

ICNIRP ガイドライン

ICNIRP 声明

時間変化する電界および磁界へのばく露制限に関するガイドライン
(1 Hzから100 kHzまで)

国際非電離放射線防護委員会*

序論

本文書は、電磁界スペクトラム中の低周波領域の電界および磁界にばく露された人体の防護に関するガイドラインを制定するものである。ICNIRP のガイドライン作成の全般的原則は、別文書として公表されている (ICNIRP 2002)。本文書の目的においては、低周波領域は 1 Hz から 100 kHz までの範囲とする。100 kHz より高い領域では、加熱などの影響を考慮する必要があるが、これについては別の ICNIRP ガイドラインでカバーされている。しかしながら、100 kHz から約 10 MHz までの周波数範囲においては、ばく露条件によって、高周波の影響と低周波の神経系への影響の両者からの防護を考える必要がある。したがって、本文書の指針の一部は 10 MHz まで範囲を広げ、この周波数領域での神経系への影響をカバーしている。静磁界に関するガイドラインは、すでに別文書として刊行されている (ICNIRP 2009)。人体の動きにより誘導される電界または 1 Hz までの時間変化する磁界に適用可能なガイドラインは、これとは別に公表される予定である。本文書は、1998 年版ガイドライン (ICNIRP 1998) 中の低周波部分に置き換わるものである。ICNIRP は、現在、高周波部分 (100 kHz 以上) に関するガイドラインの改訂作業を進めている。

目的と範囲

本文書刊行の主目的は、全ての確立された健康への

*ICNIRP事務局：c/o Gunde Ziegelberger, c/o Bundesamt für Strahlenschutz, Ingolstaedter Landstrasse 1, 85764 Oberschleissheim, Germany.
通信又は別刷の連絡先：info@icnirp.org.
(Manuscript accepted 15 June 2010)
0017-9078/10/0
Copyright © 2010 Health Physics Society

有害な影響を防護するため、電界および磁界 (EMF) へのばく露の制限に関するガイドラインを制定することである。

EMF の直接的および間接的影響に関する研究を評価した。直接的影響とは電界および磁界と身体との直接的相互作用から生じるものであり、間接的影響とは身体とは異なる電位にある導体との相互作用を要件とするものである。実験および疫学研究の結果、ばく露評価の基本的クライテリア (判断基準)、ハザード評価の実際に役立つ参考レベルについて議論した。ここに提示されたガイドラインは職業的ばく露、公衆ばく露の両者に適用可能である。

本ガイドラインの制限値は、急性影響に関する確立された証拠に基づいた。この制限値を堅持すれば、低周波 EMF へのばく露による健康への有害な影響から作業員および公衆の一人一人が防護されることを、現在利用可能な知識は示している。慢性的なばく露条件に関する疫学研究および生物学的研究のデータは注意深くレビューされたが、それらが低周波 EMF ばく露と因果的に関連するという説得力のある証拠はないと結論された。

本ガイドラインは、定められた試験条件下での特定機器からの EMF 放射を制限することを目的とした製品性能基準には言及しておらず、また電界、磁界および電磁界の特性を表す物理量の計測技術は取り扱わない。そのような物理量を正確に測定するための計測機器および計測技術についての包括的記述は他の文書に見ることができる (IEC 2004, 2005a; IEEE 1994, 2008)。

本ガイドラインが満たされていても、金属製人工器官、心臓ペースメーカーおよび植え込み型除細動器、人工内耳などの医用機器との電磁干渉、あるいはそれらの機器への影響が必ずしも排除されるわけではない。

ペースメーカーとの電磁干渉は、ここに推奨する参考レベルを下回るレベルでも起きるかも知れない。これらの問題の回避に関する助言は、本文書の範囲外であり、他の文書で得ることができる (IEC 2005b)。

本ガイドラインは定期的に見直され、また低周波の時間変化する電界および磁界のばく露制限の見地から何らかの問題となるような科学的知識の進展に応じて更新される予定である。

物理量と単位

電界は電荷の存在にのみ関連するのに対し、磁界は電荷の物理的運動 (電流) の結果生じる。電界 E は電荷に力を及ぼし、ボルト/メートル (V m^{-1}) で表される。同様に磁界は、電荷が運動している時、および/または磁界が時間的に変化している時に、電荷に物理的な力を及ぼす。電界および磁界は大きささと方向を持つ (すなわちベクトルである)。磁界は2つの表記法、すなわち磁束密度 B (テスラ(T))、または磁界強度 H (アンペア/メートル (A m^{-1})) で表される。この2つの物理量には次式のような関係がある。

$$B = \mu H \quad (1)$$

ここで、 μ は比例定数 (透磁率) である。真空中および空气中、ならびに非磁性体 (生体材料を含む) 中で、 μ の値は $4\pi \times 10^{-7}$ ヘンリー/メートル (H m^{-1}) である。したがって、防護を目的とした磁界の表記には、物理量 B または H のどちらか一方を明確にすればよい。

時間変化する EMF にばく露されると、身体組織に体内電界、体内電流およびエネルギー吸収が生じるが、それらは結合メカニズムと周波数によって決まる。体

表1. 本ガイドラインで用いる物理量とそのSI単位

物理量	記号	単位
導電率	\square	シーメンス/メートル (S m^{-1})
電流	I	アンペア (A)
電流密度	J	アンペア/平方メートル (A m^{-2})
周波数	f	ヘルツ (Hz)
電界強度	E	ボルト/メートル (V m^{-1})
磁界強度	H	アンペア/メートル (A m^{-1})
磁束密度	B	テスラ (T)
透磁率	μ	ヘンリー/メートル (H m^{-1})
誘電率	\square	ファラッド/メートル (F m^{-1})

内電界 E_i と電流密度 J にはオームの法則による次のような関係がある。

$$J = \square E_i \quad (2)$$

ここで、 \square は媒質の導電率である。本ガイドラインで用いられるドシメトリの物理量は次のとおりである。

- 電界 E_i ; および
- 電流 I

本ガイドラインで用いられる EMF およびドシメトリの物理量と単位の概要を表1に示す。

ばく露制限の科学的根拠

このばく露制限ガイドラインは、既刊の科学的文献を徹底的に精査した上で作成された。報告された知見の研究手法、結果、結論の科学的妥当性は、十分に確立されたクライテリアを用いて評価された。信頼できる科学的証拠がある影響のみがばく露制限の根拠として用いられた。

低周波電磁界ばく露の生物学的影響は、国際がん研究機関 (IARC)、ICNIRP、世界保健機関 (WHO) (IARC 2002; ICNIRP 2003a; WHO 2007a) および各国の専門家グループによりレビューされている。それらの刊行物は本ガイドラインの科学的根拠を提供している。

ガイドラインの根拠は、以下に詳述される2つの要素から成る。一つは、低周波の電界へのばく露が引き起こす可能性がある、十分に明らかにされている生物学的反応、すなわち表面電荷作用による、知覚から不快感までの範囲の反応である。もうひとつは、低周波の磁界ばく露されたボランティアにおいて、十分に確立された唯一の作用である、中枢および末梢神経組織刺激と網膜閃光現象誘発である。閃光現象とは視野周辺部に点滅する微弱な光を知覚することである。網膜は中枢神経系 (CNS) の一部であり、誘導電界が CNS 神経回路に一般的に及ぼす影響の適切な、但し、安全側のモデルとみなされる。

科学的データが本来有する不確かさの観点から、ばく露制限ガイドラインの制定においては低減係数が適用される。詳細は ICNIRP 2002 を参照されたい。

電界および磁界と身体との結合メカニズム

人体や動物などの身体は低周波の電界の空間分布を

著しく擾乱する。低い周波数では、身体は良導体であり、擾乱を受けた身体周辺部の電気力線は身体表面に対してほぼ垂直である。ばく露された身体の表面に振動電荷が誘導され、これら電荷は身体内部に電流を生じさせる。人体の低周波の電界ばく露に関するドシメトリの主な特徴は以下の通りである。

- 身体内誘導電界の大きさは外部電界よりかなり小さい。例えば、50–60 Hzでは 5~6 桁小さい大きさである。
- 外部電界を一定とする時、人体が両足で地面と完全に接触している（電氣的に接地している）場合に誘導電界は最も強く、人体が地面から絶縁された（“自由空間”に置かれている）場合に最も弱い。
- 地面と完全に接触した人体に流れる全電流は、人体組織の導電率ではなく、人体の大きさや形状（姿勢を含む）によって決定される。
- 種々の器官と身体組織を流れる誘導電流の分布は、各々の身体組織の導電率によって決定される。
- 間接的作用として、電界中に置かれた導体と身体が接触することにより、身体内に電流が生じることもある。

磁界に関しては、身体組織の透磁率は空気のものと同じであるため、身体組織中の磁界は外部磁界と同じである。人体や動物などの身体は磁界を著しく擾乱することはない。磁界の主な相互作用はファラデーの法則による誘導電界とそれによる組織中の誘導電流である。電界は静磁界中での運動によっても誘導される。人体の低周波の磁界ばく露に関するドシメトリの主な特徴は以下の通りである。

- 磁界の強度と方向を一定とする時、身体が大きければ大きいほど強い電界が誘導される。その理由は、作られる誘導電流ループが大きくなるからである。
- 誘導電界および誘導電流は身体に対する外部磁界の向きによって決まる。通例、磁界の向きが身体の前部から後部の方向と一致する場合、身体内誘導電界は最大になるが、器官によっては、それとは異なる磁界の向きの時に最大値となるものもある。
- 磁界の向きが身体の体軸方向の場合、誘導電界は最も弱い。

