

新 ICNIRP ガイドライン説明会

平成 22 年 12 月 15 日（東京）

（ 2010 年 ）

主催

財団法人電気安全環境研究所

電磁界情報センター





電磁界情報センター

～新 ICNIRP ガイドライン説明会～ 開催のご案内

国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）は、2010 年 11 月 16 日、新たな低周波電磁界に関するガイドラインとファクトシートを、ICNIRP ホームページに公表しました。

電磁界情報センターでは、新ガイドライン制定の経緯やその概要、特に旧ガイドラインからの評価方法の変更や制限値・参考レベルの算出方法などについて、首都大学東京の多氣先生、電力中央研究所の山崎先生をお招きし、新ガイドラインに関する知識を深めるための説明会を行うこととしました。

電磁界の健康影響に関心を持たれている方、新ガイドラインについて詳しく知りたい方など、多くの皆様のご参加をお待ちしております。

なお、本説明会の性格上、電磁波全般の基礎的な内容についての説明・質疑応答は予定しておりませんので、予めご了承下さい。また、説明会の事前質問を 12 月 8 日まで受け付けていますので、ご質問がある方は下記事務局宛にお寄せ下さい。

記

《開催のご案内》

- 日 時：平成 22 年 12 月 15 日（水） 13:30～16:00（開場 13:00）
- 場 所：日本科学未来館 みらい CAN ホール（住所：東京都江東区青海 2-3-6）
会場地図 URL：<http://www.miraikan.jst.go.jp/guide/route/>
- 定 員：250 名（参加費：無料）

《プログラム》

- 13:30～13:40 開会挨拶、事務連絡
司会 電磁界情報センターGM 倉成 祐幸
- 13:40～14:00 新ガイドライン制定の経緯について
電磁界情報センター所長 大久保 千代次
- 14:00～15:00 新ガイドラインの概要について
首都大学東京大学院教授 多氣 昌生氏
- 15:00～15:10 休 憩
- 15:10～15:30 制限値・参考レベルの算出方法と新旧ガイドラインの比較
電力中央研究所上席研究員 山崎 健一氏
- 15:30～16:00 質疑応答
コーディネーター 電磁界情報センターGM 世森 啓之
- 16:00 閉会

《連絡先》

- 財団法人電気安全環境研究所 電磁界情報センター 事務局
TEL：03-5444-2631 FAX：03-5444-2632
e-mail：jeic@jeic-emf.jp

以 上

新ガイドライン制定の経緯について



E-mail: emf@jeic-emf.jp
Website: <http://www.jeic-emf.jp/>

1

WHO国際電磁界プロジェクト



2

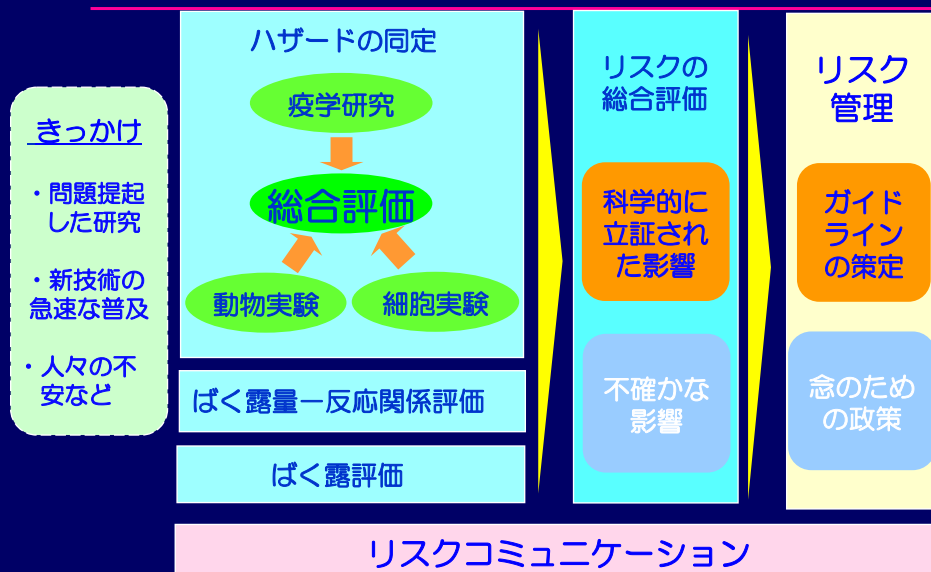
《メモ》

目的

- ①健康影響に対する国際的対応
- ②研究評価および研究状況の把握
- ③健康リスク評価のために必要な研究の把握
- ④知見の空白を埋めるための研究奨励
- ⑤環境保健クライテリア(EHC)作成と健康リスク評価
- ⑥国際的な統一基準の奨励
- ⑦各国への電磁界防護プログラム管理情報提供
- ⑧各国への助言

3

リスク評価



4

《メモ》

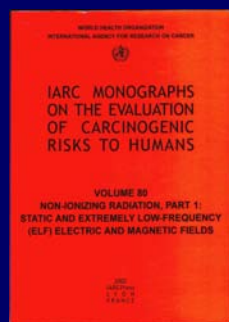
電磁界のリスク評価からリスク管理へ

- 科学の成果の更新（ブルーブック） ICNIRP
- 発がん性評価（モノグラフ） IARC
- 健康影響の全体的評価（EHC） WHO
- ガイドラインの改訂 ICNIRP

ICNIRP：国際非電離放射線防護委員会
IARC：国際がん研究機関（WHOの組織）
WHO：世界保健機関

5

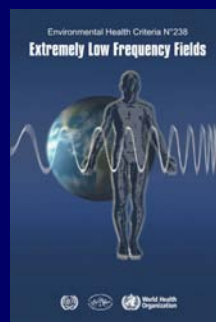
超低周波電磁界



IARC 2002



ICNIRP 2003



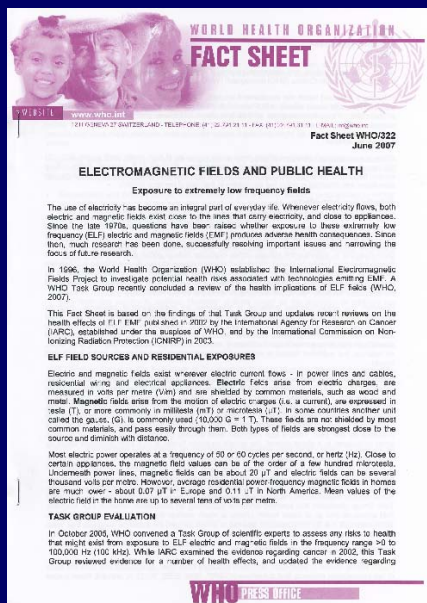
WHO 2007



ICNIRP 2010

6

《メモ》



Fact Sheet No. 322

2007年6月18日

7

商用周波電磁界については、

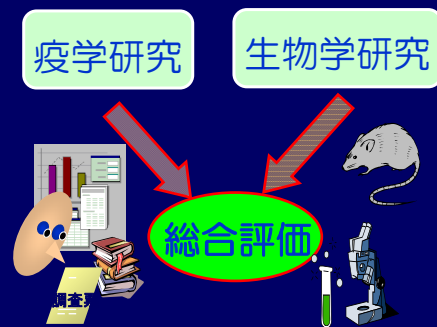
- 短期的ばく露については、健康への悪影響が科学的に確立されている。
- 国は、これらの影響から人々を護るために国際的なばく露ガイドラインを採用すべきである。

8

《メモ》

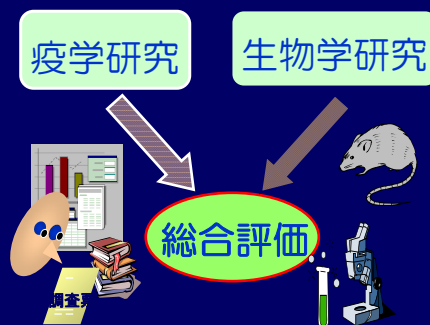
磁界ばく露の長期的影響

- 疫学研究から、長期的な影響として居住環境磁界ばく露 ($0.3\text{--}0.4\ \mu\text{T}$ 以上) と小児白血病との間に、弱いながらも統計的な**関連性がある**ことが報告されている。
- 生物学的な研究からは、**悪影響を及ぼす再現性のある結果は得られていない**。



9

- 小児白血病は因果関係と見なせる程ではない。
(IARCの2B評価を踏襲)
- その他の健康影響は、小児白血病よりももっと関連がない。
- 疫学で示す **$0.4\ \mu\text{T}$ を磁界のばく露基準**とするのは合理的ではない。(環境保健クライテリア 238)



10

《メモ》

新ガイドラインの概要について

首都大学東京
多氣 昌生

2010年12月15日
日本未来科学館 みらいCANホール
東京都江東区青海2-3-6

1

国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)

•ICNIRPは中立の学術組織

- 1992年に設置
- 前身は、国際放射線防護学会(IRPA)の委員会(1977～)

•任務は、

- 非電離放射線の健康への影響に関する**指導と助言**
- 非電離放射線へのばく露を制限する**国際的ガイドライン**を作成
- 中立の立場で科学を基盤とする

• ICNIRPの組織は、:

- 本委員会(委員14名、委員長・副委員長を含む)
- 常設委員会(4つ)
- Consulting Experts

2

《メモ》

本委員会 2008 – 2012

P. Vecchia(物理学) イタリア 委員長
R. Matthes(電気工学) ドイツ 副委員長

- － A. Green (疫学) オーストラリア
- － M. Feychting (疫学) スウェーデン
- － K. Jokela (保健物理) フィンランド
- － J. Lin(電気工学) 米国
- － A. Peralta(公衆衛生) フィリピン
- － R. Saunders(生物学) 英国
- － K. Schulmeister(光学) オーストラリア
- － P. Soederberg(眼科) スウェーデン
- － B. Stuck(レーザー安全) 米国
- － A. Swerdlow(疫学) 英国
- － B. Veyret(物理化学) フランス
- － E. van Rongen(生物学) オランダ

G. Ziegelberger (生物学) ドイツ 科学事務長
M.H. Repacholi スイス 名誉委員長

注: 4年ごとに改選。3期12年を超えて再任できない

3

常設委員会 2008-2012

- SC I – 疫学

委員長: Anthony Swerdlow (英国)

- SC II – 生物学・医学

委員長: Richard Saunders (英国) 宮越順二(京大)

- SC III – Physics and Engineering

委員長: James Lin (米国) 渡辺聡一(NICT)

- SC IV – Optical radiation

委員長: Per Soderberg (スウェーデン)

4

《メモ》

Consulting Experts

- 専門の立場からの貢献。必ずしも中立機関に所属していなくもよい
- 現在37名
- 日本から、平田晃正(名工大)、王建青(名工大)、奥野勉(産医研)、多氣(首都大)
- 前ICNIRPメンバーが8名含まれる

5

ICNIRPによる電磁界ガイドライン

- 1992年以前のINIRC/IRPAが作ったガイドラインを継承
- 1994年: 静磁界のガイドライン
- 1998年: 300GHzまでのガイドライン
- (2002年: 非電離放射線防護の一般的アプローチ)
- 2009年: 静磁界のガイドライン改訂
- 2010年: 1－100kHzのガイドライン改訂
- 2013年?: 100kHz－300GHzの改訂(?)

6

《メモ》

General Approach to Protection against Non Ionizing Radiation.

Health Physics Vol 82, Nr 4, pp: 540-548, April 2002.

—ICNIRP Statement—

GENERAL APPROACH TO PROTECTION AGAINST NON-IONIZING RADIATION

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

INTRODUCTION

This document explains the approach that ICNIRP uses in providing advice on protection against non-ionizing radiation (NIR) exposure to serve both as a guide for the understanding of ICNIRP's documents and for its future work. The activities of ICNIRP are delineated, and the relationships with other advisory and legislative bodies are described. Furthermore, ICNIRP's current general approach to the assessment of health risks as a basis for the development of guidelines on limiting exposure is explained.

Issues dealt with by ICNIRP relate to optical radiation (ultraviolet, visible and infrared) including lasers and electromagnetic fields (microwaves, other radiofrequency fields and fields of lower frequencies down to

valuable input. ICNIRP is the successor of the International Non-Ionizing Radiation Committee (INIRC) of the International Radiation Protection Association (IRPA) since 1992, and still retains a close association with the latter.

ICNIRP, as an international scientific advisory body, does not address social, economic, or political issues. Membership of ICNIRP is limited in time and also to experts who are not affiliated with commercial or industrial enterprises. Thus, ICNIRP is free of vested commercial interest.

ICNIRP is the formally recognized non-governmental organization in NIR protection for the World Health Organization (WHO), the International Labour Organization (ILO), and the European Union (EU). It maintains a close liaison and working relation-

7

ICNIRP ガイドライン

時間変動する電界、磁界、および電磁界

(1 Hzから100 kHz)へのばく露制限に関するガイドライン

—ICNIRP Guidelines—

ICNIRP STATEMENT—GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 HZ TO 100 KHZ)

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

INTRODUCTION

In this document, guidelines are established for the protection of humans exposed to electric and magnetic fields in the low-frequency range of the electromagnetic spectrum. The general principles for the development of ICNIRP guidelines are published elsewhere (ICNIRP 2002). For the purpose of this document, the low-frequency range extends from 1 Hz to 100 kHz. Above 100 kHz, effects such as

Studies on both direct and indirect effects of EMF have been assessed: direct effects result from direct interactions of fields with the body; indirect effects involve interactions with a conducting object where the electric potential of the object is different from that of the body. Results of laboratory and epidemiological studies, basic exposure assessment criteria, and reference levels for practical hazard assessment are discussed, and the guidelines presented here are applied.

8

《メモ》

1－100kHzのガイドライン(序論)

- 100kHzまでを対象にした、環境保健クライテリア No.238(2007年)に基づく改訂
- 一部の内容について10MHzまで制限
 - － 1998年のガイドラインは、刺激作用を根拠に10MHz以下を制限(瞬時の値)、熱作用を根拠に100kHz以上300MHzまでを制限(10MHzまでは6分間平均)
 - － 100kHzから10MHzまでは刺激作用の制限と熱作用の制限の両方で制限していた
 - － 2009年のドラフトでは100kHzまでの制限のみだった
 - － 静磁界中で人体の動きによって誘導される電界および1Hz以下の時間変化する磁界のガイドラインは別に作られる予定

9

目的と範囲(1)

- 電磁界による「健康への有害な影響」から人体を防護
 - － 電磁界による直接の影響からの防護
 - － 電磁界による間接の影響からの防護
 - ・ 電磁界中にある導体に電位が発生→人体が接触することによるハザード
- 急性影響に関する確立された証拠を根拠
 - － 慢性影響についての注意深いレビューから、電磁界との因果関係の説得力のある証拠はないと判断

10

《メモ》

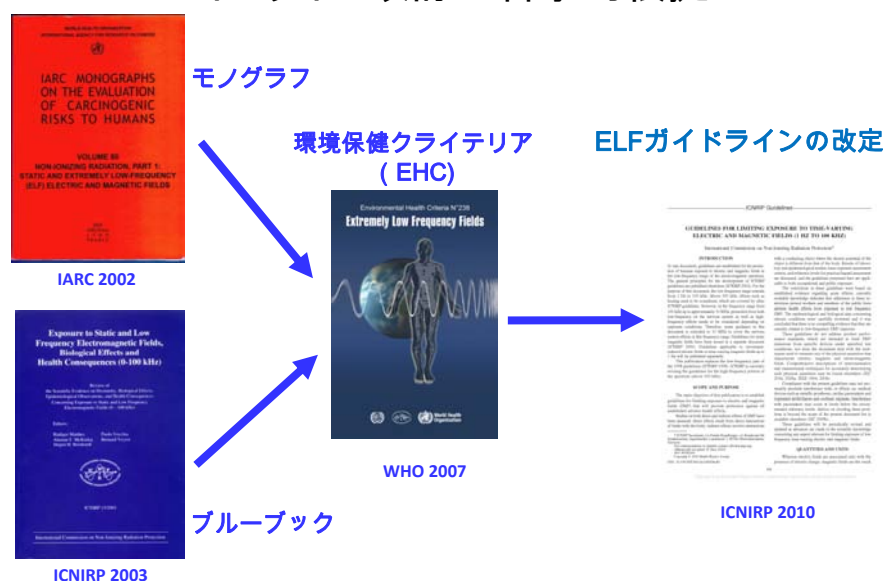
目的と範囲(2)

- 製品からの放射電磁界ノイズの制限は含まない
- 計測技術は扱わない
- 金属製人工器官、心臓ペースメーカー、植え込み型除細動器、人工内耳などの医療機器への干渉、影響は、このガイドラインで排除できるわけではない

目的と範囲は1998年ガイドラインと変わらない。但し、1998年より測定方法に関する具体的な示唆がある

11

ガイドライン改訂の科学的根拠



12

《メモ》

ガイドラインの根拠(確立された作用)

- 電界ばく露によって生じる表面電荷の作用
 - 生物学的反応である(健康への悪影響ではない)
 - 知覚→不快感
- 体内に誘導される電界による神経に対する刺激
 - 中枢および末梢神経への刺激
 - 網膜閃光現象

13

「確立された作用」とは

- ガイドラインの用語解説では「確立されたメカニズム」を次のように定義:
 - 次のような特徴をもつ生体電氣的メカニズム。(a) ヒトの生物学的影響の予測に用いることが可能である;(b)方程式や変数間の関係を用いた明快なモデルが構築可能である;(c)ヒトにおいて検証されている、または動物データが確信を持ってヒトへ外挿可能である;(d)強力な証拠によって支持されている;(e)学界の専門家に広く受け入れられている。

14

《メモ》

科学的文献からの結論(1)

- 神経行動学的作用
 - 十分に確立されており、指針の根拠として利用できる
 - 表面電荷の知覚
 - 神経および筋組織の直接刺激
 - 興奮性細胞(神経・筋)の電気生理学データ、数理モデル
 - TMS(経頭蓋磁気刺激)の経験データ
 - 網膜閃光現象の誘発
 - 間接的な科学的証拠がある
 - 視覚処理と運動との協応などの脳機能が、誘導電界による一過性の影響を受けること
 - 根拠とする信頼性がない
 - その他の神経行動学的ボランティア研究
 - 過敏な主観症状
 - 抑うつ症状

15

科学的文献からの結論(2)

- 神経内分泌
 - 各種ホルモンへの影響を科学的データは示していない
 - メラトニン分泌など
- 神経変性疾患
 - アルツハイマー病などへの影響の証拠は不十分
- 心臓血管系疾患
 - これまでの証拠は関連を示していない
- 生殖および発達
 - 低周波電界および磁界と影響の関連は非常に弱い

16

《メモ》

科学的文献からの結論(3)

- がん
 - 疫学研究が相対的に高いレベルの磁界ばく露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
 - 生物物理学的メカニズムは同定されておらず、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する考えを支持しない

17

ガイドラインの論拠(1)

- 急性影響
 - 神経・筋組織への刺激
 - 体内誘導電界(中枢・末梢神経系)を制限(周波数に依存)
 - 網膜閃光現象
 - 感知すること自体は健康影響ではない(だから1998年ガイドラインでは根拠に採用しなかった)
 - 網膜は前脳から派生した組織で、脳との共通した性質がある→慎重な立場での良いモデル(2003年に英国Didcotで開催されたWHO/ICNIRPワークショップでの結論)
 - 頭部の中枢神経系での体内電界を制限
 - 電界による表面電荷
 - 痛みを防止
 - 電界を制限

18

《メモ》

ガイドラインの論拠(2)

- 慢性影響

- 「ICNIRPの見解は、低周波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を示す既存の科学的証拠は、ばく露ガイドラインの根拠するには非常に弱い、ということである。とりわけ、もし関係が因果関係でなかった場合、ばく露を低減しても健康への利益は何も生まれない。」(2010年ガイドライン)

Cf. ELF電磁界の影響の可能性を明らかにするため、動物研究をさらに続ける必要があるが[...] これら電磁界の発がんへの影響を示す説得力のある証拠は現在のところ何もなく、そのようなデータをばく露ガイドライン作成の根拠として用いることはできないと結論せざるを得ない(1998年ガイドライン)

19

ガイドラインの論拠(3)

- ドシメトリ

- 電磁界にばく露された人体内の誘導電界などの定量的な評価
 - 1998年当時(主に球や楕円体の幾何学的形状を用いた)より格段に進歩
 - 解剖学的な構造を考慮したミリメートルオーダーの数値人体モデル
- 身体パラメータによって影響
 - 姿勢や人体と電磁界の相対的な向きなど、安全側の仮定をおいて推定する

20

《メモ》

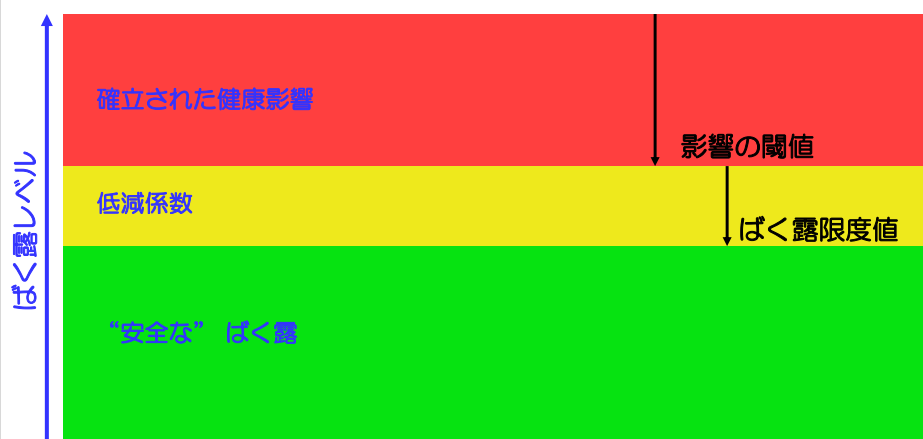
2レベルからなる体系

- 基本制限
 - 生物学的作用に有効な物理量
 - 体内電界強度
- 参考レベル
 - 体外におけるばく露尺度
 - 実用的なばく露評価のため
 - 直接的影響: 電界強度、磁界強度、磁束密度 (四肢電流は削除?)
 - 間接的影響: 接触電流

□ばく露が参考レベル以下なら、基本制限は満たしている。
(ワーストケース条件下で両者の関係が考えられているから)
□ばく露が参考レベルを上回っても、必ずしも基本制限を超過しない。

21

基本制限の設定



22

《メモ》

低減係数 (Reduction Factor)

- ガイドライン策定過程における不確かさの様々な原因に対する補正のために影響閾値に低減を加えること。ばく露－影響閾値レベルに関する不確かさの原因の例としては、動物のデータをヒトでの影響に外挿すること、生理学的予備能とそれに対応した許容度の個人差、量－反応関数における統計学的不確かさ(信頼限界)などがある。ガイドライン施行上の測定における不確かさは、遵守手法の開発を職務とする組織が担当するのがより適している問題であるというのが、ICNIRPの見解である。この不確かさは、ICNIRPによる低減係数の設定では考慮されていない。

23

基本制限の考え方

(括弧内は1998年ガイドラインとの比較)

- 刺激作用を根拠
- 体内電界強度を指標 (cf. 誘導電流密度)
- 末梢神経系の刺激作用を根拠に入れる (cf. 中枢神経系のみ、閾値100 mA/m²)
- 中枢神経系を別に扱い、網膜閃光現象を根拠に採用 (cf. 閃光現象は知覚であり、健康影響ではない)
- 閾値方式で、低減係数を用いる (cf. 安全係数)
- 空間平均は、2x2x2 mm³の電界強度を平均 (cf. 1cm²の電流密度を平均)

