

## 10 磁界

### 10-1 磁界の基準について

#### 10-1-1 国の基準

超電導リニアの磁界については、国の基準である「特殊鉄道に関する技術上の基準を定める告示の一部を改正する告示（平成 24 年 8 月 1 日 国土交通省告示第 855 号）」及び「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準の一部改正について（平成 24 年 8 月 1 日 国鉄技第 42 号）」において下記のとおり定められている。

（特殊鉄道に関する技術上の基準を定める告示）

##### 第 6 条第 5 項第 4 号

き電線（動力発生装置の地上設備に供給する電気の周波数を変換する機器を備えた変電所及び当該変電所と動力発生装置の地上設備との間に施設される開閉所（以下この項及び第七項において「特定変電所等」という。）に施設されるものを除く。以下同じ。）、浮上装置、案内装置、動力発生装置及び車両の電源に給電する装置は、通常の使用状態において、当該設備から発生する磁界により、当該設備のそれぞれの付近において、人の健康に影響を及ぼすおそれがないように施設しなければならない。ただし、田畑、山林その他の人の往来が少ない場所において、人体に危害を及ぼすおそれがないように施設する場合はこの限りではない。

##### 第 6 条第 5 項第 5 号

特定変電所等は、通常の使用状態において、当該特定変電所等から発生する磁界により、当該特定変電所等の付近において、人の健康に影響を及ぼすおそれがないように施設しなければならない。ただし、田畑、山林その他の人の往来が少ない場所において、人体に危害を及ぼすおそれがないように施設する場合は、この限りでない。

（鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準）

##### 第 6 条第 2 項(4)

施設及び車両は、次の基準に適合するものであること

- ①施設及び車両は、き電線（動力発生装置の地上設備に供給する電気の周波数を変換する機器を備えた変電所及び当該変電所と動力発生装置の地上設備との間に施設される開閉所（以下「特定変電所等」という。）に施設されるものを除く。）、超電導磁石、浮上コイル、推進コイル、給電レール及び非接触集電地上設備並びに特定変電所等のそれぞれから発生する磁界を③の測定方法により求めた磁束密度の測定値（交流磁界にあつては実効値）が、国際非電離放射線防護委員会の「時間変化する電界及び磁界のばく露制限に関するガイドライン（2010）」の公衆ばく露に対する参考レベル及び「静磁界の曝露制限値に関するガイドライン（2009）」の一般公衆曝露の曝露限度値以下となるように施設すること。

- ②測定装置は、日本工業規格 JIS C 1910 (2004) 「人体ばく露を考慮した低周波磁界及び電界の測定—測定器の特別要求事項及び測定の手引き」に適合する3軸のものであること。
- ③測定方法は、IEC 62110 (2009) 及び IEC/TS62597 (2011) に適合するものであること。

### 10-1-2 国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) の基準について

解釈基準の条文で基準とされている国際非電離放射線防護委員会の「時間変化する電界及び磁界のばく露制限に関するガイドライン (2010)」の公衆ばく露に対する参考レベル及び「静磁界の曝露制限値に関するガイドライン (2009)」について解説する。

ICNIRP の基準は、これまでに世界中で出された磁界や電界の論文を、細胞レベル、動物研究、人体研究、疫学的研究の観点からレビューし十分な証拠があると判断された影響に基づき定められている。まず 1Hz から 100Hz までの変動磁界については、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、及び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を根拠にして、これらの研究で認められた閾値に基づき、基準 (電界強度と周波数) が定められ、公表されたデータを用いた数学的モデル化により、基本制限から磁界及び電界に関する参考レベルが導き出された。

次に静磁界については、2T 以上で、目眩、吐き気、磁気閃光など一過性の影響が、ある人々において時折観察されたが、不可逆的または重大な健康悪影響に関する証拠は何も見出されていない。したがって、目眩、吐き気、その他の感覚作用を防護するため、一般的職場に対する曝露限度値は 2T と定められた。さらに、一般公衆に対する曝露限度値 (身体の任意の部分において) 400mT は、職業的曝露の頭部・躯幹部に対する限度値を基本にし、これに低減係数 5 を適用して導かれたものである。この低減係数は人口集団の全構成員を考慮したものである。

なお、低レベルの磁界の長期曝露の影響については、世界保健機関 (WHO) 及び ICNIRP によりレビューが行われたが、明確な影響の証拠といえるものではなく、WHO は 2007 年 6 月のファクトシート No. 322 において、恣意的に低いばく露制限値を採用する政策は是認されるべきではないことを述べている。

### 10-1-3 医療機器について

ペースメーカー等医療機器については、ICNIRP の対象とはしていない。一方で、ペースメーカーについては、正常な動作を維持すべき静磁界を 1mT とする国際規格 ISO 14708-1&2 が定められ、これを基にして、厚生労働省は「植込み型心臓ペースメーカー等承認基準の制定について」において、1mT を国内のペースメーカーの承認基準としているため、列車運行にあたっては本承認基準を順守していく。

また、ペースメーカー以外の医用インプラントについては、今後の医療機器の国際規格や国内規格に関する動向を注視し、必要な検討を行っていく。

## 静磁界の曝露限度値に関するガイドライン

国際非電離放射線防護委員会\*

### 序論

産業と医療における静磁界利用技術の急速な発展は、人の静磁界曝露の増大をもたらし、それにより生じる可能性のある健康影響について多くの科学研究がなされるに至った。世界保健機関 (WHO) は最近、環境保健クライテリアプログラム (WHO 2006) 中の静電界および静磁界に関する保健クライテリア文書を作成した。その文書は、静的な場の曝露による生物学的影響の報告のレビューを含み、他の最近の刊行物 [主たるは、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) 2003, McKinlay et al. 2004 および Noble et al. 2005] と共に、1994 年刊行の ICNIRP 文書 (ICNIRP 1994) に代わる本文書で述べられたガイドラインの根拠の進展における科学的データベースとして役立つものである。

### 範囲と目的

このガイドラインは職業的および一般公衆の静磁界曝露に適用する。このガイドラインは医学的診断または治療を受けている患者の曝露には適用しない。患者の防護に関して考慮すべき詳細事項は、磁気共鳴画像法 (MRI) 検査中の患者の防護に関する ICNIRP ステートメント (ICNIRP 2004, および ICNIRP 準備中) に示されている。

\* ICNIRP, c/o BfS - G. Ziegelberger, Ingolstaedter Landstr. 1,85764 Oberschleissheim, Germany.