- 誘導電界分布は、種々の器官や身体組織の導電率の影響を受ける。

現在の科学的文献から得られる結論

神経行動学：低周波の電界へのばく露は、表面電荷作用による、知覚から不快感までの範囲の、十分に明らかにされている生物学的反応を引き起こす (Reilly 1998, 1999)。ボランティアの中で感受性の高い方から 10%の人における、50–60 Hz の直接知覚の閾値は 2–5 kV m^{-1} の範囲であり、同 5% の人が不快に感じるのは 15–20 kV m^{-1} である。人体から地面への火花放電による痛みは、5 kV m^{-1} 電界中ではボランティアの 7% が感じる一方、10 kV m^{-1} 電界中では約 50% が感じる。帯電物体から接地した人体への火花放電の閾値は物体の大きさに依存するため、個別の評価が必要である。

低周波EMFへのばく露により誘導されるものも含めた電氣的刺激に対する電氣的興奮性の神経および筋組織の応答は長年にわたって十分に確立されてきた (例えば、Reilly 2002; SaundersとJefferys 2007)。神経モデルを用いた理論計算に基づき、ヒトの末梢神経系の有髄神経線維はおよそ6 V m^{-1} (ピーク値) の閾値の最小値を持つと見積もられた (Reilly 1998, 2002)。一方、磁気共鳴 (MR) 装置の切替勾配磁界にばく露中のボランティアに誘導される末梢神経刺激については、均一人体ファントムモデルを用いた計算を基に、その知覚閾値は約2 V m^{-1} 程度の低さかも知れないことが示された (Nyenhuis 他 2001)。このMR研究で得られたデータに基づき、So 他 (2004) は不均一人体モデルの各組織に誘導される電界のより精密な計算を行った。著者らは、刺激は皮膚または皮下脂肪で起きると仮定して、末梢神経刺激の閾値の最小値は4–6 V m^{-1} の間であると見積もった。さらに強い刺激では、不快な感覚、それに続いて痛みが起きる。知覚閾値の中央値を約20%上回る値が、耐え難い刺激の閾値の最小値である (ICNIRP 2004)。中枢神経系 (CNS) の有髄神経線維は、経頭蓋磁気刺激 (TMS) で誘導される電界により刺激される。TMS中の大脳皮質組織に誘導されるパルス電界は非常に強い (>100 V m^{-1} : ピーク値) が、理論計算上の刺激閾値の最小値はかなり低く、~10 V m^{-1} (ピーク値) であるかも知れないことが示されている (Reilly 1998, 2002)。両神経系の神経線維とも、

約1-3 kHz以上では神経細胞膜上に電荷を蓄積するための時間が徐々に短くなるのが原因で、また約10 Hz以下ではゆっくりした脱分極刺激に対して神経が順応¹することが原因で、それぞれ閾値が上昇する。

筋細胞は、一般的に、神経組織より直接的刺激に対する感受性は低い (Reilly 1998)。心筋組織は、その機能不調は潜在的に致死的であるため、特に注意を払って当然である。ただし、心室細動閾値は心筋刺激閾値の 50 倍以上高い (Reilly 2002) が、心周期の中で影響を受けやすい期間に心臓を繰り返し興奮させた場合、この値はかなり低下する。有髄神経線維に比べ筋繊維の時定数は非常に長いため、約120 Hz以上で閾値が上昇する。

直接的な神経や筋の興奮閾値を下回るレベルで、最も強固に確立された誘導電界の影響は、磁気閃光現象、すなわち視野周辺部での点滅する微弱な光の知覚、が低周波の磁界にばく露されたボランティアの網膜に誘発されることである。磁気閃光の磁束密度での閾値の最小値は、20 Hz において5 mT程度であり、これより高い周波数および低い周波数では上昇する。これらの研究において、磁気閃光は誘導電界と網膜の電気的興奮性細胞との相互作用によって生じると考えられている。網膜は前脳から派生して形成された組織であり、CNS組織で一般に起きている過程をよく表現している、但し、安全側のモデルと考えることができる (Attwell 2003)。網膜における誘導電界強度での閾値は、20 Hz においておよそ50と100 mV m⁻¹の間と見積もられ、これより高い周波数および低い周波数では上昇する

(SaundersとJefferys 2007) が、これらの値にはかなりの不確かさがある。

CNSの神経組織は、その空間的加算特性によって、記憶や認知過程のような機能が、生理学的には弱い電界に対しても感受性を示すようになるかも知れない。SaundersとJefferys (2002) は、そのような弱い電界によるCNSのニューロンの電気的分極が、活動しているニューロン群の同期を増強し、周辺の活動していないニューロンの活性化に影響を与え、結局は神経細胞の興奮性と活動状態を変化させるかも知れないことを示唆した。脳組織切片を用いたインビトロ研究の証拠は、

¹ 順応は、例えば、立ち上がり時間の短い台形型または矩形型パルスの低周波成分に対する応答では起きないが、MR装置の切替勾配磁界に見られるような低い繰り返し周波数では起きる。

これらの影響の閾値の最小値は、~100 Hz 以下の周波数で存在し、その大きさは100 mV m⁻¹ の低さであろうということを示唆している (SaundersとJefferys 2007)。

二つの研究グループが、電極²を通して頭部へ直接印加した弱い電界が、ヒトの脳の電気的活動および機能に及ぼす影響を研究した。一つのグループ (Kanai 他 2008) は、大脳皮質視覚野刺激を視覚野活動の特性周波数、すなわち暗条件では 10 Hz 付近、または明条件では 20 Hz 付近で行う場合、皮質性閃光 (見かけ上は網膜に誘発される閃光と似たもの) が誘発され、それより高い周波数または低い周波数では起こらないことを報告した。もう一つのグループ (Pogosyan 他 2009) は、視覚-運動タスクを遂行中のボランティアの皮質運動野に 20 Hz 信号を印加し、タスク遂行中に手の動きが遅くなる変化が、小さいが統計的に有意にみられ、20 Hz の運動野活動周波数との同期の増大と一致することを見出した。これより低い刺激周波数では影響は見られなかった。要約すると、両グループは、網膜閃光閾値より強いレベルの 10-20 Hz の電界が、大脳皮質の視覚野および運動野で進行中のリズム性の電気的活動と相互作用し得ること、視覚処理と運動との協調にわずかに影響することがあることを見出し、十分な強さの 10-20 Hz の EMF に誘導された電界には同様の影響があるかも知れないという示唆をもたらした。

しかし、その他の、低周波EMFにばく露されたボランティアにおける脳の電気的活動、認知、睡眠、気分に関する神経行動学的影響の証拠は遙かに明確さを欠く (Cook 他 2002, 2006; Crasson 2003; ICNIRP 2003a; Barth 他 2010)。一般に、そのような研究は約1-2mTまたはそれ以下のばく露レベル、すなわち、上述の影響を引き起こすために必要なばく露レベルより低いレベルで行われており、せいぜいのところ、微妙で一時的な影響の証拠を示しているに過ぎない。そのような反応を引き出すために必要な条件は、現時点では十分に明確にされていない。

EMF 全般に対して過敏 (ハイパーセンシティブ) であることを訴える人がいる。しかし二重盲検による誘発研究から得られた証拠は、報告された症状は EMF ばく露と関連しないことを示唆している (Rubin 他

² 経頭蓋 AC 刺激 (tACS) には、局所的な皮膚知覚閾値より低いレベルが用いられる。

2005; WHO 2007a)。

低周波の電界および磁界へのばく露が抑うつ症状または自殺の原因となるということについては、一貫性がなく決定的ではない証拠しかない (WHO 2007a)。

動物において、低周波の電界および磁界へのばく露が神経行動学的機能に影響を与える可能性について、いくつかの異なるばく露条件で多くの視点から探索が行われた。確立された影響は殆んどなかった。動物が低周波の電界の存在を感じることについては説得力のある証拠がある。これはおそらく、表面電荷作用の結果、一過性の覚醒または軽度なストレス反応が生じるためと考えられる。可能性のあるその他の電界および磁界依存性の変化については明確にされていない (WHO 2007a)。

したがって、表面電荷の知覚、神経および筋組織の直接刺激、網膜閃光現象の誘発は十分に確立されており、指針の根拠として利用できる。それに加えて、視覚処理と運動との協調などの脳機能が、誘導電界による一過性の影響を受けることがあることを示す間接的な科学的証拠がある。しかしながら、低周波の電界および磁界にばく露されたボランティアでのその他の神経行動学的研究からの証拠は、人体のばく露制限のための根拠とするには十分な信頼性はない。

神経内分泌系：ボランティア研究ならびに居住環境および労働環境の疫学研究の結果は、50 - 60 Hz の電界または磁界へのばく露が神経内分泌系に有害な影響を及ぼさないことを示唆している。このことは特に、松果体から放出されるメラトニンを含む特定のホルモンの血中レベルや、身体の代謝と生理の制御に関与する数多くの下垂体放出ホルモンについてあてはまる。50-60 Hz のばく露が夜間メラトニンレベルに与える影響に関する大半のボランティア実験研究は、可能性のある交絡因子の制御に十分な注意を払った場合、いかなる影響も見出さなかった (WHO 2007a)。

50-60 Hz の電界および磁界がラットの松果体および血清のメラトニンレベルに与える影響を調べた数多くの動物研究の中には、ばく露がメラトニンの夜間抑制を生じさせることを報告したものがあるが、一方、他の研究はそのような報告をしなかった。季節性の繁殖期をもつ動物において、50-60 Hz の電界および磁界のばく露がメラトニンレベルおよびメラトニンに依

