neuronal cells. *J Radiat Res*. 2014;55(2):265-76.
27. Kayhan H, Esmekaya MA, Saglam AS, Tuysuz MZ, Canseven AG, Yagci AM, et al. Does MW Radiation Affect Gene Expression, Apoptotic Level, and Cell Cycle Progression of Human SH-SY5Y Neuroblastoma Cells? *Cell Biochem Biophys*. 2016;74(2):99-107.
28. Duan W, Liu C, Zhang L, He M, Xu S, Chen C, et al. Comparison of the genotoxic effects induced by 50 Hz extremely low-frequency electromagnetic fields and 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in GC-2 cells. *Radiat Res*. 2015;183(3):305-14.
29. Sun C, Wei X, Fei Y, Su L, Zhao X, Chen G, et al. Mobile phone signal exposure triggers a hormesis-like effect in *Atm*<sup>+/+</sup> and *Atm*<sup>-/-</sup> mouse embryonic fibroblasts. *Sci Rep*. 2016;6:37423.
30. Glaser K, Rohland M, Kleine-Ostmann T, Schrader T, Stopper H, Hintzsche H. Effect of Radiofrequency Radiation on Human Hematopoietic Stem Cells. *Radiat Res*. 2016;186:455-65.
31. Mizuno K, Shinohara N, Miyakoshi J. In Vitro Evaluation of Genotoxic Effects under Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer. *Int J Environ Res Public Health*. 2015;12(4):3853-63.
32. Danese E, Lippi G, Buonocore R, Benati M, Bovo C, Bonaguri C, et al. Mobile phone radiofrequency exposure has no effect on DNA double strand breaks (DSB) in human lymphocytes. *Ann Transl Med*. 2017;5(13):272.
33. Su L, Wei X, Xu Z, Chen G. RF-EMF exposure at 1800 MHz did not elicit DNA damage or abnormal cellular behaviors in different neurogenic cells. *Bioelectromagnetics*. 2017;38:175-85.
34. Valbonesi P, Franzellitti S, Bersani F, Contin A, Fabbri E. Effects of the exposure to intermittent 1.8 GHz radio frequency electromagnetic fields on HSP70 expression and MAPK signaling pathways in PC12 cells. *Int J Radiat Biol*. 2014;90(5):382-91.
35. Valbonesi P, Franzellitti S, Bersani F, Contin A, Fabbri E. Activity and expression of acetylcholinesterase in PC12 cells exposed to intermittent 1.8 GHz 217-GSM mobile phone signal. *Int J Radiat Biol*. 2015:1-10.
36. Lu Y, He M, Zhang Y, Xu S, Zhang L, He Y, et al. Differential pro-inflammatory responses of astrocytes and microglia involve STAT3 activation in response to 1800 MHz radiofrequency fields. *PLoS One*. 2014;9(9):e108318.
37. Kuzniar A, Laffeber C, Eppink B, Bezstarosti K, Dekkers D, Woelders H, et al. Semi-quantitative proteomics of mammalian cells upon short-term exposure to non-ionizing electromagnetic fields. *PLoS One*. 2017;12(2):e0170762.
38. Eghlidospour M, Ghanbari A, Mortazavi SMJ, Azari H. Effects of radiofrequency exposure emitted from a GSM mobile phone on proliferation, differentiation, and apoptosis of neural stem cells. *Anat Cell Biol*. 2017;50(2):115-23.



39. Chen C, Ma Q, Liu C, Deng P, Zhu G, Zhang L, et al. Exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation impairs neurite outgrowth of embryonic neural stem cells. *Sci Rep.* 2014;4:5103.
40. Ozgur E, Guler G, Kismali G, Seyhan N. Mobile phone radiation alters proliferation of hepatocarcinoma cells. *Cell Biochem Biophys.* 2014;70(2):983-91.
41. Liu K, Zhang G, Wang Z, Liu Y, Dong J, Dong X, et al. The protective effect of autophagy on mouse spermatocyte derived cells exposure to 1800MHz radiofrequency electromagnetic radiation. *Toxicol Lett.* 2014;228(3):216-24.
42. Sannino A, Zeni O, Romeo S, Massa R, Gialanella G, Grossi G, et al. Adaptive response in human blood lymphocytes exposed to non-ionizing radiofrequency fields: resistance to ionizing radiation-induced damage. *J Radiat Res.* 2014;55(2):210-7.
43. He Q, Zong L, Sun Y, Vijayalaxmi, Prihoda TJ, Tong J, et al. Adaptive response in mouse bone marrow stromal cells exposed to 900MHz radiofrequency fields: Impact of poly (ADP-ribose) polymerase (PARP). *Mutat Res.* 2017;820:19-25.
44. Deshmukh PS, Nasare N, Megha K, Banerjee BD, Ahmed RS, Singh D, et al. Cognitive impairment and neurogenotoxic effects in rats exposed to low-intensity microwave radiation. *Int J Toxicol.* 2015;34(3):284-90.
45. Tang J, Zhang Y, Yang L, Chen Q, Tan L, Zuo S, et al. Exposure to 900 MHz electromagnetic fields activates the mcp-1/ERK pathway and causes blood-brain barrier damage and cognitive impairment in rats. *Brain Res.* 2015;1601:92-101.
46. Zhang Y, Li Z, Gao Y, Zhang C. Effects of fetal microwave radiation exposure on offspring behavior in mice. *J Radiat Res.* 2015;56(2):261-8.
47. Masuda H, Hirota S, Ushiyama A, Hirata A, Arima T, Kawai H, et al. No Dynamic Changes in Blood-brain Barrier Permeability Occur in Developing Rats During Local Cortex Exposure to Microwaves. *In Vivo.* 2015;29(3):351-7.
48. Masuda H, Hirota S, Ushiyama A, Hirata A, Arima T, Kawai H, et al. No Dynamic Changes in Inflammation-related Microcirculatory Parameters in Developing Rats During Local Cortex Exposure to Microwaves. *In Vivo.* 2015;29(5):561-7.
49. Jeong YJ, Kang GY, Kwon JH, Choi HD, Pack JK, Kim N, et al. 1950 MHz Electromagnetic Fields Ameliorate Abeta Pathology in Alzheimer's Disease Mice. *Curr Alzheimer Res.* 2015;12(5):481-92.
50. Sahin A, Aslan A, Bas O, İkinci A, Ozyilmaz C, Sonmez OF, et al. Deleterious impacts of a 900-MHz electromagnetic field on hippocampal pyramidal neurons of 8-week-old Sprague Dawley male rats. *Brain Res.* 2015;1624:232-8.
51. Sahin D, Ozgur E, Guler G, Tomruk A, Unlu I, Sepici-Dincel A, et al. The 2100 MHz radiofrequency radiation of a 3G-mobile phone and the DNA oxidative damage in brain. *J Chem Neuroanat.* 2016;75:94-8.
52. Dasdag S, Akdag MZ, Erdal ME, Erdal N, Ay OI, Ay ME, et al. Effects of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on microRNA expression in brain tissue. *Int J Radiat Biol.* 2015;91(7):555-61.
53. Dasdag S, Akdag MZ, Erdal ME, Erdal N, Ay OI, Ay ME, et al. Long term and excessive use of 900 MHz radiofrequency radiation alter microRNA expression in brain. *Int J Radiat Biol.* 2015;91(4):306-11.
54. Wang K, Lu JM, Xing ZH, Zhao QR, Hu LQ, Xue L, et al. Effect of 1.8 GHz radiofrequency electromagnetic radiation on novel object associative recognition memory in mice. *Sci Rep.* 2017;7:44521.
55. Furelos AL, Vidal JM, Sanchez AA, Pena FJ, Martin ME. Evidence of cellular stress and caspase-3 resulting from a combined two-frequency signal in the cerebrum and cerebellum of Sprague-Dawley rats. *Oncotarget.* 2016;7(40):64674-.
56. Cao H, Qin F, Liu X, Wang J, Cao Y, Tong J, et al. Circadian rhythmicity of antioxidant markers in rats exposed to 1.8 GHz radiofrequency fields. *Int J Environ Res Public Health.* 2015;12(2):2071-87.
57. Zong C, Ji Y, He Q, Zhu S, Qin F, Tong J, et al. Adaptive response in mice exposed to 900 MHz radiofrequency fields: bleomycin-induced DNA and oxidative damage/repair. *Int J Radiat Biol.* 2015;91(3):270-6.
58. Boder P, Stankiewicz W, Antkowiak B, Paluch M, Kieliszek J, Sobiech J, et al. Influence of electromagnetic