連絡は上記住所 G. Ziegelberger, または info@icnirp.org (2008 年 12 月 4 日原稿受付)  
0017-9078/09/0

Copyright © 2009 Health Physics Society

### 物理量と単位

電界は電荷の存在と密接に結びつけられるのに対し、磁界は電荷の物理的運動 (電流) の結果生じる。同様に、磁界は電荷に物理的力を及ぼすが、それは電荷が動いている時のみである。磁界はベクトルとして表わされ、磁束密度  $B$  または磁界強度  $H$  の二通りのうちのどちらかが指定される。 $B$  と  $H$  はテスラ (T) とアンペア毎メートル ( $\text{Am}^{-1}$ ) でそれぞれ表記される。真空中、および十分に真空と近似できる大気中で、 $B$  と  $H$  には次の関係式が成り立つ。

$$B = \mu_0 H \quad (1)$$

式(1)の比例定数  $\mu_0$  は自由空間中の透磁率で、ヘンリー毎メートル ( $\text{Hm}^{-1}$ ) で表記された値は  $4\pi \times 10^{-7}$  である。したがって、大気中または非磁性体 (生体材料を含む) 中の磁界を適切な近似で記述するためには、 $B$  か  $H$  のどちらか一つの量を指定すればよい。

磁束密度  $B$  に対し垂直方向に速度  $v$  で運動する電荷  $q$  に作用する力  $F$  の大きさは次式で与えられる。

$$F = q(v \times B) \quad (2)$$

力 (ローレンツ力) の方向は、電荷速度と磁束密度のベクトル積で決まるため、常に電荷の流れの方向に垂直である。結果として磁界と電荷の相互作用は電荷の流れの方向に変化を起こすが、速度に変化は起こさない。静磁界は生体組織へエネルギーを運びこまない。

磁束密度 (テスラで測定される) は、磁界影響に関して最も関係のある物理量として認められている。表面の一定領域内の磁束密度は、その領域と磁束密度の表面に対する法線成分との積で

ある。

表 1. 静磁界の物理量と SI 単位

| 物理量      | 記号      | 単位                                   |
|----------|---------|--------------------------------------|
| 電流       | $I$     | アンペア(A)                              |
| 電流密度     | $J$     | アンペア毎平方メートル( $\text{Am}^{-2}$ )      |
| 磁界強度     | $H$     | アンペア毎メートル( $\text{Am}^{-1}$ )        |
| 磁束       | $\Phi$  | ウェーバー(Wb または $\text{Tm}^2$ )         |
| 磁束密度     | $B$     | テスラ(T)                               |
| 透磁率      | $\mu$   | ヘンリー毎メートル( $\text{Hm}^{-1}$ )        |
| 自由空間の透磁率 | $\mu_0$ | $4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ |

磁界の物理量と単位を表 1 に要約する。

国際単位系 (SI) は科学的文献に用いられる国際的に認められた単位系である。非電離放射線防護に関する概念、物理量、単位、専門用語のより完全なリストおよび議論について、読者は ICNIRP の関連刊行物 (ICNIRP 2003) を参照できる。

### 曝露発生源

地球の自然の静磁界は $\sim 50 \mu\text{T}$ であり、地理的位置に依存して $\sim 30$  から  $70 \mu\text{T}$  まで変動する。 $20 \mu\text{T}$  程度の磁束密度は高压直流送電線下に生じる。将来は、新しい輸送技術の発展によるさらに高い磁束密度の曝露可能性がある。磁気浮上に基づく高速旅客列車はモーター付近で比較的高い磁束密度を生じさせる。磁気浮上列車、従来型電車の両方とも、客車内磁界は比較的低く、 $100 \mu\text{T}$  以下であるが、客車床下に置かれたインダクタにより、床レベルにおいて最大で数 mT の局所的磁界が生じる (WHO 2006; ICNIRP 2008)。その他、居住環境および職場環境での静磁界発生源には、磁石クリップや磁石留め具 (バッグ、ボタン、磁気ネックレス・ブレスレット、磁気ベルト、磁石の玩具等々) の小型永久磁石があり、これらは局所的に  $0.5 \text{mT}$  を上回る静磁界を発生させる。最も高い非職業的曝露は、磁気共鳴 (MR) による診断検査を受けている患者に起きる。MR は診断上の身体情報を得るために、また身体内の外科的介入のガイドのためにも次第に多く利用されている。MR

は核磁気共鳴現象に基づいており、MRI と核磁気分光法 (MRS) の根底をなす。MR 処置中の典型的な磁束密度は  $0.15$  から  $3\text{T}$  までの範囲にあり、曝露は通常 1 時間より短くとどめられているが、数時間の継続もあり得る (Gowland 2005)。MRI を用いた直接的なリアルタイム制御下での介入的医学処置はますます普及しつつある。これらの処置は職業的曝露、特に医療専門家 (外科医、放射線技師、看護師、技術者) の曝露増大を生じさせる。処置中、医療スタッフは、最大で数時間までの長時間、主要磁界領域内にいる場合もある。医療専門家が患者に非常に接近して介入しなければならぬような救急場面でもスタッフの曝露増大は起きる。さらに、MR システムの内外的患者の移動中にスタッフの短時間曝露が起きる。最後に、MR システムの製造や保守に係わるスタッフも職業的に、強い静磁界に曝露される。

機能的 MRI は、現在、ヒトの脳機能についての学術的、医学的研究に広く利用されている。最大で約  $10\text{T}$  までの強磁界を用いた MR システムが現在、世界各地のいくつかの研究所で研究に使われ、研究所内審査委員会または同等な組織の承認を得て運転されている。その他の静磁界の医療応用でも曝露は起きる。種々の人工器官を正しい場所に保持するための磁石の利用や、心臓カテーテル先端を導くために可動性の永久磁石を用いる磁氣的ナビゲーションなどである。しかし、これらの装置は局所的磁界しか発生しない。

強い磁界は、熱核融合炉、電磁流体力学システム、超電導発電機など高エネルギー技術においても発生する。粒子検出装置、粒子加速器、超電導分光計測器、同位体分離装置などを利用する実験施設にも、これら装置周辺に高い磁束密度のエリアがある。塩素やアルミニウムの生産のような電気分解処理を必要とする産業（このような職場における、ほとんどの労働日の典型的曝露は数 mT で、最大で数 10 mT の曝露ピーク値を伴う）および永久磁石、磁性体材料の製造に携わる産業でも強い磁界への曝露が起きる。