24

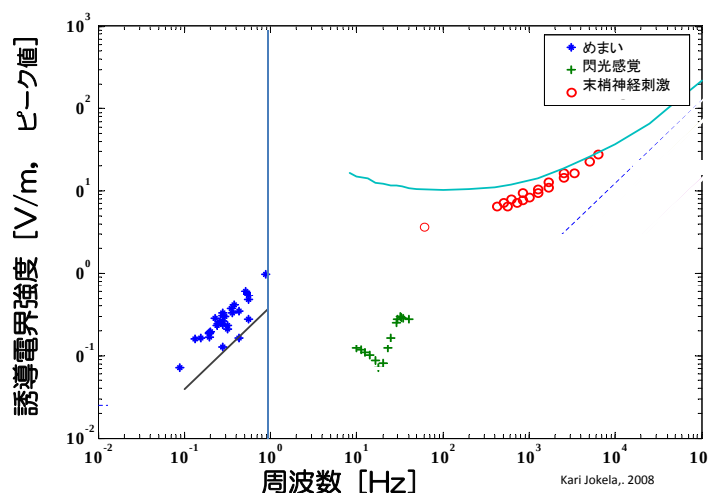
《メモ》

閃光感覚の扱い

- ICNIRPガイドラインは、確立された健康への悪影響の防護にその目的を定めている。確立された生物学的影響は、その本来の性質から、健康リスクがあるかも知れないことを示唆するものである。
- 閃光感覚は、それ自体は健康への悪影響ではない。誘導電界と網膜の電氣的興奮性細胞との相互作用の結果として生じると考えられている。網膜は前脳の一部であり、中枢神経系(CNS)組織全般で起きる現象の過程をよく表現するモデルで、安全側に立ったモデルであると見なされる。
- したがって、改定ガイドラインは、閃光感覚の防止を含む。

25

影響の閾値



26

《メモ》

閾値と低減係数

- 閃光現象の閾値 50 mV/m (10 – 25 Hz)
 - 低減係数 1 → 職業ばく露の基本制限 50 mV/m
 - 低減係数 5 → 公衆ばく露の基本制限 10 mV/m
- 末梢神経系の刺激閾値 4 V/m (<3kHz)
 - 低減係数 5 → 職業ばく露の基本制限 0.8 V/m
 - 低減係数 10 → 公衆ばく露の基本制限 0.4 V/m

27

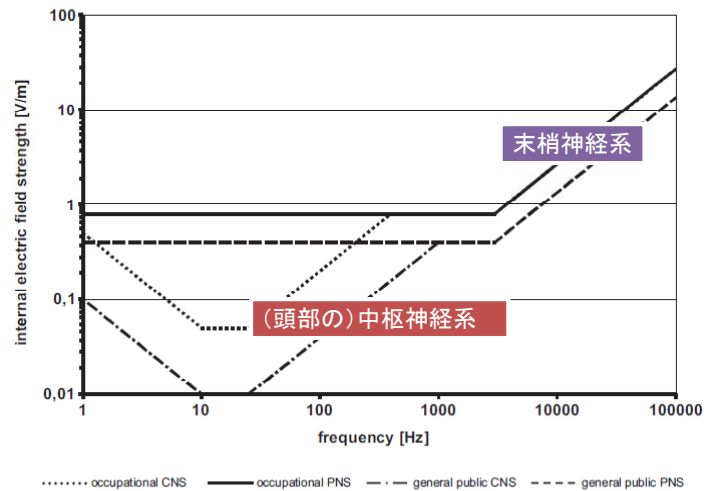
職場環境の考え方

- 和訳p.7
 - 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少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。

28

《メモ》

基本制限



29

参考レベル

- 実用的に評価するために、体外の電磁界を用いた評価により、基本制限への適合性を判断するための参考値
- 基本制限からワーストケースを想定して導出
- 解剖学的モデルを用いた数値ドシメトリに基づく (cf. 均一球モデルによる導出)
- 不均一な電磁界では、空間平均
 - 発生源から20 cm以上では、人体に沿った(または人体の一部)空間の平均値と比較 (cf. 参考レベルは人体の占める空間で平均した値に適用する)
 - 非常に発生源に近接した場合は基本制限を用いる

30

《メモ》

参考レベルの導出

- 不均一モデルでの換算値
 - 脳では、
 - 入射磁界1mTあたり最大で23 – 33 mV/m
 - 入射電界1kV/mあたり最大で1.7 – 2.6 mV/m
 - 末梢(皮膚で評価)
 - 入射磁界1mTあたり最大で20 – 60 mV/m
 - 入射電界1kV/mあたり最大で12 – 33 mV/m
- 低減係数(参考レベルの導出での追加的係数)
 - 中枢(脳)では、3

31

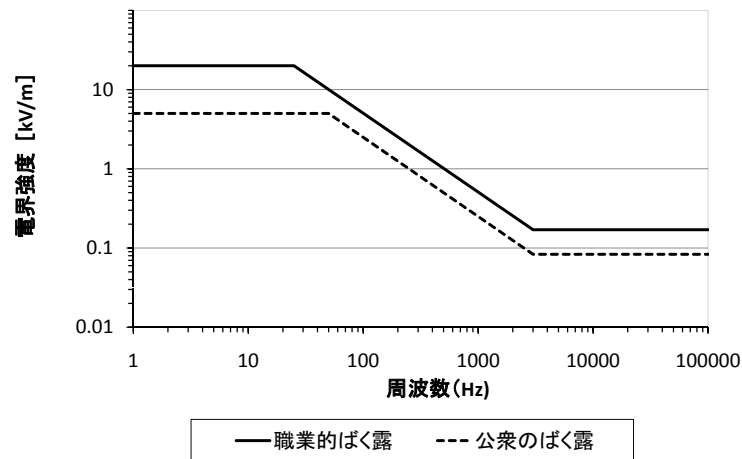
間接的影響の考慮

- 電界強度の参考レベルで考慮
 - 職業ばく露
 - 25Hzまでは接触電流刺激を防止するためのマージン
 - 25Hz以上では、考慮していない(接触電流の参考レベルを考慮する)
 - 公衆ばく露
 - 10MHzまで、>90%の人に間接的影響を防止できるようにマージン
- 接触電流についての参考レベル
 - 知覚を防止するのではなく、痛みのある電撃を回避する
 - 子供で閾値が1/2 → 公衆に低減係数2
 - 1998年ガイドラインと同じ値

32

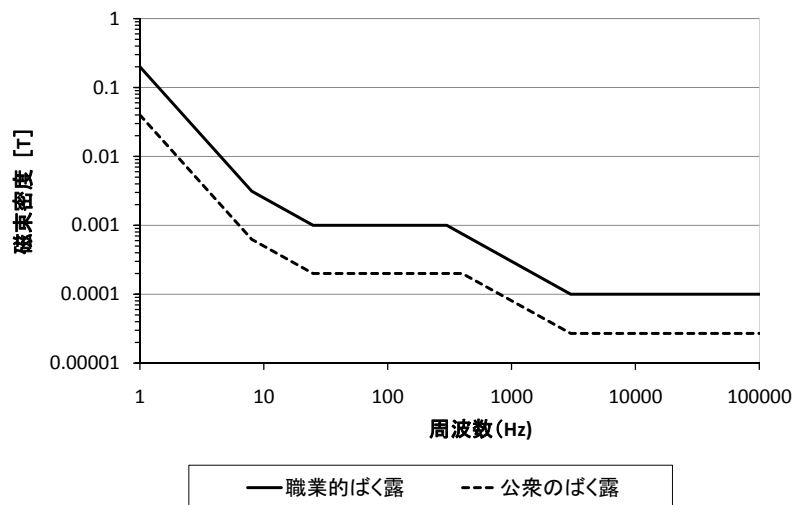
《メモ》

参考レベル(電界強度)



33

参考レベル(磁束密度)



34

《メモ》

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	0.2f
	100 kHz–10 MHz	20

注: f は、kHzで表わされる周波数

35

基本制限の評価方法への言及

- 時間平均
 - 時間平均されない瞬時値を推奨
- 空間平均
 - 解剖学的な構造を考慮した人体モデルで $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ の分解能で計算して99パーセンタイル値をとることが適切
- 非正弦波
 - 重みづけピーク値を用いる方法を示し、具体的な方法を付属書で示した
 - ICNIRP Statement: Guidance on Determining Compliance of Exposure to Pulsed Fields and Complex Non-Sinusoidal Waveforms below 100 kHz with ICNIRP Guidelines. Health Physics 84 (3): 383-387; 2003

36

《メモ》

参考レベルの評価方法への言及

- 空間平均
 - 参考レベルは空間的変動の小さい電磁界強度を想定
 - 空間的に非一様な場合
 - 最大値が参考レベルを超えなければ安全側
 - 発生源からの距離が20cmを超えるときは、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
 - 距離が数cmのときは基本制限で考える

37

長期的影響への言及（ファクトシート）

- 疫学研究は、低レベル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することを見出している。しかしながら、実験研究は磁界と小児白血病のこのような関連を支持しておらず、磁界と小児白血病またはその他のいかなる長期的影響との因果関係も確立されていない。この確立された因果関係がないことが、基本制限で疫学研究の結果を扱わない理由である。このような疫学研究の結果が、多くの国の人々が懸念をもつきっかけとなったことをICNIRPはよく承知している。この懸念に対しては、各国のリスク管理の枠組みの中で最善に対処されるというのが、ICNIRPの見解である。リスク管理は一般に、社会的、経済的、政治的問題を含む多くの異なる局面に基づいている。この状況の中で、ICNIRPは科学に基づいた助言のみを提供する。プレコーショナリ対策に関する検討を含むリスク管理上の追加的助言は、例えば、世界保健機関および他の組織によって与えられている。

38

《メモ》

コメント(1)

- Vecchia委員長は10年以上使えると述べている
- 欧州の規制に採用するためには、現行の欧州理事会勧告1999/ 519/ECの改訂が必要
- 職場環境の欧州指令2004/40/ECに基づく法規制導入の環境に前進
 - 指令ではMinimum requirementを想定している
- 刺激作用の上限を10MHzまでとしたことの妥当性
 - 公衆で10MHzでは約180W/kg、1MHzで1.8W/kg(導電率0.1S/mとして)の内部電界が基本制限

39

コメント(2)

- 作成プロセスの変化
 - 従来は、ICNIRPで原案を承認後、関係機関およびIRPA加盟組織(日本では日本保健物理学会)に回付してコメント募集。修正は大幅ではなかった。
 - 今回は、コメントを公募(100件以上)
 - コメントに対し非常に丁寧な修正
 - 但し、ドラフトとの変更が著しい

40

《メモ》

100kHz～10MHzでの熱作用と刺激作用

- 1998年ガイドライン
 - $J = \sigma E$ (刺激) と $SAR = \sigma E^2 / 1000$ (熱)
 - 基本制限は100kHz～10MHzで周波数に依存しない
- 2010年ガイドライン
 - E (刺激) と $SAR = \sigma E^2 / 1000$ (熱)

導電率 σ が与えられれば、どちらの制約が支配的であるかが決まる

41

旧ICNIRP(1998年)の筋・脂肪組織における基本制限値と内部電界

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}$$

$$J = \sigma E$$

	freq.	σ	J_{max}	SAR_{max}	$E(J)$	$E(SAR)$
	[Hz]	[S/m]	[A/m ²]	[W/kg]	[V/m]	[V/m]
Muscle	10^5	0.36	0.20	2	0.55	74.3
	10^6	0.50	2.00	2	3.98	63.1
	10^7	0.62	20.0	2	32.4	56.9
Fat	10^5	0.024	0.20	2	8.19	286.2
	10^6	0.025	2.00	2	79.7	282.4
	10^7	0.029	20.0	2	686	261.9

10MHzまででは、誘導電流密度の制限が支配的

42

《メモ》

新ICNIRPの筋・脂肪組織における 基本制限値と内部電界

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}$$

	freq. [Hz]	σ [S/m]	$E_{\max}$ [V/m]	$SAR_{\max}$ [W/kg]	$E(SAR)$ [V/m]
Muscle	10^5	0.36	13.5	2	74.3
	10^6	0.50	135	2	63.1
	10^7	0.62	1 350	2	56.9
Fat	10^5	0.024	13.5	2	286.2
	10^6	0.025	135	2	282.4
	10^7	0.029	1 350	2	261.9

SARの制約が支配的な周波数が広がった

43

《メモ》

制限値・参考レベルの算出方法と 新旧ガイドラインの比較

山崎 健一
電力中央研究所



概 要



- 低周波電磁界の健康影響に関するWHO（世界保健機関）による評価結果の公表（2007年）を受け、国内においても1998年発行のICNIRPガイドラインに基づく磁界の限度値（電力設備）の導入について議論が進められている。
- 一方、ICNIRPガイドライン自体も、改訂作業が進められ、1 Hz から100 kHzの低周波帯域に対し、2009年7月の改定ガイドライン原案公表を経て、2010年11月に新ICNIRP低周波ガイドラインが公表された。
- 新ガイドラインでは、磁界参考レベルの変更や基本制限の指標の変更など、大幅な変更を伴うものとなっており、ドラフトからの変更も大幅になされた。
- 本講演では、新旧ガイドラインの比較ならびに新ガイドラインにおける基本制限および参考レベルとの適合性評価方法について述べる。

2

《メモ》

旧ICNIRPガイドライン

- ・「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(300 GHzまで)」

1998年制定。任意の規格であるが、欧州を中心に広く採用され、これまでもっとも影響力があった防護指針。

- ・再現性のある生体反応(神経刺激)に基づく、**人体内誘導電流**が指標。等価な外部磁界を算出
- ・「基本制限」と「参考レベル」の2段階構成
- ・「公衆ばく露」と「職業ばく露」で異なる指針値



3

(参考)IEEE安全基準

- ・IEEE C95.6:「0Hz～3kHzの電磁界への人体ばく露に関する安全レベル」
- ・刺激による神経組織の電氣的興奮が根拠。作用量は、*in situ*(生体内)電界(=**人体内誘導電界**)
- ・「基本制限」と「最大許容ばく露」の2段階構成
- ・基本制限の対象は4種類の部位(脳、心臓、手足、他)
- ・「一般公衆」と「管理環境」で異なる指針値
- ・ICNIRPの参考レベルに相当する最大許容ばく露(公衆)は、50/60 Hzで、**904 μ T**と大きい(旧ICNIRPでは**100 μ T** – 50 Hz, 新ICNIRPでは**200 μ T** – 50/60 Hz)

4

《メモ》

ガイドラインの構成の比較

- 構成については、大きな変更はない
- 2段階の指標：
体内誘導量で規定される**基本制限**(確立された健康影響を直接的な根拠とする)と電磁界の大きさを規定される**参考レベル**(基本制限から導出される参考値)、基本制限の遵守に重点
- ばく露対象：
「職業ばく露」と「公衆ばく露」の区別
公衆に対してより厳しい値が適用されている



5

電磁界のばく露制限の根拠の比較

- 低レベル磁界ばく露の長期影響の扱い：
変更なし。「磁界ばく露と小児白血病との因果関係があるとする疫学調査結果については、ばく露を制限する根拠として用いるには十分ではない」。
- 生物学的知見の整理における誘導量指標の変更：
体内誘導電流密度 → 体内誘導電界
- 制限の根拠として取り上げられる現象の変更：
磁気閃光現象を重要視。有害な影響ではないものの「中枢神経系(CNS)組織への影響の適切なモデル」であるとして考慮されることになった。



6

《メモ》

電磁界ばく露制限の基本制限の比較(1)

- ・ 従 来: 神経系機能への影響の誘導電流密度の閾値 100 mA/m^2 (数Hz～1 kHz)に安全係数10としたものを職業ばく露の制限値とする。
- ・ 改 訂: 指標の誘導電界への変更
「頭部のCNS組織」と「頭部および胴体の全組織」の2種類の対象に対し別の指針値を示す。



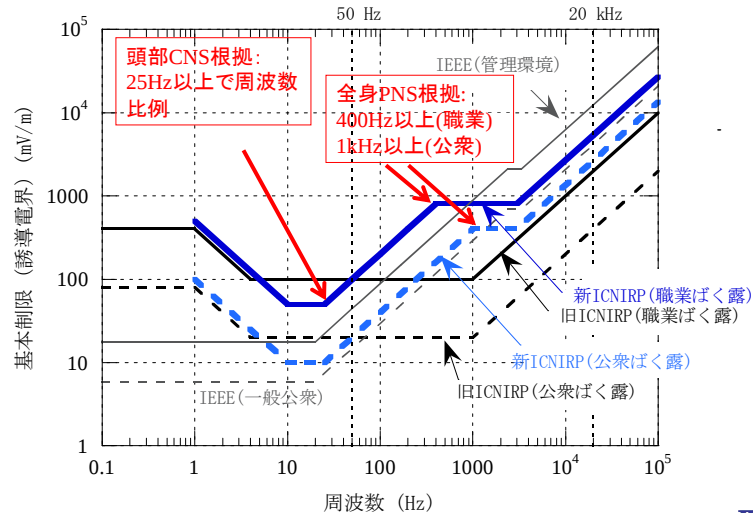
電磁界ばく露制限の基本制限の比較(2)

- ・「頭部のCNS組織」では、磁気閃光の閾値の最下限を職業ばく露の基本制限(10 Hz～25 Hz – 50 mV/m, 以降周波数比例)。低減係数は適用しない。
- ・「頭部および胴体の全組織」では、末梢神経系(PNS)の刺激反応の閾値 4 V/m (3 kHz以下で一定, それ以上は周波数比例)に、不確かさを考慮し、低減係数(職業ばく露: 5, 公衆ばく露: 10)を適用した値を基本制限とした。



《メモ》

基本制限の比較



※旧ICNIRPガイドラインでは、基本制限は体内誘導電流密度で表されており、便宜上、導電率を0.1 S/mとして換算している。
※新ICNIRPガイドラインおよびIEEE基準では、部位により基本制限が異なるが、グラフでは最も低い値を示している。

磁界参考レベルの比較(1)

- 25 Hz以上の周波数において、基本制限の周波数依存性の変更および人体モデルを用いた換算の変更を反映し、磁界参考レベルの数値に変更が生じた。
- 商用周波数では、公衆ばく露については、従来の「0.1 mT(50 Hz), 0.0833 mT(60 Hz)」から「50Hz, 60 Hzともに0.2 mT」と大幅な緩和となった。
- 中間周波数帯と呼ばれる1 kHz～100 kHzの帯域でも、磁界参考レベルが大幅に緩和された(従来の公衆に対する磁界参考レベル 6.25 μ Tが27 μ Tと4倍以上の緩和)。

《メモ》

磁界参考レベルの比較(2)

- 基本制限から参考レベルの換算根拠については、Dimbylowによる数値計算結果が引用されている。
- 「頭部のCNS組織」の基本制限が適用される周波数帯では、1 mT, 50 Hzの一樣磁界ばく露に対して、「脳の誘導電界の値」として33 mV/mを対応させている（Dimbylowの論文では、英国のNORMANと呼ばれる人体モデルを用いた脳における99パーセンタイル値）。
- さらに、数値計算および人体のモデル化における「不確かさ3」を考慮し、脳の誘導電界の値を100 mV/mとし、この関係が、「頭部のCNS組織」に基づく基本制限値と参考レベルとの対比になっている。



11

磁界の参考レベルの比較(3)

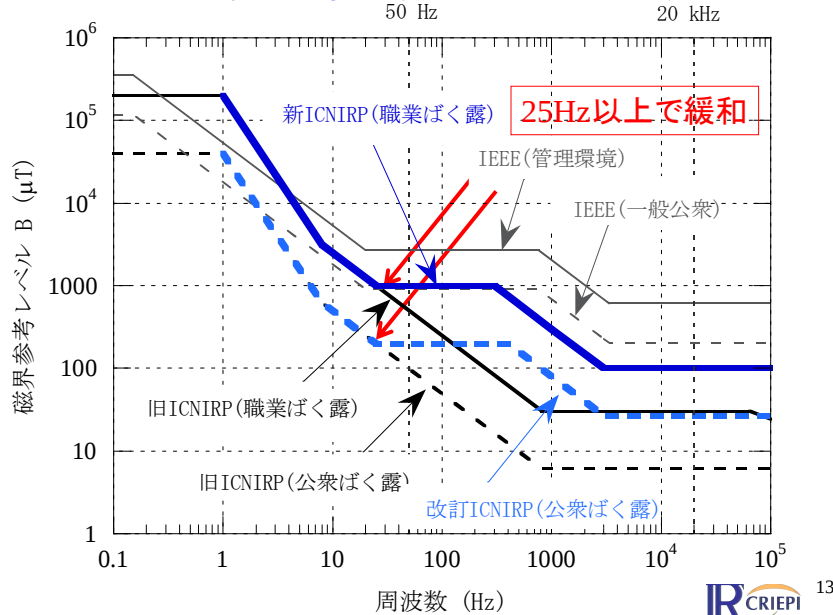
- 一方、「頭部および胴体の全組織」が適用される周波数帯では、1 mT, 50 Hzの一樣磁界ばく露に対して、「PNSへの影響に関連するCNS以外の組織における誘導電界の値」として60 mV/mを対応させている（ただしDimbylowの論文において該当する数値は見当たらない）。
- 本文では、頭部CNS組織と同様に「不確かさ3」が考慮されたところがあるが、基本制限値と参考レベルとの対比はこの関係になっていない。



12

《メモ》

磁界の参考レベルの比較

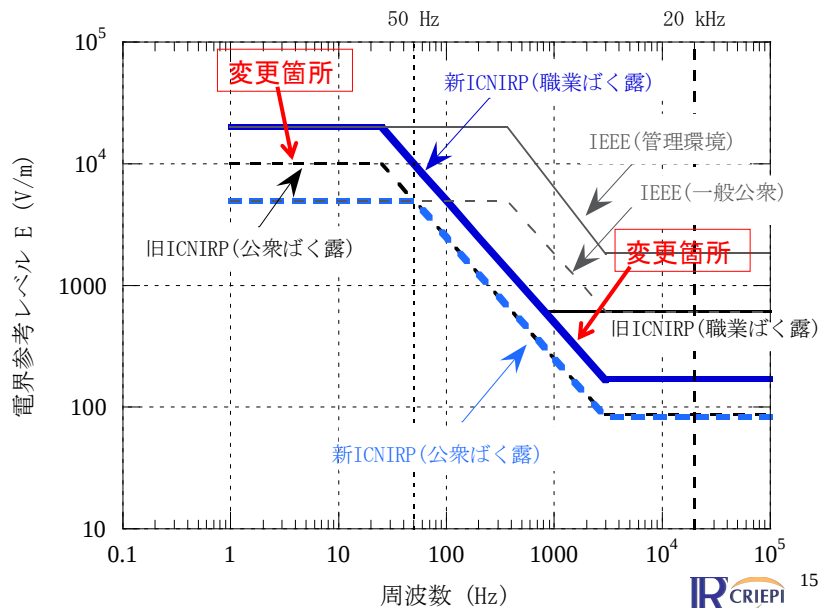


電界の参考レベルの比較

- 公衆ばく露では, 25 Hz以下の周波数帯で, 従来の1/2の値に変更された。この理由として, 感知を予防する十分なマージンを見込んだことを挙げている。
- 一方, 職業ばく露については, 中間周波数帯の電界参考レベルが大幅に厳しい値となった(20 kHzにおいて, 610 V/mから83.3 V/m)。なお, 25 Hz以上では, 基本制限のみを考慮して参考レベルが決定されているが, 外部電界と体内誘導電界の換算が周波数ごとに異なっている。

《メモ》

電界の参考レベルの比較



その他

- 接触電流については、参考レベルのみが示されており、旧ガイドラインからの変更はない。旧ガイドラインにおいて、接触電流の参考レベルは、電磁界ばく露の基本制限(誘導電流密度)を超えることが容易に示され矛盾が生じていたが、今回の改定では、頭部CNSとその他の組織の基本制限が分けられたため、再度の検討が必要となっている(手で裸電導体に接触した場合、頭部の通過電流は小さい)。
- 電界と磁界の同時ばく露については、従来と同様、加算的に扱う必要はないものと判断される。