- field (1800 MHz) on lipid peroxidation in brain, blood, liver and kidney in rats. *Int J Occup Med Environ Health*. 2015;28(4):751-9.
59. Lerchl A, Klose M, Grote K, Wilhelm AF, Spathmann O, Fiedler T, et al. Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. *Biochem Biophys Res Commun*. 2015;459(4):585-90.
  60. Tillmann T, Ernst H, Streckert J, Zhou Y, Taugner F, Hansen V, et al. Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model. *Int J Radiat Biol*. 2010;86(7):529-41.
  61. Wyde M, Cesta M, Blystone C, Elmore S, Foster P, Hooth M, et al. Report of Partial findings from the National Toxicology Program Carcinogenesis Studies of Cell Phone Radiofrequency Radiation in Hsd: Sprague Dawley® SD rats (Whole Body Exposure). *bioRxiv*. 2016. Available at <https://www.biorxiv.org/content/early/2016/05/26/055699> (2018/01/06 accessed)
  62. Odaci E, Ozyilmaz C. Exposure to a 900 MHz electromagnetic field for 1 hour a day over 30 days does change the histopathology and biochemistry of the rat testis. *Int J Radiat Biol*. 2015;91(7):547-54.
  63. Suzuki S, Okutsu M, Suganuma R, Komiya H, Nakatani-Enomoto S, Kobayashi S, et al. Influence of radiofrequency-electromagnetic waves from 3rd-generation cellular phones on fertilization and embryo development in mice. *Bioelectromagnetics*. 2017;38(6):466-73.
  64. Sepehrimanesh M, Kazemipour N, Saeb M, Nazifi S, Davis DL. Proteomic analysis of continuous 900-MHz radiofrequency electromagnetic field exposure in testicular tissue: a rat model of human cell phone exposure. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2017;24(15):13666-73.
  65. Kuzay D, Ozer C, Sirav B, Canseven AG, Seyhan N. Oxidative effects of extremely low frequency magnetic field and radio frequency radiation on testes tissues of diabetic and healthy rats. *Bratisl Lek Listy*. 2017;118(5):278-82.
  66. Ohtani S, Ushiyama A, Maeda M, Ogasawara Y, Wang J, Kunugita N, et al. The effects of radio-frequency electromagnetic fields on T cell function during development. *J Radiat Res*. 2015;56(3):467-74.
  67. Lustenberger C, Murbach M, Tushaus L, Wehrle F, Kuster N, Achermann P, et al. Inter-individual and intra-individual variation of the effects of pulsed RF EMF exposure on the human sleep EEG. *Bioelectromagnetics*. 2015;36(3):169-77.
  68. Ghosn R, Yahia-Cherif L, Hugueville L, Ducorps A, Lemarechal JD, Thuroczy G, et al. Radiofrequency signal affects alpha band in resting electroencephalogram. *J Neurophysiol*. 2015;113(7):2753-9.
  69. Eggert T, Dorn H, Sauter C, Marasanov A, Hansen ML, Peter A, et al. Terrestrial Trunked Radio (TETRA) exposure and its impact on slow cortical potentials. *Environ Res*. 2015;143(Pt A):112-22.
  70. Sauter C, Eggert T, Dorn H, Schmid G, Bolz T, Marasanov A, et al. Do signals of a hand-held TETRA transmitter affect cognitive performance, well-being, mood or somatic complaints in healthy young men? Results of a randomized double-blind cross-over provocation study. *Environ Res*. 2015;140:85-94.
  71. Malek F, Rani KA, Rahim HA, Omar MH. Effect of Short-Term Mobile Phone Base Station Exposure on Cognitive Performance, Body Temperature, Heart Rate and Blood Pressure of Malaysians. *Sci Rep*. 2015;5:13206.
  72. Andrianome S, Hugueville L, de Seze R, Selmaoui B. Increasing levels of saliva alpha amylase in electrohypersensitive (EHS) patients. *Int J Radiat Biol*. 2017;93(8):841-8.
  73. Andrianome S, Hugueville L, de Seze R, Hanot-Roy M, Blazy K, Gamez C, et al. Disturbed sleep in individuals with Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF): Melatonin assessment as a biological marker. *Bioelectromagnetics*. 2016;37:175-182.
  74. van Moorselaar I, Slottje P, Heller P, van Strien R, Kromhout H, Murbach M, et al. Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility - A double-blind randomised controlled trial. *Environ Int*. 2017;99:255-62.
  75. Andrianome S, Gobert J, Hugueville L, Stephan-Blanchard E, Telliez F, Selmaoui B. An assessment of the

- autonomic nervous system in the electrohypersensitive population: a heart rate variability and skin conductance study. *J Appl Physiol* (1985). 2017;jap 00229 2017.
76. Lewis RC, Minguez-Alarcon L, Meeker JD, Williams PL, Mezei G, Ford JB, et al. Self-reported mobile phone use and semen parameters among men from a fertility clinic. *Reprod Toxicol*. 2016;67:42-7.
  77. Nakatani-Enomoto S, Okutsu M, Suzuki S, Suganuma R, Groiss SJ, Kadowaki S, et al. Effects of 1950 MHz W-CDMA-like signal on human spermatozoa. *Bioelectromagnetics*. 2016;37(6):373-81.
  78. Soderqvist F, Carlberg M, Hardell L. Biomarkers in volunteers exposed to mobile phone radiation. *Toxicol Lett*. 2015;235(2):140-6.
  79. Coureau G, Bouvier G, Lebailly P, Fabbro-Peray P, Gruber A, Leffondre K, et al. Mobile phone use and brain tumours in the CERENAT case-control study. *Occupational and environmental medicine*. 2014;71(7):514-22.
  80. Moon IS, Kim BG, Kim J, Lee JD, Lee WS. Association between vestibular schwannomas and mobile phone use. *Tumour Biol*. 2014;35(1):581-7.
  81. Pettersson D, Mathiesen T, Prochazka M, Bergenheim T, Florentzson R, Harder H, et al. Long-term mobile phone use and acoustic neuroma risk. *Epidemiology*. 2014;25(2):233-41.
  82. Group IS. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Int J Epidemiol*. 2010;39(3):675-94.
  83. Group IS. Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Cancer Epidemiol*. 2011;35(5):453-64.
  84. Momoli F, Siemiatycki J, McBride ML, Parent ME, Richardson L, Bedard D, et al. Probabilistic multiple-bias modelling applied to the Canadian data from the INTERPHONE study of mobile phone use and risk of glioma, meningioma, acoustic neuroma, and parotid gland tumors. *Am J Epidemiol*. 2017; 186(7):885-893.
  85. Grell K, Frederiksen K, Schüz J, Cardis E, Armstrong B, Siemiatycki J, et al. The Intracranial Distribution of Gliomas in Relation to Exposure From Mobile Phones: Analyses From the INTERPHONE Study. *Am J Epidemiol*. 2016;184(11):818-28.
  86. Lagorio S, Roosli M. Mobile phone use and risk of intracranial tumors: a consistency analysis. *Bioelectromagnetics*. 2014;35(2):79-90.
  87. Leitgeb N. Synoptic Analysis of Epidemiologic Evidence of Brain Cancer Risks from Mobile Communication. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 2014;6(14):413-24.
  88. Hardell L, Carlberg M. Increasing rates of brain tumours in the Swedish national inpatient register and the causes of death register. *Int J Environ Res Public Health*. 2015;12(4):3793-813.
  89. Grell K, Diggle PJ, Frederiksen K, Schuz J, Cardis E, Andersen PK. A three-dimensional point process model for the spatial distribution of disease occurrence in relation to an exposure source. *Stat Med*. 2015;34(23):3170-80.
  90. Carlberg M, Hardell L. Decreased survival of glioma patients with astrocytoma grade IV (glioblastoma multiforme) associated with long-term use of mobile and cordless phones. *Int J Environ Res Public Health*. 2014;11(10):10790-805.
  91. Sato Y, Kiyohara K, Kojimahara N, Yamaguchi N. Time trend in incidence of malignant neoplasms of the central nervous system in relation to mobile phone use among young people in Japan. *Bioelectromagnetics*. 2016;37(5):282-9.
  92. Chapman S, Azizi L, Luo Q, Sitas F. Has the incidence of brain cancer risen in Australia since the introduction of mobile phones 29 years ago? *Cancer Epidemiol*. 2016;42:199-205.
  93. de Vocht F. Inferring the 1985-2014 impact of mobile phone use on selected brain cancer subtypes using Bayesian structural time series and synthetic controls. *Environ Int*. 2016;97:100-7.
  94. Hauri DD, Spycher B, Huss A, Zimmermann F, Grotzer M, Von der Weid N, et al. Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields From Broadcast Transmitters and Risk of Childhood Cancer: A Census-based Cohort Study. *Am J Epidemiol*. 2014;179(7):843-51.
  95. Ha M, Im H, Lee M, Kim HJ, Kim BC, Gimm YM, et al. Radio-frequency radiation exposure from AM radio

- transmitters and childhood leukemia and brain cancer. *Am J Epidemiol.* 2007;166(3):270-9.
96. Merzenich H, Schmiedel S, Bennack S, Bruggemeyer H, Philipp J, Blettner M, et al. Childhood leukemia in relation to radio frequency electromagnetic fields in the vicinity of TV and radio broadcast transmitters. *Am J Epidemiol.* 2008;168(10):1169-78.
  97. Leng L, Zhang Y. Etiology of Pituitary Tumors: A Case Control Study. *Turk Neurosurg.* 2016;26(2):195-9.
  98. Shrestha M, Raitanen J, Salminen T, Lahkola A, Auvinen A. Pituitary tumor risk in relation to mobile phone use: A case-control study. *Acta Oncol.* 2015;54(8):1159-65.
  99. Al-Qahtani K. Mobile Phone Use and the Risk of Parotid Gland Tumors: A Retrospective Case-Control Study. *Gulf J Oncolog.* 2016;1(20):71-8.
  100. Carlberg M, Hedendahl L, Ahonen M, Koppel T, Hardell L. Increasing incidence of thyroid cancer in the Nordic countries with main focus on Swedish data. *BMC Cancer.* 2016;16:426.
  101. Baste V, Oftedal G, Mollerlokken OJ, Mild KH, Moen BE. Prospective Study of Pregnancy Outcomes After Parental Cell Phone Exposure: The Norwegian Mother and Child Cohort Study. *Epidemiology.* 2015 ;26(4):613-21.
  102. Zhou LY, Zhang HX, Lan YL, Li Y, Liang Y, Yu L, et al. Epidemiological investigation of risk factors of the pregnant women with early spontaneous abortion in Beijing. *Chin J Integr Med.* 2017;23(5):345-9.
  103. Mahmoudabadi FS, Ziaei S, Firoozabadi M, Kazemnejad A. Use of mobile phone during pregnancy and the risk of spontaneous abortion. *J Environ Health Sci Eng.* 2015;13:34.
  104. Jurewicz J, Radwan M, Sobala W, Ligocka D, Radwan P, Bochenek M, et al. Lifestyle and semen quality: role of modifiable risk factors. *Systems biology in reproductive medicine.* 2014;60(1):43-51.
  105. Zilberlicht A, Wiener-Megnazi Z, Sheinfeld Y, Grach B, Lahav-Baratz S, Dirnfeld M. Habits of cell phone usage and sperm quality - does it warrant attention? *Reprod Biomed Online.* 2015;31(3):421-6.
  106. Zarei S, Mortazavi SM, Mehdizadeh AR, Jalalipour M, Borzou S, Taeb S, et al. A Challenging Issue in the Etiology of Speech Problems: The Effect of Maternal Exposure to Electromagnetic Fields on Speech Problems in the Offspring. *J Biomed Phys Eng.* 2015;5(3):151-4.
  107. Roser K, Schoeni A, Burgi A, Roosli M. Development of an RF-EMF Exposure Surrogate for Epidemiologic Research. *Int J Environ Res Public Health.* 2015;12(5):5634-56.
  108. Zheng F, Gao P, He M, Li M, Tan J, Chen D, et al. Association between mobile phone use and self-reported well-being in children: a questionnaire-based cross-sectional study in Chongqing, China. *BMJ Open.* 2015;5(5):e007302.
  109. Ikeda K, Nakamura K. Association between mobile phone use and depressed mood in Japanese adolescents: a cross-sectional study. *Environ Health Prev Med.* 2014;19(3):187-93.
  110. Szyjkowska A, Gadzicka E, Szymczak W, Borkiewicz A. The risk of subjective symptoms in mobile phone users in Poland--an epidemiological study. *Int J Occup Med Environ Health.* 2014;27(2):293-303.
  111. Chiu CT, Chang YH, Chen CC, Ko MC, Li CY. Mobile phone use and health symptoms in children. *J Formos Med Assoc.* 2015;114(7):598-604.
  112. Schoeni A, Roser K, Roosli M. Symptoms and the use of wireless communication devices: A prospective cohort study in Swiss adolescents. *Environ Res.* 2017;154:275-83.
  113. Schoeni A, Roser K, Roosli M. Symptoms and Cognitive Functions in Adolescents in Relation to Mobile Phone Use during Night. *PLoS One.* 2015;10(7):e0133528.
  114. Schoeni A, Roser K, Burgi A, Roosli M. Symptoms in Swiss adolescents in relation to exposure from fixed site transmitters: a prospective cohort study. *Environ Health.* 2016;15(1):77.
  115. Guxens M, Vermeulen R, van Eijsden M, Beekhuizen J, Vrijkotte TG, van Strien RT, et al. Outdoor and indoor sources of residential radiofrequency electromagnetic fields, personal cell phone and cordless phone use, and cognitive function in 5-6 years old children. *Environ Res.* 2016;150:364-74.
  116. Baliatsas C, Bolte J, Yzermans J, Kelfkens G, Hooiveld M, Lebret E, et al. Actual and perceived exposure to