## 科学的証拠のレビュー

### 相互作用のメカニズム

静磁界と生体物質との相互作用の物理的メカニズムとして確立されたものは、磁気誘導、磁界力学的相互作用および磁界電子相互作用の3つである。

### 磁気誘導

このメカニズムに起因して、以下の相互作用が起きる。

- 運動する電解質との電気力学的相互作用：静磁界は運動するイオン性電荷担体にローレンツ力を及ぼし、それによって誘導電界と電流を生じさせる。この相互作用は血流による磁気誘導電位の根拠であり、すでに理論的解析がされている (Kinouchi et al. 1996)。この著者らによれば、心臓ペースングをコントロールする洞房結節は電流に最も敏感な部位であろうが、5 T の磁界に対するこの部位での電流密度は約  $100 \text{ mA m}^{-2}$  と計算された。これは心臓の電氣的活動による内因性電流の最大値の約 10%にあたり、10 T の場合は約 20%に上昇することが示唆された。心臓電気生理学の計算機モデルを用いた電界の心機能への影響の詳細な検討によれば、8 T までの磁界は心拍数とリズムに影響する可能性はないものの、より高い磁界に対してはこれが必ずしも正しくないかもしれないことが示された (Holden 2005)。
- 誘導電界および電流：時間変動する磁界は、ファラデーの誘導法則にしたがって生体組織に電流を誘導する。静磁界中の運動によっても同様に電流

が誘導される。特に、磁界勾配に沿った運動や回転運動により、均一磁界中と勾配磁界中のどちらでも、電流を誘導する磁束鎖交数変化が起きる。対照的に、均一静磁界中の人体の直線運動ではこれは起きない。勾配磁界中の直線運動では、誘導電流およびそれに関係する電界の大きさは、運動速度および勾配の大きさと共に増加する。計算によれば、2–3T 以上の磁界の中またはその周辺での通常の動きによる誘導電界は実際効果がある大きさであること (Crozier and Liu 2005)、そのような磁界中で動く患者、ボランティア、作業員での体験が多数報告されている目眩・吐き気・磁気閃光 (Schenck et al. 1992; Chakeres and de Vocht 2005; de Vocht et al. 2006b) の原因はこれで説明されるであろうことが示された。3 T の全身用 MRI スキャナ周辺の磁界中で、歩行・方向転換などの典型的な人体の動きにより誘導される表面電界を人体各部位で計測した結果、上腹部、頭部、舌面でそれぞれ、0.15、0.077、0.015  $\text{V m}^{-1}$  であった (Glover and Bowtell 2008)。電界のピーク値は胸部で 0.30  $\text{V m}^{-1}$  と計測された。この研究では運動速度が明示されていない点に注意を要する。Crozier と Liu (2005) は、一定速度  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  で 4 T 磁石に進入するような人体の動きにおいて体内の最大誘導電界強度はおおよそ  $2 \text{ V m}^{-1}$  と推定した。これは、周波数範囲 10 Hz–1 kHz における末梢神経刺激の知覚閾値とおおよそ等しい (ICNIRP 1998)。しかし、人体の動きによる磁界変動の周波数成分は大抵の場合 10 Hz より低いことに注意しなければならない。10Hz という周波数は、これ以下では電位依存性ナトリウムイオンチャネルの遅い不活性化が原因で、順応により神経組織の電氣的興奮性が低下することを意味する (Bezannilla 2000)。例えば、歩行中の頭部の並進および回転運動による磁界変動の周波数成分は、0.4–4 Hz の間で変化する (Grossman et al. 1988; Pozzo et al. 1990; MacDougall and Moore 2005)。

### 磁界力学的効果

- 静磁界が生物学的対象に及ぼす力学的効果には、以下の2つの種類がある。
- 磁界配向：常磁性分子は、静磁界中でその自由エネ

ルギーを最小化する向きをとるように働くトルクを受ける。この効果は、磁気異方性が大きな反磁性高分子集合体についても十分に研究されている。概して生体内物質の磁化率は非常に小さい値 ( $\sim 10^{-5}$ ) のため、この力はあまりに小さく、生体内で影響を及ぼすことはないと考えられている (Schenck 2000)。しかし、いくつかの動物種の帰巢や渡りの際の方角の手がかり探知に地磁気に関わることが示されている (Kirschvink et al. 2001; WHO 2006)。さらに、強静磁界 ( $>17$  T) は細胞分裂装置の再配向を引き起こすことが示された。すなわち、第1卵割から第3卵割までの間にあるカエル胚で卵割面の方向に変化を引き起こされた (Valles et al. 2002)。

- 磁界力学的並進：勾配がある静磁界は、反磁性体、常磁性体の両方に正味の並進力を生じさせる。この力の方向は、常磁性体では磁界勾配方向と同じであり、反磁性体では反対向きである。力の大きさは、磁束密度 (B) と磁界勾配 (dB/dx) の積に比例する。高磁化率の金属 ( $>1$  の鉄やある種のスチール) の工具のような強磁性物体に働く力は、大きな磁界勾配での加速度により危険をもたらす。生体物質に働く力の大きさは、 $BdB/dx > 1000 \text{ T}^2 \text{ m}^{-1}$  の場合、重力と同程度である (WHO 2006)。磁界勾配  $50 \text{ T m}^{-1}$  の8 T 磁石で、磁石内部を通る水平な樋の中の水の深さが下がることが実証されたが、これは磁石の外側にある樋の両端に向かって水が押されて、水が分断されることによる (Ueno and Iwasaka 1994)。10 T での効果は、磁石の内側から外側への圧力の変化でみて  $40\text{mmH}_2\text{O}$  より小さいものであり、これは人体の血流に影響を与えるには不十分と考えられている (Schenck 2005)。しかし、Ichioka ら (2000) は、ラットの全身に8 T の静磁界を作用させた場合、皮膚血流量の低下を観察した。この場合、磁束密度と磁界勾配の積は、ラットの体長軸に沿って200 から  $400 \text{ T}^2 \text{ m}^{-1}$  の間で変化していた。

#### 電子スピン相互作用

ある種の代謝反応はラジカル対から成る中間状態を必然的に伴うが、通常、それは不対電子のスピン同士が反平行な一重項状態である (Schulten 1982; McLauchlan and Steiner 1991; Grissom 1995; Nagakura

et al. 1998; Hore 2005; WHO 2006)。このようなスピン相関ラジカル対は反応産物を形成するために再結合する。磁界作用は、このラジカル対が三重項状態 (スピンの平行になり、この状態ではもはや再結合は起きない) へと変換する速度と変換割合に影響を与える。生体システムにおけるこの効果に関する実験的証拠が報告されているものの (Eveson et al. 2000; Liu et al. 2005)、その生物学的意義は現在のところ明らかでない。動物、特に鳥類、が渡りのナビゲーション情報源として地球磁界を利用するメカニズムとして、“ラジカル対メカニズム” が示唆され (Ritz et al. 2000)、この見解に対する実験的支持がいくつかある (Ritz et al. 2004)。