《メモ》

基本制限との適合性評価方法

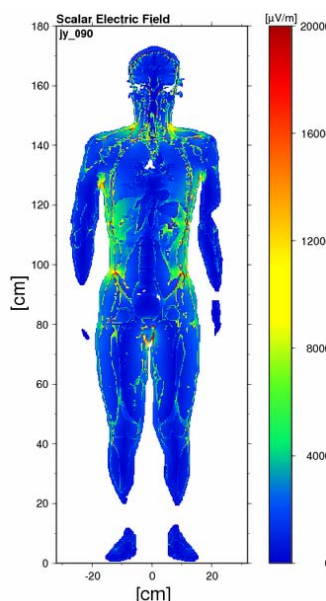
- 人体モデル内誘導電界の「辺長2mmの立方体空間での平均」を計算し、「特定組織の99パーセンタイル値」を評価した上、さらに「網膜と皮膚を除き、平均化する空間に他組織を含む場合はこれを除外する」処理を行うものとされた
- 基本制限との適合性評価が不可避な状況として、「発生源からの距離が20 cm以内」の参考レベルを超過する状況が挙げられている。

基本制限との適合性評価の実際

- 磁界発生源のモデル化(実測, 等価発生源)
- 数値人体モデルに対する体内誘導電界の計算の実施
- 計算結果のボクセル(立方体セル)データからのデータ抽出(特定組織, 99パーセンタイル値算出等)

日本人数値人体モデル

- 情報通信研究機構(NICT)による開発
- 51種類の組織
- ボクセルサイズ **2 mm**
- 各組織に割り当てる導電率は, Gabrielらによるデータの使用が一般的



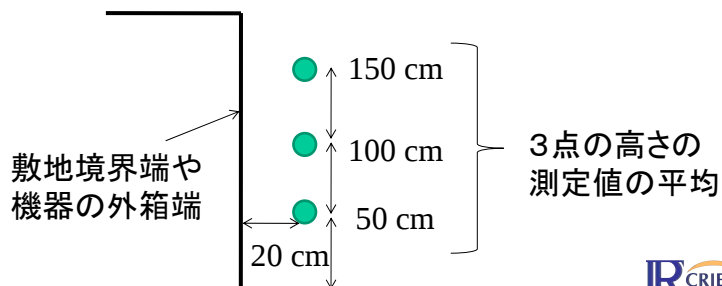
《メモ》

参考レベルとの適合性評価方法

- 旧ガイドラインと同様、非一様磁界ばく露に対し、「磁界の全身平均」を評価し参考レベルと比較する。新ガイドラインでは、その適用条件が明記され、「発生源の端から20 cm以上の位置」となった。
- 測定に関わる不確かさは、前述のreduction factorには入っていないことが明記された。

磁界参考レベルとの適合性評価方法の例 —電力設備の例(IEC 62110-2009) —

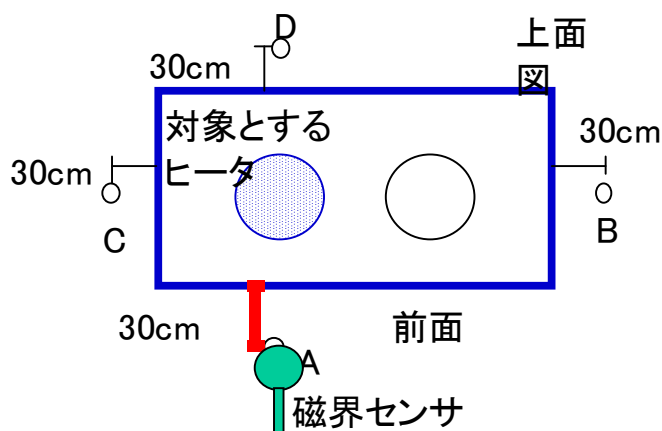
- 送電線下など一様な電界・磁界に対しては、地上1mの高さで測定する
- 変電所敷地境界や配電路上機器近傍など、一様ではない場合は、「磁界の全身平均」に対応する「高さ3点平均」で評価する



《メモ》

磁界参考レベルとの適合性評価方法の例 —IH電磁調理器の例(IEC 62233-2005)—

○ : 測定位置(高さ方向にスキャンし, 最大値を把握)



おわりに

- 参考レベルの周波数特性カーブに依存した評価を行っている測定器の改修の必要性
- 従来の誘導電流密度によりICNIRP基本制限との適合性評価が示された製品やばく露環境について, 新たな体内誘導量指標を用いた再評価の必要性
- 公衆および職業ばく露に関する欧州recommendationおよびdirectiveの改訂動向および, 国内の磁界規制へ影響についての関心
- 今回の変更の理由は, 主として数値計算の扱いの変更によるものであるが, 本分野は依然研究レベルの段階であり, 今後の再評価の可能性にも留意する必要がある。

《メモ》

制限値・参考レベルの算出方法と新旧ガイドラインの比較

山崎健一（電力中央研究所）

1. はじめに

ICNIRP(国際非電離放射線防護委員会)では、WHO(世界保健機関)国際電磁界プロジェクトによる低周波電磁界影響の評価結果の公表(2007 年)を受け、1998 年発行の ICNIRP ガイドライン(以下、旧ガイドライン)⁽¹⁾の改定作業が進められ、このうち 1 Hz から 100 kHz の低周波・中間周波帯域(これらを併せて ELF と呼んでいる)に対し、2009 年 7 月に改定ガイドラインのドラフトが公表され、コメント募集が行われた⁽²⁾。その後、コメントが考慮された修正がなされ、2010 年 11 月 10 日付で、新 ICNIRP 低周波ガイドライン(以下、新ガイドライン)⁽³⁾が公表された。新ガイドラインでは、磁界参考レベルの変更や基本制限の指標の変更など、大幅な変更を伴うものとなっており、ドラフトからの変更も大幅になされた。本稿では、新旧ガイドラインの比較ならびに新ガイドラインにおける基本制限および参考レベルとの適合性評価方法について述べる。

2. 新旧ガイドラインの比較

本章では、新ガイドラインにおける旧ガイドラインからの変更点について述べる。また、参考のため、米国を中心に用いられている IEEE/ICES(米国電気電子学会／非電離放射の電磁界安全性に関する国際委員会)規格^(4,5)との対比についても示す(変更箇所の対比を表 1 に示す)。

(1) 全般事項

新ガイドラインでは、全般において下記の変更がなされた。

- ・従来 0 Hz を超える周波数から 300 GHz までひとつのガイドラインとして発行されていたものが、1 Hz～100 kHz の低周波・中間周波領域のみ現行のガイドラインを置き換えるものとなった。
- ・タイトルでは 100 kHz が上限であるが、基本制限および参考レベルの周波数帯域の上限は 10 MHz となっており、旧ガイドラインとの整合が図られている。

- ・基本制限と参考レベルの 2 段階構成など、基本的な構造に変化はない。
- ・磁気閃光現象は、従来有害とはみなせないとして、電磁界ばく露を制限する根拠として用いられていなかったが、今回の改訂において、有害な影響ではないものの「中枢神経系(CNS)組織への影響の適切なモデル」であるとして考慮されることになった。

(2) 基本制限

基本制限については、新ガイドラインにおいて以下の変更がなされた。

- ・基本制限の指標として、従来「体内誘導電流密度」で表されていたものが、「体内誘導電界」に変更された。
- ・旧ガイドラインでは、基本制限は「頭部および体幹」での評価とされ、のちの補足文書⁽⁶⁾で CNS 組織に限られるとの見解が出されていた。これに対し、今回の改定では、基本制限は「頭部の CNS 組織」ならびに「頭部および胴体の全組織」の 2 種類の対象に対し、生体作用の閾値に基づく異なる値が示されることになった。これは、ドラフトからの大きな変更箇所であり、4 種類の適用対象が区別されている IEEE 規格^(4,5)の考え方に近いものとなった。
- ・旧ガイドラインでは、体内誘導電流密度が指標とされ、神経系機能への急性影響を防ぐための閾値 100 mA/m^2 より、「安全率(safety factor)10」を見込んだ 10 mA/m^2 を職業ばく露の基本制限値としていたのに対し、新ガイドラインにおける「頭部の CNS 組織」では、磁気閃光の閾値の最下限を職業ばく露の基本制限とした。この際、安全率(今回から reduction factor: 低減率 が用いられている)は適用されていない。基本制限値は 10 Hz～25 Hz において一定、それ以上では周波数比例する。
- ・一方、「頭部および胴体の全組織」の基本制限は、末梢神経系(PNS)の刺激に基づくもので、反応の閾値 4 V/m (3 kHz 以下で一定、それ以上は周波

数比例)に、不確かさを考慮し、低減係数 5 を適用した値を職業ばく露の基本制限、低減係数 10 を適用した値を公衆ばく露の基本制限とした。

- ・商用周波数での基本制限(職業ばく露の場合)は、従来の「頭部および体幹」の 10 mA/m^2 から、「頭部の CNS 組織」の 100 mV/m (50 Hz), 120 mV/m (60 Hz)に置き換えられた。これらの体内誘導電界の基本制限値は、ドラフトからの変更もなされており(ドラフトでは、50 Hz/60 Hz とも 100 mV/m であった)、IEEE 規格⁽⁴⁾の基本制限値 44.3 mV/m (脳, 50 Hz の場合。IEEE では“確率係数”として 3 を見込んでいる)と比較して大きい値となっている(図 1)。

(3) 磁界参考レベル

磁界参考レベルについては、新ガイドラインにおいて以下の変更がなされた。

- ・新ガイドラインでは、25 Hz 以上の周波数において、基本制限の周波数依存性の変更および後述の人体モデルを用いた換算の変更を反映し、磁界参考レベルの数値に変更が生じた(図 2)。
- ・商用周波数では、公衆ばく露については、従来の「 0.1 mT (50 Hz), 0.0833 mT (60 Hz)」から「50 Hz, 60 Hz ともに 0.2 mT 」と大幅な緩和となった。
- ・また、IH 電磁調理器等で利用される中間周波数帯と呼ばれる $1 \text{ kHz} \sim 100 \text{ kHz}$ の帯域でも、磁界参考レベルが大幅に緩和された(従来の公衆に対する磁界参考レベル $6.25 \text{ } \mu\text{T}$ が $27 \text{ } \mu\text{T}$ となり、4 倍以上の緩和)。
- ・基本制限から参考レベルの換算根拠については、Dimbylow による数値計算結果⁽⁷⁾が引用されている(比較対象として、日本人詳細人体モデルを使用した平田・和氣・渡辺・多氣らによる論文⁽⁸⁾およびドイツの Bahr らの論文も併せて引用されている)。「頭部の CNS 組織」の基本制限が適用される周波数帯では、 1 mT , 50 Hz の一様磁界ばく露に対して、「脳の誘導電界の値」として 33 mV/m を対応させている (Dimbylow の論文⁽⁷⁾では、英国の NORMAN と呼ばれる人体モデルを用いた脳における 99 パーセンタイル値)。さらに、数値計算および人体のモデル化における「不確かさ 3」を考慮し、 100 mV/m とし、この関係が、「頭部の CNS 組織」に基づく基本制限値と参考レベルとの関係になっている。

- ・一方、「頭部および胴体の全組織」が適用される周波数帯では、 1 mT , 50 Hz の一様磁界ばく露に対して、「PNS への影響に関連する CNS 以外の組織における誘導電界の値」として 60 mV/m を対応させている (ただし Dimbylow の論文⁽⁷⁾において、これに該当する数値は見当たらない)。さらに本文には、頭部 CNS 組織と同様に「不確かさ 3」が考慮されたとあるが、基本制限値と参考レベルとの対比はこの関係になっていない。

(4) 電界参考レベル

電界参考レベルについては、新ガイドラインにおいて以下の変更がなされた。

- ・公衆ばく露では、25 Hz 以下の周波数帯で、従来の $1/2$ の値に変更され、厳しくなった(図 3)。この理由として、感知を予防する十分なマージンを見込んだことを挙げている。
- ・一方、職業ばく露については、中間周波数帯の電界参考レベルが大幅に厳しい値となった(20 kHz において、 610 V/m から 83.3 V/m)。なお、25 Hz 以上では、基本制限のみを考慮して参考レベルが決定されているとしているが、外部電界と体内誘導電界の換算が周波数ごとに異なっている。

(5) 接触電流

接触電流については、参考レベルのみが示されており、旧ガイドラインからの変更はない。旧ガイドラインにおいて、接触電流の参考レベルは、電磁界ばく露の基本制限(誘導電流密度)を超えることが容易に示され矛盾が生じていたが、今回の改定では、頭部 CNS とその他の組織の基本制限が分けられたため、再度の検討が必要となっている(たとえば、手で裸電導体に接触した場合、頭部の通過電流は小さく、体内電界も小さくなる)。

(6) その他

電界と磁界の同時ばく露は「加算的に扱う」との記述がドラフトにあり、従来の「別々に扱う」としたもののから大幅な変更と思われたが、最終的には弱い記述は残ったものの、ファクトシート⁽¹⁰⁾において、「従来から変更なし」の分類とされ、加算的に扱う必要はないものと判断される。

また、修正版が出されているが、低周波では不要となる足首電流 I_L の記載が残っているなど、表記上の不適切な箇所が一部ある。

3. 基本制限・参考レベルとの適合性評価方法

本章では、新ガイドラインにおける基本制限ならびに参考レベルとの適合性評価方法について述べる。

(1) 基本制限との適合性評価方法

旧ガイドラインでは、基本制限の誘導電流密度の評価方法は「1 cm²断面の平均」であったが、新ガイドラインでは、人体モデル内誘導電界の「辺長 2mm の立方体空間での平均」を計算し、「特定組織の 99 パーセンタイル値」を評価した上、さらに「網膜と皮膚を除き、平均化する空間に他組織を含む場合はこれを除外する」処理を行うものとされ、数値計算を想定した詳細な評価手法が本文中に明記されることとなった。なお、ドラフトの段階で示されていた評価指標「辺長 5mm の立方体空間での誘導電界の平均」は、とりやめとなった。

また、基本制限との適合性評価が不可避な状況として、「発生源からの距離が 20 cm 以内」の参考レベルを超過する状況が挙げられている。

(2) 参考レベルとの適合性評価方法

旧ガイドラインでは、非一様磁界ばく露に対し「磁界の全身平均を評価し参考レベルと比較する」との記述があった。ドラフトの段階においてこの記述が本文から消滅し、適合性評価方法の規格⁽¹⁾への影響が危惧されたが、最終的には復活した。新ガイドラインでは、磁界の全身平均評価を適用する条件が「発生源の端から 20 cm 以上の位置」であることが明記され、現行の IEC 規格と整合上、評価方法の詳細の決定は「標準化機関の役割」であるとし、さらに「標準化機関が新たな参考レベルを示してもよい」とし、IEC(国際電気標準会議)等、標準化機関の所掌範囲を明確に定義することとなった。また、測定に関わる不確かさは、前述の reduction factor には入っていないことが明記された。

4. おわりに

今回の改定により、今後影響を及ぼすことが予想される項目として、以下の点が挙げられる。

- ・参考レベルの周波数特性カーブの変更に伴い、このカーブに依存した表示を行っている測定器は、新ガイドラインにあわせた改修が必要となる。

る。

- ・旧ガイドラインを用いて、体内誘導電流密度により基本制限との適合性が評価された製品やばく露状況については、新ガイドラインによる指標(体内誘導電界)を用いた再評価が必要となる。
- ・公衆および職業ばく露に関する欧州 recommendation および directive について、今後、新ガイドラインに合わせた改定がなされるかどうか、あるいはその時期について関心が持たれる。
- ・導入の検討が進められている国内における磁界規制へ影響についても、注視する必要がある。

今回の ICNIRP ガイドライン改訂において参考レベルが変更となった理由は、主として数値計算の扱いの変更によるものである。本分野は依然研究レベルの段階であり、人体のモデル化の妥当性も含め十分なコンセンサスが得られているとはいえず、今後、新たな知見や数値計算結果の出現により、参考レベルの値が再評価される可能性があることにも留意する必要がある。

参 考 文 献

- (1) ICNIRP: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, Health Physics, Vol. 74, pp. 494-522 (1998)
- (2) ICNIRP: “Draft ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)” (2009)
- (3) ICNIRP: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)”, Health Physics, Vol. 99, pp. 818-836 (2010)
- (4) IEEE: “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz”, IEEE Std C95.6 (2002)
- (5) IEEE: “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz”, IEEE Std C95.1 (2005)
- (6) ICNIRP: “Response to questions and comments on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Q&A 10”, Health Physics, vol.75, no.4, pp.438-439 (1998)
- (7) P.J. Dimbylow, "Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic fields", Phys Med Biol, 50, 1047-1070 (2005)
- (8) A. Hirata, K. Wake K, S. Watanabe, M. Taki: “In-situ electric field and current density in Japanese male and

female models for uniform magnetic field exposures. Radiation Protection Dosimetry, vol.135, no.4, pp.272-275 (2009)

- (9) A. Bahr A, T. Bolz, C. Hennes: “Numerical dosimetry ELF: Accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines”, Health Physics, vol.92, no.6, pp.521-530 (2007)

- (10) ICNIRP: “Fact sheet on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)” (2010)

- (11) IEC62110 ed1.0: “Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure” (2009)

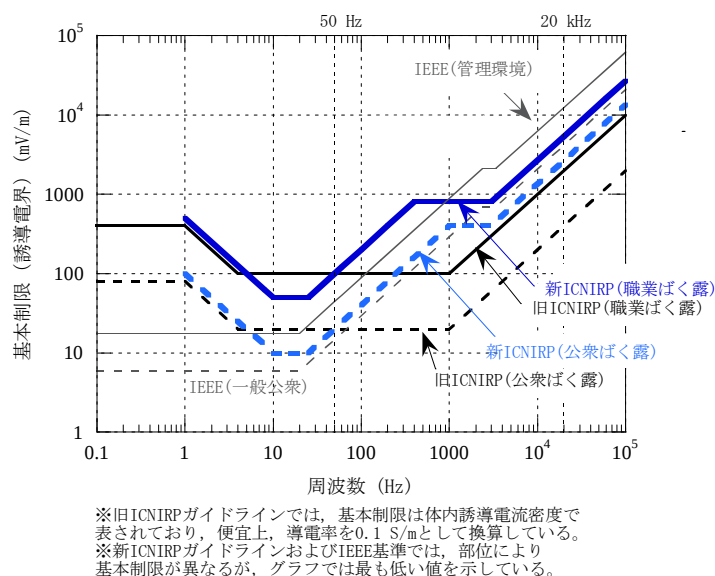


図1 基本制限の新旧 ICNIRP ガイドライン
および IEEE 規格との比較

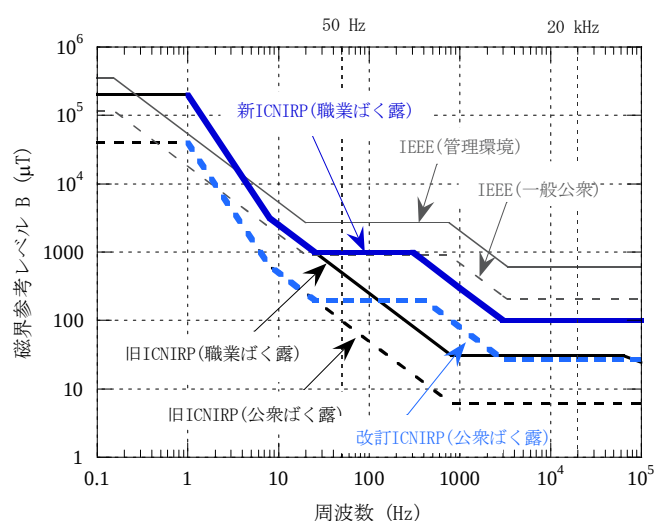


図2 磁界参考レベルの新旧 ICNIRP ガイドライン
および IEEE 規格との比較

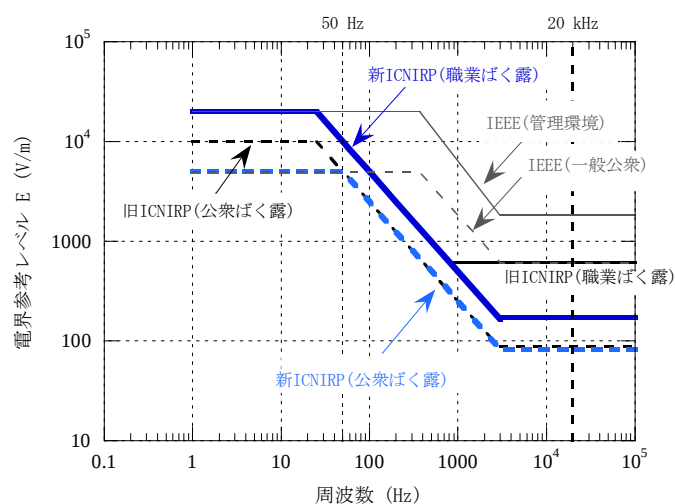


図3 電界参考レベルの新旧 ICNIRP ガイドラインおよび IEEE 規格との比較

表 1 新旧 ICNIRP ガイドラインの相違点および IEEE 規格との比較
(網掛けは変更箇所。＊は IEEE 規格との調和が図られた箇所)

項目		旧 ICNIRP ガイドライン	新 ICNIRP 低周波ガイドライン	IEEE 規格
構成	指針値の表現	基本制限と参考レベルの 2 段階	同等	同等(基本制限と最大許容ばく露)
	ばく露対象	公衆ばく露と職業ばく露	同等	同等(一般公衆と管理環境)
ばく露制限 の根拠	制定の根拠	確立された急性反応のみ	同等	同等
	生物学的知見の 整理の指標	体内電流密度	体内電界＊	体内(<i>in situ</i>)電界
	生物影響閾値算 出の理論モデル	記述はない	同等	Reilly の知見に基づく詳細な記述 がある
	眼内閃光現象	有害な現象とはみなさず、根拠と しない	有害な現象とはみなさないが、網 膜は CNS への影響の適切なモデル と考えられ、根拠とする＊	有害な現象とみなし、制限の根拠 とする
基本制限	生体作用の閾値 からの換算	閾値に安全係数 10 を適用	最小閾値を適用＊	閾値の 1 パーセンタイル値(中央 値の 1/3)を適用
	物理量	体内誘導電流密度	体内誘導電界＊	体内誘導電界
	評価方法	電流方向に直交する 1 cm ² の断面 での平均値	辺長 2 mm の立方体空間の平均 値、さらに組織の 99 パーセンタ イル値(網膜/皮膚を除き他組織を 含む空間は除外)	あらゆる方向の長さ 5 mm の線分 の平均値
	周波数特性(50 Hz 以上)	1 kHz まで一定 1 kHz 以上は周波数比例	周波数比例(頭部 CNS 組織)＊	周波数比例(脳)
	適用部位	部位に関わらず同じ値	部位ごとに異なる(2 種類)＊	部位ごとに異なる(4 種類)
	公衆の安全係数	5	同等(400Hz 以上では異なる)	3
	電界参考レベル の根拠	基本制限に基づく(一部)	同等(適用周波数に変更あり)	基本制限に基づかない(感知を基 準)
参考レベル	電界参考レベル の職業ばく露の 緩和特例	あり(間接影響を排除できる状況 では 2 倍を許容)	なし	あり(間接影響を排除できる状況 では無制限に許容)
	磁界参考レベル 導出時のモデル	なし(詳細な数値計算も含む複数の 計算結果を根拠)	同等(引用文献は異なる)	あり(楕円断面一様媒質モデル)
	公衆に対する安 全係数	電界参考レベル： 2 (50/60Hz), 7 (20/60 kHz) 磁界参考レベル：5	電界参考レベル： 2 (25Hz 以上), 4 (25Hz 以下) 磁界参考レベル： 5 (50/60Hz), 3.7(20/60 kHz)	電界参考レベル： 4 (50/60Hz), 3 (20/60 kHz) 磁界参考レベル：3
	非一様磁界の扱 い	参考レベルは「人体占有空間の平 均値」に適用	20 cm 以上発生源から離れた位置 では、参考レベルは「人体占有空 間の平均値」に適用	参考レベルは「人体占有空間の最 大値」に適用
その他	非正弦波ばく露	周波数領域評価	同等(時間領域評価を追加)	同等
	電界・磁界同時 ばく露	加算的に扱わない	結果的に同等(現象は加算的だが 同時に生じることはまれ)	加算的に扱わない
	敷設用地への公 衆の立入り	想定しない(緩和規定なし)	同等	敷設用地内では数値の緩和
	活線作業	電界の参考レベルを 2 倍に緩和	緩和条項がなくなった	本規格の適用を除外

FACT SHEET

ON THE GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz – 100 kHz) PUBLISHED IN HEALTH PHYS 99(6):818-836; 2010.