- electromagnetic fields and non-specific physical symptoms: An epidemiological study based on self-reported data and electronic medical records. *Int J Hyg Environ Health*. 2015;218(3):331-44.
117. Martens AL, Slottje P, Timmermans DRM, Kromhout H, Reedijk M, Vermeulen RCH, et al. Modeled and Perceived Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields From Mobile-Phone Base Stations and the Development of Symptoms Over Time in a General Population Cohort. *Am J Epidemiol*. 2017;186(2):210-9.
  118. Lamech F. Self-reporting of symptom development from exposure to radiofrequency fields of wireless smart meters in victoria, australia: a case series. *Altern Ther Health Med*. 2014;20(6):28-39.
  119. Geronikolou SA, Chamakou A, Mantzou A, Chrousos G, KanakaGantenbein C. Frequent cellular phone use modifies hypothalamic-pituitary-adrenal axis response to a cellular phone call after mental stress in healthy children and adolescents: A pilot study. *Sci Total Environ*. 2015;536:182-8.
  120. Shrivastava A, Saxena Y. Effect of mobile usage on serum melatonin levels among medical students. *Indian J Physiol Pharmacol*. 2014;58(4):395-9.
  121. Shivashankara AR, Joy J, Sunitha V, Rai MP, Rao S, Nambranthayil S, et al. Effect of Cell Phone Use on Salivary Total Protein, Enzymes and Oxidative Stress Markers in Young Adults: A Pilot Study. *Journal of Clinical and Diagnostic Research : JCDR*. 2015;9(2):BC19-BC22.
  122. Gupta N, Goyal D, Sharma R, Arora KS. Effect of Prolonged Use of Mobile Phone on Brainstem Auditory Evoked Potentials. *J Clin Diagn Res*. 2015;9(5):CC07-9.
  123. Balakrishnan K, Murali V, Rathika C, Manikandan T, Malini RP, Kumar RA, et al. Hsp70 is an independent stress marker among frequent users of mobile phones. *J Environ Pathol Toxicol Oncol*. 2014;33(4):339-47.
  124. Gandhi G, Kaur G, Nisar U. A cross-sectional case control study on genetic damage in individuals residing in the vicinity of a mobile phone base station. *Electromagn Biol Med*. 2015;34(4):344-54.
  125. Gulati S, Yadav A, Kumar N, Kanupriya, Aggarwal NK, Kumar R, et al. Effect of GSTM1 and GSTT1 Polymorphisms on Genetic Damage in Humans Populations Exposed to Radiation From Mobile Towers. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2016;70(3):615-25.
  126. Dabouis V, Arvers P, Debouzy JC, Sebbah C, Crouzier D, Perrin A. First epidemiological study on occupational radar exposure in the French Navy: a 26-year cohort study. *Int J Environ Health Res*. 2015;26:131-44.
  127. Singh K, Nagaraj A, Yousuf A, Ganta S, Pareek S, Vishnani P. Effect of electromagnetic radiations from mobile phone base stations on general health and salivary function. *J Int Soc Prev Community Dent*. 2016;6(1):54-9.
  128. Jarideh S, Taeb S, Pishva SM, Haghani M, Sina S, Mortazavi SA, et al. Does Occupational Exposure of Shahid Dastghieb International Airport Workers to Radiofrequency Radiation Affect Their Short Term Memory and Reaction Time? *J Biomed Phys Eng*. 2015;5(3):143-50.
  129. Habauzit D, Le Quement C, Zhadobov M, Martin C, Aubry M, Sauleau R, et al. Transcriptome analysis reveals the contribution of thermal and the specific effects in cellular response to millimeter wave exposure. *PLoS One*. 2014;9(10):e109435.
  130. Haas AJ, Le Page Y, Zhadobov M, Sauleau R, Le Drean Y. Effects of 60-GHz millimeter waves on neurite outgrowth in PC12 cells using high-content screening. *Neurosci Lett*. 2016;618:58-65.
  131. Haas AJ, Le Page Y, Zhadobov M, Boriskina A, Sauleau R, Le Drean Y. Impact of 60-GHz millimeter waves on stress and pain-related protein expression in differentiating neuron-like cells. *Bioelectromagnetics*. 2016;37(7):444-54.
  132. Haas AJ, Le Page Y, Zhadobov M, Sauleau R, Drean YL, Saligaut C. Effect of acute millimeter wave exposure on dopamine metabolism of NGF-treated PC12 cells. *J Radiat Res*. 2017;58(4):439-45.
  133. Le Quement C, Nicolaz CN, Habauzit D, Zhadobov M, Sauleau R, Le Drean Y. Impact of 60-GHz millimeter waves and corresponding heat effect on endoplasmic reticulum stress sensor gene expression. *Bioelectromagnetics*. 2014;35(6):444-51.
  134. Koyama S, Narita E, Shimizu Y, Shiina T, Taki M, Shinohara N, et al. Twenty Four-Hour Exposure to a 0.12 THz Electromagnetic Field Does Not Affect the Genotoxicity, Morphological Changes, or Expression of Heat Shock

- Protein in HCE-T Cells. *Int J Environ Res Public Health*. 2016;13(8).
135. De Amicis A, Sanctis SD, Cristofaro SD, Franchini V, Lista F, Regalbuto E, et al. Biological effects of in vitro THz radiation exposure in human foetal fibroblasts. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*. 2015;793:150-60.
  136. Bogomazova AN, Vassina EM, Goryachkovskaya TN, Popik VM, Sokolov AS, Kolchanov NA, et al. No DNA damage response and negligible genome-wide transcriptional changes in human embryonic stem cells exposed to terahertz radiation. *Sci Rep*. 2015;5:7749.
  137. Sergeeva S, Demidova E, Sinitsyna O, Goryachkovskaya T, Bryanskaya A, Semenov A, et al. 2.3THz radiation: Absence of genotoxicity/mutagenicity in *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium*. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*. 2016;803-804:34-8.
  138. Demidova EV, Goryachkovskaya TN, Mescheryakova IA, Malup TK, Semenov AI, Vinokurov NA, et al. Impact of terahertz radiation on stress-sensitive genes of *E.coli* cell. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol*. 2016;6(3):435-41.
  139. Gapeyev AB, Aripovsky AV, Kulagina TP. Modifying effects of low-intensity extremely high-frequency electromagnetic radiation on content and composition of fatty acids in thymus of mice exposed to X-rays. *Int J Radiat Biol*. 2015;91(3):277-85.
  140. Jauchem JR, Ryan KL, Walters TJ. Pathophysiological alterations induced by sustained 35-GHz radio-frequency energy heating. *J Basic Clin Physiol Pharmacol*. 2016;27(1):79-89.
  141. Sivachenko IB, Medvedev DS, Molodtsova ID, Panteleev SS, Sokolov AY, Lyubashina OA. Effects of Millimeter-Wave Electromagnetic Radiation on the Experimental Model of Migraine. *Bull Exp Biol Med*. 2016;160(4):425-8.
  142. Hwang Y, Ahn J, Mun J, Bae S, Jeong YU, Vinokurov NA, et al. In vivo analysis of THz wave irradiation induced acute inflammatory response in skin by laser-scanning confocal microscopy. *Opt Express*. 2014;22(10):11465-75.
  143. Partyla T, Hacker H, Edinger H, Leutzow B, Lange J, Usichenko T. Remote Effects of Electromagnetic Millimeter Waves on Experimentally Induced Cold Pain: A Double-Blinded Crossover Investigation in Healthy Volunteers. *Anesth Analg*. 2017;124(3):980-5.
  144. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz). *Health Phys*. 1998; 74(4): 494-522.
  145. IEEE Std C95.1-2005, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, section C.2.2.2.3, Rationale for applying the peak spatial-average SAR values for the extremities to the pinna  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1626482>
  146. Sasaki K, Mizuno M, Wake K, Watanabe S. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. *Phys. Med. Biol*. 2017; 62: 6993-7010.
  147. Colombi D, Thors B, Törnevik C. Implications of EMF Exposure Limits on Output Power Levels for 5G Devices Above 6 GHz. *IEEE Antennas & Wireless Propagat. Lett*. 2015; 14: 1247-9.
  148. ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. *Health Phys*. 2013; 105(1): 74-96.
  149. ICNIRP. Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000 µm. *Health Phys*. 2013; 105(3): 271-95.
  150. Adair E R, Kelleher S A, Mack G W, Morocco T S. Thermophysiological responses of human volunteers during controlled whole-body radio frequency exposure at 450 MHz. *Bioelectromagnet*. 1998; 19(4): 232-45.
  151. Adair E R, Mylacraine K S, Cobb B L. Human exposure to 2450 MHz CW energy at levels outside the IEEE