### In Vivo および In Vitro 研究

磁束密度ミリテスラから数テスラの範囲の静磁界に対する生物学的反応を検出するために多数の研究が精力的に行われてきた。これらは、ICNIRP (2003)、McKinlay ら (2004)、Miyakoshi (2005)、Noble ら (2005) および WHO (2006) で包括的にレビューされている。以下は主要な結論の要約である。

#### In Vitro システムを用いた実験研究

細胞レベル生物体の多面的研究には、細胞なしの実験系 (単離細胞膜、酵素、生化学反応) および様々な細胞モデル (微生物および哺乳類細胞) がある。研究の評価項目は、細胞配向、細胞成長、細胞代謝活性、細胞膜生理学、遺伝子発現である。

これらすべての評価項目に対し、肯定的および否定的知見が報告されている。多様ともいべき影響が、8 T までの広範な範囲の磁束密度の曝露後に見いだされた。影響の閾値が報告されたものもあるが、その他は明確な閾値がない非線形反応と示唆されている。しかしそのような反応は十分に確立されていない。前述の細胞分裂装置への影響 (Valles et al. 2002) はある程度一貫性のある証拠を示している。この研究は、以前と同じ研究グループが行った観察 (Denegre et al. 1998) の確認である。

ラジカルが介在する代謝反応への影響に関しては、これまでの研究の結果から、磁界作用によるフリーラジカルの密度やフラックスの変化が、生理的に重大な結果をもたらすような影響、または長期的な変

異誘発性の影響を起こす強い可能性はないことが示唆される (Hore 2005)。

遺伝毒性に関する研究は数件のみ行われている (Miyakoshi 2005)。9 T までの静磁界の曝露において、遺伝毒性的または後生的な影響は見られないが、例外として、修復不全微生物株を用いた研究 1 件がある (Zhang et al. 2003)。この研究は、変異原物質と静磁界の複合曝露に関するものであり、試験された変異原物質作用の修飾が示されたが、その磁界依存性は示されなかった。

総括すると、磁束密度が数テスラまでの磁界曝露の生物学的有害影響について、細胞モデルおよび非細胞モデルでの確かな証拠はない。

### 動物実験研究

静磁界影響に関する多数の動物研究が行われてきた (Saunders 2005)。行動研究において最も一貫して見られた反応であることから、実験用げっ歯類が約 4 T およびそれ以上の磁界中で見せた動きは嫌悪反応および条件回避かも知れないことが示唆される (Weiss et al. 1992; Nolte et al. 1998; Houpt et al. 2003)。この影響は前庭器官との相互作用から生じると考えられている (Snyder et al. 2000)。しかし、2 T 程度およびそれ以下の磁界レベルにおいては、学習または様々な刺激に対する条件および無条件行動反応への曝露の影響について、実験研究での確かな証拠はない (Trzeciak et al. 1993)。この知見に一致するものとして、静磁界曝露下神経組織の電気的興奮性の実験的研究では、2 T までの磁界において確固たる影響は実証されなかった (Gaffey and Tenforde 1983; Hong et al. 1986)。

動物で、約 0.1 T 以上の静磁界の曝露影響として十分に確立されたものは、心臓内部および周囲と循環器系主要血管の血流に誘導される電位である (Gaffey and Tenforde 1981; Tenforde et al. 1983)。ヒトにおける同様の影響についても証拠は十分に示されているが (後述参照)、ボランティア研究によればそれが悪性の影響に結びつくことはなかった。誘導電圧の存在は、げっ歯類、イヌ、ヒヒ、サルを用い、2 T までの磁界の数時間から数日の継続曝露中に実施された心電図 (ECG) 研究で実証された (Tenforde 2005)。しかし、これが健康に関してもつ意味は明らかでない。

イヌ、サルを 1.5 T に曝露して広範な計測が行われたが、血流速度、血圧または循環動態における変化の証拠は提供されなかった (Tenforde et al. 1983)。8 T 磁界の数時間の継続曝露はブタの循環機能に何ら影響を与えなかった (Kangarlu et al. 1999)。げっ歯類をミリテスラから 10 T までの範囲の磁界に曝露させた研究数件が、血圧、血流速度などの循環系パラメータにおける微小な変化を報告している (Ichioka et al. 2000; Okano et al. 2005; Okano and Ohkubo 2006)。しかし、これら研究での実験評価項目は概してやや不安定であり、麻酔などの修飾因子の影響を受け易いため、報告された影響が独立的に反復実験されなくては結論の確定はできない。

1 T までの静磁界の曝露がマウスの胎仔成長、生後発育に与える影響は実証されなかった (Sikov et al. 1979; Konermann and Monig 1986)。その他の研究として、マウス胎仔の器官発生期に 4.7 T (Okazaki et al. 2001) および 6.3 T (Murakami et al. 1992) の磁界に短期間 (2 - 7 日) 曝露された後に胎仔発育への影響はないことが報告されている。

実験動物で静磁界の遺伝毒性または発がん性の影響可能性を示した研究は少数しかない (Bellossi 1984, 1986; Mevissen et al. 1993)。現在までのところ、静磁界による発がんのイニシエーションまたはプロモーションの評価を目的とした生涯曝露研究は行われていない。このような特定の評価項目および長期的な健康影響一般に関しては、動物研究から何らかの結論を導くのは不可能である。

これまでに研究された、血液系、内分泌系および血液化学を含む、その他の評価項目については、悪影響の確たる証拠は何ら示されていない。

### ヒトでの実験研究

1994 年の ICNIRP ガイドライン (ICNIRP 1994) 刊行以降、静止状態で 8 T までの静磁界に曝露されたヒトについて、生理学的、神経行動学的影響を評価する研究が多数行われてきた。

体 (舌下) 温、呼吸数、脈拍数、血圧、指尖酸素化レベルを含む多様な生理学的パラメータを評価する詳細な研究は、8 T までの静磁界の曝露による特記すべき影響がないことを示した (Chakeres et al. 2003a)。心電図 (ECG) 信号のひずみが観察されたが、