存する生殖準備状態に与える影響に関する証拠は大部分が否定的である (ICNIRP 2003a; WHO 2007a)。ヒト以外の霊長類を用いた 50-60 Hz の電界および磁界の慢性ばく露研究では、メラトニンレベルへの確かな影響は見られなかった。

多種の哺乳類の下垂体-副腎系ストレス関連ホルモンに関して一貫した影響は見られていないが、例外として、感知レベルより十分高いレベルの低周波の電界ばく露の開始直後に見られる短期的ストレスがある可能性がある (ICNIRP 2003a; WHO 2007a)。数少ない研究しか実施されていないが、成長ホルモン、代謝活動制御に関与するホルモン、生殖および性発達制御に関連するホルモンなどのホルモンレベルへの影響も同様に、大部分は否定的または一貫性のないものであった。

総括すると、これらのデータは、低周波の電界および/または磁界が、人体の健康に有害に作用するような神経内分泌系への影響を与えるということを示唆していない。

神経変性疾患：低周波の電界および磁界のばく露がいくつかの神経変性疾患に関連するという仮説が提起されている。パーキンソン病および多発性硬化症に関しては研究数が少なく、これらの疾患と低周波ばく露の関連の証拠はない。アルツハイマー病および筋萎縮性側索硬化症 (ALS) に関してはより多くの研究が公表されている。いくつかの研究は、電気関連の職業に従事する人は ALS のリスク上昇があるかも知れないことを示唆している (Kheifets 他 2009)。これまでのところ、この関連を説明する生物学的メカニズムは確立されていないが、このリスク上昇は電氣的ショックなど電気関連の職業に関係する交絡因子が原因であるかも知れない。さらに言えば、より洗練されたばく露評価方法、例えば、職業-ばく露マトリクスなどを用いた研究は、概ね、リスク上昇を観察していない (Kheifets 他 2009)。アルツハイマー病に関しては、結果は一貫性がない。選択バイアスの潜在的可能性が大きな医療機関ベースの研究において最も強い関連が見られたが、人口ベースの研究においても、全てにおいてではないが、いくつかの研究でリスク上昇が観察されている。研究内のサブグループ分析により、このデータには一貫性がないという印象が強められている (Kheifets 他 2009)。利用可能な結果がプールされた

(Garcia 他 2008) が、これには各研究結果の統計的異質性を理由とする反対意見があった。加えて、出版バイアスの証拠もいくつかある。他の職業的ばく露の潜在的交絡の制御は一般的に行われていない。これまでのところ唯一の利用可能な居住環境研究は、長期ばく露後のアルツハイマー病のリスク上昇を示しているが、これは非常に少ない症例数に基づいたものである (Huss 他 2009)。

低周波ばく露とアルツハイマー病との関連を調べた研究は一貫性がない。総括すると、低周波ばく露とアルツハイマー病および ALS との関連の証拠は決定的ではない。

心臓血管系疾患：短期的および長期的ばく露の実験的研究によれば、電氣的ショックは明白な健康ハザードであるが、それ以外の低周波の電界および磁界に関連する心臓血管系への有害な影響が、一般環境または職場で日常的に遭遇するばく露レベルで引き起こされる可能性はないことが示唆されている (WHO 2007a)。文献では心臓血管系における様々な変化が報告されているが、それらの影響の大半は小さなものであり、一つの研究内および複数の研究間において結果に一貫性がなかった (McNamee 他 2009)。心臓血管系疾患の罹患率および死亡率の研究の大半は、ばく露との関連を示していない (Kheifets 他 2007)。ばく露と心臓の自律制御の変化との特異的な関連が存在するかどうかは推論に過ぎない。総括すると、これまでの証拠は、低周波ばく露と心臓血管系疾患との関連を示唆していない。

生殖および発達：全般的にみて、疫学研究はヒトの生殖への有害な影響と母親または父親の低周波ばく露との関連を示していない。母親の磁界ばく露に関連した流産のリスク上昇について限定的な証拠がいくつかあるものの、その報告された関連は他の研究では見られなかったことから、結局、そのような関連についての証拠は乏しい。

いくつかの哺乳類の種において、150 kV m⁻¹までの低周波の電界へのばく露の影響評価が行われており、その中には大きな実験標本サイズを用いた数世代にわたるばく露の研究もあるが、結果は発達への有害な影響はないことを一貫して示している (ICNIRP 2003a;

WHO 2007a)。

哺乳類の低周波の磁界へのばく露は、20 mT までを用いた場合、大きな外形的奇形や内臓または骨格の奇形を生じなかった (Juutilainen 2003, 2005; WHO 2007a)。総括すると、低周波の電界および磁界と発達および生殖への影響との関連の証拠は非常に弱い。

がん：1980年代から1990年代に特に行われたかなりの数の疫学報告は、1998年のばく露ガイドラインの制限値を数桁下回る大きさの50–60 Hz 磁界への長期的ばく露ががんに関連するかも知れないことを示唆した。初期の研究は、磁界と小児がんとの関連に着目していたが、その後の研究は成人のがんも調査した。全体として、当初に観察された、50–60 Hz 磁界と種々のがんとの関連は、その再現性を確かめるためにデザインされた研究において確認されなかった。しかしながら、小児白血病に関しては状況が異なる。最初の研究に続いて行われた研究は、50–60 Hz の居住環境磁界の高い方のばく露区分と小児白血病リスクに弱い関連があるかも知れないことを示唆したが、それが因果関係か否かは不明確であり、その結果は選択バイアス、ある程度の交絡および偶然の組み合わせで説明される可能性がある (WHO 2007a)。2つのプール分析 (Ahlbom 他 2000; Greenland 他 2000) は、0.3–0.4 μ T を超える平均ばく露について過剰リスクがあるかも知れないことを示唆したが、一方、その分析の著者らは、彼らの結果が磁界と小児白血病との因果関係を示すとは解釈できないと強く注意した。

同時に言えることは、生物物理学的メカニズムは何ら同定されておらず、また、動物および細胞研究の実験結果は、50–60 Hz 磁界ばく露が小児白血病の原因であるとの考えを支持していない。

注意すべきは、最も一般的な形態の小児白血病である、急性リンパ芽球性白血病の適切な動物モデルが現在はないことである。ほとんどの研究は齧歯類モデルで50–60 Hz 磁界の白血病またはリンパ腫への影響はないことを報告している (ICNIRP 2003a; WHO 2007a)。齧歯類での大規模長期研究が数件あるが、造血系のがん、乳がん、脳腫瘍および皮膚がんを含むあらゆる種類のがんにおいて一貫した増加を示していない。

ラットの化学物質誘発がんへの50–60 Hz 磁界の影響は、十分な数の研究で調べられている (ICNIRP

2003a; WHO 2007a)。一貫性のない結果が得られたが、それは、特定の亜系統動物の使用など実験プロトコルの違いが全体的あるいは部分的な原因かも知れない。化学物質または放射線で誘発させた白血病またはリンパ腫のモデルへの 50–60 Hz 磁界ばく露の影響に関する大半の研究は否定的であった。肝前がん病変、化学物質で誘発させた皮膚がんおよび脳腫瘍についての研究は、ほとんどが否定的な結果を報告した。

全体として、低周波の磁界ばく露の細胞への影響に関する研究は、50 mT 以下において遺伝毒性の誘発を示していない (Crumpton と Collins 2004; WHO 2007a)。総括すると、小児白血病と商用周波の磁界への長期的ばく露との関連の疫学的証拠とは対照的に、がんの動物実験データ、特に大規模生涯研究から得られたデータは、ほぼ全面的に否定的である。細胞研究のデータは、さらに明快ではないものの、全体として動物研究を支持している。

今回推奨される低周波ガイドラインの論拠

ICNIRP は、この指針において、急性および慢性的な健康影響に対処し、ドシメトリの最近の進展を考慮に入れる。

急性影響：低周波 EMF へのばく露が神経系に与える急性影響は十分確立されたものが多数ある。それは、神経および筋組織の直接刺激、ならびに網膜閃光現象の誘発である。また、間接的な科学的証拠があるものは、視覚処理と運動との協調のような脳機能が誘導電界により一過性の影響を受ける可能性である。これら全ての影響には閾値が存在し、閾値以下では影響は起きないため、体内誘導電界に関する適切な基本制限を満たすことによって影響は回避可能である。

静磁界のばく露制限に関するガイドライン (ICNIRP 2009) に関連して出された推奨にしたがって、職業的環境では、適切な助言と訓練が行われた場合、作業者が網膜閃光現象およびある種の脳機能に起きる可能性のある微小な変化のような一過性の影響を、承知の上で随意的に体験することは理にかなったことであると ICNIRP は考える。なぜなら、そのような影響が長期的または病理的な健康影響を結果的に生じるとは思われないからである。このような職業的環境での身体のある部分へのばく露は、末梢および中枢神経系の有

髓神経刺激を回避するために制限される。ICNIRP は、末梢神経の知覚閾値と痛み閾値の差は比較的小さいことに留意している (上述参照)。両神経系の神経線維とも、約 1–3 kHz 以上では、髄鞘を有する結果として膜時定数が非常に短くなるのが原因で、また約 10 Hz 以下ではゆっくりとした脱分極刺激への順応が原因で、それぞれ閾値が上昇する。

網膜閃光現象を回避すれば、脳機能に起きる可能性のある全ての影響が防護されることになる。網膜閃光閾値は 20 Hz 付近において最小で、それより高い周波数および低い周波数では急激に上昇する。これが末梢および中枢神経刺激閾値と交差する点においては、末梢神経刺激に対する制限値が適用される。訓練を受けておらず、自分のばく露状況に気づかず、ばく露状況を制御する手段を持たない可能性がある作業者を考慮して、一過性ではあるが作業を妨害する潜在的可能性がある影響を避けるために、基本制限は網膜閃光閾値に設定される。公衆については、網膜閃光閾値に低減係数 5 が適用される。