- C95.1 Standard does not increase core temperature. *Bioelectromagnet.* 2001; 22(6): 429–39.
152. Adair E R, Mylacraine K S, Allen S J. Thermophysiological consequences of whole-body resonant RF exposure (100 MHz) in human volunteers. *Bioelectromagnet.* 2003; 24(7): 489–501.
153. Hirata A, Asano T, Fujiwara O. FDTD analysis of human body-core temperature elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines. *Phys. Med. Biol.* 2007; 52 (16): 5013-23.
154. Morimoto R, Hirata A, Laakso I, Ziskin M C, Foster K R. Time constants for temperature elevation in human models exposed to dipole antennas and beams in the frequency range from 1 to 30 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2016; 62 (5): 1676-99.
155. Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster K R. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2017; 62(8): 3124-38.
156. Foster K R, Ziskin M C, Balzano Q. Thermal modeling for the next generation of radiofrequency exposure limits: commentary. *Health Phys.* 2017; 113(1): 41-53.
157. H Virtanen, J Keshvari, R Lappalainen. The effect of authentic metallic implants on the SAR distribution of the head exposed to 900, 1800 and 2450 MHz dipole near field. *Phys. Med. Biol.* 2007; 52(5): 1221-1236.
158. Kyriakou A., Christ A., Neufeld E., and Kuster N. Local Tissue Temperature Increase of a Generic Implant Compared to the Basic Restrictions Defined in Safety Guidelines. *Bioelectromagnetics.* 2012; 33: 366-374.
159. Liorni I., Kuehn S., and Kuster N. 4-Tiered approach for WPT including safety for persons w/medical implants. presented at TC106 WG9 meeting in Seoul, 2017.
160. 総務省「各種電波利用機器の電波が植込み型医療機器等へ及ぼす影響を防止するための指針」(2016年)  
<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/medical/H28guide.pdf>
161. CEPT ECC WG SE (Doc. ECC/SE(12)076), September 2012  
[https://cept.org/Documents/wg-se/6856/se-12-076\\_etsi-report](https://cept.org/Documents/wg-se/6856/se-12-076_etsi-report)
162. D. Colombi, B. Thors, and C. Törnevik, “Implications of EMF exposure limits on output power levels for 5G devices above 6 GHz,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 1247-1249, 2015.
163. B. Thors, D.Colombi, Z.Ying, T.Bolin and C.Törnevik, “Exposure to RF EMF From Array Antennas in 5G Mobile Communication Equipment,”*IEEE Access*, vol. 4, pp. 7469 – 7478, 2016.
164. T.Wu, T. S. Rappaport, and C. M. Collins, “Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 65-84, Mar. 2015.
165. T. Wu, T. S. Rappaport, C. M. Collins, “The Human Body and Millimeter-Wave Wireless Communication Systems: Interactions and Implications,”*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2015
166. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing the European Electronic Communications Code, 2016  
[http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c5ee8d55-7a56-11e6-b076-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_3&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c5ee8d55-7a56-11e6-b076-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF)
167. EC, 5G for Europe Action Plan, 2016  
<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/5g-europe-action-plan>
168. 5G Manifesto for timely deployment of 5G in Europe, 2016  
[http://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?action=display&doc\\_id=16579](http://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?action=display&doc_id=16579)

169. GSM Association, Improving wireless connectivity through small cell deployment, 2016  
[http://www.gsma.com/publicpolicy/wp-content/uploads/2016/12/GSMA\\_Small\\_Cell\\_Deployment\\_Booklet.pdf](http://www.gsma.com/publicpolicy/wp-content/uploads/2016/12/GSMA_Small_Cell_Deployment_Booklet.pdf)
170. Action Souveraineté Télécoms de la solution Confiance Numérique, 2015  
[http://www.systematic-paris-region.org/sites/default/files/WP\\_Souverainete\\_T%C3%A9l%C3%A9coms\\_Recommandations\\_5G\\_FINAL.pdf](http://www.systematic-paris-region.org/sites/default/files/WP_Souverainete_T%C3%A9l%C3%A9coms_Recommandations_5G_FINAL.pdf)
171. FCC/OET, “RF Exposure Procedures”, TCB Workshop, April 2016  
<https://transition.fcc.gov/oet/ea/presentations/files/apr16/4.1-RF-Exposure-TCB-Slides-April-2016-KC.pdf>
172. 総務省平成 29 年 5 月 19 日付け報道資料「LTE-Advanced 等の高度化に関する技術的条  
件」[http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban14\\_02000299.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000299.html)
173. 総務省告示第四百二十三号  
[http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/system/h27\\_423.pdf](http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/system/h27_423.pdf)



## 第4章 新たな電波利用に向けた電波防護指針

### 4.1. 新たな電波利用に向けた電波防護指針の在り方

電波が人体に与える影響については、これまで50年以上にわたって様々な研究がなされており、国際的な合意を得ている項目が数多くある。これらの研究結果に基づき、時間変化する電界、磁界及び電磁界によるばく露を制限するためのガイドラインが国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)において制定され<sup>(1,2)</sup>、欧州を中心に国際的に広く利用されている。ICNIRP ガイドラインは、1998年に制定<sup>(1)</sup>された後、2010年に10 MHzまでの周波数帯における刺激作用等からの防護に関する規定が改定された<sup>(2)</sup>。

一方、我が国では、電波が人体に好ましくない影響を及ぼさないよう電波防護指針が制定されている<sup>(3-6)</sup>。電波防護指針は、「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)として制定<sup>(3)</sup>された後、同答申「電波利用における人体防護の在り方」(平成9年4月電気通信技術審議会答申)において局所吸収指針が導入され<sup>(4)</sup>、「局所吸収指針の在り方」(平成23年5月情報通信審議会答申)として局所吸収指針の上限が3 GHzから6 GHzに変更された<sup>(5)</sup>。さらに、「低周波領域(10 kHz以上10 MHz以下)における電波防護指針の在り方」(平成27年3月情報通信審議会答申)においては上述のICNIRP ガイドライン改定に準拠する形で、10 MHzまでの周波数に関する改定がなされている<sup>(6)</sup>。

#### 4.1.1. 刺激作用を考慮した電波防護指針(10MHz以下)

上述のICNIRP ガイドライン<sup>(1,2)</sup>では0 Hzから規定値が示されているものの、我が国の電波防護指針[3-6]の対象周波数の下限は10 kHzに設定されている。これは当時の周波数割り当ての現状や電波利用技術の動向を考慮して定められたものである。現在の周波数割り当ては、8.3-9 kHzが気象援助、9-11.3 kHzが無線航空および気象援助となっているものの、実際には使用されていない。また、表4.1-1に挙げるような電波利用技術については一部10 kHz未満の利用があるものの、個別の規制や自主的取組により安全性の確保が図られているのが現状である。

上述のとおり我が国の電波防護指針は10 kHz以上10 MHz以下の周波数帯の刺激作用等からの防護についてICNIRP ガイドラインと整合している。10 kHz以下についても自主規制がICNIRP ガイドライン等と同様の根拠に基づいているものであれば、同じ考えが連続していると考えられる。以上のことから、電波防護指針の対象周波数の下限10 kHzを直ちに見直す必要はないと考えられる。

表 4.1-1 10 kHz 未満で利用される電波利用システムおよびその対応状況

システム	対応状況
磁気方式の EAS 機器 (万引き防止システム)	無線設備として電波法体系により規制されているとともに、日本万引防止システム協会が自主的取組により ICNIRP ガイドラインに準拠する形で人体の安全を担保している。
電力設備	電気設備に関する技術基準を定める省令 (ICNIRP ガイドラインに準拠(50Hz、60 Hz)) により規制されている。(※1,2)
家電製品	電子レンジ及び IH 調理器以外の家電製品については、一般財団法人家電製品協会が ICNIRP ガイドラインに準拠した技術指針を定めており、加盟メーカーがその指針を遵守している。(※3)
鉄道関連	鉄道に関する技術上の基準を定める省令等 (ICNIRP ガイドラインに準拠(50Hz、60 Hz)) による規制がある。(※4)

出所) 各種資料を基に作成

- (※1) 経済産業省令第 15 号「電気設備に関する技術基準を定める省令の一部を改正する省令」(2011 年)
- (※2) 原子力安全・保安部会電力安全小委員会「電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書」(2007 年)
- (※3) 家電製品協会「家電製品から発せられる電磁波測定 (10Hz~400kHz) 調査」(2013 年)
- (※4) 国土交通省「鉄道に関する技術上の基準を定める省令の一部改正」(2012 年)

ICNIRP では現在、ガイドライン作成において確認されたデータギャップの検討が行われている<sup>7)</sup>。具体的には、推奨される研究課題の抽出を目的としたプロジェクトグループが立ち上げられている。その中で 1 Hz から 100 kHz の間で変化する電界および磁界についてのガイドラインの将来の改定の際に課題となるデータギャップについても議論が進められている。表 4.1-2 に議論されているトピック例とその状況を示す。しかし、まだ方向性が定まっておらず、根拠となるデータが十分集まっていないのが現状である。そのため、データギャップについては 5-10 年後のガイドライン改定までの中長期的な研究課題とすることが望ましいと考えられる。

表 4.1-2 低周波帯で議論されているデータギャップのトピック例とその状況

トピック	状況
ニューラルネットワーク活動パターン	確立した現象 推定された感度の幅が広い
フリーラジカルライフタイム	参考レベルより高い磁界の影響は確立 実験的な閾値は理論推定値より高いが、魚や鳥は環境の小さな変化にとっても敏感（ELF ではさほどでもない）
生体起源のマグネタイト	マグネタイトの存在は十分確立 磁気センサの性質に関する議論あり
神経行動	限られたヒト研究からは影響なし 動物実験のレビューからは可能性が示唆 ヒトと動物のデータの間に一貫性のない結果
神経内分泌システム	研究が少ない 一貫性のない結果
神経変性疾患	疫学研究において多くの方法論的な問題あり 実験的研究は適切でない 一貫性のない結果
再生と発生	限られた研究 一般的に生殖の結果は支持されない
心血管障害	限られた研究 一般的に心血管障害は支持されない
小児白血病	適切な動物モデルによる限られた研究 一般的にがんの誘導や促進は支持されない
ドシメトリとモデル	研究データベースができてきている モデル間の相互比較がさらに必要