これは心臓周囲に血流により誘導された電位（上述参照）が原因であった。8 Tにおける誘導電位の大きさはECGを解釈不能にするのに十分であったが、心拍数は影響を受けなかった。統計的に有意な変化を示した唯一の生理学的パラメータは、収縮期血圧の4%以下のわずかな増加であったが、これは磁気流体力学的効果による血流抵抗増大の予測値の範囲内である。そのような効果のモデル化に基づけば、臨床的に意味のある10%以上の血流低下は15 Tを上回る磁界レベルにおいてのみ予測される（Kinouchi et al. 1996）。記録された血圧変化は、健康な被験者に臨床的意味のある変化、あるいは臨床的徴候である変化を示さず、正常な生理学的変動の範囲内であった。その他の心機能に対する静磁界の影響について、ヒトでの証拠はない。また、8 Tまでの静磁界に曝露されたヒトのボランティアに体温の変化は起きないことが報告されている（Shellock and Crues 1987; Chakeres et al. 2003a）。これらの知見は、最近のMRI研究（Atkinson et al. 2007）で確認された。この研究では、静磁界成分は9.4 Tで、心拍数、収縮期血圧での変化は見られなかった。しかし、切り替え勾配磁界および高周波（RF）磁界も存在したことに注意を要する。

静止状態で8 Tまでの静磁界に曝露されたヒトに関する最近の神経行動学的研究は、短期記憶、作業記憶、会話、聴覚—運動反応時間を含む多様なパラメータにおいて有意な変化を示さなかった（Kangarlu et al. 1999; Chakeres et al. 2003b; Chakeres and de Vocht 2005）。

7 TまでのMRシステム近傍に位置した被験者における行動研究によれば、磁界内での頭部運動に伴って、目と手の協応運動や視覚コントラスト感度が一過性の好ましくない影響を受ける可能性が示唆された（de Vocht et al. 2003, 2006a, 2007a, 2007b）。De Vochtらは、0.5 Tから1.6 Tまでの間の静磁界内で、 $0.3\text{T s}^{-1}$ （静磁界1.6 Tの時）までの磁界変化速度を起こすように規格化された頭部の連続運動を行った直後に起きる、視標追跡作業および目と手の協応運動（どちらも前庭動眼反射の特異的測定尺度）の成績低下を述べている。影響の大きさは、頭部運動により時間変動する磁束に依存するようには見えなかった。

約2–3 Tの静磁界に曝露された人は、眼球や頭部を

動かした時に目眩、吐き気、金属味、磁気閃光といった、静磁界内での動きに伴う一過性の感覚作用を体験するという報告が数件ある（Schenck et al. 1992; de Vocht et al. 2006a, 2006b; Atkinson et al. 2007）。しかし、これらの症状の発生頻度や強さは、磁界勾配を通る運動の速度を緩めることにより減じることが可能である（Chakeres and de Vocht 2005）。

強い静磁界の内部または周辺で作業する人が体験する、磁界作用による目眩に関する理論的および実験的根拠は、Gloverら（2007）によって詳しく研究された。7 T全身用磁石ポアへ $0.1\text{ m s}^{-1}$ の速度で進入する動きをすると、ある被験者は回転（前後に揺れる）の感覚を得る結果になったが、被験者の全てがそうではなかった。被験者の身体の向きを磁界に対して反対にすると（例えば、仰向けからうつ伏せに姿勢を変えるなどで）、回転感覚の向きは反対になったことから、前庭神経系の神経出力に対する誘導電流の影響が示唆された。磁石中心部の均一磁界（勾配なし）内で頭部を動かすと、結果として中程度ないし重症な目眩に似た影響を受け、そのうち2人は強い吐き気も併せて体験した。これらの感覚は最大30分間持続した。

運動により引き起こされる影響とは対照的に、MRIスキャナに近接した0.8 Tまでの磁界内に静止して立っている被験者の一部（50%以下）で、姿勢動揺が有意に増加した。この影響は、前庭器官の平衡砂（耳石）を構成する方解石結晶とその周囲の液体との磁化率の差異に密接に結びついていると考えられている（Glover et al. 2007）。

このような影響に対する感受性の個人差が大きいことは明らかになっている。敏感な人の場合、運動により引き起こされる目眩の閾値は $1\text{ T s}^{-1}$ （1秒間以上）程度と推定され、姿勢動揺の閾値は磁界と勾配の積で $1\text{ T}^2\text{ m}^{-1}$ と推定された。これらの影響が知覚されるまでに長い積分時間を要することは、前庭神経系の比較的低い周波数応答（0.4–4 Hz）を示している。

1.0 Tおよび1.5 TのMRI装置製造に従事する作業者の研究で、感覚的症状の発生率（勤務時間終了時の質問紙調査）、認知作業能力（勤務時間前と終了直後に検査）が調査された（de Vocht et al. 2006b）。その結果、勤務時間中の目眩、口内の金属味、注意力低下問題についての発生報告は、対照群と比較して



MRI 製造群でより頻繁に起きたことが示された。感受性の個人間変動は相当に大きかったものの、概しては動きのゆっくりした作業者に比較して速い作業者的の方にこれらの症状がより頻繁に起きた。しかし、認知作業能力は、作業前のもものと比較して作業後の能力に有意な低下はなかった。この結果は、他の研究が報告した磁界作用の認知的能力への影響は一過性であるという見解を支持する。

結論として、現在の情報では、8 T までの静磁界への静止したヒトの急性曝露から生じる深刻な健康影響は何ら示されていない。しかし、そのような曝露が、頭部や身体を動かした時の目眩など不快な感覚作用および行動学的作業能力の一過性低下に潜在的につながることに注意しなければならない。

### 疫学的研究

数少ないが、数 10 mT までの中程度の静磁界に曝露される作業着、またはアルミニウム精錬所や塩素アルカリ工場で働く人、溶接工として働く人などに関する疫学的研究が利用可能である。しかし、そのような作業は、コールドピッチや多環式芳香族炭化水素など、結果に交絡する可能性のある様々な潜在的有害物質への曝露が必然であることが多い。加えて、電気分解などの工業的処理に利用される静磁界は、平滑化が不完全な整流の給電で作られるため、超低周波 (ELF) の場も同時に存在する。静磁界曝露評価は貧弱であるか、または存在しない。調査参加者数が非常に少ない研究もある。健康評価項目には、がん発生率、血液学的変化とその関連影響、染色体異常、生殖への影響、筋骨格系障害が含まれる。

Rockette と Arena (1983) は、男性アルミニウム労働者の大規模コホート研究で、米国の男性一般人口集団との死亡率を比較した。膵臓、泌尿生殖器、リンパ血液系のがんで死亡率が期待値よりやや高いことが報告されたが、統計的に有意ではなかった。静磁界は測定されておらず、作業環境に存在するその他の曝露と静磁界曝露とを分けて考えることも不可能であった。Spinelli ら (1991) は、アルミニウム労働者のコホートで、有意な脳腫瘍死亡率のリスク増加 [標準化死亡率比 (SMR) 2.2 ; 90%信頼区間 (CI) : 1.2-3.7] と、有意でない白血病死亡率の増加を報告