低周波の電界へのばく露は、表面電荷作用による、十分に明らかにされている生物学的反応を引き起こす。そのようなばく露によって身体表面に誘導される表面電荷による痛み作用の防止は、参考レベルを用いて対処する。

慢性影響：低周波電磁界の慢性影響に関する文献は、個々の科学者および専門家委員会によって詳細に評価されてきた。WHO のがん研究機関である IARC (国際がん研究機関) は、2002 年に低周波の磁界の評価を行い、カテゴリ 2 B (「ヒトに対する発がん性があるかもしれない」と説明されるカテゴリ) に分類した。この分類の根拠は小児白血病に関する疫学研究の結果である。

ICNIRP の見解は、低周波の磁界への長期ばく露が小児白血病のリスク上昇と因果的に関連することについての既存の科学的証拠は、ばく露ガイドラインの根拠とするには非常に弱い、ということである。とりわけ、この関係が因果的でなかった場合、ばく露を低減しても健康への利益は何も生まれない。

ドシメトリ：歴史的に磁界モデルでは、身体は均一で等方性の導電率を持つと仮定し、様々な器官や部位

における誘導電流の推定に単純な円形導体ループモデルを採用してきた。時間変化する電界および磁界による誘導電界は、単純な均一楕円体モデルを用いて計算された。近年、解剖学および電気学的に精密な不均一モデル (Xi と Stuchly 1994; Dimbylow 2005, 2006; Bahr 他 2007) に基づく、より実際に近い計算の結果、電界および磁界へのばく露によって身体内に生じる電界について、はるかに正しい知識が得られるようになった。

4 mm以下のボクセルサイズを用いた高解像度の誘導電界計算から、本ガイドラインの目的にとって最も有用なドシメトリの結果が得られた (Dimbylow 2005; Bahr 他 2007; Hirata 他 2009; Nagaoka 他 2004)。外部電磁界が均一で、向きが体軸に平行 (電界の場合) または垂直 (磁界の場合) の時、身体内に誘導される電界は最大になる。計算によれば、50 Hz磁界により脳組織に誘導される電界の局所的ピーク値の最大値は、外部磁界1 mT当たりおよそ23–33 mV m^{-1} で、磁界の向きと身体モデルに依存する。現時点で利用可能な末梢神経組織に対する変換係数はない。したがって、末梢神経末端がある皮膚が、ワーストケースの標的組織として選ばれた。50 Hz磁界により皮膚に誘導される電界は、外部磁界1 mT当たりおよそ20–60 mV m^{-1} である。50 Hz電界により脳組織に誘導される電界の局所的ピーク値の最大値は、外部電界1 kV m^{-1} 当たりおよそ1.7–2.6 mV m^{-1} であり、皮膚においては、外部電界1 kV m^{-1} 当たりおよそ12–33 mV m^{-1} である。

参考レベルの導出における身体パラメータの影響や現在利用可能なドシメトリにおける不確かさを考慮して、ICNIRPは、基本制限から参考レベルを導出する際に、安全側に見積もる方法を用いている。

EMF ばく露制限に関するガイドライン

職業的ばく露と公衆ばく露に対して別々の指針が与えられる。本ガイドラインにおける職業的ばく露は、正規の、または割り当てられた業務活動遂行の結果として、一般的には既知の条件下で、職場において1 Hzから10 MHzの時間変化する電界および磁界へのばく露される成人に適用される。対照的に、公衆という用語は、全ての年齢の、様々な健康状態の各個人に適用される。このような個人の集団では個々の感受性の多様

性は大きくなると考えられる。多くの場合、公衆の人たちは、自分のEMFへのばく露に気づいていない。職業的にばく露される作業者に対するものより厳しいばく露制限が公衆に対して採用されるのは、このような考慮が根拠となっている。

科学における不確かさへの対処

全ての科学的データとその解釈はある程度の不確かさから免れ得ない。不確かさの例には、研究方法の違い、個人間、動物種間、系統間の差異がある。知識におけるそのような不確かさは低減係数を用いることによって補正される。

しかしながら、不確かさを生む原因の全てに関する情報が不十分なため、全ての周波数範囲と全ての変調パターンにわたって低減係数を設定するための確固たる根拠は与えられない。したがって、研究データベースの解釈や低減係数の決定において、どの程度までの用心深さが適用されるかは極めて専門的判断の問題である。

基本制限と参考レベル

確立された健康影響と直接的に関連付けられる物理量 (1つまたは複数) に基づくばく露の制限値を基本制限と呼ぶ。本ガイドラインにおいてEMFばく露の基本制限の規定に用いる物理量は身体内電界強度 E_i である。これこそが神経細胞やその他の電気的感受性細胞に作用する電界であるからである。

身体内電界強度は評価が困難である。そこで、実用的なばく露評価のため、ばく露の参考レベルが与えられる。大半の参考レベルは測定および/または計算を用いて関連する基本制限から導き出されるが、いくつかの参考レベルはEMFばく露の知覚 (電界) および間接的で有害な影響に対処するものである。導き出された物理量は、電界強度 (E)、磁界強度 (H)、磁束密度 (B)、および四肢電流 (I_L) である。間接的影響の物理量は接触電流 (I_C) である。どのようなばく露状況においても、いずれかの物理量の測定値または計算値を適切な参考レベルと比較することが可能である。参考レベルを満たせば、関連する基本制限を満たすことは保証される。もし測定値または計算値が参考レベルを超過するとしても、そのことが必ずしも基本制限を超過することにはならない。しかしながら、参考レ

ベルを超過する時には必ず、関連する基本制限を満たすか否かを検証し、追加的防護策が必要か否かを決定することが必要である。

基本制限

本文書刊行の主な目的は、健康への有害な影響を防護するためのEMFばく露制限のためのガイドラインを制定することである。上述のように、リスクは神経系の一過性の反応から生じる。これには末梢神経系（PNS）および中枢神経系（CNS）の刺激、網膜閃光現象の誘発、脳機能のある側面への影響の可能性も含まれる。

上述の考察から、網膜閃光現象の誘発を回避するために、10 Hz–25Hzの周波数範囲において、職業的ばく露は、頭部のCNS組織（すなわち、脳と網膜）に50 mV m⁻¹以下の電界強度を誘導するような電界および磁界に制限される。これらの制限値により、脳機能に対して起きる可能性のある一過性の影響は全て防護するはずである。これらの影響は健康への有害な影響とは見なされていない。しかしながら、一部の職業的環境において作業を妨害するかも知れないので回避するのがよいとICNIRPは認識するが、追加的な低減係数は適用されない。これより高い周波数および低い周波数では、網膜閃光閾値は急激に上昇し、末梢および中枢の有髄神経刺激の閾値と400 Hzで交差する。400 Hzより高い周波数では、末梢神経刺激の制限値が人体の全ての部位に適用される。

管理された環境でのばく露は、作業者はそのようなばく露により起きる可能性のある一過性の影響について知識を与えられているので、末梢および中枢の有髄神経刺激を回避するために、頭部および体部に800 mV m⁻¹以下の電界強度を誘導するような電界および磁界に制限される。これは、上述の不確かさを考慮するために、刺激閾値4 V m⁻¹に対して低減係数 5 を適用したものである。3 kHz以上ではこの制限値は上昇する。

公衆については、低減係数 5 を適用し、頭部のCNS組織に対し、10 Hz–25Hzの周波数範囲で10 mV m⁻¹の基本制限が与えられる。これより高い周波数および低い周波数で基本制限は上昇する。1000 Hzにおいて、末梢および中枢の有髄神経刺激を防護する基本制限値と交差する。ここで低減係数 10 を適用し、400 mV m⁻¹

の基本制限値が得られる。この制限値は人体の全ての部位の組織に適用される。

基本制限を表2および図1に示す。

時間平均

ICNIRPは、過渡成分、または非常に短時間のピークを持つものを含め、電界または磁界により誘導される身体内電界に対する制限値は、時間平均されない瞬時値とみなすことを推奨する（非正弦波のばく露に関する章も参照のこと）。

誘導電界の空間平均

誘導電界の有害な影響を神経細胞および神経ネットワークに限定して考える場合、局所的な誘導電界を平均すべき距離や体積を明確にすることが重要である。正当な生物学的基礎と計算手法上の制約に関する要求を満足するための実際的な折衷案として、ICNIRPは、切れ目なく連続する小さな2×2×2 mm³の体積組織

表2. 時間変化する電界および磁界への人体のばく露に対する基本制限

ばく露特性	周波数範囲	体内電界 (V m ⁻¹)
職業的ばく露		
頭部のCNS組織	1 Hz– 10 Hz	0.5 / f
	10 Hz– 25 Hz	0.05
	25 Hz– 400 Hz	2×10 ⁻³ f
	400 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz– 10 MHz	2.7×10 ⁻⁴ f
頭部と体部の全組織	1 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz– 10 MHz	2.7×10 ⁻⁴ f
公衆ばく露		
頭部のCNS組織	1 Hz– 10 Hz	0.1 / f
	10 Hz– 25 Hz	0.01
	25 Hz– 1000 Hz	4×10 ⁻⁴ f
	1000 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz– 10 MHz	1.35×10 ⁻⁴ f
頭部と体部の全組織	1 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz– 10 MHz	1.35×10 ⁻⁴ f

注:

- f は周波数 (Hz)。
- 全ての値は実効値。
- 100 kHz より高い周波数範囲では、RF に特有な参考レベルを追加的に考慮する必要がある。

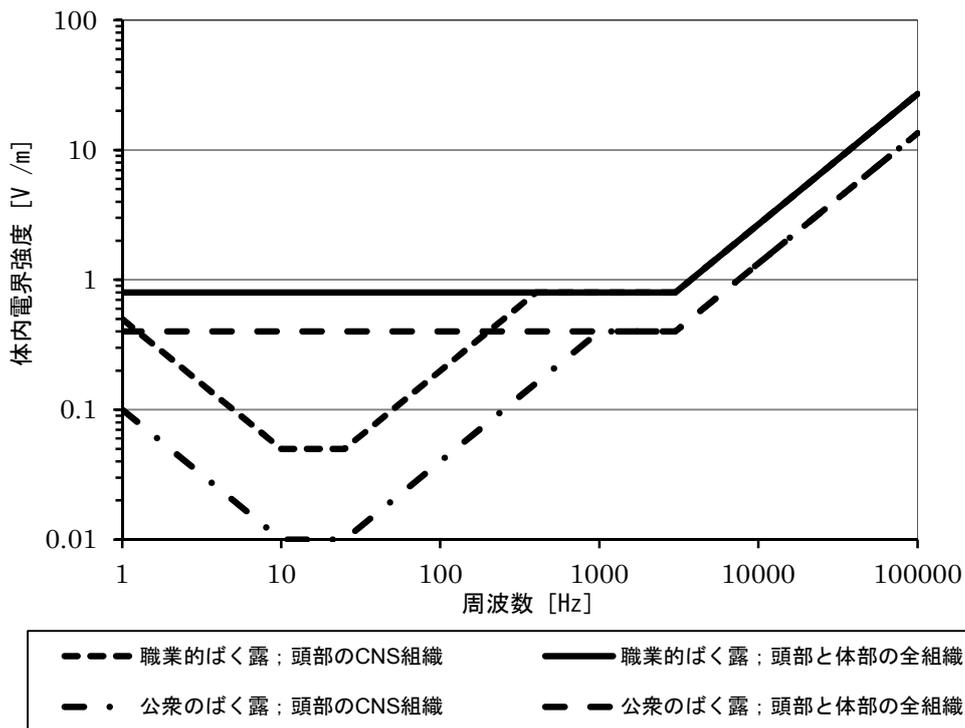


図1. CNSおよびPNSへの影響に係わる体内電界強度に基づく公衆ばく露と職業的ばく露に対する基本制限
(訳者注：原文の凡例では、単にCNS、PNSと表記されている箇所を、表2に対応させて、それぞれ、頭部のCNS組織、頭部と体部の全組織と訳した。)

における電界のベクトル平均として誘導電界を決定することを推奨する。ある特定の身体組織での電界の99パーセンタイル値は基本制限との比較に適切な値である。

基本的には、ニューロンおよびその他の電気興奮性細胞への電界影響は局所的影響であるが、その体積や距離の最小値は電気生理学的要因および実用的ドシメトリの要因の制約によって決まる。ニューロンおよび神経ネットワークの機能を妨害する主な物理的要因は細胞膜に誘導された電界が生み出す電位差である。単離した神経線維を電界方向に沿って置いた場合（最大の結合）、この電位差は膜の誘導電界を電気緊張の距離で積分したものである。無脊椎動物では、この距離は2から7mmの範囲にばらつく(Reilly 1998; ReillyとDiamant 2003)。有髄神経細胞では、ランヴィエの絞輪間の最大距離である約2mmをこの積分距離と仮定できる。これらの距離は単離した神経細胞の刺激閾値を考えるとときに用いられる。網膜閃光のように刺激閾値より低い電界での影響の場合には、多数の相互作用し合う神経細胞群の集成的な「ネットワーク」

効果を考慮に入れなければならない。この影響の閾値はシナプスに誘導された小さな電位差の加算や積分によるものであるため、単離した神経細胞の刺激閾値よりもかなり低い。誘導電界の平均化体積は、最小でも1000個の相互作用し合う神経細胞群に基づくよう示唆されており、その体積はほとんどの神経組織で約1mm³である(Jefferys 1994)。したがって、生物学的に合理的な平均化距離は、1から7mmまでの範囲となる可能性がある。実用的見地からは、ミリメートルレベルの解像度での誘導電界の計算において満足できる精度を得ることは困難であり、そのような測定はなお困難である。ある身体組織の1つのボクセル内の最大値は、立方体ボクセルの角部分の階段近似誤差を大きく受けやすい。より安定したピーク近似値を得るための解決方法は、ある身体組織での誘導電界の99パーセンタイル値をピーク値として選択することである。しかし、ピーク値が解像度に依存することから、これは生物学的観点からはやや恣意的な選択である。空間平均のための別の選択肢は、局所的電界を小さな体積中または線分に沿っての平均値と定

義することである (ReillyとDiamant 2003)。

一般的ルールとして、平均化体積は組織の境界を越えて拡張しないとされているが、網膜や皮膚のように、平均化立方体で全体を覆うには薄すぎるものは例外である。皮膚の場合、同様の $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ の平均化体積を仮定することができ、その場合は皮下組織に拡張してもよい。網膜の場合、平均化体積は網膜の前後の組織に拡張してもよい。

参考レベル

参考レベルは、公表されたデータを用いた数学的モデル化により、基本制限から導き出される (Dimbylow 2005、2006)。それらの参考レベル値は、ばく露される人体と電界および磁界との結合が最大になる条件のもとで計算されているので、最大限の防護が与えられることになる。周波数依存性とドシメトリの不確かさが考慮に入れられた。ここに提示された参考レベルは、二つの別個の影響、すなわち、脳内誘導電界 (CNSへの影響に関連する) とCNS以外の身体の全部位の組織における誘導電界 (PNSへの影響に関連する) を考慮し、これらの組み合わせに近づけた値である (すなわち、50 Hzでは、CNSへの影響についての基本制限値を外部磁界ばく露値に換算する係数は外部磁界1 T当たり 33 V m^{-1} であり、PNSへの影響については外部磁界1 T当たり 60 V m^{-1} である。ドシメトリの不確かさを見込んで、これらの計算値に対して追加的な低減係数 3 が適用された。)

さらに、25 Hz までの職業的ばく露に対する電界の参考レベルは、ほとんどの実際的な条件下での接触電流による刺激を防止するための十分なマージンを含んでいる。25 Hz-10 MHz間については、参考レベルは誘導電界のみの基本制限に基づいており、したがってこの周波数帯において起こり得る全ての条件下での接触電流による刺激を防止するのに十分なマージンは与えられていないかも知れない。

10 MHz までの公衆ばく露に対する電界の参考レベルは、ばく露された人の90%以上に対して有害な間接的影響 (電撃と熱傷) を防止する。さらに、50 Hz までの公衆ばく露に対する電界の参考レベルは、大半の人において知覚などの表面電荷作用を防止するための十分なマージンを含んでいる。

表3および4に、職業的ばく露および公衆ばく露に対する参考レベルをそれぞれ要約する。図2および3に、参考レベルを図示する。参考レベルは、人体の占める空間の範囲で一様 (均一) な電界および磁界によるばく露との仮定を置いている。

外部電界および外部磁界の空間平均

参考レベルは、身体が占める空間における電界または磁界の変動が比較的小さいとするばく露条件のもとに決定されている。しかしながら、多くの場合、

表3. 時間変化する電界および磁界への職業的ばく露に対する参考レベル (無擾乱、実効値)

周波数範囲	電界強度 E (kV m^{-1})	磁界強度 H (A m^{-1})	磁束密度 B (T)
1 Hz-8 Hz	20	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$0.2 / f^2$
8 Hz-25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^{-2} / f$
25 Hz-300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz-3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2.4 \times 10^5 / f$	$0.3 / f$
3 kHz-10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

注:

- f は周波数 (Hz)。
- 非正弦波のばく露および複数の周波数のばく露に関する助言は後述の別節を参照。
- 特に強電界中の間接的影響の防止については「防護対策」の章を参照。
- 100 kHzより高い周波数範囲では、RFに特有な参考レベルを追加的に考慮する必要がある。

表4. 時間変化する電界および磁界への公衆ばく露に対する参考レベル (無擾乱、実効値)

周波数範囲	電界強度 E (kV m^{-1})	磁界強度 H (A m^{-1})	磁束密度 B (T)
1 Hz-8 Hz	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 Hz-25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25 Hz-50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz-400 Hz	$2.5 \times 10^2 / f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz-3 kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz-10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

注:

- f は周波数 (Hz)。
- 非正弦波のばく露および複数の周波数のばく露に関する助言は後述の別節を参照。
- 100 kHzより高い周波数範囲では、RFに特有な参考レベルを追加的に考慮する必要がある。

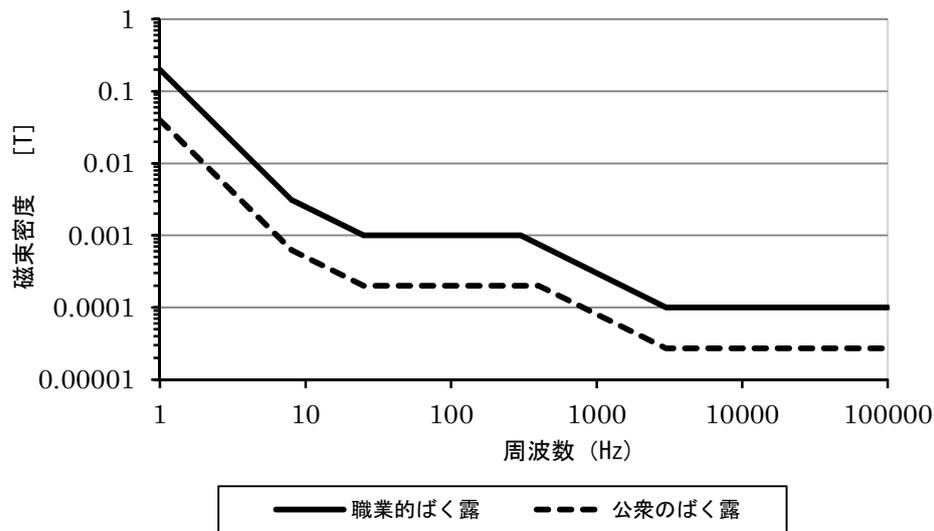


図2 時間変化する磁界へのばく露に対する参考レベル (表3、4を参照)