#### 4.1.2. 熱作用を考慮した電波防護指針（100kHz 以上）

我が国の電波防護指針の対象周波数は、周波数割り当ての現状や電波利用技術の動向を考慮して、上限は 300 GHz とされている。また、国際的なガイドラインである ICNIRP ガイドラインの上限も 300 GHz である。超高周波における利用動向としては、表 4.1-3 に示すように、大容量データ無線通信<sup>(8)</sup>や非破壊検査・非接触検査<sup>(9,10)</sup>を目的として 10～3,000 GHz の周波数を使った装置の実用化への取り組みがあり、さらに未踏周波数域を利用するための研究開発<sup>(11-13)</sup>も進められている。しかし、超高周波を使用した機器の導入は、一部の研究機関等に限られており、現段階では汎用の市販機器の販売までは進んでいない。そのため、超高周波を発する身近な機器の実用化は未だ検討段階にある。以上のことから、周波数の上

限を直ちに見直す必要はないと思われる。ただし将来的には、研究開発の動向により技術の導入や普及の見通しが十分得られる場合は、それらに合わせた見直しが必要と考えられる。

表 4.1-3 超高周波における利用動向

THz 応用機器	周波数 (THz)	利用目的
テラヘルツカメラ	0.14、1.4、29、 0.05～0.7	内部構図・生体検査の非破壊・非接触検査 人体に装着可能なウェアラブルカメラ (※1-3)
異物・薬物検査	0.2～3	郵便物内の非破壊検査 (※4)
大容量データ無線通信	0.12 0.1～0.5 (見込み)	高速無線通信 (※5,6)
リモートセンシング (受動)	0.4、0.7	火星の酸素観測 (※7)

出所) 各種資料を基に作成

- (※1) Dr. Suzuki et al, “A flexible and wearable terahertz scanner,” Nature Photonics, 10.1038/NPHOTON.2016.209, 2016.
- (※2) 東京工業大学「カーボンナノチューブを使い、折れ曲がるテラヘルツカメラを開発—非破壊・非接触検査における新たな手法として期待—」 (<https://www.titech.ac.jp/news/2016/036686.html>)
- (※3) Terahertz imaging cameras (<http://terasense.com/products/sub-thz-imaging-cameras/>)
- (※4) 山崎ら「郵便物内の違法薬物の非破壊検査」精密光学会誌, vol.82. no.3, 2016 ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/82/3/82\\_217/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/82/3/82_217/_article/-char/ja))
- (※5) 総務省テラヘルツ波帯の情報通信利用に関する調査検討会 (2011年)
- (※6) 総務省電波資源拡大のための研究開発研究開発課題便覧 (2017年4月)
- (※7) 総務省「通信・リモートセンシング衛星の現状と動向について」 (2016年9月) ([http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000439192.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000439192.pdf))

### 4.1.3. 局所吸収指針対象周波数の拡張

局所吸収指針は、主に身体に極めて近接して使用される無線機器等から発射される電磁波により、身体の一部が集中的に電磁界にさらされる場合に使用される指針である。「電波利用における人体防護の在り方」(平成9年4月電気通信技術審議会答申)<sup>(4)</sup>において防護指針に追加され、3 GHz までの指針値が定められた。その後、科学的知見<sup>(14,15)</sup>を踏まえて、「局所吸収指針の在り方」(平成23年5月情報通信審議会答申)<sup>(5)</sup>により適用上限周波数を6 GHz まで拡張する改定がなされた。評価指標としては10 g 平均の SAR が用いられており、電磁放射源(主にアンテナ)や金属(筐体等)と人体との距離が20 cm 以内の場合に原則として適用される。SAR 測定法に関しては、人体側頭部に近接して使用される無線設備(主に携帯電話(通話))については、側頭部 SAR (IEC62209-1、300 MHz - 6 GHz)、人体の側頭部以外の部分で20 cm 以内に近接して使用する無線設備(主に携帯電話(メール・ネット)やラップトップ PC など)については Body-SAR(IEC62209-2、30 MHz - 6 GHz)等の国際電気標準会議(IEC)国際規格と整合した測定法が総務省告示第324号(平成25年)において

整備されている。

一方で、第5世代移動通信システム(5G)や超高速無線LANシステム等での利用が予定される6GHzより上の周波数帯において、我が国では局所吸収指針が策定されていない状況である。300GHzまで電力密度による指針値が設けられているものの、従来、6GHzより上の周波数領域を用いるシステムにおいては人体近傍での使用を考慮していなかったため、空間的に不均一な分布となる場合での電力密度を評価するための空間平均の範囲は明示されておらず、遠方界で規定される電力密度の基準値が適用されている状況である。したがって、今後、放射源からの距離10cm未満の人体の安全性評価として最適な指標を策定することが重要な課題である。

5G(ミリ波帯)では20GHzから90GHzにおける複数の帯域を対象とした無線通信技術が検討されており、これらは人体近傍10cm未満の距離での利用増加をもたらすことが見込まれるため、6GHzより上の周波数帯における入射電力密度に関してICNIRPガイドライン<sup>15)</sup>を暫定的に採用した上で国際動向を考慮しながら整合させる、あるいは、入射電力密度の新たな指針を局所指針に追加する等の改定が望ましい。

#### 4.1.4. 眼への入射規制

##### 4.1.4.1. 基礎指針<sup>(3)</sup>

基礎指針4(b)には、「3GHz以上の周波数においては、眼への入射電力密度(6分間平均)が10mW/cm<sup>2</sup>以下とすること」と記載されている。この4(b)は眼に特化して記載された指針である。この基礎指針の根拠として、「3GHz以上の周波数領域では、眼への影響と体表の広い範囲への照射による熱感などが問題となる。ウサギの角膜上皮に対する一過性の障害が35GHz及び107GHzの周波数で10~50mW/cm<sup>2</sup>程度の照射で生じ、100mW/cm<sup>2</sup>程度を超えると一過性でない影響の可能性も考えられている(Ro76)。一過性の障害は、電磁波を照射しなくても検出される程度のもので重大なものではない。以上の報告を考慮し、入射電力密度を10mW/cm<sup>2</sup>以下にすることが望ましく、この項目を注意事項として加えた」と記載されている。

この説明文で「一過性」と記載されているので、一過性=重大な障害ではないとの誤解を生じやすい。Rosenthalら<sup>(17)</sup>は、角膜障害を受傷後24時間以内に治癒するsuperficial keratitis(表層角膜炎:角膜表面にある角膜上皮細胞が剥離すること。蛍光染色所見では点状染色所見として観察させる)とdeep keratitis(深部角膜炎:持続性の角膜炎や角膜実質部分に永久的に残存する白斑)に分類している。Rosenthalらが「炎症の所見なしに発症する角膜炎は点状表層角膜炎のみである。」と報告している。Kojimaら<sup>(18)</sup>は、40、75、95GHzのミリ波帯をレンズアンテナを介して、同一手法で有色家兎眼にばく露し、Rosenthalらが指摘するdeep ketatitisの発症閾値は50-100mW/cm<sup>2</sup>内にあると報告している。

基礎指針の10mW/cm<sup>2</sup>の根拠はRosenthalの報告に基づくが、この実験ではウサギの瞬目(まばたき)を抑制した条件下の実験である<sup>(17)</sup>。眼部の表面にある角膜には非常に多くの

神経が配置されており、角膜に埃等の異物が付着すると瞬きをしたり、瞼を閉じたり、眼をそむける等の忌避反応が備わっている。従って、基礎指針の根拠となる  $100 \text{ mW/cm}^2$  程度の電波が眼部に照射された場合は、忌避反応によりウサギが瞼を閉じ、眼内には電波の影響が到達しないことを報告者は示している<sup>(21)</sup>。加えて、家兎の瞬目回数は報告にばらつきがあるが 3-12 回/時間であるのに対して、ヒトでは 6-18 回/分と瞬目回数が多いため、ヒトではさらに安全性が高いと言える。

瞬目の影響や長時間（6 分間）にわたり、眼にミリ波ビームが照射し続けるという想定は、光（レーザ）ガイドライン<sup>(22)</sup>等でも非現実的であるとされていることを考慮すると、現行の眼に対する防護指針値は必ずしも必要ではない。しかしながら、ヒトが忌避反応を行う時間よりも短時間の間に、眼に強力なパルス波状の電磁界被ばくが考えられる状況では、この限りではない。高強度のパルス波に対する検討を行っていく必要がある。

以上の観点を考慮すると、現行の防護指針は重篤な角膜上皮障害の発生を防護していると考ええる。なお、ICNIRP 電磁界ガイドライン<sup>(1)</sup>においては、健常者に対して基本制限を導出し、安全係数 5 を考慮することで一般公衆を防護している。安全係数は、虚弱者、高齢者、乳幼児、病人及び熱耐性が低下するような投薬を受けている人等を考慮したものであり、また、ICNIRP レーザガイドラインでは長時間にわたりビームを眼（体表の一箇所）にだけ照射するという状況が非現実的とされ<sup>(22)</sup>、例えば瞬目が十分でないヒトについての防護についても考慮されている。

#### 4.1.4.2. 管理指針<sup>(3)</sup>

電磁界強度指針は全身のばく露を想定した安全側の数値となっているため、近傍の波源や指向性のある波源による局所ばく露及び不均一ばく露については、補助指針を用いてより詳細な評価を行い、電磁界強度指針を局所的に超えるばく露も許容されるようにしている。補助指針では波源等から 10 cm 以上（300MHz 以下では 20cm 以上）離れた空間に限って適用される。

近年では Virtual Reality に使用される Head Mount Display 等の波源から眼表面までの距離は 10 cm 以下になると考えられる。また、Google Contact Lens<sup>(19)</sup>に代表されるようにコンタクトレンズ内に電極を埋め込んで、種々の医療情報を得る試み<sup>(20)</sup>がされているが、これらの例では角膜上に波源があるため、近接波源による眼球への電波ばく露の可能性に対して、現行の防護指針（補助指針：10cm 以上の場合に適用）は対応していない。今後、検討が必要であると考ええる。

#### 4.1.4.3. 不均一又は局所的にさらされる場合の補助指針における眼への入射電力密度の空間的最大値<sup>(4)</sup>

「電波利用における人体防護の在り方」（平成 9 年 4 月電気通信技術審議会答申）では局所吸収指針が導入され、3 GHz 以下（2011 年の 2030 号答申で 6GHz 以下に改定）の周波数