した (ただし発生率ではない) が、これは、コールドピッチ揮発物 (CTPV) を用いて説明できるようには見えなかった。(CTPV 曝露に関連したその他のがんの増加があった。) 著者らは、静磁界の蓄積的曝露に関連したリスク増加を見出さなかった。ノルウェーのアルミニウム労働者の小規模な研究 2 件は、静磁界曝露推定値と関連したがんリスクの増加はないと報告した (Rønneberg and Andersen 1995; Rønneberg et al. 1999)。Mur ら (1987) が行ったフランスのアルミニウム労働者の研究では、がん死亡率および全死因死亡率にフランスの男性一般人口集団での観測値との有意な差異は見られなかった。

スウェーデンとノルウェーの塩素アルカリ労働者の研究 (Ellingsen et al. 1993) は、統計的有意性の境界線での肺がんのリスク増加を報告したが、曝露磁界の推定は試みられなかった。これらの労働者は、磁界以外に水銀蒸気のような因子へも曝露されていた。喫煙の交絡可能性についても調整はされなかった。Bårregard ら (1985) は、電気分解による塩素生産に用いられる 100 kA の直流により、労働者の位置で 4 から 29 mT の範囲の磁束密度の静磁界が生じている塩素アルカリ工場の労働者コホート研究を行った。25 年間以上の労働者で観測されたがんの死亡率に期待値との有意な差異はなかった。

がん以外の健康影響にはほとんど関心が払われてこなかった。これらの研究の大半は非常に少数のデータに基づいており、多くの方法論的限界があった。やや規模の大きな研究の一つは、おそらく 1 T までの磁界への曝露が必然的であった女性 MRI 操作者 1915 人において生殖および妊娠への影響を調査した (Kanal et al. 1993)。MRI の就業期間中の流産のリスクは、その他の職業に就業の場合に比較してやや増加 (統計的に有意でない) し、主婦でのリスクに比較してかなり高かった。また、主婦に比較して、早産および低出生体重に小さな差異が見られたが、その他の職業との比較では差異はなかった。分析において年齢は統制されなかった。MRI 作業着は他グループより顕著に年齢が高いため、この横断的研究には選択バイアスが影響した可能性がある。

総括すると、数少ない、利用可能な疫学的研究には方法論的限界があり、静磁界の長期曝露によるがんリスクの可能性またはその他の影響に関して多数

の未説明の問題が残っている。これまでの研究から、数 10 mT レベルの静磁界曝露が、調べられた様々な健康上の帰結に強い影響を及ぼすことは示唆されていないが、これらの研究では小さな影響から中程度の影響までを検出することは不可能であろう。さらに強い磁界曝露が潜在する職業、例えば MRI 操作者、についてはまだ適切に評価されていない。

## 曝露限度値

職業的曝露および一般公衆曝露に対して、別個のガイダンスが与えられる。このガイドラインの職業的曝露に対する限度値は、正規の、または割り当てられた職務活動を遂行した結果として静磁界へ曝露した個人に適用されることが勧告される。“一般公衆”という用語は人口集団全体を指す。

### 職業的曝露

#### 曝露限度値

頭部および躯幹部の職業的曝露は、以下を除き、空間ピーク値で磁束密度 2 T を超えるべきではない。除外されるのは、2 T 以上の曝露が必要と考えられる職場への適用であり、環境が制御され、かつ運動誘導効果を制御するために適切な作業実践が履行されていることを条件に、8 T までの曝露が許容される。磁界内の運動による感覚的影響は、ELF ガイドラインに定められた基本制限を満たすことにより回避が可能である。四肢に限定した場合、最大 8 T までの曝露が容認される。

#### 説明

静磁界に対するガイドライン作成において 2 つの難しい問題が提起される。第一は、曝露された作業者の一部に起きる可能性のある一時的な感覚への影響について、既知の長期的影響または重大な結果はないものの、もし許容するとすれば、どの程度までガイドラインが許容すべきかという問題である。第二は、ヒトがすでに経験している曝露レベルについては既知の悪影響はないものの、知識欠落の懸念はあるので、曝露制限として、経験している曝露レベルより高い曝露をどの程度まで防止すべきかという問題である。第一の問題に関しては、職場環境において、適切な助言と訓練を伴って、作業者が自

発的かつ知識を持って、吐き気のような一過性の感覚的影響を、これらは長期的または病理学的健康影響に至るとは考えられていないので、体験することが合理的であると ICNIRP は考える。第二の問題に関しては、ガイドラインの下で許容される曝露は評価可能な証拠がある曝露レベルを根拠とすべきであり、単に悪影響の証拠がないことを理由として、このレベルを引き上げるべきではないと ICNIRP は考える。

注：研究を目的として、より高い磁界レベルの影響を調べたいという願望があることは承知している。しかし、そのような実験的曝露は倫理委員会（機関内審査委員会）の事案である。

1994 年のガイドライン刊行以降、8 T までの静磁界に曝露されたヒトに関して数件の研究がある（Kangarlu et al. 1999; Chakeres et al. 2003a, 2003b; Glover et al. 2007）。2 T 以上で、目眩、吐き気、磁気閃光など一過性の影響が、ある人々において時折観察されたが、不可逆的または重大な健康悪影響に関する証拠は何ら見出されていない。前庭神経系は、低周波（1 Hz 前後）の誘導電界または電流により最適に刺激され（Stephen et al. 2005）、そのレベルは神経刺激閾値より低い（Glover et al. 2007）ため、目眩および吐き気を防護することは、頭部および躯幹部における誘導電流のその他の影響、例えば末梢神経刺激、に対する十分な防護になると考えられる。

同様の影響の結果生じた可能性がある、動物実験での嫌悪反応は 4 T と 14 T の間で観察された。しかしながら、臨床上重大な心臓循環系または神経系の影響こそ、静磁界曝露限度値を考えるにあたっての大きな潜在的懸念であるが、8 T までではその証拠はない。したがって、目眩、吐き気、その他の感覚作用を防護するため、一般的職場に対する曝露限度値は 2 T と定められた。しかし特殊な職場への適用については、環境が制御され、かつ適切な作業実践が履行されている場合、8 T までの曝露が容認される。これらの感覚作用は、乗り物酔い傾向など個人的要因および磁界内での運動速度に大きく依存する。したがって、そのような影響を体験した場合には、可能な限りゆっくり動くことにより、そのような影響を回避または最小化することができる。このガイドラインは時間平均曝露に基づかない。その理由は、こ