ICNIRP is the internationally recognized body that sets guidelines for protection against adverse health effects of non-ionizing radiation. It has recently published Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz); this fact sheet describes the content of these guidelines and their scientific background.

The guidelines replace previous recommendation given by ICNIRP for this frequency range. They are derived from the current scientific knowledge as described in extensive reviews especially those of the World Health Organization and ICNIRP. Some of the recommendations given in the new document deviate from former ones. Where appropriate, such differences are explained in detail.

The main interaction of low frequency time-varying electric and magnetic fields (EMF) with the human body is the induction of electric fields and associated currents in the tissues. In addition, exposure to low frequency electric fields can cause surface electric charge effects.

The responsiveness of electrically excitable nerve and muscle tissue to electric stimuli including those induced by exposure to low frequency electric and magnetic fields has been well established. A minimum electric field threshold of about $4\text{--}6 \text{ V m}^{-1}$ has been calculated for peripheral nerve stimulation, using a heterogeneous human model and data from volunteer exposure to the switched gradient fields of magnetic resonance (MR).

The most robustly established effect of electric fields below the threshold for direct nerve or muscle excitation is the induction of magnetic phosphenes, a perception of faint flickering light in the periphery of the visual field. They are thought to result from the interaction of the induced electric field with electrically excitable cells in the retina. This is formed as an outgrowth of the forebrain and can be considered a good but conservative model of processes that occur in CNS tissue in general. The threshold for induction of phosphenes in the retina has been estimated to lie between about 50 and 100 mV m^{-1} at 20 Hz . The evidence for neurobehavioral effects on brain electrical activity, cognition, sleep and mood in volunteers exposed to low frequency electric and magnetic fields is much less clear.

The scientific data available so far do not indicate that low frequency electric and/or magnetic fields affect the neuroendocrine system in a way that these would have an adverse impact on human health. There is no substantial evidence for an association between low frequency exposure and diseases such as Parkinson's disease, multiple sclerosis, and cardiovascular diseases. The evidence for an association between low frequency exposure and Alzheimer's disease and amyotrophic lateral sclerosis is inconclusive. The evidence for an association between low frequency exposure and developmental and reproductive effects is very weak.

A considerable number of epidemiological reports, published particularly during the 1980s and '90s, indicated that long term exposure to 50-60 Hz magnetic fields might be associated with an increased risk of childhood leukemia. Two pooled analyses indicate that an excess risk may exist for average exposures exceeding 0.3-0.4 μT . However, a combination of selection bias, some degree of confounding and chance could possibly explain the results. In addition, no biophysical mechanism has been identified and the experimental results from the animal and cellular laboratory studies do not support the notion that exposure to 50-60 Hz magnetic fields is a cause of childhood leukemia.

It is the view of ICNIRP that the currently existing scientific evidence that prolonged exposure to low frequency magnetic fields is causally related with an increased risk of childhood leukemia is too weak to form the basis for exposure guidelines. Thus, the perception of surface electric charge, the direct stimulation of nerve and muscle tissue and the induction of retinal phosphenes are the only well established adverse effects and serve as the basis for guidance.

Based on the review of the scientific evidence summarized above, ICNIRP recommends the following limits on exposure:

Occupational exposures: In the frequency range 10 Hz to 25 Hz, occupational exposure should be limited to fields that induce electric field strengths in CNS tissue of the head (i.e., the brain and retina) of less than 50 mV m^{-1} in order to avoid the induction of retinal phosphenes. These restrictions should also prevent any possible transient effects on brain function. These effects are not considered to be adverse health effects; however, ICNIRP recognizes that they may be disturbing in some occupational circumstances and should be avoided, but no additional reduction factor is applied. At lower frequencies the limit value for the induced electric field strength rises in reverse proportion to frequency. At higher frequencies, up to 400 Hz the limit value rises proportional to frequency. At frequencies in the range 400 Hz to 3 kHz occupational exposure should be limited to fields that induce electric field strengths in all parts of the body of less than 800 mV m^{-1} in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. At frequencies above 3 kHz the limit value rises proportionally with frequency.

In controlled environments, where workers are informed about the possible transient effects, exposure in the range 1 Hz to 400 Hz, should be limited to fields that induce electric fields in the head and body of less than 800 mV m^{-1} in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. This value has been obtained by applying a reduction factor of 5 to the peripheral nerve stimulation threshold of 4 V m^{-1} in order to account for the uncertainties described above. These restrictions rise proportionally with frequency above 3 kHz.

General public exposures: In the frequency range 10 Hz to 25 Hz, general public exposure should be limited to fields that induce electric field strengths in CNS tissue of the head (i.e., the brain and retina) of less than 10 mV m^{-1} , in order to avoid the induction of retinal phosphenes. These restrictions should also prevent any possible transient effects on brain function. A reduction factor of 5 has been applied to the phosphene threshold of 50 mV m^{-1} in order to account for uncertainties. Above and below this frequency range, the basic restriction rises. At 1000 Hz it intersects with basic restrictions that protect against peripheral and central myelinated nerve stimulation. Here, a reduction factor of 10, with respect to the above mentioned stimulation threshold of 4 V m^{-1} , results in a basic restriction of 400 mV m^{-1} , which should be applied to the tissues of all parts of the body.

The rationale for these guidelines limits can be found in full in "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) Health Physics 99(6):818-836; 2010."

The main changes, compared with previous recommendations by ICNIRP are:

- The basic restrictions are based on induced internal electric fields, instead of induced current density, as this is the physical quantity that determines the biological effect. Previous health risk

assessments were based on induced current density as most experimental data at that time were based on this metric. Now, sufficient information based on induced internal electric fields is available to use this metric in guidelines.

- Previous guidelines were set to prevent effects on nervous system functions and a limitation of induced current density in CNS tissue only was recommended. Phosphenes were not considered to be an adverse effect. ICNIRP now considers the effects on the retina as a model of effects in the brain and the phosphene threshold provides a basis for limiting exposure as specified above. In addition, stimulation effects on peripheral and central myelinated nerves have been included as explained above. This leads to an exposure limitation in any tissue of the body. The limit values were based on current scientific evidence and not simply converted on the basis of tissue conductivity from the former guidance on induced current density.

The table summarizes the basic restrictions

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field ($V m^{-1}$)
Occupational exposure		
CNS tissue of the head	1 - 10 Hz	0.5 / f
	10 Hz - 25 Hz	0.05
	25 Hz - 400 Hz	$2 \times 10^{-3} f$
	400 Hz - 3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} f$
All tissues of head and body	1 Hz - 3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} f$
General public exposure		
CNS tissue of the head	1 - 10 Hz	0.1 / f
	10 Hz - 25 Hz	0.01
	25 Hz - 1000 Hz	$4 \times 10^{-4} f$
	1000 Hz - 3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$
All tissues of head and body	1 Hz - 3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$

Notes:

- f is the frequency in Hz
- All values are rms
- in the frequency range above 100 kHz, RF specific basic restrictions need to be considered additionally.

Reference levels: Reference levels have been determined by mathematical modeling for the exposure conditions where the variation of the electric or magnetic field over the space occupied by the body is relatively small, i.e., uniform exposures. They are calculated for the condition of maximum coupling of the field to the exposed individual, thereby providing maximum protection. Frequency dependence and dosimetric uncertainties were taken into account. At the power frequency (50 Hz) the reference levels for occupational exposure are $10 kV m^{-1}$ for the electric field, and 1 mT for the magnetic field. With

respect to general public exposure the reference levels are 5 kV m^{-1} for the electric field and $200 \text{ }\mu\text{T}$ for the magnetic field.

For a very localized source with a distance of a few centimeters from the body, the only realistic option for the exposure assessment is to determine dosimetrically the induced electric field, case-by case. With greater distances the distribution of the field becomes less localized but is still non-uniform, in which case it is possible to compare the spatial average along the body or part of it with the reference levels. Contact current may result in shock and burn hazards. Therefore reference levels for contact current are given for frequencies up to 100 kHz.

The main changes compared to the previous recommendations are:

- While in 1998 dosimetric considerations were based on simple geometrical models, the new guidelines use data from computational simulations based on anatomically detailed human body models.
- The revised basic restrictions as well as the dosimetric models used result in reference levels that deviate in some areas from previous ones. There is a tendency for magnetic field reference levels to be less conservative, whereas the electric field reference levels are, with some exceptions, basically unchanged.

Additional advice is given on how to apply the guidelines in the case of simultaneous exposure to electric and magnetic fields, to multiple frequency fields and to non-sinusoidal fields. There is no fundamental change compared with previous advice.

Protective Measures: ICNIRP notes that protection of people exposed to electric and magnetic fields could be ensured by compliance with all aspects of these guidelines. Appropriate protective measures must be implemented when exposure results in the basic restrictions being exceeded. Engineering controls should be undertaken in conjunction with administrative controls. In the workplace, additionally personal protection measures can be used, but these should be regarded as a last resort. It is also essential to implement rules that will prevent interference with medical electronic devices, detonation of electro-explosive devices, and fires and explosions resulting from ignition of flammable materials by sparks. All this is in line with previous advice.

Long-Term Effects: As noted above, epidemiological studies have found that everyday chronic low-intensity power frequency magnetic field exposure is associated with an increased risk of childhood leukemia. However, laboratory studies have not supported this association and a causal relationship between magnetic fields and childhood leukemia or any other long term effect has not been established. The absence of established causality is the reason why the epidemiological results have not been addressed in the basic restrictions. ICNIRP is well aware that these epidemiological results have triggered concern within the population in many countries. It is ICNIRP's view, that this concern is best addressed within the national risk management framework. Risk management in general is based on many different aspects, including social, economic, and political issues. ICNIRP in this context provides scientifically based advice only. Additional risk management advice, including considerations on precautionary measures, has been given for example by the World Health Organization and other entities.

Further details can be found in Health Physics 99(6):818-836; 2010.

ファクトシート

時間変化する電界および磁界（1 Hz–100 kHz）へのばく露制限に関するガイドライン （Health Phys 99(6):818-836; 2010 に掲載） について

ICNIRP は、非電離放射線の健康への有害な影響に対する防護のためのガイドラインを制定する、国際的に承認された組織である。このたび、ICNIRP は、時間変化する電界および磁界（1 Hz から 100 kHz まで）へのばく露制限に関するガイドラインを公表した：本ファクトシートは、当該ガイドラインの内容とその科学的背景を述べる。

このガイドラインは、この周波数範囲について ICNIRP が提供した以前の推奨に置き換わるものである。このガイドラインは、広範なレビュー、特に世界保健機関と ICNIRP によるものに記述されている現時点での科学的知識から導き出された。新しい文書で提供される推奨のいくつかは、以前の推奨とは相違している。必要な場合には、この相違点について詳しく説明する。

低周波の時間変化する電界および磁界（EMF）と人体との主な相互作用は、人体組織中での電界の誘導とそれに関連する電流の誘導である。加えて、低周波の電界へのばく露は表面電荷作用を起こすことがある。

低周波の電界および磁界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神経および筋組織の応答は十分に確立されている。末梢神経刺激に対する電界強度の閾値の最小値はおおよそ $4-6 \text{ V m}^{-1}$ と計算されている。これは、不均一人体モデルおよび磁気共鳴（MR）装置の切替勾配磁界へのボランティアのばく露から得られたデータを用いて計算された。

直接的な神経や筋の興奮の閾値を下回るレベルで、最も強固に確立された電界の影響は磁気閃光現象、すなわち、視野周辺部に点滅する微弱な光を知覚する現象の誘発である。この現象は、誘導電界と網膜の電氣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、中枢神経系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。網膜での閃光現象誘発閾値は、20 Hz で、およそ 50 と 100 mV m^{-1} の間と見積もられている。低周波の電界および磁界にばく露されたボランティアにおける脳の電氣的活動、認知、睡眠、気分に関する神経行動学的影響の証拠はそれより遙かに明確さを欠く。

低周波の電界および／または磁界が、人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ことを、これまでに利用可能な科学的データは示していない。低周波ばく露とパーキンソン病、多発性硬化症および心臓血管系疾患などの疾患との関連について、実質的な証拠はない。低周波ばく露とアルツハイマー病および筋萎縮性側索硬化症との関連について、証拠は決定的ではない。低周波ばく露と発達および生殖への影響との関連について、証拠は非常に弱い。

特に 1980 年代から 1990 年代に公表されたかなりの数の疫学報告は、50–60 Hz 磁界への長期ばく露が小児白血病のリスク上昇と関連するかも知れないことを示した。2つのプール分析は、 $0.3-0.4 \text{ } \mu\text{T}$ を超

える平均ばく露において過剰リスクがあるかも知れないことを示している。しかし、これらの結果は、選択バイアスと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。加えて、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する考えを支持しない。

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。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が、唯一の、十分に確立された健康への有害な影響であり、指針の根拠として利用できる。

以上に要約したような科学的証拠のレビューに基づき、ICNIRP は以下のばく露制限値を推奨する。

職業的ばく露： 網膜閃光現象の誘発を回避するために、10 Hz から 25 Hz の周波数範囲において、職業的ばく露は、頭部の中枢神経系組織（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されるはずである。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は作業の妨害となるかも知れないので避けるのがよいと ICNIRP は認識するが、追加的な低減係数は適用されない。これより低い周波数範囲では、誘導電界強度の制限値は周波数に反比例して上昇する。これより高く、400 Hz までの周波数範囲では、制限値は周波数に比例して上昇する。400 Hz から 3 kHz までの周波数範囲では、末梢および中枢の有髄神経刺激を回避するために、職業的ばく露は人体の全ての部位に 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。3 kHz 以上の周波数範囲では、制限値は周波数に比例して上昇する。

管理された環境においては、作業者は起きる可能性のある一過性の影響について知識を与られているので、1 Hz から 400 Hz までの周波数範囲でのばく露は、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。この値は、上述の不確かさを考慮するために末梢神経刺激閾値 4 V m^{-1} に対し低減係数 5 を適用したものである。3 kHz 以上でこの制限値は周波数に比例して上昇する。

公衆ばく露： 10 Hz から 25 Hz の周波数範囲では、網膜閃光現象の誘発を回避するために、公衆のばく露は、頭部の中枢神経系組織（すなわち、脳と網膜）に 10 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されるはずである。不確かさを考慮するために、閃光現象の閾値 50 mV m^{-1} に低減係数 5 が適用されたものである。この周波数範囲より高い周波数および低い周波数では基本制限値は上昇する。これは、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、上述の刺激閾値 4 V m^{-1} に対し低減係数 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。

これらのガイドライン制限値の論拠の全ては、“Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz to 100 Hz) Health Physics 99(6):818-836;2010” で見ることができる。

ICNIRP の以前の推奨と比較して、大きな変更は以下の通りである。

- 基本制限は、誘導電流密度に代わり、生物学的影響を決定する物理量である体内誘導電界に基づくものとなった。以前の健康リスク評価は誘導電流密度に基づいたが、それは、当時の実験データの大半が誘導電流密度に基づいていたためである。現在では、ガイドラインで測定尺度として用いるための、

体内誘導電界に基づく十分な情報が入手可能である。

- 以前のガイドラインは、神経系機能に対する影響の防止を目的として制定され、中枢神経系組織のみにおける誘導電流密度の制限が推奨された。閃光現象を有害な影響であると考えなかった。現在、ICNIRP は、網膜への影響を脳における影響のモデルと考えて、上述に規定したように、閃光現象の閾値はばく露制限の根拠を提供する。加えて、上述のように、末梢および中枢の有髄神経に対する刺激作用が含められた。これらより、人体の全ての部位におけるばく露制限値が導かれる。制限値は現時点での科学的証拠に基づくものであり、誘導電流密度に関する以前のガイダンスから組織の導電率に基づいて単純に換算されたものではない。

表は、基本制限値を要約したものである。

ばく露特性	周波数範囲	体内電界強度 ($V m^{-1}$)
職業的ばく露		
頭部の中枢神経系組織	1 Hz - 10 Hz	0.5 / f
	10 Hz - 25 Hz	0.05
	25 Hz - 400 Hz	$2 \times 10^{-3} f$
	400 Hz - 3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} f$
頭部と体部の全ての組織	1 Hz - 3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} f$
公衆ばく露		
頭部の中枢神経系組織	1 Hz - 10 Hz	0.1 / f
	10 Hz - 25 Hz	0.01
	25 Hz - 1000 Hz	$4 \times 10^{-4} f$
	1000 Hz - 3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$
頭部と体部の全ての組織	1 Hz - 3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$

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 に特有な基本制限を追加的に考慮する必要がある。

参考レベル： 参考レベルは、人体が占める空間での電界または磁界の変動が比較的小さい、すなわち一様ばく露というばく露条件のもとで、数学的モデルを用いて決定された。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。商用周波 (50 Hz) において、職業ばく露に対する参考レベル値は電界で $10 kV m^{-1}$ 、磁界で 1 mT である。公衆のばく露に対する参考レベル値は電界で $5 kV m^{-1}$ 、磁界で 200 μT である。

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。距離が大きくなるにつれて、



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参考レベルと比較することが可能である。接触電流は電撃および熱傷の傷害を生じるかも知れない。したがって、接触電流に対する参考レベルは、100 kHz[※]までの周波数について与えられる。

ICNIRP の以前の推奨と比較して、大きな変更は以下の通りである。

- 1998 年のガイドラインでは、ドシメトリの検討は単純な幾何学的モデルに基づいていたが、今回の新しいガイドラインは、解剖学的に詳細な人体モデルに基づいたコンピュータ・シミュレーションから得られたデータを用いている。
- ドシメトリモデルに加えて、基本制限の変更により、参考レベルは、ある周波数範囲で以前のものと異なるものになった。傾向としては、磁界の参考レベルはやや緩和された一方、電界の参考レベルは、いくつかの例外はあるものの、基本的に変わっていない。

電界および磁界への同時ばく露、複数の周波数の電磁界および非正弦波電磁界への同時ばく露の場合におけるガイドラインの適用方法に関して、追加的助言が与えられた。これについては、以前の助言と比較して、根本的変更はない。

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は確保されることを特に言及する。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。制度的管理と併せて工学的管理が実施されることになるであろう。職場では、追加的な個人用防護対策を用いることができるが、あくまでも最後の手段とみなすのがよい。医用電子機器との電磁干渉、電気式爆発装置の起爆、火花放電による可燃性物質の発火の結果として生じる火災および爆発を防止する規則を実施することも重要である。これら全ては従来の助言に沿うものである。

長期的影響：上述に指摘したように、疫学研究は、低レベル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することを見出している。しかしながら、実験研究は磁界と小児白血病のこのような関連を支持しておらず、磁界と小児白血病またはその他のいかなる長期的影響との因果関係も確立されていない。この確立された因果関係がないことが、基本制限で疫学研究の結果を扱わない理由である。このような疫学研究の結果が、多くの国の人々が懸念をもつきっかけとなったことを ICNIRP はよく承知している。この懸念に対しては、各国のリスク管理の枠組みの中で最善に対処されるというのが、ICNIRP の見解である。リスク管理は一般に、社会的、経済的、政治的問題を含む多くの異なる局面に基づいている。この状況の中で、ICNIRP は科学に基づいた助言のみを提供する。プレコーショナリ対策に関する検討を含むリスク管理上の追加的助言は、例えば、世界保健機関および他の組織によって与えられている。

さらなる詳細は、Health Physics 99(6):818-836;2010 で見ることができる。

【翻訳:電磁界情報センター】

※（訳者注）ガイドラインでは、接触電流の参考レベルは 10MHz までの周波数について与えられている。

GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz TO 100 kHz)

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

INTRODUCTION

IN THIS document, guidelines are established for the protection of humans exposed to electric and magnetic fields in the low-frequency range of the electromagnetic spectrum. The general principles for the development of ICNIRP guidelines are published elsewhere (ICNIRP 2002). For the purpose of this document, the low-frequency range extends from 1 Hz to 100 kHz. Above 100 kHz, effects such as heating need to be considered, which are covered by other ICNIRP guidelines. However, in the frequency range from 100 kHz up to approximately 10 MHz protection from both, low frequency effects on the nervous system as well as high frequency effects need to be considered depending on exposure conditions. Therefore, some guidance in this document is extended to 10 MHz to cover the nervous system effects in this frequency range. Guidelines for static magnetic fields have been issued in a separate document (ICNIRP 2009). Guidelines applicable to movement-induced electric fields or time-varying magnetic fields up to 1 Hz will be published separately.

This publication replaces the low-frequency part of the 1998 guidelines (ICNIRP 1998). ICNIRP is currently revising the guidelines for the high-frequency portion of the spectrum (above 100 kHz).

SCOPE AND PURPOSE

The main objective of this publication is to establish guidelines for limiting exposure to electric and magnetic fields (EMF) that will provide protection against all established adverse health effects.

Studies on both direct and indirect effects of EMF have been assessed: direct effects result from direct interactions of fields with the body; indirect effects involve interactions

with a conducting object where the electric potential of the object is different from that of the body. Results of laboratory and epidemiological studies, basic exposure assessment criteria, and reference levels for practical hazard assessment are discussed, and the guidelines presented here are applicable to both occupational and public exposure.

The restrictions in these guidelines were based on established evidence regarding acute effects; currently available knowledge indicates that adherence to these restrictions protect workers and members of the public from adverse health effects from exposure to low frequency EMF. The epidemiological and biological data concerning chronic conditions were carefully reviewed and it was concluded that there is no compelling evidence that they are causally related to low-frequency EMF exposure.

These guidelines do not address product performance standards, which are intended to limit EMF emissions from specific devices under specified test conditions, nor does the document deal with the techniques used to measure any of the physical quantities that characterize electric, magnetic and electromagnetic fields. Comprehensive descriptions of instrumentation and measurement techniques for accurately determining such physical quantities may be found elsewhere (IEC 2004, 2005a; IEEE 1994, 2008).

Compliance with the present guidelines may not necessarily preclude interference with, or effects on, medical devices such as metallic prostheses, cardiac pacemakers and implanted defibrillators and cochlear implants. Interference with pacemakers may occur at levels below the recommended reference levels. Advice on avoiding these problems is beyond the scope of the present document but is available elsewhere (IEC 2005b).

These guidelines will be periodically revised and updated as advances are made in the scientific knowledge concerning any aspect relevant for limiting exposure of low frequency time-varying electric and magnetic fields.

QUANTITIES AND UNITS

Whereas electric fields are associated only with the presence of electric charge, magnetic fields are the result

* ICNIRP Secretariat, c/o Gunde Ziegelberger, c/o Bundesamt für Strahlenschutz, Ingolstaedter Landstrasse 1, 85764 Oberschleissheim, Germany.

For correspondence or reprints contact info@icnirp.org.

(Manuscript accepted 15 June 2010)

0017-9078/10/0

Copyright © 2010 Health Physics Society

DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86

of the physical movement of electric charge (electric current). An electric field, E , exerts a force on an electric charge and is expressed in volts per meter (V m^{-1}). Similarly, magnetic fields can exert physical forces on electric charges, if such charges are in motion and/or the magnetic field varies with time. Electric and magnetic fields have both magnitude and direction (i.e., they are vectors). A magnetic field can be specified in two ways—as magnetic flux density, B , expressed in tesla (T), or as magnetic field strength, H , expressed in ampere per meter (A m^{-1}). The two quantities are related by the expression:

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

where μ is the constant of proportionality (the magnetic permeability); in vacuum and air, as well as in non-magnetic (including biological) materials, μ has the value $4\pi \times 10^{-7}$ when expressed in Henry per meter (H m^{-1}). Thus, in describing a magnetic field for protection purposes, only one of the quantities B or H needs to be specified.