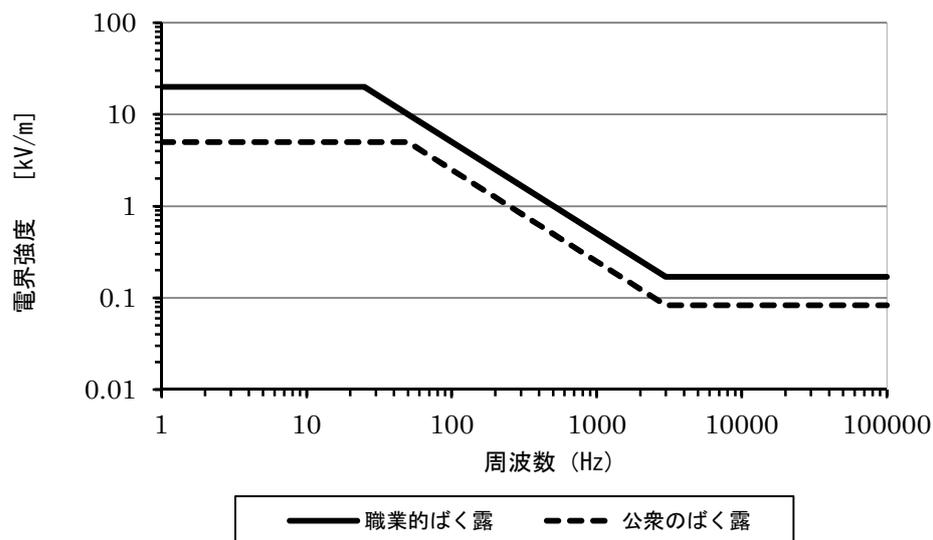


図3 時間変化する電界へのばく露に対する参考レベル (表3、4を参照)

電磁界発生源までの距離は小さいため、電磁界の分布は非一様であるか、身体の小さな部分に局在する。このような場合、身体が占める空間の位置における電界強度または磁界強度の最大値を測定することは、常に、かなり控えめだが安全なばく露評価となる。

身体から数センチメートルの距離にある非常に局所的な発生源については、ばく露評価のための唯一の現実的な選択肢は、個別にドシメトリ法で誘導電界を決定することである。距離が20cmを超えると、電磁界分布の局在性は少なくなるが、非一様性は残

る。そのような場合には、身体に沿うかまたは身体の一部についての空間平均を決定することが可能である (Stuchly と Dawson 2002; Jokela 2007)。空間平均値は参考レベルを上回らないようにする。局所的ばく露は参考レベルを上回ってもよいが、基本制限を上回ってはならないとの重要な規定が付けられる。空間平均が適用可能なばく露状況に関する詳しい指針を与えるのは標準化機関の職務である。この指針は、十分に確立されたドシメトリに基づいて行われなければならない。また、特定のタイプの非一様ば

く露に関しては、標準化機関が新しい参考レベルを導出してもよい。

電界と磁界へのばく露の加算性

外部電界および外部磁界がそれぞれに誘導した電界成分は組織中でベクトル的に加算される。外部電界と外部磁界を基にしたばく露の解析において、安全側に見積もる方法は、電気的な誘導電界成分と磁気的な誘導電界成分が、同位相で、同位置で最大値になると仮定することであろう。このことは、外部電界と外部磁界へのばく露は加算的であることを意味するであろう (Cech 他 2008)。しかし、電気的な誘導電界と磁気的な誘導電界の分布は大きく異なることを考えると、そのような状況は非常に稀であると思われる。

接触電流の参考レベル

接触電流に対しては電撃および熱傷のハザードを回避するための注意を払わなければならない。そのような接触電流に対する参考レベルは10 MHz まで与えられる。点接触の参考レベルを表5に示す。生物学的反応を引き起こす接触電流の子供での閾値は、成人男性の閾値の約1/2であるため、公衆ばく露に対する接触電流の参考レベルは、低減係数 2 を用いて、職業的ばく露に対する値より低く設定される。注意すべきは、参考レベルは、知覚の防止ではなく、痛みのある電撃の回避を意図していることである。接触電流の知覚は、本質的には傷害性はないが、不快感として考慮される。過大な接触電流の防止は、技術的手段により可能である。

表5. 導体からの時間変化する接触電流の参考レベル

ばく露特性	周波数範囲	最大接触電流 (mA)
職業的ばく露	2.5 kHzまで	1.0
	2.5 kHz-100 kHz	0.4 f
	100 kHz-10 MHz	40
公衆ばく露	2.5 kHzまで	0.5
	2.5 kHz-100 kHz	0.2 f
	100 kHz-10 MHz	20

注: f は、kHzで表わされる周波数。

複数の周波数の電界および磁界への同時ばく露

異なる周波数の電界および磁界への同時ばく露の状況において、各ばく露は影響について加算的であるかどうかの判断は重要である。実際のなばく露状況下で、下記の諸式が関連する複数の周波数に適用される。10 MHz までの周波数が係わる電気的刺激については、体内電界は次式にしたがって加算される。

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_{i,j}}{E_{L,j}} \leq 1 \quad (3)$$

ここで、 $E_{L,j}$ は、周波数 j での誘導された体内電界強度。 $E_{L,j}$ は、表2で与えられる、周波数 j での誘導電界強度の基本制限。

基本制限の実際的適用のために、電界および磁界強度の参考レベルに関する次のクライテリアが適用される。

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_j}{E_{R,j}} \leq 1 \quad (4)$$

および

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1 \quad (5)$$

ここで、

E_j = 周波数 j での電界強度。

$E_{R,j}$ = 表3、4で与えられる、周波数 j での電界強度の参考レベル。

H_j = 周波数 j での磁界強度。

$H_{R,j}$ = 表3、4で与えられる、周波数 j での磁界強度の参考レベル。

四肢電流および接触電流に関しては、それぞれ、次の要求が適用される。

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{I_j}{I_{L,j}} \leq 1 \quad (6)$$

ここで、 I_j は、周波数 j での接触電流成分。 $I_{L,j}$ は、表5で与えられる、周波数 j での接触電流の参考レベル。

非正弦波へのばく露

100 kHz 以下の低周波では、電界および、特に磁

界は、ほとんどの場合、幅広い周波数帯に分布する高調波成分によって歪められている。その結果、電界および磁界の波形は複雑な(しばしばパルス状の)パターンを示す。そのような電界および磁界を、例えばフーリエ変換法 (FT) を用いて、離散スペクトル成分に分解し、前述の複数周波数に対するルールを適用することが常に可能である。この手法は、スペクトル成分は同位相で加算される、すなわち、全ての最大値は同時点に起きるという仮定に基づいており、その結果、一個の鋭いピーク値が生じる。この仮定が現実的となるのは、スペクトル成分の数が限られていて、それらの位相がコヒーレントでない、すなわちランダムな場合である。位相がコヒーレントに固定されている場合には、この仮定は必要以上に安全側の見積もりとなる。さらに、FT スペクトル解析におけるサンプリングや窓関数によってスプリアス周波数が発生するために、ばく露比の線形総和が人為的に増加する可能性がある。

スペクトル法に代わる選択肢として、基本制限または参考レベルに関連するフィルタ関数を用いて、外部電界および外部磁界、誘導電界ならびに誘導電流に重み付けをする方法がある (ICNIRP 2003; Jokela 2000)。高調波成分からなる広帯域の電界および磁界の場合、フィルタリングによって課せられる制限は数学的に次のように表わされる。

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{EL_i} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \right| \leq 1 \quad (7)$$

ここで、 t は時間； EL_i は第 i 高調波周波数 f_i でのばく露制限値； A_i 、 θ_i 、および φ_i は、第 i 高調波周波数における電界および磁界の振幅、位相角、およびフィルタの位相角である。位相角を除き、この方程式は加算式(3)、(4)、(5)と同様である。重み付けの実際的方法(重み付けピーク値ばく露の決定)に関する詳しいガイダンスは付属書(参考)に記載されている。

防護対策

ICNIRP は、本ガイドラインのすべての事項を満たすことによって電界および磁界へばく露された人体の防護が確保されることを特に言及する。

作業者の防護対策には、工学的管理、制度的管理、

個人用防護プログラムがある。職場でのばく露が結果的に基本制限を超える場合、適切な防護対策を実行しなければならない。第一歩として、可能な時はいつでも、機器からの電界および磁界の放射を許容レベルまで低減する工学的管理を実施するのがよい。それには、適切な安全設計と、必要に応じてインターロックまたはそれと同等の健康防護の機械的仕組みの使用が含まれる。

立ち入り制限、聴覚的および視覚的警報の使用などの制度的管理を工学的管理と併せて用いるのがよい。防護衣などの個人用防護対策は、特定の状況では有用であるが、作業者の安全を確保する最後の手段とみなすのがよい。可能な時はいつでも、工学的管理と制度的管理を優先する。さらに、電撃からの防護のために絶縁手袋のような物を使用する場合でも、絶縁材は間接的影響に対してのみの防護であるので、基本制限を超えてはならない。