で、それまで補助指針の不均一ばく露に対する緩和が適用できなかった 10 cm 以内の領域に適用できる指針として、局所 SAR による制限が定められた。

局所吸収指針の導入に伴い、補助指針も改定され、眼への入射電力密度に 2 段階の数値が導入された。一般環境に 5 倍の付加的な安全率が導入されたことから、一般環境における 3 GHz 以上の眼への入射電力密度は  $2 \text{ mW/cm}^2$  の制限である。これは基礎指針の  $10 \text{ mW/cm}^2$  以下という注意事項に基づくが、一般環境でこれに 5 倍の付加的な安全率を設ける根拠が明確ではない。

## 4.2. 電波防護指針（管理指針）の改定の方向性

### 4.2.1. 考え方

電波防護指針は、電磁界強度指針、局所吸収指針、補助指針（以上 3 つの指針を「管理指針」という）、基礎指針及び基本制限から構成する。基礎指針及び基本制限は、管理指針の根拠であるとともに、管理指針への適合性を評価できない場合において安全性を判断する際の根拠を与える性格を有するため、研究機関等で慎重に評価を行う必要がある。他方、管理指針は、生体内の電磁現象に関する測定法・推定法に関する研究の進展、電波の利用状況の変化及び国際動向等によって適宜変更されるものである。

現在、ICNIRP の国際的ガイドラインの高周波領域の改定作業が進められている。我が国の電波防護指針についても、国際基準との整合を鑑み、この国際的ガイドラインの改定内容に合わせて、高周波領域を含む電波防護指針の管理指針を改定することが望ましい。なお、低周波の電波防護指針においては、ICNIRP ガイドライン 2010 に倣い、従来の基礎指針に代えて基本制限という概念を導入した経緯があり、高周波の電波防護指針においても、国際ガイドラインの動向を注視し、必要に応じて同様な改定について検討することが望ましい。

### 4.2.2. 電磁界強度指針

現在、ICNIRP、IEEE ICES が高周波ガイドライン改定を行っている。また、我が国では 100 kHz 以上の熱作用に対する防護指針は、これらの国際ガイドラインの現行版の策定に先立ち、当時の諸外国の電波防護規格の動向等を考慮して独自に作成されたものであるが、根拠となる全身平均 SAR の基礎指針は  $0.4 \text{ W/kg}$  で同一である。一方、電磁界強度指針に相当する指標は、ICNIRP ガイドライン<sup>(1)</sup>では参考レベル(Reference Level)、IEEE C95.1 規格<sup>(16)</sup>では最大許容ばく露 (Maximum Permissible Exposure) とよばれ、指針値は若干異なる。

2017 年に開催された GLORE 会合 (Global Coordination of Research and Health Policy on RF Electromagnetic Fields, 電磁界の健康影響に関する国際コーディネイト会合) において、IEEE ICES Technical Committee 95 からの参加者は、実用性の観点から他の国際ガイドラインとの整合を考慮することは妥当であるとコメントし、現在の改定案は 100MHz 以上については ICNIRP ガイドラインと整合した案となっている。

従って、改定中の国際ガイドラインでは、最新の研究成果に基づいた、より信頼性の高い電磁界強度指針値に相当する値が設定され、かつそれらはほぼ同一の値に整合される可能性が高い。新たに設定される電磁界強度レベルは従来の値と比べて、いずれも同じ根拠に基づいているため、本質的には同等の防護が得られていると考えられる。一方で、我が国の電波防護指針は 10 MHz 以下の刺激作用に対しては 2010 年に改定された ICNIRP 低周波電磁界ガイドライン（～10MHz）と整合している<sup>(2)</sup>。このため、ICNIRP 高周波ガイドラインが改定された場合には、電波防護指針の熱作用に基づく電磁界強度指針を同様に整合させることが望ましい。

### 4.2.3. 補助指針

電波防護指針の補助指針では、平成 9 年の改定で、眼への入射電力密度に 2 段階の数値が導入された<sup>(4)</sup>。一般環境に 5 倍の付加的安全率が導入されたことから、一般環境の 3 GHz 以上（2011 年の 2030 号答申で 6GHz 以下に改定）の眼への入射電力密度は 2 mW/cm<sup>2</sup>の制限である。しかし、一般環境に対して 5 倍の付加的な安全率を設ける根拠が明確ではない。

我が国以外で唯一眼に対する入射規制を行っていたカナダにおいても、カナダの電波防護規格である Safety Code 6（SC6）の改定の根拠を説明した A Review of Safety Code 6<sup>(23)</sup>では、「白内障は、実験動物で生じるが、眼の周りの皮膚に痛みを伴う加熱を引き起こす RF エネルギーのレベルにばく露された場合のみである。」と述べられており、2015 年に改定された最新の SC6 では眼に対する規制は撤廃されている。

ヒトの眼表面には表層まで角膜神経が分布されている。眼の違和感に対して、瞬目（まばたき）、閉瞼（まぶたを閉じる）、眼を逸らせる等の忌避反応が生じる。長時間（6 分間）に渡り、眼にミリ波ビームが入射し続けるという想定は、光（レーザー）のガイドライン<sup>(22)</sup>でも非現実的であるとされていることを考慮すると、現行の眼に対する補助指針値は必ずしも必要ではない。

また、体表に対する補助指針に関し、GLORE 会合では、Sasaki<sup>(24)</sup>、Foster<sup>(25)</sup>の論文を用いて指針値の設定に関する議論がなされていた。4.2.4. で示す局所吸収指針の拡張と合わせ、眼に対する防護も考慮した上で適切な指針値の設定が必要となる。

### 4.2.4. 局所吸収指針

4.2.2. で述べた電界強度指針および補助指針の値については、一般に電波放射源から 10cm 以上（300MHz 以下では 20cm 以上）離れた空間で適用することが推奨されている。これは電波放射源の近傍で正確な電磁界の測定ができないことによるものであり、測定条件によってはこれら距離以内の領域での測定が可能な場合もある。例えば、WPT システムにおける中間周波数帯の近傍磁界については 20cm 以内の距離での磁界測定は可能とされている。ただし、例え正確な測定が可能であっても、不均一なばく露に対する補助指針（空間平均）については、電波放射源から 10cm（300MHz 以下では 20cm）以内の領域では適用で



きないことに注意が必要である。

しかし、携帯電話端末等のその他の身体で使用される携帯無線端末のほとんどは、波源近傍における高周波数領域の電磁界を正確に測定することは困難であり、電界強度指針および補助指針を適用することはできない。そのため、我が国電波防護指針（局所吸収指針）では、身体から 20cm 以内の電磁放射源からの局所的なばく露に関する安全性の指標として、立方体形状の 10g 組織にわたり平均化された SAR が用いられている。その適用上限周波数は 6GHz となっている。従って、6 GHz から 300 GHz までの周波数において、電波放射源より 10cm 未満における指針値は十分に整備されているとはいいがたい。

10g 平均 SAR は、皮膚および脳における温度上昇を一定以下にする指標となることが示されている<sup>(26)</sup>。一方、6GHz 以上の周波数においては電波の浸透深さの減少に伴い、皮膚での温度上昇が支配的となる。2017 年の GLORE 会合において、IEEE ICES は、Penetrating Power Density at the Skin (PPD；皮膚における浸透電力密度)を提案している。この指標は、10gSAR と同様に、内部吸収電力に基づくものであり、温度上昇との関係が周波数に依存しない。この有効性は、例えば、Hashimoto<sup>(27)</sup>から確認することができる。PPD に対応する皮膚表面における入射電力密度は、皮膚表面における反射率の周波数依存性のため、周波数に依存する。したがって、皮膚表面の反射率の周波数を考慮することで、PPD に対応する電磁界強度指針（入射電力密度）を求めることができる。

ICNIRP ガイドライン、IEEE ICES 規格の動向を注視し、我が国でも同様に、10cm 未満に位置する放射源から皮膚の温度上昇を防護するための局所吸収指針における新たな指標を導入、適切な指針値の設定、さらには 10cm 未満での電磁界強度指針の設定を検討することが望ましい。

#### 4.2.5. その他

2017 年の GLORE 会合において、現在検討されている ICNIRP ガイドライン、IEEE C95.1 規格の改定版では、パルス波による非熱的な影響や聴覚効果等を考慮していないことが報告されている。したがって、電波防護指針でも同様の対応が望ましい。

一方、電波防護指針における熱作用に関する基礎指針と電磁界強度指針における平均時間は、300GHz まで一定値（6 分間）と定められている。なお、ICNIRP ガイドライン、IEEE C95.1 規格における従来の熱作用に基づくガイドラインの平均時間は、それぞれ 10GHz、3GHz 以上では周波数に依存する。現在、IEEE ICES は、周波数依存性を見直し、局所ばく露に対しては 6 分間を、全身ばく露については 3.2.3 節に述べた理由により 30 分間への変更を検討している。また、ICNIRP ガイドラインでも同様の変更について検討している。

同時に、現行の平均化時間では、レーザ施設近傍でみられる間欠ばく露（概ね 10 秒以下）による断熱的な過程（血流による冷却効果が小さく、温度上昇が吸収電力に概ね比例する場合）での過度な温度上昇の防護には適切ではない可能性がある。ICNIRP レーザガイドラインでは短パルスからの防護に関する制限値が設けられているが、スポット径、持続時間など