Exposure to time-varying EMF results in internal electric fields and in body currents and energy absorption in tissues that depend on the coupling mechanisms and the frequency involved. The internal electric field E_i and current density J are related by Ohm's Law:

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

where σ is the electrical conductivity of the medium. The dosimetric quantities used in these guidelines are as follows:

- electric field E_i ; and
- Current I .

A general summary of EMF and dosimetric quantities and units used in these guidelines is provided in Table 1.

SCIENTIFIC BASIS FOR LIMITING EXPOSURE

These guidelines for limiting exposure have been developed following a thorough review of the published

scientific literature. Well established criteria were used to evaluate the scientific validity of the methodology, results and conclusions of reported findings. Only effects for which there was reliable scientific evidence were used as the basis for the exposure restrictions.

Biological effects of exposure to low frequency electromagnetic fields have been reviewed by the International Agency for Research on Cancer (IARC), ICNIRP, and the World Health Organization (WHO) (IARC 2002; ICNIRP 2003a; WHO 2007a) and national expert groups. Those publications provided the scientific basis for these guidelines.

As detailed below, the basis for the guidelines is two-fold: Exposure to low-frequency electric fields may cause well-defined biological responses, ranging from perception to annoyance, through surface electric-charge effects. In addition, the only well established effects in volunteers exposed to low frequency magnetic fields are the stimulation of central and peripheral nervous tissues and the induction in the retina of phosphenes, a perception of faint flickering light in the periphery of the visual field. The retina is part of the CNS and is regarded as an appropriate, albeit conservative, model for induced electric field effects on CNS neuronal circuitry in general.

In view of the uncertainty inherent in the scientific data, reduction factors have been applied in establishing the exposure guidelines. For details see ICNIRP 2002.

Coupling mechanisms between fields and the body

Human and animal bodies significantly perturb the spatial distribution of a low frequency electric field. At low frequencies, the body is a good conductor, and the perturbed field lines external to the body are nearly perpendicular to the body surface. Oscillating charges are induced on the surface of the exposed body and these produce currents inside the body. Key features of dosimetry for exposure of humans to low frequency electric fields include:

- the electric field induced inside the body is considerably smaller than the external electric field, e.g., five to six orders of magnitude at 50–60 Hz;
- for a given external electric field, the strongest fields are induced when the human body is in perfect contact with the ground through the feet (electrically grounded), and the weakest induced fields are for the body insulated from the ground (in “free space”);
- the total current flowing in a body in perfect contact with ground is determined by the body size and shape (including posture) rather than tissue conductivity;
- the distribution of induced currents across the various organs and tissues is determined by the conductivity of those tissues; and

Table 1. Quantities and corresponding SI units used in these guidelines.

Quantity	Symbol	Unit
Conductivity	σ	Siemens per meter (S m^{-1})
Current	I	Ampere (A)
Current density	J	Ampere per square meter (A m^{-2})
Frequency	f	Hertz (Hz)
Electric field strength	E	Volt per meter (V m^{-1})
Magnetic field strength	H	Ampere per meter (A m^{-1})
Magnetic flux density	B	Tesla (T)
Magnetic permeability	μ	Henry per meter (H m^{-1})
Permittivity	ϵ	Farad per meter (F m^{-1})

- there is also an indirect effect, where the current in the body is produced by contact with a conductive object located in an electric field.

For magnetic fields, the permeability of tissue is the same as that of air, so the field in tissue is the same as the external field. Human and animal bodies do not significantly perturb the field. The main interaction of magnetic fields is the Faraday induction of electric fields and associated currents in the tissues. Electric fields may also be induced by movement in a static magnetic field. Key features of dosimetry for exposure of humans to low frequency magnetic fields include:

- for a given magnetic field strength and orientation, higher electric fields are induced in the bodies of larger people because the possible conduction loops are larger;
- the induced electric field and current depend on the orientation of the external magnetic field to the body. Generally induced fields in the body are greatest when the field is aligned from the front to the back of the body, but for some organs the highest values are for different field alignments;
- the weakest electric fields are induced by a magnetic field oriented along the principal body axis; and
- the distribution of the induced electric field is affected by the conductivity of the various organs and tissues.

Conclusions from the current scientific literature

Neurobehavior. Exposure to low-frequency electric fields causes well-defined biological responses, ranging from perception to annoyance, through surface electric-charge effects (Reilly 1998, 1999). Thresholds for direct perception by the most sensitive 10% of volunteers at 50–60 Hz ranged between 2 and 5 kV m⁻¹ and 5% found 15–20 kV m⁻¹ annoying. The spark discharge from a person to ground is found to be painful to 7% of volunteers in a field of 5 kV m⁻¹, whereas it would be painful to about 50% in a 10 kV m⁻¹ field. Thresholds for the spark discharge from a charged object through a grounded person depend on the size of the object and therefore require individual assessment.

The responsiveness of electrically excitable nerve and muscle tissue to electric stimuli including those induced by exposure to low-frequency EMFs has been well established for many years (e.g., Reilly 2002; Saunders and Jefferys 2007). Myelinated nerve fibers of the human peripheral nervous system have been estimated to have a minimum threshold value of around 6 V_{peak} m⁻¹ (Reilly 1998, 2002), based on theoretical calculation using a nerve model. However, peripheral nerve stimulation induced during volunteer exposure to

the switched gradient magnetic fields of magnetic resonance (MR) systems suggested that the threshold for perception may be as low as about 2 V m⁻¹ (Nyenhuis et al. 2001), based on calculations using a homogeneous human phantom model. A more accurate calculation of the electric fields induced in the tissues of a heterogeneous human model based on data from the above MR study has been carried out by So et al. (2004). These authors estimated the minimum threshold for peripheral nerve stimulation of between about 4–6 V m⁻¹, based on the assumption that stimulation took place in the skin or subcutaneous fat. With stronger stimuli, discomfort and then pain ensue; the lowest percentile for intolerable stimulation is approximately 20% above the median threshold for perception (ICNIRP 2004). Myelinated nerve fibers of the central nervous system (CNS) can be stimulated by electric fields induced during transcranial magnetic stimulation (TMS); the pulsed fields induced in cortical tissue during TMS are quite high (>100 V m⁻¹_{peak}), although theoretical calculation suggests that minimum stimulation threshold values may be as low as ~10 V m⁻¹_{peak} (Reilly 1998, 2002). For both sets of nerves, thresholds rise above around 1–3 kHz due to the progressively shorter time available for the accumulation of electric charge on the nerve membrane and below about 10 Hz due to the accommodation of a nerve to a slowly depolarizing stimulus.[†]

Muscle cells are in general less sensitive to direct stimulation than nerve tissue (Reilly 1998). Cardiac muscle tissue deserves particular attention because aberrant function is potentially life-threatening; however, ventricular fibrillation thresholds exceed those for cardiac muscle stimulation by a factor of 50 or more (Reilly 2002), although this drops considerably if the heart is repeatedly excited during the vulnerable period of the cardiac cycle. Thresholds rise above about 120 Hz due to the much longer time-constant of muscle fibers compared with myelinated nerves.

The most robustly established effect of electric fields below the threshold for direct nerve or muscle excitation is the induction of magnetic phosphenes, the perception of faint flickering light in the periphery of the visual field, in the retinas of volunteers exposed to low frequency magnetic fields. The minimum threshold flux density is around 5 mT at 20 Hz, rising at higher and lower frequencies. In these studies, the phosphenes are thought to result from the interaction of the induced electric field with electrically excitable cells in the retina. This is formed as an outgrowth of the forebrain and can

[†] Accommodation does not occur for example in response to the low-frequency component of trapezoid or rectangular pulses with quick rise-times but low repetition frequencies such as those found in the switched gradient fields of MR systems.

be considered a good but conservative model of processes that occur in CNS tissue in general (Attwell 2003). The threshold for induced electric field strengths in the retina has been estimated to lie between about 50 and 100 mV m⁻¹ at 20 Hz, rising at higher and lower frequencies (Saunders and Jefferys 2007) although there is considerable uncertainty attached to these values.

The integrative properties of the nervous tissue of the CNS may render it, and therefore functions such as cognitive processes like memory, sensitive to the effects of these physiologically weak electric fields. Saunders and Jefferys (2002) suggested that the electrical polarization of neurons in the CNS by such weak electric fields might enhance the synchronization of active groups of neurons and affect the recruitment of adjacent non-active neurons, thereby influencing overall nerve cell excitability and activity. *In vitro* evidence from studies using brain slices suggests that minimum thresholds for these effects lie below frequencies of ~100 Hz and may be as low as 100 mV m⁻¹ (Saunders and Jefferys 2007).

Two research groups have investigated the effects of weak electric fields applied directly to the head via electrodes[†] on brain electrical activity and function in humans. One group (Kanai et al. 2008) reported that stimulation of the visual cortex induced the perception of cortical phosphenes (similar in appearance to phosphenes induced in the retina) when the stimulus frequency was characteristic for visual cortical activity either in dark conditions (around 10 Hz) or in light conditions (around 20 Hz) but not at higher or lower frequencies. The other group (Pogosyan et al. 2009) applied a 20 Hz signal to the motor cortex of volunteers during the performance of a visuo-motor task and found a small but statistically significant slowing of hand movement during task performance, which was consistent with an increased synchronization of 20 Hz motor cortex activity. No effect was seen at a lower stimulus frequency. In summary, both groups of authors found that 10–20 Hz electric fields, above the threshold for retinal phosphenes, can interact with ongoing rhythmic electrical activity in the visual and motor cortices and slightly affect visual processing and motor co-ordination, carrying the implication that 10–20 Hz EMF-induced electric fields of sufficient magnitude may have similar effects.

However, the evidence for other neurobehavioral effects on brain electrical activity, cognition, sleep, and mood in volunteers exposed to low frequency EMFs is much less clear (Cook et al. 2002, 2006; Crasson 2003; ICNIRP 2003a; Barth et al. 2010). Generally, such

studies have been carried out at exposure levels at or below about 1–2 mT; i.e., below those required to induce the effects described above, and have produced evidence of subtle and transitory effects at most. The conditions necessary to elicit such responses are not well defined at present.

Some people claim to be hypersensitive to EMFs in general. However, the evidence from double-blind provocation studies suggests that the reported symptoms are unrelated to EMF exposure (Rubin et al. 2005; WHO 2007a).

There is only inconsistent and inconclusive evidence that exposure to low-frequency electric and magnetic fields causes depressive symptoms or suicide (WHO 2007a).

In animals, the possibility that exposure to low frequency fields may affect neurobehavioral functions has been explored from a number of perspectives using a range of exposure conditions. Few effects have been established. There is convincing evidence that low-frequency electric fields can be detected by animals, most likely as a result of surface charge effects, and may elicit transient arousal or mild stress. Other possible field-dependent changes are less well defined (WHO 2007a).

Thus, the perception of surface electric charge, the direct stimulation of nerve and muscle tissue and the induction of retinal phosphenes are well established and can serve as a basis for guidance. In addition, there is also indirect scientific evidence that brain functions such as visual processing and motor co-ordination can be transiently affected by induced electric fields. However, the evidence from other neurobehavioral research in volunteers exposed to low frequency electric and magnetic fields is not sufficiently reliable to provide a basis for human exposure limits.

Neuroendocrine system. The results of volunteer studies as well as residential and occupational epidemiological studies suggest that the neuroendocrine system is not adversely affected by exposure to 50–60 Hz electric or magnetic fields. This applies particularly to circulating levels of specific hormones, including melatonin released by the pineal gland, and to a number of hormones involved in the control of body metabolism and physiology released by the pituitary gland. Most laboratory studies of the effects of 50–60 Hz exposure on night-time melatonin levels in volunteers found no effect when care was taken to control possible confounding (WHO 2007a).

From the large number of animal studies investigating the effects of 50–60 Hz electric and magnetic fields on rat pineal and serum melatonin levels, some reported

[†] Transcranial AC stimulation or tACS is applied at levels below local skin perception thresholds.

that exposure resulted in night-time suppression of melatonin, while other studies did not. In seasonally breeding animals, the evidence for an effect of exposure to 50–60 Hz fields on melatonin levels and melatonin-dependent reproductive status is predominantly negative (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). No convincing effect on melatonin levels has been seen in a study of non-human primates chronically exposed to 50–60 Hz fields.

No consistent effects have been seen in the stress-related hormones of the pituitary-adrenal axis in a variety of mammalian species, with the possible exception of short-lived stress following the onset of low frequency electric-field exposure at levels high enough to be perceived (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Similarly, while few studies have been carried out, mostly negative or inconsistent effects have been seen in the levels of growth hormone and hormones involved in controlling metabolic activity or associated with the control of reproduction and sexual development.

Overall, these data do not indicate that low frequency electric and/or magnetic fields affect the neuroendocrine system in a way that would have an adverse impact on human health.

Neurodegenerative disorders. It has been hypothesized that exposure to low frequency fields is associated with several neurodegenerative diseases. For Parkinson's disease and multiple sclerosis the number of studies has been small and there is no evidence for an association between low frequency exposure and these diseases. For Alzheimer's disease and amyotrophic lateral sclerosis (ALS) more studies have been published. Some of these reports suggest that people employed in electrical occupations might have an increased risk for ALS (Kheifets et al. 2009). So far, no biological mechanism has been established which can explain this association, although it could have arisen because of confounders related to electrical occupations, such as electric shocks. Furthermore, studies using more sophisticated exposure assessment methods, e.g., job-exposure matrices, have generally not observed increased risks (Kheifets et al. 2009). For Alzheimer's disease, results are inconsistent. Strongest associations have been found in clinic based studies with a large potential for selection bias, but increased risks have also been observed in some, but not all, population based studies. Subgroup analyses within studies strengthen the impression of inconsistent data (Kheifets et al. 2009). Statistical heterogeneity between study results speaks against pooling of available results, although such attempts have been made (Garcia et al. 2008). In addition, there is some evidence for publication bias. Control of potential confounding from other occupational exposures has generally not been made. So far only one residential

study is available, indicating an increased risk for Alzheimer's disease after long-term exposure, but based on very small numbers of cases (Huss et al. 2009).

The studies investigating the association between low frequency exposure and Alzheimer's disease are inconsistent. Overall, the evidence for the association between low frequency exposure and Alzheimer's disease and ALS is inconclusive.

Cardiovascular disorders. Experimental studies of both short-term and long-term exposure indicate that, while electric shock is an obvious health hazard, other hazardous cardiovascular effects associated with low frequency fields are unlikely to occur at exposure levels commonly encountered environmentally or occupationally (WHO 2007a). Though various cardiovascular changes have been reported in the literature, the majority of effects are small, and the results have not been consistent within or between studies (McNamee et al. 2009). Most of the studies of cardiovascular disease morbidity and mortality have shown no association with exposure (Kheifets et al. 2007). Whether a specific association exists between exposure and altered autonomic control of the heart remains speculative. Overall, the evidence does not suggest an association between low frequency exposure and cardiovascular diseases.

Reproduction and development. Overall, epidemiological studies have not shown an association between human adverse reproductive outcomes and maternal or paternal exposure to low frequency fields. There is some limited evidence for increased risk of miscarriage associated with maternal magnetic field exposure, but this reported association has not been found in other studies and overall the evidence for such an association is poor.

Exposures to low frequency electric fields of up to 150 kV m^{-1} have been evaluated in several mammalian species, including studies with large group sizes and exposure over several generations; the results consistently show no adverse developmental effects (ICNIRP 2003a; WHO 2007a).

Low frequency magnetic field exposure of mammals does not result in gross external, visceral or skeletal malformations using fields up to 20 mT (Juutilainen 2003, 2005; WHO 2007a). Overall, the evidence for an association between low frequency and developmental and reproductive effects is very weak.

Cancer. A considerable number of epidemiological reports, carried out particularly during the 1980's and 90's, indicated that long term exposure to 50–60 Hz magnetic fields, orders of magnitude below the limits of

the 1998 ICNIRP exposure guidelines might be associated with cancer. While the first studies looked at childhood cancer in relation to magnetic fields, later research also investigated adult cancers. In general, the initially observed associations between 50–60 Hz magnetic fields and various cancers were not confirmed in studies designed to see whether the initial findings could be replicated. However, for childhood leukemia the situation is different. The research that followed the first study has suggested that there may be a weak association between the higher levels of exposure to residential 50–60 Hz magnetic fields and childhood leukemia risk, although it is unclear whether it is causal: a combination of selection bias, some degree of confounding and chance could explain the results (WHO 2007a). Two pooled analyses (Ahlbom et al. 2000; Greenland et al. 2000) indicate that an excess risk may exist for average exposures exceeding 0.3–0.4 μT , although the authors of those analyses cautioned strongly that their results cannot be interpreted as showing a causal relationship between magnetic fields and childhood leukemia.

At the same time, no biophysical mechanism has been identified and the experimental results from the animal and cellular laboratory studies do not support the notion that exposure to 50–60 Hz magnetic fields is a cause of childhood leukemia.

It should be noted that there is currently no adequate animal model of the most common form of childhood leukemia, acute lymphoblastic leukemia. Most studies report no effect of 50–60 Hz magnetic fields on leukemia or lymphoma in rodent models (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Several large-scale long-term studies in rodents have not shown any consistent increase in any type of cancer, including hematopoietic, mammary, brain, and skin tumors.

A substantial number of studies have examined the effects of 50–60 Hz magnetic fields on chemically-induced mammary tumors in rats (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Inconsistent results were obtained that may be due in whole or in part to differences in experimental protocols, such as the use of specific sub-strains. Most studies on the effects of 50–60 Hz magnetic field exposure on chemically-induced or radiation-induced leukemia/lymphoma models were negative. Studies of pre-neoplastic liver lesions, chemically-induced skin tumors, and brain tumors reported predominantly negative results.

Generally, studies of the effects of low frequency field exposure of cells have shown no induction of genotoxicity at fields below 50 mT (Crompton and Collins 2004; WHO 2007a). Overall, in contrast to the epidemiological evidence of an association between childhood leukemia and prolonged exposure to power

frequency magnetic fields, the animal cancer data, particularly those from large-scale lifetime studies, are almost universally negative. The data from cellular studies are generally supportive of the animal studies, though more equivocal.

Rationale for these recommended low frequency guidelines

ICNIRP addresses acute and chronic health effects and considers recent dosimetric developments in this guidance.

Acute effects. There are a number of well established acute effects of exposure to low-frequency EMFs on the nervous system: the direct stimulation of nerve and muscle tissue and the induction of retinal phosphenes. There is also indirect scientific evidence that brain functions such as visual processing and motor co-ordination can be transiently affected by induced electric fields. All these effects have thresholds below which they do not occur and can be avoided by meeting appropriate basic restrictions on electric fields induced in the body.

Following the recommendations made concerning guidelines on limits of exposure to static magnetic fields (ICNIRP 2009), ICNIRP considers that there are occupational circumstances where, with appropriate advice and training, it is reasonable for workers voluntarily and knowingly to experience transient effects such as retinal phosphenes and possible minor changes in some brain functions, since they are not believed to result in long-term or pathological health effects. Exposure of all parts of the body in these circumstances should be limited in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. ICNIRP notes the relatively narrow margin between peripheral nerve perception and pain thresholds; see above. For both types of nerves, thresholds rise above around 1–3 kHz due to the very short membrane time-constants resulting from myelination, and below about 10 Hz due to the accommodation to a slowly depolarizing stimulus.

Avoiding retinal phosphenes should protect against any possible effects on brain function. Phosphene thresholds are a minimum around 20 Hz and rise rapidly at higher and lower frequencies, intersecting with the thresholds for peripheral and central nerve stimulation at which point limits on peripheral nerve stimulation should apply. For workers who are not trained and who may be unaware and not in control of their exposure status the basic restriction is set at the phosphene threshold in order to avoid these transient but potentially disturbing effects of exposure. For members of the public, a reduction factor of 5 is applied to the phosphene threshold.

Exposure to low-frequency electric fields causes well-defined biological responses through surface electric-charge effects. Prevention of the painful effects of surface electric charge induced on the body by such exposure are addressed by the reference levels.

Chronic effects. The literature on chronic effects of low frequency fields has been evaluated in detail by individual scientists and scientific panels. WHO's cancer research institute, IARC (International Agency for Research on Cancer), evaluated low frequency magnetic fields in 2002 and classified them in category 2 B, which translates to "possibly carcinogenic to humans." The basis for this classification was the epidemiologic results on childhood leukemia.

It is the view of ICNIRP that the currently existing scientific evidence that prolonged exposure to low frequency magnetic fields is causally related with an increased risk of childhood leukemia is too weak to form the basis for exposure guidelines. In particular, if the relationship is not causal, then no benefit to health will accrue from reducing exposure.

Dosimetry. Historically, magnetic field models assumed that the body has a homogeneous and isotropic conductivity and applied simple circular conductive loop models to estimate induced currents in different organs and body regions. Electric fields induced by time varying electric and magnetic fields were computed by using simple homogeneous ellipsoid models. In recent years, more realistic calculations based on anatomically and electrically refined heterogeneous models (Xi and Stuchly 1994; Dimbylow 2005, 2006; Bahr et al. 2007) resulted in a much better knowledge of internal electric fields in the body from exposure to electric and magnetic fields.

The most useful dosimetric results for the purpose of these guidelines have been obtained from high resolution calculations of induced electric field with voxel sizes below 4 mm (Dimbylow 2005; Bahr et al. 2007; Hirata et al. 2009; Nagaoka et al. 2004). The maximum electric field is induced in the body when the external fields are homogeneous and directed parallel to the body axis (E-field) or perpendicular (H-field). According to those calculations, the maximum local peak electric field induced by a 50 Hz magnetic field in the brain is approximately $23\text{--}33\text{ mV m}^{-1}$ per mT, depending on field orientation and body model. There is no conversion factor for peripheral nerve tissue available at present. Therefore, the skin, which contains peripheral nerve endings, was chosen as a worst-case target tissue. The electric field induced in the skin by such a field is approximately $20\text{--}60\text{ mV m}^{-1}$ per mT. The maximum

local electric field induced by a 50 Hz electric field in the brain is approximately $1.7\text{--}2.6\text{ mV m}^{-1}$ per kV m^{-1} , while in the skin it is approximately $12\text{--}33\text{ mV m}^{-1}$ per kV m^{-1} .

In view of the uncertainties in the available dosimetry as well as the influence of body parameters in the derivation of reference levels, ICNIRP is taking a conservative approach in deriving reference levels from the basic restrictions.

GUIDELINES FOR LIMITING EMF EXPOSURE

Separate guidance is given for occupational exposures and exposure of the general public. Occupational exposure in these guidelines refers to adults exposed to time-varying electric, and magnetic fields from 1 Hz to 10 MHz at their workplaces, generally under known conditions, and as a result of performing their regular or assigned job activities. By contrast, the term general population refers to individuals of all ages and of varying health status which might increase the variability of the individual susceptibilities. In many cases, members of the public are unaware of their exposure to EMF. These considerations underlie the adoption of more stringent exposure restrictions for the public than for workers while they are occupationally exposed.

Addressing scientific uncertainty

All scientific data and their interpretation are subject to some degree of uncertainty. Examples are methodological variability and inter-individual, inter-species, and inter-strain differences. Such uncertainties in knowledge are compensated for by reduction factors.

There is, however, insufficient information on all sources of uncertainty to provide a rigorous basis for establishing reduction factors over the whole frequency range and for all modulation patterns. Therefore, the degree to which caution is applied in the interpretation of the available database and in defining reduction factors is to a large extent a matter of expert judgment.

Basic restrictions and reference levels

Limitations of exposure that are based on the physical quantity or quantities directly related to the established health effects are termed basic restrictions. In this guideline, the physical quantity used to specify the basic restrictions on exposure to EMF is the internal electric field strength E_i , as it is the electric field that affects nerve cells and other electrically sensitive cells.