公衆の参考レベルを超える可能性がある時はいつでも、防護衣やその他の個人用防護対策を除いて、同様の対策を公衆に適用することができる。また、次のことを防止する規則を設け、実施することも重要である。

- 医用電子機器および装置(心臓ペースメーカを含む)との電磁干渉
- 電気式爆発装置(起爆装置)の起爆
- 誘導電界、接触電流または火花放電によって生じた火花による可燃性物質の発火の結果として生じるによる火災および爆発

長期的影響の可能性に関する考察

上述の通り、低い強度(0.3–0.4 μT 以上)の商用周波の磁界への毎日の慢性的ばく露が小児白血病のリスク上昇と関連していることを、疫学研究は一貫して見出している。IARC は、そのような磁界を「発がん性があるかもしれない」と分類した。しかしながら、磁界と小児白血病の因果関係は確立されておらず、また、その他のいかなる長期的影響も確立されていない。確立された因果関係がないことは、基本制限においてこの影響を扱うことはできないことを意味する。しかしながら、プレコーショナリ対策に関する考察を含むリスク管理上の助言が、WHO

(WHO 2007a、b) および他の組織から与えられている。

謝辞 — ICNIRP は、国際放射線防護学会、世界保健機関、国際労働機関、欧州委員会、ドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省からの支援に深く感謝いたします。また、ICNIRP は、公開のオンライン協議を通して貢献して下さった ICNIRP 協議専門家の方々およびレビューワの方々全員に感謝します。

本ガイドラインの準備期間の国際非電離放射線防護委員会および ICNIRP ELF タスクグループの構成は以下の通りであった。

ICNIRP

P. Vecchia 委員長 (イタリア)
M. Hietanen 副委員長 -2008年まで (フィンランド)
R. Matthes 副委員長 -2008年から (ドイツ)
A. Ahlbom -2008年まで (スウェーデン)
E. Breitbart -2008年まで (ドイツ)
F. R. De Gruijl -2008年まで (オランダ)
M. Feychting (スウェーデン)
A. Green (オーストラリア)
K. Jokela (フィンランド)
J. Lin (米国)
R. Saunders (英国)
K. Schulmeister (オーストリア)
P. Söderberg (スウェーデン)
B. Stuck (米国)
A. Swerdlow (英国)
M. Taki -2008年まで (日本)
B. Veyret (フランス)
G. Ziegelberger, 科学事務長 (オーストリア)
M.H. Repacholi, 名誉委員長 (スイス)

ICNIRP ELF タスクグループ

R. Matthesグループ委員長 (ドイツ)
A. Ahlbom (スウェーデン)
K. Jokela (フィンランド)
C. Roy (オーストラリア)
R. Saunders (英国)

別添2 ICNIRPガイドライン（2010）の根拠の検証

1. ガイドラインの根拠の検証

ICNIRP ガイドライン(2010)は、急性および慢性的な健康影響に関する研究を詳細に精査し、さらに、ばく露量評価（ドシメトリ）の研究を考慮し、ガイドラインを策定するための根拠を次の通り報告している。

低周波電磁界の慢性影響に関しては、WHO/IARC（世界保健機関／国際がん研究機関）が低周波磁界の発がん性をカテゴリ－2B（ヒトに対する発がん性があるかもしれない）と分類している。しかし、ICNIRP はこの発がん性評価の根拠となった低周波磁界が小児白血病のリスク上昇と因果的に関連することの科学的証拠は非常に弱く、ガイドライン策定の根拠とはならないと結論している。

低周波電磁界の急性影響に関しては、神経及び筋組織の刺激、ならびに網膜閃光現象の誘発が十分に確立された影響である。また、視覚処理と運動の協調のような脳機能への栄光についての間接的な科学的証拠が示されている。これらの影響には全て閾値が存在し、閾値以下では影響が生じない。

網膜は中枢神経である脳から派生して形成された組織であるため、誘導電界と網膜の電気的興奮性細胞との相互作用である網膜閃光現象は中枢神経組織への影響を測る安全側のモデルと考えることができる。このため、末梢における有髄神経刺激と網膜閃光現象を回避するための制限が必要と結論している。一方で、管理された環境では、作業者が網膜閃光現象やある種の脳機能に生じる微小な効果を承知の上で随意的に体験することを許容している。なぜなら、そのような影響が長期的または病理的な健康影響を引き起こすとはないと考えられるからとしている。

ガイドライン策定のために考慮された科学的データには不確かさが含まれていることも考慮された。不確かさの例には、研究方法の違い、個人間、動物種間、系統間の再がある。これらの不確かさは、同定された健康影響の閾値に低減係数を考慮して、ガイドラインを決定することで、補償される。

しかしながら、不確かさを生む原因の全てに関する情報は不十分のため、低減係数を設定するための確固たる根拠は与えられていない。したがって、低減係数の決定において、どの程度までの用心深さが適用されるかは極めて専門的判断の問題である。

ガイドライン策定の根拠となる刺激作用を引き起こす人体内部の誘導電界強度と人体に入射する電磁界強度との関係は、数ミリ以下の微細なブロックから構成される数値人体モデルを用いた数値シミュレーションに基づいている。ICNIRP はこれらの数値シミュレーションの不確かさを考慮して、基本制限から参考レベルを導出する際に、不可的な低減係数を加えている。

2. 電波防護指針との比較

2. 1 基礎指針（電波防護指針）と基本制限（ICNIRP ガイドライン）の比較

ICNIRP ガイドライン(2010)は、電波防護指針の周波数範囲と重なる 10kHz から 10 MHz においては、末梢の有髄神経への刺激の回避を根拠としており、その刺激の閾値（人体内誘導電界強度）は極低周波領域では 4 V/m であり、3 kHz 以上では周波数に比例して閾値が上昇する（ $1.3 \times 10^{-3} f$ [V/m]（ f は周波数[Hz]））としている。一方、電波防護指針では、神経・筋細胞の興奮の閾値（人体内誘導電流密度）を $0.35 \times 10^{-4} f$ [mA/cm²]としている。この閾値を ICNIRP ガイドライン（2010）と同じ人体内誘導電界強度に換算する（生体組織の導電率を 0.2 [S/m]と想定）と、 $1.9 \times 10^{-3} f$ [V/m]となり、根拠となる刺激の閾値はほぼ同程度（1.3 倍）である。

また、ICNIRP ガイドライン（2010）では、刺激の閾値に対して、職業的ばく露では低減係数 5 を適用することで、 $2.7 \times 10^{-4} f$ [V/m]を基本制限値とし、公衆ばく露では低減係数 10 を適用することで、 $1.35 \times 10^{-4} f$ [V/m]を基本制限値としている。一方、電波防護指針では、通常体表付近で最大となる電流密度を閾値以下になるようにすれば、身体内部の重要な組織（心臓等）は十分に防護されるとし、不可的な安全率を考慮せず、閾値そのもの（ $0.35 \times 10^{-4} f$ [mA/cm²]）を基礎指針値としている。すなわち、ICNIRP ガイドライン（2010）と同じ人体内誘導電界強度に換算する（生体組織の導電率を 0.2 [S/m]と想定）と、 $1.9 \times 10^{-3} f$ [V/m]となり、6.5 倍の差となる。したがって、基礎指針値と基本制限の違いは、安全率（または低減係数）の考え方の違いによるものといえる。

以上より、電波防護指針の基礎指針を ICNIRP ガイドライン（2010）の基本制限に置き換えることで、身体の深部だけでなく体表の刺激も十分に防護されるため、より安全な電波利用が可能になると考えられる。

2. 2 電磁界強度指針（電波防護指針）と参考レベル（ICNIRP ガイドライン）の比較

2. 2. 1 入射電界強度

ICNIRP ガイドライン（2010）では、10 kHz から 10 MHz における電界強度の参考レベルを 0.17 [kV/m]（職業的ばく露）と 0.083 [kV/m]（公衆ばく露）としている。なお、ICNIRP ガイドライン（2010）では、公衆ばく露の参考レベルは、ばく露された人々の 90%以上に対して有害な間接的影響（電撃と熱傷）を防止すると記述している。一方で、電波防護指針では、10 kHz から 100 kHz における刺激作用に基づく電界強度指針値を 2 [kV/m]（管理環境）と 0.894 [kV/m]（一般環境）としている。ただし、電波防護指針では接触ハザードが防止されていない場合には、0.137 [kV/m]（管理環境）と 0.0614 [kV/m]以下にすると注意事項を設けており、ICNIRP ガイドライン（2010）の参考レベルとほぼ同等（管理環境で 1.2 倍、一般環境で 0.7 倍）である。

したがって、電波防護指針の接触ハザードに関する注意事項と ICNIRP ガイドライン（2010）の電界強度に関する参考レベルは同等と考えられ、ICNIRP ガイドラインを採

用することで、最新のばく露量評価研究に基づき、接触ハザードの防止も考慮したより安全な電波利用が可能になると考えられる。ただし、ICNIRP ガイドライン（2010）では電界だけでなく磁界により接触ハザードが生じる可能性もあるとして、接触電流に関する参考レベルも示していることにも注意する必要がある。