相違がみられる。従って、将来、国際動向を加味した上で、連続ではない間欠的なばく露からの適切なばく露指標の導入、その指針値の設定が必要となると考えられる。

## 文献

1. ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Phys.*, vol. 74, no.1, pp. 494-522, 1998.
2. ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz to 100 kHz)," vol. 99, pp. 818-836, 2010.
3. 電気通信技術審議会答申 諮問第 38 号「人体に対する電波防護指針」(1990 年)
4. 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」(1997 年)
5. 情報通信審議会答申 諮問第 2030 号「局所吸収指針の在り方」(2011 年)
6. 情報通信審議会答申 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」(2015 年)
7. Marino C, "Data gaps relevant to guidelines setting," ICNIRP 8<sup>th</sup> International NIR Workshop, 2016.
8. 総務省近畿総合通信局 テラヘルツ波帯の情報通信利用に関する調査検討会 (2011 年)
9. 山崎ら「郵便物内の違法薬物の非破壊検査」 精密光学会誌, vol.82. no.3, 2016.
10. 一般社団法人電気学会 テラヘルツ波を用いた非破壊検査技術調査専門委員会 (2015 年-2018 年)
11. Suzuki D, Oda S, and Kawano Y., "A flexible and wearable terahertz scanner," *Nature Photonics*, 10.1038/NPHOTON.2016.209, 2016.
12. Tonouchi, M. Cutting edge terahertz technology. *Nat. Photonics* 2007, 1, 97-105.
13. 総務省総合通信基盤局電波部電波政策課 電波資源拡大のための研究開発 研究開発課題便覧(2017 年 4 月)
14. Hirata A. and Fujiwara O. Correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2009; 54: 7227-38.
15. Laakso I. Assessment of the computational uncertainty of temperature rise and SAR in the eyes and brain under far-field exposure from 1 to 10 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2009; 54: 3393-404
16. IEEE Std C95.1-2005, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, section C.2.2.2.3, Rationale for applying the peak spatial-average SAR values for the extremities to the pinna  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1626482>
17. Rosenthal S. W., Birenbaum L., Kaplan I. T., Metlay W., Snyder W. Z. and Zaret M. M. Effects of 35 and 107 GHz CW Microwaves on the rabbit eye, *Biological effects of electromagnetic waves. Selected Papers of the USNC/URSI Annual Meeting, Boulder, Colorado, October 1975 Rockville, Maryland, US Department of Health, Education, and Welfare, HEW Publication (FDA) 77-8010, vol. 1, pp. 110-128, 1976*
18. 総務省生体電磁環境研究平成 26 年度報告書 眼部への電波ばく露の定量的調査に関する研究 研究報告書 (平成 27 年 3 月)
19. Google, "Introducing our smart contact lens project," January 2014  
<https://googleblog.blogspot.jp/2014/01/introducing-our-smart-contact-lens.html>
20. Kim J, Kim M, Lee M. S., Kim K, Ji S, Kim U. T., Park J, Na K, Bae K. H., Kim H. K., Bien F, Lee C. Y., and

Park J. Wearable smart sensor systems integrated on soft contact lenses for wireless ocular diagnostics NATURE COMMUNICATIONS | DOI: 10.1038/ncomms14997

21. Kojima M., Hanazawa M., Yamashiro Y., Sasaki H., Watanabe S., Taki, M., Suzuki Y., Hirata A., Kamimura Y. and Sasaki K., Acute ocular injuries caused by 60-GHz millimeter-wave exposure. *Health Phys.* 2009; 97: 212-8.
22. ICNIRP, "Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000  $\mu\text{m}$ ," *Health Phys.*, vol. 105, no.3, pp. 271-295, 2013.
23. Demers P, Findlay R, Foster K, Kolb B, Moulder J, Nicol A-M, Prato F, and Stam R. A review of safety code 6 (2013): Health Canada's Safety Limits for Exposure to Radiodfrequency code 6 (2013): Health Canada's Safety Limits for Exposure to Radiodfrequency Fields. The Royal Society of Canada. 2014
24. Sasaki K, Mizuno M, Wake K, and Watanabe S. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. *Phys. Med. Biol.* 2017; 62 (15): 6993-7010.
25. Foster K R, Ziskin M C, Balzano Q. Thermal modeling for the next generation of radiofrequency exposure limits: commentary. *Health Phys.* 2017; 113(1): 41-53.
26. Morimoto R, Laakso I., De Santis V, and Hirata A. Relationship between peak spatial-averaged specific absorption rate and peak temperature elevation in human head in frequency range of 1–30 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2016; 61 (13): 5406-5425.
27. Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster K R. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2017; 62(8): 3124-38.

## 第5章 適合性評価方法

電波防護のための適合性評価手法について、国際的には国際電気標準会議（IEC）第 106 専門委員会（TC106）において、国際標準化が実施されている（3.5 参照）。また、電磁界安全に関わる IEEE 国際委員会（IEEE International Committee on Electromagnetic Safety: IEEE/ICES）第 34 専門委員会（TC34）でも議論が行われており、IEC 規格と IEEE 規格はデュアルロゴで出版される場合もある（2.5 参照）。我が国では、10 MHz から 6 GHz までの携帯無線端末からの適合性評価手法に関する IEC 62209 規格と整合した国内規制を整備してきた経緯があり<sup>(1)-(4)</sup>、また我が国での携帯電話基地局からの適合性評価手法<sup>(5)(6)</sup>は IEC 62232 規格（2.5 参照）に採用されている。

新しい電波利用システムとして挙げられる、10 MHz 以下の周波数で動作する WPT システム及び 5G システムを含む 6 GHz 以上周波数で動作する無線端末等の新しい電波利用技術に対して、現在 IEC TC106 において国際標準規格策定に向けた検討が進められている状況である。いずれの技術に対する適合性評価においても、小電力で動作する一部の製品を除き、具体的な製品が流通していない状況であることから、活動当初には情報提供を意図した技術報告書（TR）の策定を計画していた。

特に複数の国で利用される無線機器の適合性評価手法については、国際的な整合性の確保が必須であることから、国際標準規格に基づくことが望ましい。ただし、国際標準規格の中には、我が国を始め諸外国にて導入に至っていない適合性評価技術も挙げられる。例えば、数値シミュレーションによる適合性評価法（5.3 参照）や携帯電話基地局からの全身平均 SAR の測定法については我が国での導入には至っていない。従って、新しい電波利用技術に対する適合性評価法として IEC 規格の導入においては、国内の状況および諸外国の導入状況に照らし合わせた上で十分に審議する必要がある。

### 5.1. 中間周波における適合性評価方法

近年、IH 調理器、RFID、盗難防止装置（EAS）、WPT など中間周波数帯を用いる機器の利用が進んでいる。中間周波数帯における適合性評価については、10 MHz 以下は刺激作用を考慮した指針、100 kHz 以上では熱作用を考慮した指針を考慮する必要があり、100 kHz から 10 MHz は双方の作用を考慮する必要がある。

IEC TC106 において、人体ばく露に関する電界、磁界および電磁界の評価方法についての標準化活動を行っている。その中で、100 kHz までの周波数における電磁界測定法の水平規格として IEC61786<sup>(7,8)</sup>、同じく体内誘導電流計算法の水平規格が IEC62226<sup>(9-11)</sup>に定められている。また特定の発生源に対する評価方法として、IH 調理器を含む家電製品の評価方法が IEC62233<sup>(12)</sup>、RFID や EAS などについての評価方法が IEC62369<sup>(13)</sup>に定められている。特定の発生源に対する個別の規格がない場合の評価方法は IEC62311<sup>(14)</sup>に示されている。

WPT は、近年研究開発が進められている技術であり、その利便性から電気自動車や家電製品などの給電方法として期待されているものの、従来の無線通信端末に比べて大きな電

力（例、電気自動車では7.7kW）を用いることから、その適合性評価法に関する議論も新たに進められている。我が国では、総務省情報通信審議会情報通信技術分科会電波利用環境委員会において、近年中に実用化が見込まれるいくつかのWPTシステムに対して、他の無線機器との周波数共用、システムから放射される漏えい電波の許容値や測定法、電波防護指針への適合性の確認方法等に関する技術的条件について議論を行い、電気自動車用WPT<sup>(15)</sup>、6MHz帯磁界結合型WPTおよび400kHz帯電界結合型WPT<sup>(16)</sup>に対する適合性評価方法を世界に先駆けて策定した。一方国際的には、IEC TC106にWPTシステムに対する適合性評価方法のためのWG9が2015年9月30日に設立され、国際規格策定に向けた標準化が開始された。IEC TC106/WG9では10MHz以下のWPTシステムに対する評価方法の技術報告書（TR）を作成し、2018年中に発行されることが決定している。ここで、当該技術報告書は10MHzまでの周波数帯を用いるWPTシステムに対する適合性評価法を対象としており、上述の情報通信審議会が策定した電気自動車用WPTおよび家電製品用WPTに対する評価法を概ね含んだものとなっている。ただし、情報通信審議会答申およびIEC TC106/WG9 TR双方においては、一般的な評価方法についての議論にとどまっており、今後製品化が進む際には個別の適合性評価法が必要となる可能性がある。さらに、10MHz以上の周波数を用いるWPTシステムについては、製品化の具体的な予定が見られなかったことからAnnexとして特徴が示されたのみであり、具体的な適合性評価方法は示されていない。これについても、必要に応じた議論が必要であると思われる。現在、上述の技術報告書の策定後に新規国際規格化することが検討されており、国際規格策定後は我が国で答申されたWPTシステムのための技術的要件における、電波防護指針への適合性の確認方法を国際規格に整合させていく必要があると考えられる。

また、電波に直接さらされる場合の刺激作用や熱作用とは別に、間接的な作用として接触電流が知られている。接触電流とは、電波にさらされた金属体に人体が触れる際に、その電位差により接地点を介して流れる電流であり、周波数や強度により刺激、痛み、熱、熱痛などが生じる。接触電流についても、電波防護指針やICNIRP等で指針値が定められているが、その評価方法はいまだ確立していない。IEC TC106に接触電流の評価方法のためのWG8が2015年9月30日に設立され、国際規格策定に向けた標準化が開始され、技術報告書（TR）が作成および承認され、2018年中に発行される予定である。<sup>(18)</sup>

## 5.2. 高周波（6GHz以上）における適合性評価方法

我が国の電磁界強度指針および補助指針では評価指標として電力密度が用いられている。電磁界強度指針の値については、空間最大値を測定・評価する必要があるが、電波放射源付近の電磁界強度を正確に取得する技術の確立が課題として挙げられる。また補助指針の値については、電波放射源から10cm以上離れた空間での適用が定められている。すなわち、6GHzから300GHzまでの周波数において、電波放射源より10cm未満における指針値はない。一方で、5G携帯端末等の新しい電波利用技術に対する利用シーンでは、電波放射源

から比較的近い距離において人体が電波にさらされる。6 GHz 以上の周波数を利用した新しい電波利用技術の利用において、端末からの電波ばく露に対して、人体安全性を担保するための適合性評価手法が必要と考えられる。

IEC TC106 における標準化動向として、2017 年 11 月にアドホックグループ (AHG10) が設立され、5G システムを含む 6 GHz 以上の周波数で動作する無線機器に対する IS 策定に向けた活動が開始した。IEC TC106/AHG10 では技術報告書の作成を目標とし、2018 年 9 月までの発行が決定している (2.5 参照)。ここで、AHG10 による技術報告書は 6 GHz から 100 GHz までの無線端末に対する適合性評価のための測定手法を対象としている。すなわち、IEC では携帯電話端末に限らず、タブレット端末、ラップトップ等、広い範囲を対象としている。また、2018 年 10 月の IEC TC106 総会において、6 GHz 超の無線端末からの電力密度測定法に関する、IEEE/TC34 とのジョイントワーキンググループ (JWG12) の設立が承認され、2020 年内に当該技術に関する国際標準規格策定に向け、議論が進められている<sup>(19)</sup>。