れまで 20 年間にわたる世界中の MR および他の磁界発生源利用に伴って得られた経験に加えて、作用メカニズムの検討により、どの影響も多分に急性的であることが示唆されたからである。

8 T までの磁界による四肢への悪影響は、頭部・躯幹部のものより細い血管の血流モデル化、および既存装置での経験に基づけば、起こると思えない。四肢に対するより高い曝露限度値の根拠となり得る証拠はない。

## 一般公衆曝露

### 曝露限度値

ヒトに対する静磁界の直接的影響に関する科学的知識に基づけば、一般公衆の急性曝露は（身体の任意の部分において）400 mT を超えるべきではない。しかし、間接的な悪影響の可能性があるため、埋め込み型医用電子機器および強磁性材料含有インプラントを装着した人の不注意による有害曝露を防止し、強磁性物体の飛行による傷害を防止するために、実際的手段の履行が必要であり、そのためには大幅に低い制限レベル、例えば 0.5 mT (IEC 2002)、になる可能性があることを ICNIRP は承知している。しかし、このような生物学的でない影響を考慮して定める曝露限度値は ICNIRP の任務ではない。

### 説明

この ICNIRP ガイドラインは静磁界曝露の直接的生物学的影響に基づく。しかし、その他の静磁界ハザードとして、直接的に生物学的ではないために ICNIRP の関与する範囲ではないが、健康防護にとって重要なものがある（防護対策の章を参照）。

2 T 以上に関する利用可能な科学的データに基づき、一般公衆に対する曝露限度値（身体の任意の部分において）は、職業的曝露の頭部・躯幹部に対する限度値を基本にし、これに低減係数 5 を適用して導かれたものである。この低減係数は人口集団の全構成員を考慮したものである。

静磁界の職業的曝露および一般公衆曝露に対して勧告される限度値を表 2 に要約する。

表 2. 静磁界の曝露限度値<sup>a</sup>

| 曝露の特性               | 磁束密度   |
|---------------------|--------|
| 職業的曝露 <sup>b</sup>  |        |
| 頭部および躯体部の曝露         | 2 T    |
| 四肢の曝露 <sup>c</sup>  | 8 T    |
| 一般公衆曝露 <sup>d</sup> |        |
| 身体の任意の部分の曝露         | 400 mT |

- ICNIRP は、これらの限度値を、運用上は空間ピーク値と見なすことを勧告する。
- 特殊な職場への適用については、8 T までの曝露が正当化される。但し、環境が制御され、動きによる誘導効果を制御するために適切な作業実践が履行されていることが条件である。
- 8 T 以上の曝露限度値の根拠として利用できる情報は十分ではない。
- ICNIRP は、間接的な有害影響の可能性があるため、埋め込み型医用電子機器や強磁性物質含有インプラントを装着した人の不注意による有害な曝露、および飛来物体の危険を防止するために実際的手段が履行される必要があると認識する。それは、例えば 0.5 mT 程度の、大幅に低い制限レベルになる可能性がある。

## 防護対策

ICNIRP は、このガイドラインの利用には適切な防護対策が併用されるべきであると勧告する。これらの対策は、静磁界曝露が非常に低レベルでかつ頻繁ではない一般的場所と、職場状況によっては強い静磁界に通常的に遭遇することもある職場とについて、区別して考える必要がある。

3 つの大きな問題が懸念される。一般公衆のについて、埋め込み型医用電子機器との干渉可能性および強磁性材料含有インプラントに作用する力から人々を防護する必要がある。さらに、特殊な状況において、工具など強磁性物体の飛行から生じるリスクがある。第三は、非常な高磁界曝露を必然とする職場状況において、目眩や吐き気などの一過性症状の影響を最小化するために、部署毎に特別の作業手順を設定する必要がある。

## 埋め込み医用機器への影響

安全担当当局は、磁界の影響を受け易い、埋め込み型の強磁性機器や医用電子機器を着けた人を防護するための制限を確保する必要がある。そのような機器の装着者数は多く、また装着を意識していない場合もある（例えば、外科手術用クリップ）。

低い静磁界強度で電磁的干渉による動作への影響が観察されているのは、心臓ペースメーカ、特に磁気スイッチ付きのもの、その他の医用電子機器として心臓除細動器、ホルモン用注入ポンプ（例えば、インスリン用）、神経筋刺激機器（例えば、膀胱括約筋用）、神経刺激機器、電子工学的操作の人工器官（例えば、四肢用および内耳用）などである。一般に、これら機器の動作は、0.5 mT 以下の静磁界では有害な影響は受けない。

電磁的干渉から生じる潜在的問題に加えて、多くの埋め込み型医用機器は、磁界中で力やトルクを受け易い強磁性材料を含んでいる。これらの力学的影響は、特に人工股関節など大型機器で大きく、埋め込み型強磁性機器の移動や機器が外れることも起きる可能性がある。その他、影響を受ける可能性のあるものには、動脈瘤クリップ、金属製外科手術用クリップ・ステント、人工心臓弁・人工弁輪、避妊用埋め込み器具、埋め込み型電子機器の筐体、金属製歯科用インプラントなどがあるが、最近のインプラントの大部分は強磁性ではない。これらの機器がMRI 磁界に曝露された場合の安全性について広範な研究が行われた（New et al. 1983; Kanal et al. 1990; Shellock and Crues 2004）。これまでの研究から、0.5 mT 以下の静磁界がこれらの機器に、健康ハザードを起こすに十分な力やトルクを及ぼすという証拠はない。

したがって、磁束密度が $>0.5$  mT の場所、例えばMRI システムの周辺、には一般人の立入禁止区域を示すために警告標識または境界線が設けられる。

## 金属物体の移動

磁界による力で金属物体が飛行する危険から身を守る必要がある。そのようなリスクは数ミリテスラ程度の磁界で起きる。ICNIRP が勧告した 400 mT の限度値は、磁界の直接的な生物学的影響の立脚点にのみ基づいており、金属物体に働く力による事故が

生じるレベルを大きく上回っている。したがって、該当の安全担当当局はそのような力学的ハザードから一般人を守る必要がある。

医用機器への影響を防ぐための限度値 0.5 mT は、静磁界中で相当な力を受けた金属物体が飛行することを防ぐことにもなる。そのような飛行物体が受けている力の大きさは、物体の大きさと強磁性物質の含有量に依存するが、数ミリテスラを上回る磁束密度の磁界は、多くの工具および他の金属物体を非常に急速に移動させることができる。