2. 2. 2 入射磁界強度

ICNIRP ガイドライン（2010）では、10 kHz から 10 MHz における磁界強度の参考レベルを 80 [A/m]（職業的ばく露）と 21 [A/m]（公衆ばく露）としている。一方で、電波防護指針では、10 kHz から 100 kHz における刺激作用に基づく磁界強度指針値を 163 [A/m]（管理環境）と 72.8 [A/m]（一般環境）としており、ICNIRP ガイドライン（2010）との差は 2.0 倍（管理環境）と 3.5 倍（一般環境）となる。これらの差は前述の基礎指針と基本制限の差異に加え、基礎指針から電磁界強度を求める（または基本制限から参考レベルを求める）ばく露評価モデルの違いと、管理環境（職業的ばく露）に対して付加されている一般環境（公衆ばく露）の安全率（低減係数）の違いが含まれている。これらの差異の一部は、基礎指針と基本制限の差異を相殺するため、結果的に磁界強度指針と参考レベルの差異は減少している。

以上より、電波防護指針の磁界強度指針と ICNIRP ガイドライン（2010）の磁界強度の参考レベルは、本質的な根拠は同等であるものの、安全率やばく露評価モデルの違いにより 2.0~3.5 倍の差異が生じている。この差異は、ICNIRP ガイドライン（2010）の基本制限に考慮されている低減係数（職業的ばく露で 5、公衆ばく露で 10）よりも小さいことから、両者は本質的にはいずれも安全なばく露レベルを示していると考えられる。さらに、ICNIRP ガイドライン（2010）を適用することで、最新のばく露評価研究に基づき、適用される周波数範囲も拡張されるため、より安全な電波利用が可能になると考えられる。

3. 検証結果

以上より、ICNIRP ガイドライン（2010）の根拠は、電波防護指針の根拠と本質的な観点では整合するものであり、最新の知見・評価技術により構築された ICNIRP ガイドライン（2010）の内容を参考にして、我が国の電波防護指針を改正することは妥当であると考えられる。

別添3 長期的影響に関する検証

1. 動物実験研究による検証結果

ICNIRP ガイドライン(2010)の発行以降に発表された論文を対象として、動物実験のレビューの検証を行った。この間、海外の政府機関の見解として、スウェーデンのSSM(Swedish Radiation Safety Authority)から報告書(Recent Research on EMF and Health Risk 2014)が発表され、近年の研究に対して周波数帯毎のレポートが報告されている。このレポートを参考に、対象期間に発表された論文のうち、実験条件が明確にされているものを抽出して検証を行った。

極低周波帯(300Hz以下)においては、多くの報告がされているが、総合すると、一貫性、再現性のある健康影響に関する報告は見られていないと結論づけられる。そのため、現時点では、疫学研究で示されているような小児白血病との因果関係について、動物実験による科学的証拠は見つかっていないと考えられる。

中間周波数帯(300Hz~10MHz)においては、研究報告が非常に少ないため、今後の研究の推進が求められる状況である。現時点で報告されている研究においては、健康影響を示唆する報告は非常に少なく、再現性をもって因果関係を示す証拠は見つかっていないと考えられる。

2. 疫学研究による検証結果

ICNIRP ガイドライン(2010)の発行以降に発表された政府見解として、スウェーデンのSSMから発行された報告書(Recent Research on EMF and Health Risk 2014)に基づき、近年の疫学研究に関する報告の検証を行った。

その結果、極低周波帯(300Hz以下)においては、以下の通りと認識する。なお、中間周波数帯(300Hz~10MHz)においては、疫学研究の報告は見られない。

- ・近年の疫学研究に関する報告においては、発がん性との因果関係について、先行研究を裏付ける結果である。
- ・大規模なプール解析からは、小児白血病の生存率に電磁界ばく露は影響されないという結果もあるが、対象者の誤分類の可能性も指摘されている。
- ・成人がんでは、大規模コホート研究から因果関係が確認されない。
- ・デンマークのコホート研究から、アルツハイマーのリスクは見られないという結果が報告されている。ただし、対象者が少なすぎるという指摘もある。
- ・アルツハイマーとALSの疫学結果は電気ショックとの関連性の調整がされておらず、今後の課題である。

3. 細胞研究による検証結果

これまでに報告された細胞研究に関する報告の検証を行った結果、以下の通りの状

況と認識する。

- ・ 10kHz～10MHz の周波数帯における長期ばく露（一世代時間（20～40 時間程度））の細胞研究実績は極めて少ない。
- ・ これまでの発表論文検索結果から、電磁調理器から発生する中間周波数帯電磁波の短期ばく露影響評価論文が我が国から発表されている。2kHz～60kHz で、主として細胞遺伝毒性に関するものである。結果は全て陰性であった。
- ・ 米国、スイスなどから、がん細胞や動物個体ばく露による組織や細胞への影響で、治療に結びつく可能性の論文が少数報告されている。
- ・ 20kHz 前後の特定周波数領域の論文発表はわずかにあるものの、本周波数帯における細胞研究は、ばく露期間の長短にかかわらず研究実績は極めて少ない。

なお、スウェーデンの SSM から発行された報告書 (Recent Research on EMF and Health Risk 2014) においては、細胞研究に関して以下の通り報告されている。

- ・ 細胞研究は多くの細胞生物学的指標について研究が行われている。
- ・ 注目されている E L F 磁界と小児白血病との関連性について、因果関係を検索する研究は、細胞レベルで極めて少ない。
- ・ さらに、静磁界に関しては、シャム・コントロールの欠如により、結果説明の可能な研究は少ない。

4. 長期的影響に関する見解

以上の検証結果より、現時点において電波防護指針に電磁波のばく露による長期的な健康影響のリスクを考慮する必要はないと認識する。

別添4 その他の検証結果、参考情報

1. 電磁過敏症に関する検証結果

電磁過敏症について、近年の研究報告を分析し、電磁波との因果関係に関して検証を行った。その結果、現時点で確定的な結論は出ておらず、今後とも研究が必要な状況ではあるが、電磁波のばく露との因果関係は立証されていないと認識する。このため、現時点において電波防護指針に電磁過敏症のリスクを考慮する必要はないと認識する。

2. ばく露評価技術に関する研究動向

ばく露評価とは、電磁界へのばく露により体内に生じる体内誘導量を測定や計算により定量的に求めることである。ばく露評価は、例えば、低周波数帯における刺激作用では、電磁界ばく露により体内に誘導される電界や電流による神経や筋への刺激が作用をもたらしているとの考えに基づき、電波防護指針や ICNIRP のガイドラインが定められている。そのため、ばく露評価技術の研究は、電波防護のための指針を検討する上で、非常に重要な基礎技術と位置づけられるものである。

平成2年（1990年）に電波防護指針が策定された際、人体を模擬した球に対する解析により電磁界強度指針を求めたのに対し、平成22年（2010年）に ICNIRP ガイドライン(2010)の策定においては、詳細な数値人体モデルを用いた解析が取り入れられている。このように、ばく露評価技術の進展により、精密で正確な人体防護が可能となる。ばく露評価技術は、ワイヤレス電力伝送システムなど、新たな電波利用技術への応用や、接触電流のような局所的なばく露への適用も研究されており、今後の進展が期待される。

3. IEEEの動向

IEEE/ICES において人体防護については、主に TC95（人体安全性）及び TC34（製品安全性）において検討がされている。その中で、低周波数帯における刺激作用からの人体防護に関しては、IEEE C95.6-2002「0kHz～3kHzの電磁界への人体ばく露に関する安全レベル」が策定されている。これは、J.P. Reilly による神経刺激モデルに関する研究成果に基づいたものであり、楕円断面（一様媒質を仮定）による解析により導出されているものである。ICNIRP の参考レベルに相当する最大ばく露許容値は、ほとんどの周波数帯域で ICNIRP ガイドライン(2010)より高く設定されており、例えば50/60Hzでは904 μ T（ICNIRP では200 μ T）とされている。

現在、C95.6は、熱作用のガイドラインであるC95.1と規格を合併する方向で検討されている。また、一般環境における低減係数の緩和や詳細人体モデルの導入についても検討が進められている。

4. 個別分野における適用動向

(1) 電力関係の規制について

「電気設備に関する技術基準を定める省令」第二十七条の二及び「電気設備の技術基準の解釈」第五十条の一部改正（施行：平成 23 年 10 月 1 日）により、ICINIRP ガイドライン(2010)における磁界強度の参考レベルに基づいて、 $200\mu\text{T}$ を規制値とした規制が導入されている。評価方法は IEC62110(2009)に準拠したもの、測定方法は「電気設備の技術基準の解釈」に方法が例示されている。

(2) 鉄道分野における規制について

「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」第五十一条の二（施行：平成 24 年 8 月 1 日）により、ICINIRP ガイドライン(2010)における磁界強度の参考レベルに基づいて、 $200\mu\text{T}$ を規制値とした規制が導入されている。測定方法は、IEC/TS62597(2011)及び IEC62110(2009)を準用することとされている。

(3) 職業環境に関する諸外国の規制動向について

日本の労働環境の安全に関しては、労働安全衛生法に基づいた規制が施されているが、電磁界ばく露は労働安全衛生法の対象とされていない。現状は、電波防護指針や ICNIRP ガイドライン、諸外国の労働規制等を参考にして、各事業者が必要に応じて対応を行っている。

一方、欧州では、2013 年 6 月 26 日に Directive2013/35/EU「欧州職業電磁界指令」を発行し、職業電磁界ばく露からの保護に対する限度値とアクションレベルを制定し、EU 加盟各国に国内法転換を義務づけている。EU 加盟各国は、2016 年 7 月 1 日までに、これらに関連する法律、規制及び管理規定の国内法化をする必要がある。なお、このばく露限度値は ICNIRP ガイドラインに準拠したものであるが、一部の国においては、より厳しい基準値を国内規制に採用している国も存在する。また、ばく露限度値を遵守する実証プロセスを簡素化するため、アクションレベルが設定されており、運用上これに基づき防護又は防止対策を講じることが可能である。