携帯電話端末等の複数の国で利用される無線端末の適合性評価法においては国際的な整合性の確保が重要であることから、5G 携帯電話端末等に代表される 6 GHz 超で動作する携帯無線端末からの人体への電波防護のための適合性評価手法に関しては、IEC 規格に準拠することが望ましいと考えられる。しかしながら、我が国での 5G システム等の 6 GHz 超の電波利用技術の導入時期を考慮すると、JWG12 による国際標準規格策定までのスケジュールに先行して、我が国での適合性評価法について策定する必要がある。

IEC TC106/AHG10 による技術報告書は情報提供 (Informative) の位置づけであるため、評価法の適用における制限や不確かさ評価手順等の国際標準規格策定時に規定すべき項目については記されていない。しかしながら、この技術報告書では、6 GHz 以上で動作する無線端末からの適合性評価のための実用的な手順について記されており、IEC TC106/JWG12 による国際規格の策定においては、この技術報告書を基礎とすることが想定される。

従って、我が国での 5G 携帯無線端末を含む 6GHz 以上の無線端末に対する適合性評価手法に関しては、IEC TC106/AHG10 による技術報告書に基づいて策定することが適当と考えられる。ただし、当該技術報告書において国際規格策定時の課題とされている項目については、IEC TC106/JWG12 の動向を踏まえ、今後検討すべき課題として挙げられる。

6 GHz 以上を利用した無線技術の発展より、同一筐体より 6 GHz 以下および 6 GHz 超の複数の電波放射源によって人体が不均一な電波にさらされることが想定される。例えば、現行の第 4 世代移動体通信端末への WiGig の搭載や第 5 世代移動体通信端末への WiFi の搭載などが挙げられる。当該利用シーンにおける指針値への適合性評価手法として、ICNIRP ガイドラインでは、ばく露量の指針値に対する割合を用いた手法について記されている。具体的には、各電波放射源に人体がさらされるばく露量 (電力密度、局所 SAR など) をそれぞれ評価し、それぞれの指針値に対する割合を算出し、それらの和 (電界強度または磁界強度においては自乗和) を得る。この値が 1 を超えていなければ、指針値を満たすものと判断する。ばく露量の指針値に対する割合を合成する考え方については、複数波の評価として電波

防護指針に規定されており、IEEE ガイドラインにおいても情報提供として記載されている。ただし、電波防護指針や IEEE ガイドラインでは、局所 SAR と電力密度等の異なるばく露量の指標間での合成法については明記されていないことに留意されたい。

IEC TC106/AHG10 による技術報告書では、上述の ICNIRP ガイドラインに記される評価法に基づいた手順が提案されており、ここで提案された評価法は 6 GHz 以下の無線端末からの局所 SAR の評価手順に関する国際規格 IEC62209-1 (ed.2)<sup>(20)</sup>とも矛盾しない。複数の電波放射源から同時に不均一な電磁界に人体がさらされる際の最悪条件として、ばく露量が最大となる位置が一致する場合が想定される場合には、各電波放射源からのばく露量の最大値に対して、上述の手法を利用することで安全を担保することが可能と考えられる。ただし、電波ばく露量の最大値が得られる位置が各電波放射源で大きく異なる場合には、過大評価となる。IEC TC106/AHG10 による技術報告書では上述の評価法の外、2つの評価法が提案されているが、これら複数波の評価法の適用における制限や詳細な評価手順については、上述のとおり国際規格策定時に規定すべき課題として挙げられている。

### 5.3. 高周波（6GHz 以上）における数値シミュレーション等による適合性評価方法

5G や WiGig 等の移動体通信端末のユースケースでは、端末から比較的近い領域において、人体がさらされることが想定される。従って、6 GHz 以上の周波数での電波ばく露量の評価には、端末近傍の電波ばく露量を適切に評価する必要がある。FCC ではある WiGig 製品の適合性評価の審査において、数値電磁界シミュレーションによる評価を認めているが<sup>(21)</sup>、FCC によって認証された WiGig 製品は主に低電力または低強度のばく露条件で利用する機器であり<sup>(22)</sup>、各機器個別のばく露条件に基づき、ケース・バイ・ケースで数値シミュレーションによる評価法が利用されていることに留意されたい（3.3.2.3.2 参照）。

国際標準化動向としては、2017 年より IEEE および IEC のデュアルロゴで、6 GHz 以上の無線端末に対する数値シミュレーションによる適合性評価手法の国際規格策定のためのジョイントワーキンググループ (JWG11)<sup>(23)</sup> の設立が承認され、当該技術について国際規格策定に向けた活動の活発化が予測される。

一方で、6GHz 以下の周波数における携帯無線端末からのばく露量の数値電磁界シミュレーションによる評価手法について、IEC および IEEE のデュアルロゴの国際規格（IEC/IEEE 62704-1<sup>(24)</sup>、62704-2<sup>(25)</sup>、62704-3<sup>(26)</sup>）が策定されており、また現在 IEC/IEEE 62704-4 の国際規格化に向け議論が進められている。この数値シミュレーションによる適合性評価のための国際標準規格については、現状、米国、カナダ、EU、韓国等で導入されたとの情報はない。ただし、IEC/IEEE 62704-1 および 62704-2 規格については、現在カナダでの導入について検討されていることが、2017 年の GLORE 会合において報告された。

数値シミュレーションによる評価において、実際の端末を模擬する際にある程度の単純化（モデル化）が避けられないが、これによる実機との不一致性は避けられず、結果として



適切な評価ではない可能性がある。このような要因から、数値シミュレーションの評価手法により取得されたばく露量評価結果から電波ばく露への人体の安全性を担保するには、明らかにすべき課題がいくつか存在する（3.3.2.3.2 参照）。以上の理由により、数値シミュレーションによる適合性評価手法は我が国での導入には至っていない。

従来の測定に基づく適合性評価を基本的な評価方法とするとともに、前述のシミュレーションの課題についての研究動向をふまえ、将来的には適合性評価へのシミュレーション導入の可能性を検討していくことが望ましい。

## 文献

1. 郵政省平成 12 年 11 月 27 日付け報道資料「携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法の策定」  
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/body/protect/4-6.htm>
2. 郵政省平成 18 年 1 月 23 日付け報道資料「人体頭部での電波吸収量の測定方法に関する情報通信審議会からの一部答申-」  
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/body/protect/4-5.htm>
3. 総務省平成 23 年 10 月 28 日付け報道資料「携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法に関する情報通信審議会からの一部答申」  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban16\\_02000025.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban16_02000025.html)
4. 総務省平成 27 年 7 月 17 日付け報道資料「携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法に関する情報通信審議会からの一部答申—人体側頭部に近接して使用する無線機器等に対する比吸収率の測定方法—」  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban14\\_02000299.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000299.html)
5. 郵政省電気通信審議会諮問第 104 号答申, “電波防護指針への適合性を確認するための電波の強度の測定方法及び算出方法,” 1998
6. 郵政省告示第 300 号, “無線設備から発射される電波の強度の算出方法及び測定方法を定める件,” 1999
7. IEC61786-1, “Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 1: Requirements for measuring instruments,” 2013.
8. IEC61786-2, “Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 2: Basic standard for measurements,” 2014.
9. IEC62226-1, “Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 1: General,” 2004.
10. IEC62226-2, “Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 2-1: Exposure to magnetic fields - 2D models,” 2004.
11. IEC62226-3, “Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 3-1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models,” 2014.
12. IEC62233, “Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure,” 2005.
13. IEC62369, “Evaluation of human exposure to electromagnetic fields from short range devices (SRDs) in various applications over the frequency range 0 GHz to 300 GHz - Part 1: Fields produced by devices used for electronic article surveillance, radio frequency identification and similar systems,” 2008.
14. IEC62311, “Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz),” 2007.
15. 電気通信技術審議会諮問第 3 号「国際無線障害特別委員会 (C I S P R) の諸規格について」のうち「ワ

イヤレス電力伝送システムに関する技術的条件」のうち「電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件」(2015年7月)

16. 電気通信技術審議会諮問第3号「国際無線障害特別委員会(CISPR)の諸規格について」のうち「6 MHz帯の周波数を用いた磁界結合型ワイヤレス電力伝送システム及び400 kHz帯の周波数を用いた電界結合型ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件」(2015年1月)
17. IEC TC 106/WG 9 Addressing methods for assessment of Wireless Power Transfer (WPT) related to human exposures to electric, magnetic and electromagnetic fields  
[http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:12853,2](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:12853,2)
18. IEC TC106/WG 8, Addressing methods for assessment of contact current related to human exposures to electric, magnetic and electromagnetic fields  
[http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:12852,2](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:12852,2)
19. IEC TC 106/JWG 12 Measurement Methods to assess the power density in close proximity to the head and body  
[http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:14703258889082:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:21511,25](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:14703258889082:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:21511,25)
20. IEC 62209-1 Ed.2.0 “Measurement procedure for the assessment of specific rate of human exposure to radio frequency from hand-held and body-mounted wireless communication devices- Part 1: Devices used next to the ear (Frequency range of 300 MHz to 6 GHz),” 2016
21. FCC RF Exposure Power Density and Evaluation Test. Report. FCC ID: PD91826ONG, Oct. 2016
22. FCC/OET, “RF Exposure Procedures”, TCB Workshop, April 2016  
<https://transition.fcc.gov/oet/ea/presentations/files/apr16/4.1-RF-Exposure-TCB-Slides-April-2016-KC.pdf>
23. IEC TC 106/JWG 11 Computational Methods to assess the power density in close proximity to the head and body  
[http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:20025,25](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:20025,25)
24. IEC/IEEE 62704-1, “Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 1: General requirements for using the finite difference time-domain (FDTD) method for SAR calculations,” 2017.
25. IEC/IEEE 62704-1, “Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 1: General requirements for using the finite difference time-domain (FDTD) method for SAR calculations,” 2017.
26. IEC/IEEE 62704-3, “Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 3: Specific requirements for using the finite difference time domain (FDTD) method for SAR calculations of mobile phones,” 2017.