The internal electric field strength is difficult to assess. Therefore, for practical exposure assessment purposes, reference levels of exposure are provided. Most

reference levels are derived from relevant basic restrictions using measurement and/or computational techniques but some address perception (electric field) and adverse indirect effects of exposure to EMF. The derived quantities are electric field strength (E), magnetic field strength (H), magnetic flux density (B) and currents flowing through the limbs (I_L). The quantity that addresses indirect effects is the contact current (I_C). In any particular exposure situation, measured or calculated values of any of these quantities can be compared with the appropriate reference level. Compliance with the reference level will ensure compliance with the relevant basic restriction. If the measured or calculated value exceeds the reference level, it does not necessarily follow that the basic restriction will be exceeded. However, whenever a reference level is exceeded it is necessary to test compliance with the relevant basic restriction and to determine whether additional protective measures are necessary.

BASIC RESTRICTIONS

The main objective of this publication is to establish guidelines for limiting EMF exposure that will provide protection against adverse health effects. As noted above, the risks come from transient nervous system responses including peripheral (PNS) and central nerve stimulation (CNS), the induction of retinal phosphenes and possible effects on some aspects of brain function.

In view of the considerations above for frequencies in the range 10 Hz to 25 Hz, occupational exposure should be limited to fields that induce electric field strengths in CNS tissue of the head (i.e., the brain and retina) of less than 50 mV m^{-1} in order to avoid the induction of retinal phosphenes. These restrictions should also prevent any possible transient effects on brain function. These effects are not considered to be adverse health effects; however, ICNIRP recognizes that they may be disturbing in some occupational circumstances and should be avoided but no additional reduction factor is applied. Phosphene thresholds rise rapidly at higher and lower frequencies, intersecting with the thresholds for peripheral and central myelinated nerve stimulation at 400 Hz. At frequencies above 400 Hz, limits on peripheral nerve stimulation apply in all parts of the body.

Exposure in controlled environments, where workers are informed about the possible transient effects of such exposure, should be limited to fields that induce electric fields in the head and body of less than 800 mV m^{-1} in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. A reduction factor of 5 has been applied to a stimulation threshold of 4 V m^{-1} in order to account for the uncertainties described above. Such restrictions rise above 3 kHz.

For the general public for CNS tissue of the head a reduction factor of 5 is applied, giving a basic restriction of 10 mV m^{-1} between 10 and 25 Hz. Above and below these values, the basic restrictions rise. At 1,000 Hz it intersects with basic restrictions that protect against peripheral and central myelinated nerve stimulation. Here, the reduction factor of 10 results in a basic restriction of 400 mV m^{-1} , which should be applied to the tissues of all parts of the body.

The basic restrictions are presented in Table 2 and Fig. 1.

Time averaging

ICNIRP recommends that the restrictions on internal electric fields induced by electric or magnetic fields including transient or very short-term peak fields be regarded as instantaneous values which should not be time averaged (see also section on non-sinusoidal exposure).

Spatial averaging of induced electric field

When restricting adverse effects of induced electric fields to nerve cells and networks, it is important to define the distance or volume over which the local induced electric field must be averaged. As a practical compromise, satisfying requirements for a sound biological basis and computational constraints, ICNIRP recommends determining the induced electric field as a vector average of the electric field in a small contiguous tissue volume of $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. For a specific tissue, the 99th percentile value of the electric field is the relevant value to be compared with the basic restriction.

Table 2. Basic restrictions for human exposure to time-varying electric and magnetic fields.

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field (V m^{-1})
Occupational exposure CNS tissue of the head	1–10 Hz	$0.5/f$
	10 Hz–25 Hz	0.05
	25 Hz–400 Hz	$2 \times 10^{-3}f$
	400 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
General public exposure CNS tissue of the head	1–10 Hz	$0.1/f$
	10 Hz–25 Hz	0.01
	25 Hz–1000 Hz	$4 \times 10^{-4}f$
	1000 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
	10 MHz–100 kHz	1.35
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$

Notes:

- f is the frequency in Hz.
- All values are rms.
- In the frequency range above 100 kHz, RF specific basic restrictions need to be considered additionally.

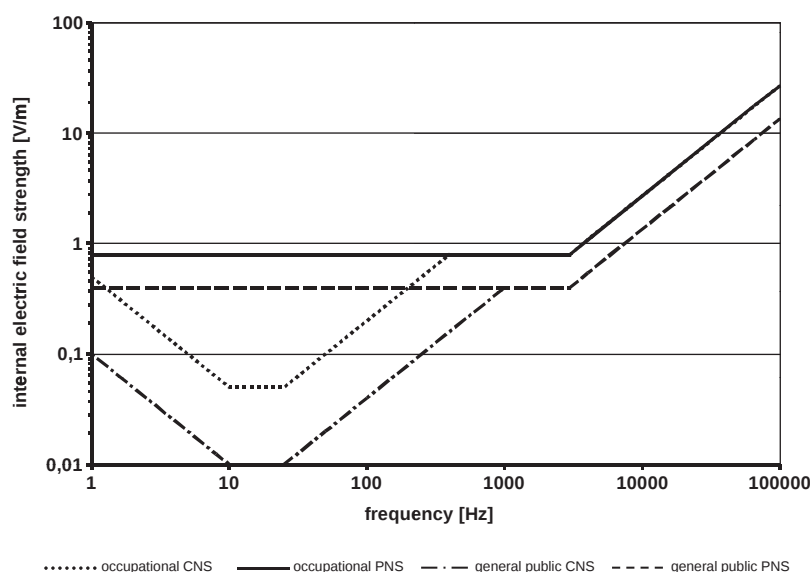


Fig. 1. Basic restrictions for general public and occupational exposure in terms of internal electric field strength concerning CNS and PNS effects.

Basically the electric field effects on neurons and other electrically excitable cells are local effects, but there are electrophysiological and practical dosimetric factors that constrain the minimum volume or distance. The major physical factor disturbing the function of neurons and neuronal networks is the voltage produced by the induced electric field over the membrane of the cell. For isolated nerve fibers aligned along the direction of the electric field (maximum coupling) this voltage is integrated from the electric field over the electrotonic distance varying from 2 to 7 millimeters for invertebrate nerves (Reilly 1998; Reilly and Diamant 2003). For myelinated nerve cells a good assumption for the integration distance is approximately 2 mm, which is the maximum inter-nodal distance between the nodes of Ranvier. These distances are relevant when considering stimulation thresholds to isolated nerve cells. In the case of sub-threshold weak electric field effects, such as retinal phosphenes, the collective “network” effect of numerous interacting nerve cells must be taken into account. The threshold of the effect is considerably lower than the stimulation threshold of isolated nerve cells, which is due to summation and integration of small, induced voltages in the synapses. It has been suggested that the averaging volume for the induced electric field should be based on minimum of 1,000 interacting cells, which is approximately 1 mm³ in most nerve tissue (Jefferys 1994). Hence, a biologically reasonable averaging distance might extend from 1 to 7 mm. From a practical point of view, it is difficult to achieve satisfactory accuracy in the millimeter resolution computation of the induced electric field, and even more difficult to

measure it. Maximal values in one voxel in a specific tissue are prone to large stair-casing errors associated with sharp corners of the cubical voxel. A solution to obtain more stable peak approximations is based on choosing for the peak value a value representing the 99th percentile value of the induced field in a specific tissue. From the biological point of view however, this is a somewhat arbitrary choice because the peak value depends on the resolution. Another option for the spatial averaging is to define the local electric field as an average in a small volume or along a line segment (Reilly and Diamant 2003).

As a general rule the averaging volume should not extend beyond the boundary of the tissue except for tissues such as the retina and skin, which are too thin to cover the whole averaging cube. For the skin the same averaging volume of $2 \times 2 \times 2$ mm³ can be assumed, and it may extend to the subcutaneous tissue. For the retina the averaging volume may extend to the tissues in front and behind it.

REFERENCE LEVELS

The reference levels are obtained from the basic restrictions by mathematical modeling using published data (Dimbylow 2005, 2006). They are calculated for the condition of maximum coupling of the field to the exposed individual, thereby providing maximum protection. Frequency dependence and dosimetric uncertainties were taken into account. The reference levels presented consider two distinct effects and approximate a combination of the induced electric fields in the brain,

relevant for CNS effects, and the induced electric fields in non-CNS tissues anywhere in the body, relevant for PNS effects (i.e., at 50 Hz, the factor used to convert the basic restriction for CNS effects to an external magnetic field exposure is 33 V m^{-1} per T, and for PNS effect 60 V m^{-1} per T. An additional reduction factor of 3 was applied to these calculated values to allow for dosimetric uncertainty).

In addition, the electric field reference level for occupational exposure up to 25 Hz includes a sufficient margin to prevent stimulation effects from contact currents under most practical conditions. Between 25 Hz and 10 MHz the reference levels are based on the basic restriction on induced electric fields only and might thus not provide a sufficient margin to prevent stimulation effects from contact currents under all possible conditions in that frequency band.

The electric field reference levels for general public exposure up to 10 MHz prevent adverse indirect effects (shocks and burns) for more than 90% of exposed individuals. In addition, the electric field reference levels for general public exposure up to 50 Hz include a sufficient margin to prevent surface electric-charge effects such as perception in most people.

Tables 3 and 4 summarize the reference levels for occupational and general public exposure, respectively, and the reference levels are illustrated in Figs. 2 and 3. The reference levels assume an exposure by a uniform (homogeneous) field with respect to the spatial extension of the human body.

Spatial averaging of external electric and magnetic fields

Reference levels have been determined for the exposure conditions where the variation of the electric or magnetic field over the space occupied by the body is relatively small. In most cases, however, the distance to

Table 4. Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).

Frequency range	E-field strength E (kV m^{-1})	Magnetic field strength H (A m^{-1})	Magnetic flux density 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}

Notes:

- f in Hz.

- See separate sections below for advice on non sinusoidal and multiple frequency exposure.

- In the frequency range above 100 kHz, RF specific reference levels need to be considered additionally.

the source of the field is so close that the distribution of the field is non-uniform or localized to a small part of the body. In these cases the measurement of the maximum field strength in the position of space occupied by the body always results in a safe, albeit very conservative exposure assessment.

For a very localized source with a distance of a few centimeters from the body, the only realistic option for the exposure assessment is to determine dosimetrically the induced electric field, case by case. When the distance exceeds 20 cm, the distribution of the field becomes less localized but is still non-uniform, in which case it is possible to determine the spatial average along the body or part of it (Stuchly and Dawson 2002; Jokela 2007). The spatial average should not exceed the reference level. The local exposure may exceed the reference level but with an important provision that the basic restriction shall not be exceeded. It is the task of standardization bodies to give further guidance on the specific exposure situations where the spatial averaging can be applied. This guidance shall be based on well established dosimetry. The standardization bodies also may derive new reference levels for special types of non-uniform exposure.

Additivity of exposure to electric and magnetic fields

Each of the external electric and magnetic field induces an electric field component, which add vectorially in the tissue. In the case of the exposure analysis based on the external electric and magnetic fields, a conservative approach would be to assume that both the electrically and magnetically induced field components attain the maximum value in the same critical point at the same phase. This would imply that the exposures to the external electric and magnetic fields are additive (Cech et al. 2008). Such situations, however, are judged to be very

Table 3. Reference levels for occupational exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).

Frequency range	E-field strength E (kV m^{-1})	Magnetic field strength H (A m^{-1})	Magnetic flux density 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}

Notes:

- f in Hz.

- See separate sections below for advice on non sinusoidal and multiple frequency exposure.

- To prevent indirect effects especially in high electric fields see chapter on "Protective measures."

- In the frequency range above 100 kHz, RF specific reference levels need to be considered additionally.

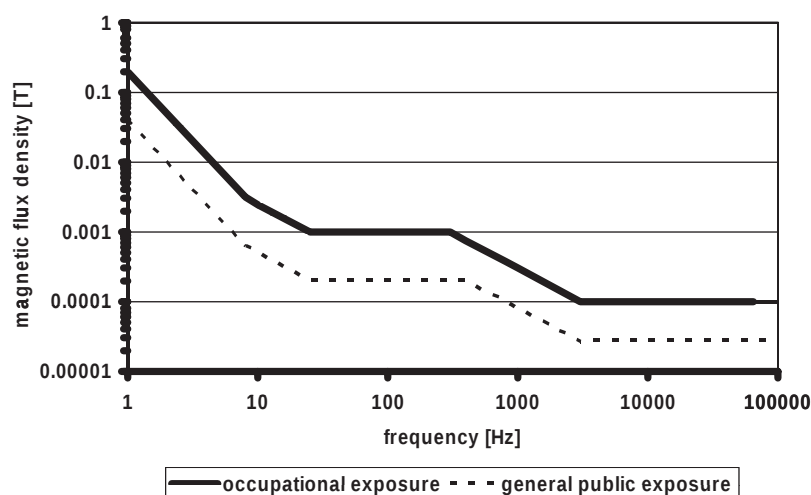


Fig. 2. Reference levels for exposure to time varying magnetic fields (compare Tables 3 and 4).

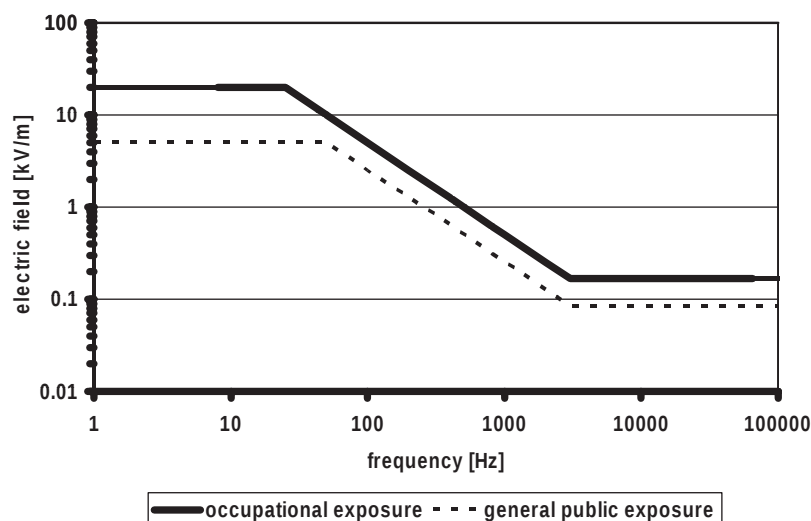


Fig. 3. Reference levels for exposure to time varying electric fields (compare Tables 3 and 4).

infrequent taking into account the great difference in the distribution of the electrically and magnetically induced electric fields.

REFERENCE LEVELS FOR CONTACT CURRENTS

Up to 10 MHz reference levels for contact current are given for which caution must be exercised to avoid shock and burn hazards. The point contact reference levels are presented in Table 5. Since the threshold contact currents that elicit biological responses in children are approximately one-half of those for adult men, the reference levels for contact current for the general public are set lower by a factor of 2 than the values for occupational exposure. It should be noted that the reference levels are not intended to prevent perception but to

Table 5. Reference levels for time-varying contact currents from conductive objects.

Exposure characteristics	Frequency range	Maximum contact current (mA)
Occupational exposure	Up to 2.5 kHz	1.0
	2.5–100 kHz	$0.4f$
	100 kHz–10 MHz	40
General public exposure	Up to 2.5 kHz	0.5
	2.5–100 kHz	$0.2f$
	100 kHz–10 MHz	20

Note: f is the frequency in kHz.

avoid painful shocks. Perception of contact current is not *per se* hazardous but could be considered as annoyance. Prevention of excess contact currents is possible by technical means.

SIMULTANEOUS EXPOSURE TO MULTIPLE FREQUENCY FIELDS

It is important to determine whether, in situations of simultaneous exposure to fields of different frequencies, these exposures are additive in their effects. The formulae below apply to relevant frequencies under practical exposure situations. For electrical stimulation, relevant for frequencies up to 10 MHz, internal electric fields should be added according to

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

where $E_{i,j}$ is the internal electric field strength induced at frequency j , and $E_{L,j}$ is the induced electric field strength restriction at frequency j as given in Table 2.

For practical application of the basic restrictions, the following criteria regarding reference levels of field strengths should be applied:

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

and

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

where

- E_j = the electric field strength at frequency j ;
- $E_{R,j}$ = the electric field strength reference level at frequency j as given in Tables 3 and 4;
- H_j = is the magnetic field strength at frequency j ;
- $H_{R,j}$ = the magnetic field strength reference level at frequency j as given in Tables 3 and 4.

For limb current and contact current, respectively, the following requirements should be applied:

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

where I_j is the contact current component at frequency j , and $I_{L,j}$ is the reference level of the contact current at frequency j as given in Table 5.

NON SINUSOIDAL EXPOSURE

At low frequencies below 100 kHz the electric and particularly magnetic fields are in most cases distorted by harmonic components distributed over a large frequency band. Consequently, the waveforms of the fields show complex, often pulsed, patterns. It is always possible to decompose such a field to discrete spectral components by using, e.g., Fourier Transformation techniques (FT)

and applying the multiple frequency rule described above. This procedure is based on the assumption that the spectral components add in phase, i.e., all maxima coincide at the same time and results in a sharp peak. This is a realistic assumption when the number of spectral components is limited and their phases are not coherent, i.e., they vary randomly. For fixed coherent phases the assumption may be unnecessarily conservative. Additionally, sampling and windowing in FT spectral analysis may create spurious frequencies, which may artificially increase the linearly summed exposure ratio.

An alternative option to the spectral method is to weight the external electric and magnetic fields, induced electric field and induced current with a filter function which is related to the basic restriction or reference level (ICNIRP 2003b; Jokela 2000). In the case of a broadband field consisting of harmonic components the restriction imposed by the filtering can be presented mathematically as

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

where t is time and EL_i is the exposure limit at the i th harmonic frequency f_i , where A_i , θ_i , φ_i are the amplitudes of the field, phase angles of the field and phase angles of the filter at the harmonic frequencies. Except the phase angles, the equation is similar to the summation eqns (3), (4), and (5). More guidance on the practical implementation of the weighting (determination of the weighted peak exposure) is given in the informative annex (Appendix).

PROTECTIVE MEASURES

ICNIRP notes that protection of people exposed to electric and magnetic fields could be ensured by compliance with all aspects of these guidelines.

Measures for the protection of workers include engineering and administrative controls, and personal protection programs. Appropriate protective measures must be implemented when exposure in the workplace results in the basic restrictions being exceeded. As a first step, engineering controls should be undertaken wherever possible to reduce device emissions of fields to acceptable levels. Such controls include good safety design and, where necessary, the use of interlocks or similar health protection mechanisms.

Administrative controls, such as limitations on access and the use of audible and visible warnings, should be used in conjunction with engineering controls. Personal protection measures, such as protective clothing, though useful in certain circumstances, should be regarded as a last resort to ensure the safety of the worker,

and priority should be given to engineering and administrative controls wherever possible. Furthermore, when such items as insulated gloves are used to protect individuals from shock, the basic restrictions must not be exceeded, since the insulation protects only against indirect effects of the fields.

With the exception of protective clothing and other personal protection, the same measures can be applied to the general public whenever there is a possibility that the general public reference levels might be exceeded. It is also essential to establish and implement rules that will prevent

- interference with medical electronic equipment and devices (including cardiac pacemakers);
- detonation of electro-explosive devices (detonators); and
- fires and explosions resulting from ignition of flammable materials by sparks caused by induced fields, contact currents, or spark discharges.

CONSIDERATIONS REGARDING POSSIBLE LONG-TERM EFFECTS

As noted above, epidemiological studies have consistently found that everyday chronic low-intensity (above 0.3–0.4 μT) power frequency magnetic field exposure is associated with an increased risk of childhood leukemia. IARC has classified such fields as possibly carcinogenic. However, a causal relationship between magnetic fields and childhood leukemia has not been established nor have any other long term effects been established. The absence of established causality means that this effect cannot be addressed in the basic restrictions. However, risk management advice, including considerations on precautionary measures, has been given by WHO (2007a and b) and other entities.

Acknowledgments—The support received by ICNIRP from the International Radiation Protection Association, the World Health Organization, the International Labour Office, the European Commission, and the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety is gratefully acknowledged. ICNIRP is also very thankful to the ICNIRP consulting experts and all other reviewers for their contribution received via the open online consultation.

During the preparation of these guidelines, the composition of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection and the ICNIRP ELF Task Group were as follows:

ICNIRP
P. Vecchia, Chairperson (Italy)
M. Hietanen, Vice-Chairperson until 2008 (Finland)
R. Matthes, Vice-Chairperson since 2008 (Germany)
A. Ahlbom until 2008 (Sweden)
E. Breitbart until 2008 (Germany)
F. R. de Gruijl until 2008 (The Netherlands)
M. Feychting (Sweden)
A. Green (Australia)
K. Jokela (Finland)

J. Lin (USA)
R. Saunders (United Kingdom)
K. Schulmeister (Austria)
P. Söderberg (Sweden)
B. Stuck (USA)
A. Swerdlow (United Kingdom)
M. Taki until 2008 (Japan)
B. Veyret (France)
G. Ziegelberger, Scientific Secretary (Austria)
M. H. Repacholi, Chairman Emeritus (Switzerland)
ICNIRP ELF Task Group
R. Matthes (Germany), ELF Task Group Chairman
A. Ahlbom (Sweden)
K. Jokela (Finland)
C. Roy (Australia)
R. Saunders (United Kingdom)

REFERENCES

- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 83:692–698; 2000.
- Attwell D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system. *Radiat Protect Dosim* 106:341–348; 2003.
- Bahr A, Bolz T, Hennes C. Numerical dosimetry ELF: Accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines. *Health Phys* 92:521–530; 2007.
- Barth A, Ponocny I, Ponocny-Seliger E, Vana N, Winker R. Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis. *Bioelectromagnetics* 31:173–179; 2010.
- Cech R, Leitgeb N, Pedititis M. Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure. *Phys Med Biol* 53:177–186; 2008.
- Cook CM, Thomas AW, Prato FS. Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23:144–157; 2002.
- Cook CM, Saucier DM, Thomas AW, Prato FS. Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time-course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001–2005). *Bioelectromagnetics* 27:613–627; 2006.
- Crasson M. 50–60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review. *Radiat Protect Dosim* 106:333–340; 2003.
- Crumpton MJ, Collins AR. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? *DNA Repair (Amst)* 3:1385–1387; 2004.
- Dimbylow PJ. Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys Med Biol* 50:1047–1070; 2005.
- Dimbylow PJ. Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. *Phys Med Biol* 51:2383–2394; 2006.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol* 37:329–340; 2008.

- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiol* 11:624–634; 2000.
- Hirata A, Wake K, Watanabe S, Taki M. In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures. *Radiat Protect Dosim* 135:272–275; 2009.
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Rösli M. Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol* 169:167–175; 2009.
- International Agency for Research on Cancer. Static and extremely low frequency electric and magnetic fields. Lyon, France: IARC; IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 80; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494–522; 1998.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Phys* 82:540–548; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0–100 kHz). In: Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P, Veyret B, eds. Review of the scientific evidence and health consequences. Munich: ICNIRP; 2003a.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. *Health Phys* 84:383–387; 2003b.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients. *Health Phys* 87:197–216; 2004.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limiting exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 96:504–514; 2009.
- International Electrotechnical Commission. 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. Geneva: IEC 62226; 2004.
- International Electrotechnical Commission. Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure. IEC 62233; 2005a.
- International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment—part 1: general requirements for safety; 2: collateral standard: electromagnetic compatibility—requirements and tests. Geneva: IEC 60601-1-2; 2005b.
- IEEE. IEEE 1308 Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz. IEEE, Piscataway; 1994.
- IEEE. IEEE 644-1994 (Reaff 2008). IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines; IEEE, Piscataway; 2008.
- Jefferys JG. Experimental neurobiology of epilepsies. *Curr Opin neurol* 7:113–122; 1994.
- Jokela K. Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields. *Health Phys* 79:373–388; 2000.
- Jokela K. Assessment of complex emf exposure situations including inhomogeneous field distribution. *Health Phys* 92:531–540; 2007.
- Juutilainen J. Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Radiat Protect Dosim* 106:385–390; 2003.
- Juutilainen J. Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 7:107–115; 2005.
- Kanai R, Chaieb L, Antal A, Walsh V, Paulus W. Frequency-dependent electrical stimulation of the visual cortex. *Curr Biol* 18:1839–1843; 2008.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J, Savitz D. Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. *Scand J Work Environ Health* 33:5–12; 2007.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H, Feychting M, Harrington M, Kavet R, Marsh G, Mezei G, Renew DC, van Wijngaarden E. Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations. *Occup Environ Med* 66:72–80; 2009.
- McNamee DA, Legros AG, Krewski DR, Wisenberg G, Prato FS, Thomas AW. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health* 82:919–933; 2009.
- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Phys Med Biol* 49:1–15; 2004.
- Nyenhuis JA, Bourland JD, Kildishev AV, Schaefer DJ. Health effects and safety of intense gradient fields. In: Shellock F, ed. Magnetic resonance procedures: Health effects and safety. Boca Raton, FL: CRC Press; 2001: 31–54.
- Pogosyan A, Gaynor LD, Eusebio A, Brown P. Boosting cortical activity at beta-band frequencies slows movement in humans. *Curr Biol* 19:1–5; 2009.
- Reilly J. Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology. New York: Springer-Verlag; 1998.
- Reilly JP. Comments concerning “guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 76:314–315; 1999.
- Reilly JP. Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines—part I: sinusoidal waveforms. *Health Phys* 83:341–355; 2002.
- Reilly J, Diamant A. Spatial relationships in electrostimulation: application to electromagnetic field standards. *IEEE Trans on Biomed Eng* 50:783–785; 2003.
- Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med* 67:224–232; 2005.
- Saunders RD, Jefferys JG. Weak electric field interactions in the central nervous system. *Health Phys* 83:366–375; 2002.
- Saunders RD, Jefferys JG. A neurobiological basis for ELF guidelines. *Health Phys* 92:596–603; 2007.
- So PPM, Stuchly MA, Nyenhuis JA. Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging. *IEEE Trans on Biomed Eng* 51:1907–1914; 2004.
- Stuchly MA, Dawson TW. Human body exposure to power lines: relation of induced quantities to external magnetic field. *Health Phys* 83:333–340; 2002.
- World Health Organization. Environmental Health Criteria 238. Extremely low frequency (ELF) fields. Geneva: World Health Organization; 2007a.
- World Health Organization. Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency fields. Fact Sheet No 322. Geneva: World Health Organization; 2007b.

Xi W, Stuchly MA. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. Appl Comput Electromagn Soc J 9:127–134; 1994.

APPENDIX

Informative annex

Determination of the weighted peak exposure.

The weighting may be implemented by computing first the spectrum of the waveform and then applying eqn (7). In many applications, however, it is more convenient to use analog or digital filtering of the waveform in the time domain. The gain of the filter (ratio of the output to the input signal) should vary as a function of frequency in direct proportion to the exposure limit $G = EL(f_{\text{ref}})/EL(f)$, where EL is the limit at frequency f and f_{ref} is an arbitrary reference frequency from 1 Hz to 100 kHz. The peak value of the filtered waveform should not exceed the exposure limit (basic restriction or reference level) converted to the peak (amplitude) value at the reference frequency. Table 6 shows an example of the derived peak limits. In addition to the amplitude physical filters always influence on the phase of the field, which changes the peak value of the filtered field. As shown in Figs. 1, 2, and 3 the limits are divided to the frequency ranges where the limit varies directly proportional to $1/f^2$, $1/f$, f^0 (constant), or f . On the $1/f^2$, $1/f$, f^0 , and f ranges the phase angle of the filter φ_i (see eqn 7) is 180, 90, 0, and -90° , respectively. The weighting filter can be approximated with an electronic or digital filter where the attenuation should not deviate more than 3 dB and phase more than 90° from the exact piecewise linear frequency response. As an example, Fig. A1 shows the attenuation and phase as a function of frequency for the filter used for the weighting of the induced electric field. The approximate curves are based on a simple approximation with RC (resistor/capacitor) type filter function. The weighted peak approach can be used both for coherent and non-coherent fields. In the latter case the measurement time must be long enough to detect the worst case peak value with a reasonable probability. In the case of non-coherent fields, consisting of a few frequencies, the weighted peak approach is identical to the spectral summation.

Table 6. Derived peak limits for non-sinusoidal electric and magnetic fields. The reference frequency is 50 Hz.

	E_{induced} (mV m ⁻¹)	body tissue	E_{external} (V m ⁻¹)	B μT
Occupational	$\sqrt{2} \times 100$	$\sqrt{2} \times 800$	$\sqrt{2} \times 10,000$	$\sqrt{2} \times 1,000$
General public	$\sqrt{2} \times 20$	$\sqrt{2} \times 400$	$\sqrt{2} \times 5,000$	$\sqrt{2} \times 200$

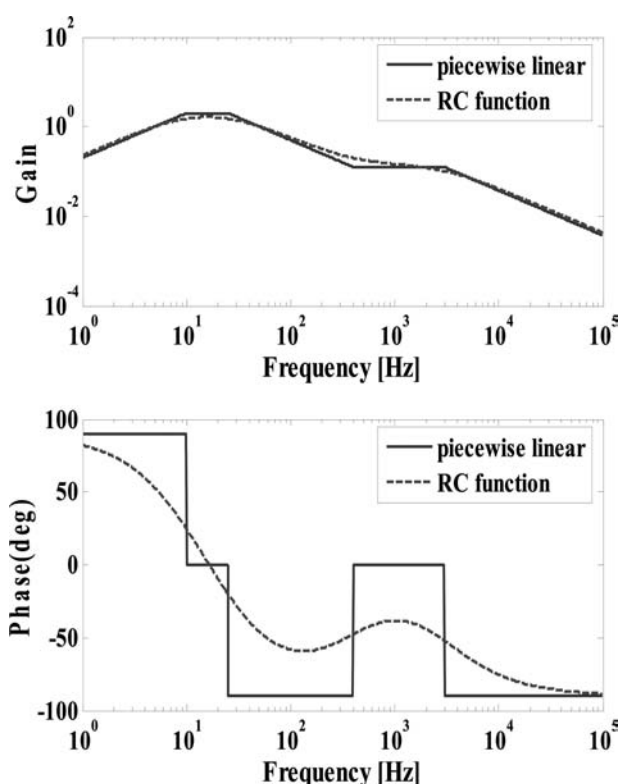


Fig. A1. Amplitude and phase response for the weighting of the induced electric field.

GLOSSARY

Adverse effect

An effect detrimental to the health of an individual due to exposure to an electric or magnetic field, or a contact current.

Averaging distance

The distance over which the *internal* electric field is averaged when determining compliance with basic restrictions.

Basic restrictions

Mandatory limitations on the quantities that closely match all known biophysical interaction mechanisms with tissue that may lead to adverse health effects.

Cancer

Diseases characterized by the uncontrolled and abnormal division of eukaryotic cells and by the spread of the disease (metastasis) to disparate sites in the organism.

Central nervous system (CNS)

The portion of the vertebrate nervous system consisting of the brain and spinal cord, but not including the peripheral nerves.

Characteristics

Detailed physical properties of electric or magnetic fields such as the magnitude, frequency spectrum, polarization, modulation, etc.

Conductivity

A property of materials that determines the magnitude of the electric current density when an electric field is impressed on the material, expressed in units of siemens per meter (S m^{-1}); the inverse of resistivity.

Contact current

Current passed into a biological medium via a contacting electrode or other source of current.

Current density

A vector of which the integral over a given surface is equal to the current flowing through the surface; the mean density in a linear conductor is equal to the current divided by the cross-sectional area of the conductor. Expressed in ampere per square meter (A m^{-2}).

DC

Abbreviation for “direct current,” but also used for to indicate constancy of fields, see “Static field.”

Depolarization (cellular)

The reduction of the resting potential across a cellular membrane.

Direct effect

A biological effect resulting from direct interaction of EMF with biological structures.

Direct electro stimulation

Stimulation via the electric field within the biological medium induced by an external electric or magnetic field without direct contact with other conductors or spark discharges.

DNA (deoxyribonucleic acid)

A polymeric molecule consisting of deoxyribonucleotide building blocks that in a double-stranded, double-helical form is the genetic material of most organisms.

Dosimetry

Measurement, or determination by calculation, of internal electric field strength or induced current density or specific absorption (SA), or specific absorption rate (SAR), in humans or animals exposed to electromagnetic fields.

Electric field

A vector field E measured in volts per meter.

Electric field strength (E)

Force exerted by an electric field on an electric point charge, divided by the electric charge. Electric field strength is expressed in newton per coulomb or volts per meter ($\text{N/C} = \text{V/m}$).

Electromagnetic energy

The energy stored in an electromagnetic field. Expressed in joule (J).

Electromagnetic fields

The combination of electric and magnetic fields in the environment. This term is often confused with “electromagnetic radiation” and can therefore be misleading when used with extremely low frequencies for which the radiation is barely detectable.

Electro stimulation

Induction of a propagating action potential in excitable tissue by an applied electrical stimulus; electrical polarization of presynaptic processes leading to a change in post synaptic cell activity.

EMF

Electric and magnetic fields.

Established mechanism

A bioelectric mechanism having the following characteristics: (a) can be used to predict a biological effect in humans; (b) an explicit model can be made using equations or parametric relationships; (c) has been verified in humans, or animal data can be confidently extrapolated to humans; (d) is supported by strong evidence; and (e) is widely accepted among experts in the scientific community.

Exposure

That which occurs whenever a person is subject to the influence of a low frequency field or contact current.

Exposure, long-term

This term indicates exposure during a major part of the lifetime of the biological system involved; it may, therefore, vary from a few weeks to many years in duration.

Exposure assessment

The evaluation of a person's exposure by measurements, modeling, information about sources or other means.

Exposure metric

A single number that summarizes exposure to an electric and/or magnetic field. The metric is usually determined by a combination of the instrument's signal

processing and the data analysis performed after the measurement.

Frequency

The number of sinusoidal cycles completed by electromagnetic waves in 1 second; usually expressed in hertz (Hz).

General public

The term General public refers to the entire population. It includes individuals of all ages, and of varying health status, and this will include particularly vulnerable groups or individuals such as the frail, elderly, pregnant workers, babies and young children.

General public exposure

All exposure to low frequency fields received by members of the general public. This definition excludes occupational exposure, and medical exposure.

Harmonic (frequency)

Frequencies that are integral multiples of the power frequency or some other reference frequency.

Heart rate

The measurement of the number of heartbeats per minute.

Hertz (Hz)

The unit for expressing frequency, (f). One hertz equals one cycle per second. 1 kHz = 1,000 Hz, 1 MHz = 1,000 kHz, 1 GHz = 1,000 MHz.

Induction

An electric or magnetic field in a conducting medium caused by the action of a time-varying external (environmental) electric or magnetic field.

Instantaneous

Adjective used to describe particular parameters that must be measured or evaluated over a very short time interval (typically 100 microseconds or less).

Let-go current

The threshold current level at which involuntary muscular contraction prevents release of a grip on an energized conductor.

Magnetic field

A vector quantity, H , specifies a magnetic field at any point in space, and is expressed in ampere per meter ($A\ m^{-1}$). See also magnetic flux density.

Magnetic field strength (H)

The magnitude of the magnetic field vector; expressed in units of ampere per meter (A/m).

Magnetic flux density (B)

A vector quantity that determines the force on a moving charge or charges (electric current). Magnetic flux density is expressed in tesla (T). One gauss (deprecated unit) equals 10^{-4} T.

Magnetophosphenes

The sensation of flashes of light caused by induced electric currents stimulating the retina.

Mean

The arithmetic average of a series of measurements or other data.

Median threshold

The threshold value within a statistical distribution at which 50% of subjects have greater thresholds and 50% have lesser thresholds.

Medical exposure

Exposure of a person to low frequency fields received as a patient undergoing medical diagnosis or recognized medical treatment, or as a volunteer in medical research.

Mutagen

A substance that is able to cause a mutation.

Mutation

Any detectable and heritable change in the genetic material not caused by genetic recombination.

Nerve

A bundle of axons.

Nerve fiber

A single nerve axon.

Neuron

A single cellular unit usually consisting of an axon, cell body, and dendritic tree.

Non-ionizing radiation (NIR)

Includes all radiations and fields of the electromagnetic spectrum that do not normally have sufficient energy to produce ionization in matter; characterized by energy per photon less than about 12 eV, which is equivalent to wavelengths greater than 100 nm, or frequencies lower than 3×10^{15} Hz.

No uniform field

A field that is not constant in amplitude, direction, and relative phase over the dimensions of the body or body part under consideration. In the case of electric fields, the definition applies to an environmental field undisturbed by the presence of the body.

Occupational exposure

All exposure to EMF experienced by individuals as a result of performing their regular or assigned job activities.

Peripheral nerve

Nerve found outside the central nervous system and leading to and from the central nervous system.

Permeability

The scalar or tensor quantity whose product by the magnetic field strength is the magnetic flux density. Note: For isotropic media, the permeability is a scalar; for anisotropic media, a matrix. Synonym: absolute permeability. If the permeability of a material or medium is divided by the permeability of vacuum (magnetic constant) μ_0 , the result is termed relative permeability (μ). Unit: henrys per meter (H m^{-1}).

Permittivity

A constant defining the influence of an isotropic medium on the forces of attraction or repulsion between electrified bodies, and expressed in farad per meter (F/m); *relative permittivity* is the permittivity of a material or medium divided by the permittivity of vacuum.

Phase duration (t_p)

The time between zero crossings of a waveform having zero mean. For a sine wave of frequency f , $t_p = 1/(2f)$. For an exponential waveform, t_p is interpreted as the duration measured from the waveform peak to a point at which it decays to 0.37 (e^{-1}) of its peak value.

Phosphene

Visual sensation caused by non-photoc stimuli. Electro-phosphenes are induced by electric currents; magneto-phosphenes are induced magnetically.

Plasma membrane

Lipid bilayer that surrounds the cytoplasm of both animal and plant cells.

Polarization (cellular)

The electric potential formed across a cell membrane.

Power frequency

The frequency at which AC electricity is generated. For electric utilities, the power frequency is 60 Hz in

North America, Brazil, and parts of Japan, and 50 Hz in much of the rest of the world.

Protein

One of a group of high-molecular weight, nitrogen-containing organic compounds of complex shape and composition.

Public exposure

All exposure to EMF experienced by members of the general public, excluding occupational exposure and exposure during medical procedures.

Radiofrequency (RF)

Electromagnetic energy with frequencies in the range 3 kHz to 300 GHz.

Reduction factor

Reduction of the effect threshold to compensate for various sources of uncertainty in the guideline setting process. Some examples of sources of uncertainty about exposure-effect threshold levels include the extrapolation of animal data to effects on humans, differences in the physiological reserves of different people with corresponding differences in tolerance, and statistical uncertainties (confidence limits) in the dose-response function. In ICNIRP's view, uncertainty in measurements used to implement the guidelines is a problem more appropriate to the functions of organizations responsible for the development of compliance methods. It is not considered in the setting of reduction factors by ICNIRP.

Reference levels

The rms and peak electric and magnetic fields and contact currents to which a person may be exposed without an adverse effect and with acceptable safety factors. The reference levels for electric and magnetic field exposure in this document may be exceeded if it can be demonstrated that the basic restrictions are not exceeded.

Thus, it is a practical or "surrogate" parameters that may be used for determining compliance with the Basic Restrictions.

Relative permeability

(Absolute) permeability (q.v.) divided by the permeability in vacuum. A value near one signifies that the material is only weakly magnetized by an external field.

Relative phase

The phase angle of a sinusoidal waveform relative to the phase angle of another waveform measured at a different point within the conductive medium or with respect to a stated reference waveform.

Relative risk (RR)

The ratio of the disease rate in the group under study to that in a comparison group, with adjustments for confounding factors such as age, if necessary. For rare diseases, the relative risk is practically the same as the odds ratio.

Root mean square (rms)

The square root of the mean of the square of a time variant function, $F(t)$, over a specified time period from t_1 to t_2 . It is derived by first squaring the function and then determining the mean value of the squares obtained, and taking the square root of that mean value, i.e.,

$$F_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [F(t)]^2 dt}. \quad (\text{A1})$$

S.I.

Abbreviation for the International system of units.

Spatial peak

Term used to describe the highest level of a particular quantity averaged over a small mass or area in the human body.

Spark discharge

The transfer of current through an air gap requiring a voltage high enough to ionize the air, as opposed to direct contact with a source.

Static field

A field that does not vary with time. In most environments, electric and magnetic fields change with time, but their frequency spectrum has a component at 0 Hz. This “quasi-static” component of the field can be measured by averaging the oscillating signal over the sample time.

Tesla (T)

S.I. unit of magnetic flux density. 1 tesla = 10,000 gauss (q.v.).

Threshold

The level of a stimulus marking the boundary between a response and a no response.

Ventricular fibrillation

Arrhythmia of the ventricles of the heart characterized by rapid uncoordinated contractions.

Voxel

A three-dimensional computational element. In this standard used to represent animal and human tissues in dosimetry models.

Waveform

The variation of an electrical amplitude with time. Unless otherwise stated, in this standard the term *waveform* refers to values (or measurements) at sites within the biological medium.

Workers

See glossary term *Occupational exposure*.



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

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。

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

ここで、 σ 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

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	σ	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	ϵ	ファラッド／メートル(F m^{-1})

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、人体の大きさと形状（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から背面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 $2 - 5 \text{ kV m}^{-1}$ の範囲であり、同 5 % の人が不快に感じるのは $15 - 20 \text{ kV m}^{-1}$ 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（Nyenhuys 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 $4 - 6 \text{ V m}^{-1}$ 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（ $>100 \text{ V m}^{-1}$ ：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、 $\sim 10 \text{ V m}^{-1}$ （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ことが原因で、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原因であるため、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、

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1–2 mT 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ある。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

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。

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係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 μT 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

髄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ことが原因で、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（非正弦波形的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。

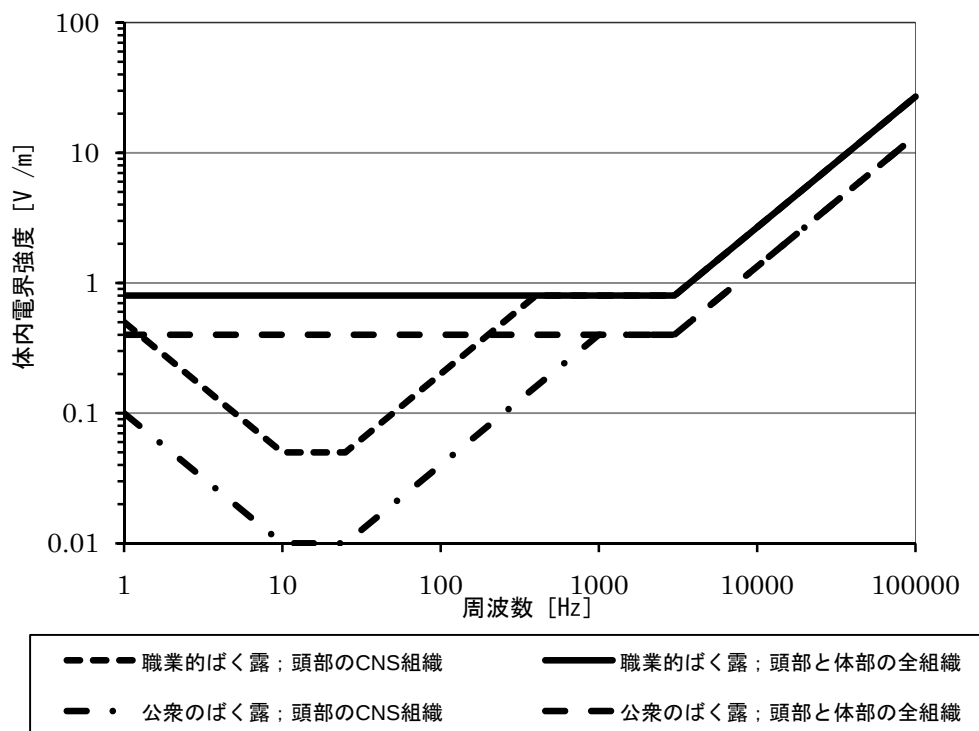


図1. CNSおよびPNSへの影響に係わる体内電界強度に基づく公衆ばく露と職業的ばく露に対する基本制限
(訳者注：原文の凡例では、単にCNS、PNSと表記されている箇所を、表2に対応させて、それぞれ、頭部のCNS組織、頭部と体部の全組織と訳した。)

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以外の身体の一部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、ほとんどの実際の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。

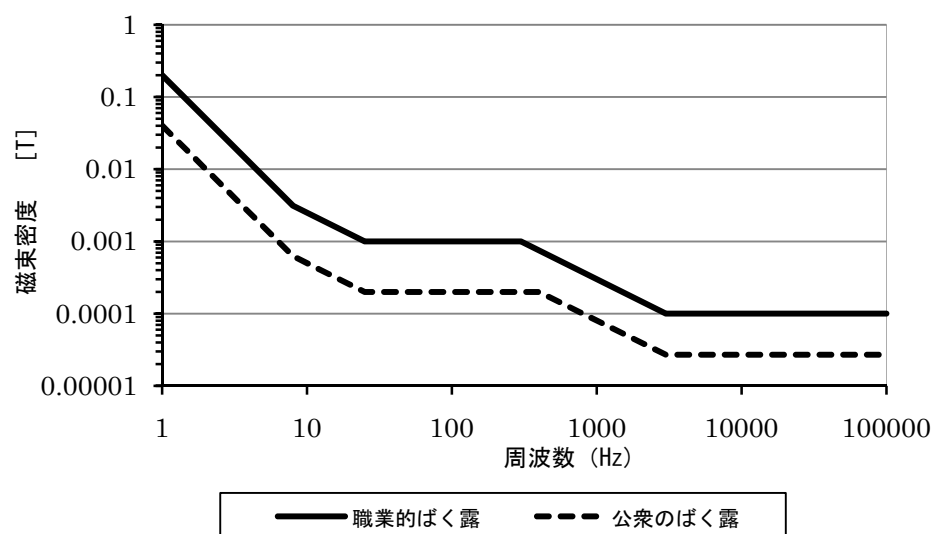


図2 時間変化する磁界へのばく露に対する参考レベル（表3、4を参照）

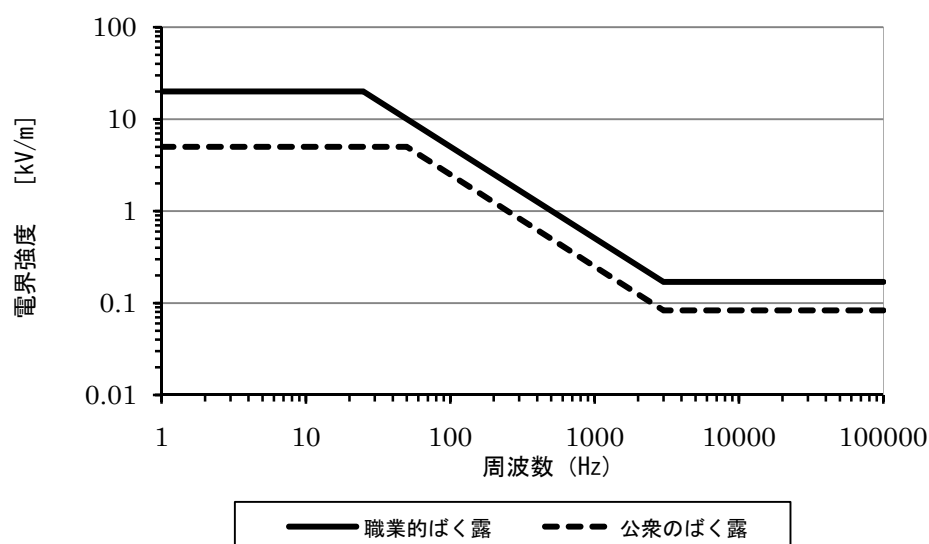


図3 時間変化する電界へのばく露に対する参考レベル（表3、4を参照）

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のに加算される。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氣的刺激については、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、 $E_{i,j}$ 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。

基本制限の実際の適用のために、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)

参考文献

- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 83:692–698;2000.
- Attwell D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system. *Radiat Protect Dosim* 106:341–348; 2003.
- Bahr A, Bolz T, Hennes C. Numerical dosimetry ELF: Accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines. *Health Phys* 92:521–530; 2007.
- Barth A, Ponocny I, Ponocny-Seliger E, Vana N, Winker R. Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis. *Bioelectromagnetics* 31:173–179; 2010.
- Cech R, Leitgeb N, Pediaditis M. Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure. *Phys Med Biol* 53:177–186; 2008.
- Cook CM, Thomas AW, Prato FS. Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23:144–157; 2002.
- Cook CM, Saucier DM, Thomas AW, Prato FS. Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time-course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001–2005). *Bioelectromagnetics* 27:613–627; 2006.
- Crasson M. 50–60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review. *Radiat Protect Dosim* 106:333–340; 2003.
- Crumpton MJ, Collins AR. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? *DNA Repair (Amst)* 3:1385–1387; 2004.
- Dimbylow PJ. Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys Med Biol* 50:1047–1070; 2005.
- Dimbylow PJ. Development of pregnant female, hybrid voxel mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. *Phys Med Biol* 51:2383–2394; 2006.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol* 37:329–340; 2008.
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiol* 11:624–634; 2000.
- Hirata A, Wake K, Watanabe S, Taki M. In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures. *Radiat Protect Dosim* 135:272–275; 2009.
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Röösli M. Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol* 169:167–175; 2009.
- International Agency for Research on Cancer. Static and extremely low frequency electric and magnetic fields. Lyon, France: IARC; IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 80; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494–522; 1998.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Phys* 82:540–548; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0–100 kHz). In: Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P, Veyret B, eds. Review of the scientific evidence and health

- consequences. Munich: ICNIRP; 2003a.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. Health Phys 84:383–387; 2003b.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients. Health Phys 87:197–216; 2004.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limiting exposure to static magnetic fields. Health Phys 96:504–514; 2009.
- International Electrotechnical Commission. 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. IEC 62226; 2004.
- International Electrotechnical Commission. Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure. IEC 62233; 2005a.
- International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment—part 1: general requirements for safety; 2: collateral standard: electromagnetic compatibility—requirements and tests. IEC 60601-1-2; 2005b.
- IEEE. IEEE 1308 Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz. IEEE, Piscataway; 1994. IEEE. IEEE 644-1994 (Reaff 2008).
- IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines; IEEE, Piscataway; 2008.
- Jefferys JG. Experimental neurobiology of epilepsies. Curr Opin neurol 7:113–122; 1994.
- Jokela K. Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields. Health Phys 79:373–388; 2000.
- Jokela K. Assessment of complex emf exposure situations including inhomogeneous field distribution. Health Phys 92:531–540; 2007.
- Juutilainen J. Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. Radiat Protect Dosim 106:385–390; 2003.
- Juutilainen J. Developmental effects of electromagnetic fields. Bioelectromagnetics 7:107–115; 2005.
- Kanai R, Chaieb L, Antal A, Walsh V, Paulus W. Frequencydependent electrical stimulation of the visual cortex. Curr Biol 18:1839–1843; 2008.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J, Savitz D. Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. Scand J Work Environ Health 33:5–12; 2007.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H, Feychting M, Harrington M, Kavet R, Marsh G, Mezei G, Renew DC, van Wijngaarden E. Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations. Occup Environ Med 66:72–80; 2009.
- McNamee DA, Legros AG, Krewski DR, Wisenberg G, Prato FS, Thomas AW. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. Int Arch Occup Environ Health 82:919–933; 2009.
- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y. Development of realistic highresolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagneticfield dosimetry. Phys Med Biol 49:1–15; 2004.
- Nyenhuis JA, Bourland JD, Kildishev AV, Schaefer DJ. Health effects and safety of intense gradient fields. In: Shellock F, ed. Magnetic resonance procedures: Health effects and safety. Boca Raton, FL: CRC Press; 2001: 31–54.
- Pogosyan A, Gaynor LD, Eusebio A, Brown P. Boosting cortical activity at beta-band frequencies slows movement in humans. Curr Biol 19:1–5; 2009.
- Reilly J. Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology. New York: Springer-Verlag; 1998.
- Reilly JP. Comments concerning “guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys 76:314–315; 1999.
- Reilly JP. Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines—part I: sinusoidal waveforms. Health Phys 83:341–355; 2002.
- Reilly J, Diamant A. Spatial relationships in electrostimulation: application to electromagnetic field standards. IEEE Trans on Biomed Eng 50:783–785; 2003.
- Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. Psychosom Med 67:224–232; 2005.
- Saunders RD, Jefferys JG. Weak electric field interactions in the central nervous system. Health Phys 83:366–375; 2002.
- Saunders RD, Jefferys JG. A neurobiological basis for ELF guidelines. Health Phys 92:596–603; 2007.
- So PPM, Stuchly MA, Nyenhuis JA. Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging. IEEE Trans on Biomed Eng 51:1907–1914; 2004.
- Stuchly MA, Dawson TW. Human body exposure to power lines: relation of induced quantities to external magnetic field. Health Phys 83:333–340; 2002.
- World Health Organization. Environmental Health Criteria 238. Extremely low frequency (ELF) fields. Geneva: World Health Organization; 2007a.
- World Health Organization. Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency fields. Fact Sheet No 322. Geneva: World Health Organization; 2007b.
- Xi W, Stuchly MA. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. Appl Comput Electromagn Soc J 9:127–134; 1994.

付 録

付 属 書（参考）

重み付けピーク値ばく露の決定

重み付けは、まず波形の周波数スペクトラムを算出し、次に式（7）を適用することで行え得る。しかしながら、多くの場合、時間領域での波形のアナロ

グまたはデジタル・フィルタリングを用いるのが、さらに便利である。フィルタの利得（入力信号に対する出力信号の比）は、ばく露制限値に比例する周波数の関数 $G = EL(f_{ref}) / EL(f)$ にしたがって変化する。ここで、 $EL(f)$ は周波数 f でのばく露制限値、 f_{ref} は 1 Hz から 100 kHz までの任意の参考周波数である。フィルタされた波形のピーク値は、参考周波数における（振幅の）ピーク値に変換されたばく露制限値（基本制限または参考レベル）を超過しないはずである。表 6 は、導き出されたピーク値の例を示す。物理的なフィルタは、振幅に加えて、電界および磁界の位相にも常に影響を与え、フィルタされた電界および磁界のピーク値を変化させる。図 1、2、3 に示されたように、制限値は、 $1/f^2$ 、 $1/f$ 、 f^0 （定数）または f にそれぞれ比例して変化するような周波数範囲に分けられる。 $1/f^2$ 、 $1/f$ 、 f^0 および f に比例する各範囲で、フィルタの位相角 φ_i （式 7 参照）はそれぞれ、180 度、90 度、0 度、-90 度である。重み付けフィルタは、厳密な区分線形周波数応答から減衰が 3 dB 以上および位相が 90 度以上は逸脱しないような電子回路フィルタまたはデジタルフィルタで近似することが可能である。一例として、図 A1 に、誘導電界の重み付けフィルタの、周波数関数としての減衰と位相を示す。近似曲線は、RC（抵抗／キャパシタ）型フィルタ関数を用いた単純な近似に基づいている。重み付けピーク値のアプローチは、コヒーレントおよび非コヒーレントの両方の電界および磁界に用いることができる。後者の場合、測定時間を十分に長くとり、妥当な蓋然性をもってワーストケースのピーク値が検出されるようにしなければならない。少数の周波数からなる、非コヒーレント電界および磁界の場合、重み付けピーク値アプローチは、スペクトル総和法と同一である。

表 6．非正弦波の電界および磁界のピーク値に対する制限値。参考周波数は 50 Hz である。

	誘導電界 (mV m ⁻¹)		外部電界	磁界
	脳	体部組織	(V m ⁻¹)	(μT)
職業的 ばく露	$\sqrt{2} \times 100$	$\sqrt{2} \times 800$	$\sqrt{2} \times 10000$	$\sqrt{2} \times 1000$
公衆 ばく露	$\sqrt{2} \times 20$	$\sqrt{2} \times 400$	$\sqrt{2} \times 5000$	$\sqrt{2} \times 200$

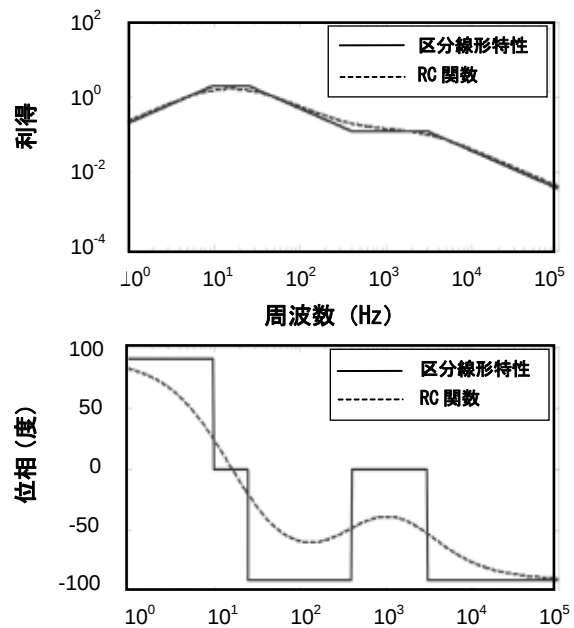


図 A1 誘導電界の重み付けに対する振幅応答と位相応答

用語解説

Adverse effect：有害な影響

電界または磁界、または接触電流へのばく露による、個人の健康にとって有害な影響。

Averaging distance：平均化距離

基本制限の遵守を決定するとき、体内電界の平均をとる範囲となる距離。

Basic restrictions：基本制限

健康への有害な影響に至る可能性のある、全ての、既知の、身体組織との生物物理学的相互作用メカニズムに直結する物理量に関する、守ることが義務づけられた制限値。

Cancer：がん

制御を外れた異常な真核細胞の分裂、および身体内の異なる部位への病変の広がり（転移）によって特徴づけられる疾患。

Central nervous system (CNS)：中枢神経系

脳と脊髄からなる、脊椎動物の神経系の一部。末梢

神経は含まれない。

Characteristics : 特性

電界または磁界の詳細な物理的性質。例えば、大きさ、周波数スペクトラム、偏波、変調など。

Conductivity : 導電率

電界を印加された材料に生じる電流密度の大きさを決定するその材料の性質。単位はジーメンズ／メートル(S/m)で表わされる。抵抗率の逆数。

Contact current : 接触電流

電極との接触または他の電流発生源を介して生体媒質に流入する電流。

Current density : 電流密度

ある表面積にわたる積分値がその表面を通過する電流に等しいベクトル。線状の導体における平均電流密度は、電流を導体の断面積で割った値に等しい。単位はアンペア／平方メートル(A/m²)で表わされる。

DC : 直流

direct current の略語。しかし、界の定常性を示す場合にも用いられる。「静的な界」参照。

Depolarization (cellular) : (細胞の) 脱分極

細胞膜にかかる静止膜電位の減少。

Direct effect : 直接的影響

EMFと生物学的構造との直接的相互作用の結果生じる生物学的影響。

Direct electro stimulation : 直接電気刺激

外部電界または磁界によって誘導された身体媒質中の電界を介した刺激。他の導体との直接接触または火花放電は伴わない。

DNA (deoxyribonucleic acid) : デオキシリボ核酸

2本鎖で、2重の螺旋構造を作り上げているデオキシヌクレオチドの高分子で、ほとんどの生物の遺伝を担う物質である。

Dosimetry : ドシメトリ

電磁界にばく露された人体または動物の内部電界強度または誘導電流密度、比エネルギー吸収量(SA)、比エネルギー吸収率(SAR)の測定、または計算による決定。

Electric field : 電界

ボルト／メートルで測定されるベクトル界 E。

Electric field strength (E) : 電界強度(E)

電界が点電荷に及ぼす力をその電荷で割った値。電界強度はニュートン／クーロンまたはボルト／メートル／で表わされる(N/C=V/m)。

Electromagnetic energy : 電磁エネルギー

電磁界がもつエネルギー。ジュールで表わされる(J)。

Electromagnetic fields : 電磁界

環境中で電界と磁界の組み合わせたもの。この用語は、しばしば、「電磁界放射 (electromagnetic radiation)」と混同されるため、放射がほとんど検出不能な低周波について用いると、誤解を与えることがある。

Electro stimulation : 電気刺激

印加した電氣的刺激により興奮性組織に伝搬する活動電位を誘発すること、すなわち、後シナプス細胞の活動の変化を導くようなシナプス前過程における電氣的分極の誘発。

EMF : 電界および磁界

Electric and magnetic fieldsの略語。

Established mechanism : 確立されたメカニズム

次のような特徴をもつ生体電氣的メカニズム。(a) ヒトの生物学的影響の予測に用いることが可能である ; (b) 方程式や変数間の関係を用いた明快なモデルが構築可能である ; (c) ヒトにおいて検証されている、または動物データが確信を持ってヒトへ外挿可能である ; (d) 強力な証拠によって支持されている ; (e) 学界の専門家に広く受け入れられている。

Exposure : ばく露

個人が低周波の電界および磁界または接触電流の影響下にあるときに、ばく露が生じるという。

Exposure, long-term : 長期的ばく露

この用語は、関与する生物系の生涯の大部分の期間にわたるばく露を指す。したがって、期間そのものは数週間から多年まで様々になる。

Exposure assessment : ばく露評価

測定、モデル化、発生源に関する情報、その他の方法によって行われる個人のばく露の評価。

Exposure metric : ばく露尺度

電界および／または磁界のばく露を総括する一つの数。尺度は、通常、機器による信号処理と測定後のデータ分析の組み合わせにより決定される。

Frequency : 周波数

電磁波により作られた正弦波的周期の1秒間における回数。通常、ヘルツで表わされる(Hz)。

General public : 公衆

この用語は人口集団全体を指す。全ての年齢の人、多様な健康状態の人を含む。これには、身体が虚弱な人、高齢者、妊娠中の作業者、乳幼児、小児など特に影響を受けやすいグループや個人が含まれる。

General public exposure : 公衆ばく露

公衆の成員が受ける全ての低周波の電界および磁界ばく露。この定義には職業的ばく露および医療ばく露は含まれない。

Harmonic (frequency) : 高調波 (周波数)

商用周波数またはその他の参考周波数の整数倍の周波数。

Heart rate : 心拍数

1分間当たりの心臓拍動数の測定値。

Hertz (Hz) : ヘルツ

周波数 (f) を表わす単位。1ヘルツは1サイクル／秒である。

1 kHz = 1000 Hz, 1 MHz = 1000 kHz, 1 GHz = 1000 MHz.

Induction : 誘導

外部（環境中）の時間変化する電界または磁界の作用によって導電性媒質中に生じる電界または磁界。

Instantaneous : 瞬時の

非常に短い時間内（典型的には100マイクロ秒またはそれ以下）で測定または評価されなければならない特定の変数を記述するために用いられる形容詞。

Let-go current : 離脱電流

不随意的筋肉収縮が起きて、握った通電中の導体を手から離すことができなくなる電流レベルの閾値。

Magnetic field : 磁界

ベクトル量 H 。これは空間中のあらゆる点における磁界を規定する。アンペア／メートルで表わされる ($A\ m^{-1}$)。「磁束密度」参照。

Magnetic field strength (H) : 磁界強度(H)

磁界ベクトルの大きさ。アンペア／メートルで表わされる (A/m)。

Magnetic flux density (B) : 磁束密度(B)

運動中の単一または複数の電荷（電流）に及ぼす力を決定するベクトル量。テスラ(T)で表わされる。1ガウス（非推奨の単位）は 10^{-4} テスラに等しい。

Magnetophosphenes : 磁気閃光

誘導電流が網膜を刺激することによって引き起こされる光の瞬きの感覚。

Mean : 平均値

一連の測定値またはデータの算術平均。

Median threshold : 閾値の中央値

閾値の統計学的分布において、被験者の50%はこの値より大きな閾値を持ち、他の50%はこの値より小さな閾値を持つような閾値。

Medical exposure：医療ばく露

医学的診断または承認された治療を受けている患者として、または医学研究のボランティアとして、個人が受ける低周波の電界および磁界のばく露。

Mutagen：突然変異原

突然変異を起こすことができる物質。

Mutation：突然変異

遺伝物質における検出可能で遺伝性をもつ変化。ただし遺伝子組み換えによるものではない。

Nerve：神経

軸索の束。

Nerve fiber：神経線維

一本の神経軸索。

Neuron：ニューロン（神経細胞）

通常は一本の軸索、細胞体、樹状突起からなる一つの細胞単位。

Non-ionizing radiation (NIR)：非電離放射線

物質中で電離（イオン化）を引き起こすための十分なエネルギーを持たない、電磁スペクトラム中の全ての放射線と電磁界。その特性は、12 eV以下の光子エネルギーであり、これは、波長が100nm以上、または周波数が 3×10^{15} Hz以下と等価である。

Non - uniform field：非一様な界

考察対象である身体または身体の一部の範囲内で、振幅、方向、相対位相が一定でない界。電界の場合、身体が存在によって擾乱されていない環境中の電界に対して、この定義を適用する。

Occupational exposure：職業的ばく露

正規の、または割り当てられた職務遂行の結果として、個人が経験する全てのEMFばく露。

Peripheral nerve：末梢神経

中枢神経系の外にあり、を入出する神経。

Permeability：透磁率

磁界との積が磁束密度になるスカラー量またはテンソル量。注：等方性媒質ではスカラー、異方性媒質ではマトリクスである。同義語：絶対透磁率。物質または媒質の透磁率を真空中の透磁率（磁気定数） μ_0 で割ったものを比透磁率（ μ ）と呼ぶ。単位：ヘンリー／メートル(H/m)。

Permittivity：誘電率

帯電体間の吸引力または反発力に及ぼす媒質の影響を決定する定数。ファラッド／メートルで表わされる(F/m)。比誘電率は、物質または媒質の誘電率を真空中の誘電率で割ったものである。

Phase duration (t_p)：位相間隔

平均値ゼロの波形がゼロ線と交差する点と点の間の時間。周波数 f の正弦波の場合、 $t_p = 1/(2f)$ 。指数関数波形の場合、 t_p は波形のピーク点からピーク値の0.37 (e^{-1})に減衰する点までを測定した時間と解釈される。

Phosphene：閃光

光以外の刺激によって起こる視覚系の感覚。電気閃光は電流によって誘発され、磁気閃光は磁氣的に誘発される。

Plasma membrane：細胞膜

動物および植物細胞の細胞質を包む脂質二重層。

Polarization (cellular)：（細胞の）分極

細胞膜内外に形成された電位差。

Power frequency：商用周波数

交流電気が発電される周波数。電気事業において、北米、ブラジル、日本の一部では60 Hz、世界のその他の多く地域では50 Hzである。

Protein：たんぱく質

複雑な形状と組成をもつ高分子量の窒素含有の有機化合物グループのひとつ。

Public exposure：公衆ばく露

公衆の成員が経験する全てのEMFばく露。職業的ばく露および医療処置中のばく露は含まれない。

Radiofrequency (RF) : 無線周波数

3 kHz から300 GHzの範囲の周波数をもつ電磁エネルギー。

Reduction factor : 低減係数

ガイドライン策定過程における不確かさの様々な原因に対する補正のために影響閾値に低減を加えること。ばく露－影響閾値レベルに関する不確かさの原因の例としては、動物のデータをヒトでの影響に外挿すること、生理学的予備能とそれに対応した許容度の個人差、量－反応関数における統計学的不確かさ（信頼限界）などがある。ガイドライン施行上の測定における不確かさは、遵守手法の開発を職務とする組織が担当するのがより適している問題であるというのが、ICNIRP の見解である。この不確かさは、ICNIRP による低減係数の設定では考慮されていない。

Reference levels : 参考レベル

許容可能な安全係数をもたせて設定された、有害な影響を受けること無くばく露されるであろう電界、磁界、接触電流の実効値およびピーク値。基本制限を超えないことが証明できる場合、本文書の電界および磁界ばく露に対する参考レベルは超えてもよい。

したがって、参考レベルは、基本制限の遵守を明確にするために用いることができる実際的または“代用的”なパラメータである。

Relative permeability : 比透磁率

（絶対）透磁率（この項参照）を真空中の透磁率で割ったもの。値が1に近いということは、その物質が外部磁界によって極めて弱くだけ磁化されることを意味する。

Relative phase : 相対位相

ある正弦波波形と同じ導電性媒質中の他の点で測定される別の波形との位相差。または基準の波形との位相差。

Relative risk (RR) : 相対リスク

調査対象グループの疾患率の比較グループの疾患率に対する比率。必要に応じて、年齢などの交絡因子の調整を行う。稀な疾患の場合、實際上、相対リスクはオッズ比と同じである。

Root mean square (rms) : 実効値

時間を変数とする関数 $F(t)$ の二乗値の時間 t_1 から t_2 までの指定された時間にわたる平均の平方根。まず関数を二乗し、次に得られた二乗値の平均値を求め、その平均値の平方根を得ることで導かれる。

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [F(t)]^2 dt} \quad (A1)$$

S.I. : 国際単位系

International system of unitsの略語。

Spatial Peak : 空間ピーク値

人体の小さな体積または面積にわたって平均された特定の物理量の最大値を記述する用語。

Spark discharge : 火花放電

発生源に直接接触するのとは異なり、空気の間隙を通る電流の移動。空気を電離するために十分な高電圧が必要である。

Static field : 静的な界

時間とともに変化しない界。ほとんどの環境中で、電界および磁界は時間とともに変化するが、周波数スペクトラムには0 Hz成分が含まれる。このような界の「準静的」成分は、サンプル時間中の振動信号を平均することにより測定できる。

Tesla (T) : テスラ

磁束密度の国際単位。1 テスラ = 10000 ガウス（この項参照）

Threshold : 閾値

反応と無反応の境界を示す刺激のレベル。

Ventricular fibrillation : 心室細動

心室の不整脈で、小刻みで調整を失った収縮を特徴

とする。

Voxel : ボクセル

3次元の計算要素。本スタンダード(訳者注:原文に忠実)では、ドシメトリモデルの動物および人体の組織を表現するために用いられる。

Waveform : 波形

電氣的振幅の時間に伴う変動。特に他に記述されないときは、本スタンダード(訳者注:原文に忠実)では、この用語は生体媒質中のある部位での値(または測定値)を指す。

Workers : 作業者

「職業的ばく露」参照。

訳者注

- 1 : 原文 p.825 最初の段落、および p.829 式(6)の段落の 2 カ所にのみ、四肢電流に関する記述がある。四肢電流は、本ガイドラインの内容に直接は関わらないが、原文に忠実に訳した。
- 2 : p.829 式(6)の I_{Lj} は、式(5)に倣えば、 I_{Rj} の表記が適すると思われるが、原文に忠実に訳した。
- 3 : 付属書(参考)の利得の関数の説明で、原文の EL は $EL(f)$ に訂正して訳した。
- 3 : 用語解説には、本文中に使用されていない用語がいくつか含まれているが、原文に忠実に訳した。

This image shows a full page of a document template designed for handwritten notes or essays. It features approximately 30 evenly spaced, thin horizontal grey lines across the entire width of the page. The lines are uniform in thickness and color, providing a guide for writing without being distracting. There are no margins, headers, footers, or other markings present on the page.

[illegible]

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