## 一過性の症状

ある種の職業、例えば MRI 装置開口部で処置を行う外科医、にとっては、曝露による吐き気などの急性症状が職務遂行、ひいては処置を施されている患者の安全に影響するかもしれない。同様に、急性症状は作業者の事故の起こしやすさに影響するかもしれない。そのような職場は、それぞれの職場状況に応じて、曝露の悪影響を最小化するような作業手順と実践を定めるべきである。

## 謝 辞

この文書の準備期間中、ICNIRP は以下のメンバーで構成された。

P. Vecchia, 委員長, イタリア; M. Hietanen, 副委員長, フィンランド; A. Ahlbom, スウェーデン; L.E. Anderson, 米国(2006年まで); E. Breitbart, ドイツ; F.R. de Grujil, オランダ; J.C. Lin, 米国; R. Matthes, ドイツ; A.P. Peralta, フィリピン; P. Söderberg, スウェーデン; B.E. Stuck, 米国; A.J. Swerdlow, 英国; M. Taki, 日本; R. Saunders, 英国; B. Veyret, フランス。

第一草稿を作成したワーキンググループは以下のメンバーで構成された。

A.J. Swerdlow, 委員長; D.W. Chakeres, 米国; M. Feychting, スウェーデン; J. Hennig, ドイツ; T.S. Tenforde, 米国; E. van Rongen, オランダ。

ICNIRP は、ICNIRP 外部の専門家による査読作業を通して多くの科学者から寄せられた有益なコメントに深謝する。

ICNIRP は、国際放射線防護学会 (IRPA)、世界保健機関 (WHO)、欧州委員会、ドイツ環境省から寄せられた支援に深く感謝する。

## 参考文献

- Atkinson IC, Renteria L, Burd H, Pliskin NH, Thulborn KR. Safety of human MRI at static fields above the FDA 8 T guideline: sodium imaging at 9.4 T does not affect vital signs or cognitive ability. *J Magn Reson Imaging* 26:1222–1227; 2007.
- Bårregard L, Jarvholm B, Ungethum E. Cancer among workers exposed to strong static magnetic fields. *Lancet* 2:892;1985.
- Bellossi A. The effect of a static uniform magnetic field on mice: a study of methylcholanthren carcinogenesis. *Radiat Environ Biophys* 23:107–109; 1984.
- Bellossi A. Effect of static magnetic fields on survival of leukaemia-prone AKR mice. *Radiat Environ Biophys* 25:75–80; 1986.
- Bezanilla F. The voltage sensor in voltage-dependent ion channels. *Physiol Rev* 80:555–592; 2000.
- Chakeres DW, de Vocht R. Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Prog Biophys Mol Biol* 87:255–265; 2005.
- Chakeres DW, Kangarlu A, Boudoulas H, Young DC. Effect of static magnetic field exposure of up to 8 tesla on sequential human vital sign measurements. *J Magn Reson Imaging* 18:346–352; 2003a.
- Chakeres DW, Bornstein R, Kangarlu A. Randomized comparison of cognitive function in humans at 0 and 8 tesla. *J Magn Reson Imaging* 18:342–345; 2003b.
- Crozier S, Liu F. Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high-field MRI scanners. *Prog Biophys Mol Biol* 87:267–278; 2005.
- Denegre JM, Valles JM Jr, Lin K, Jordan WB, Mowry KL. Cleavage planes in frog eggs are altered by strong magnetic fields. *Proc Natl Acad Sci USA* 95:14729–14732; 1998.
- de Vocht F, van Wendelde-Joode B, Engels H, Kromhout H. Neurobehavioral effects among subjects exposed to high static and gradient magnetic fields from a 1.5 tesla magnetic resonance imaging system—a case-crossover pilot study. *Magn Reson Med* 50:670–674; 2003.
- de Vocht F, Stevens T, van Wendelde-Joode B, Engels H, Kromhout H. Acute neurobehavioural effects of exposure to static magnetic fields: analysis of exposure-response relations. *J Magn Reson Imaging* 23:291–297; 2006a.
- de Vocht F, van Drooge H, Engels H, Kromhout H. Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *J Magn Reson Imaging* 23:197–204; 2006b.
- de Vocht F, Stevens T, Glover P, Sunderland A, Gowland P, Kromhout H. Cognitive effects of head-movement in stray fields generated by a 7 tesla whole-body MRI magnet. *Bioelectromagnetics* 28:247–255; 2007a.
- de Vocht F, Glover P, Engels H, Kromhout H. Pooled analyses of effects on visual and visuomotor performance from exposure to magnetic stray fields from MRI scanners: application of the Bayesian framework. *J Magn Reson Imaging* 26:1255–1260; 2007b.
- Ellingsen DG, Andersen A, Nordhagen HP, Efskind J, Kjuus H. Incidence of cancer and mortality among workers exposed to mercury vapor in the Norwegian chloralkali industry. *Br J Ind Med* 50:875–880; 1993.
- Eveson RW, Timmel CR, Brocklehurst B, Hore PJ, McLauchlan KA. The effects of weak magnetic fields on radical recombination reactions in micelles. *Int J Radiat Biol* 76:1509–1522; 2000.
- Gaffey CT, Tenforde TS. Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2:357–370; 1981.
- Gaffey CT, Tenforde TS. Frog sciatic nerve bioelectric activity during exposure to stationary magnetic fields. *Radiat Environ Biophys* 22:61–73; 1983.
- Glover PM, Bowtell R. Measurement of electric fields induced in a human subject due to natural movements in static magnetic fields or exposure to alternating magnetic field gradients. *Phys Med Biol* 53:361–373; 2008.
- Glover PM, Cavin I, Qian R, Bowtell R, Gowland PA. Magneticfield-induced vertigo: a theoretical and experimental investigation. *Bioelectromagnetics* 28:349–361; 2007.
- Gowland PA. Present and future magnetic resonance sources of exposure to static fields. *Prog Biophys Mol Biol* 87:175–183; 2005.
- Grissom CB. Magnetic field effects in biology—a survey of possible mechanisms with emphasis on radical-pair recombination. *Chemical Reviews* 95:3–24; 1995.
- Grossman GE, Leigh RJ, Abel LA, Lanska DJ, Thurston SE. Frequency and velocity of rotational head perturbations during locomotion. *Exp Brain Res* 70:470–476; 1988.
- Holden AV. The sensitivity of the heart to static magnetic fields. *Prog Biophys Mol Biol* 87:289–320; 2005.
- Hong CZ, Harmon D, Yu J. Static magnetic field influence on rat tail nerve function. *Arch Phys Med Rehabil* 67:746–749; 1986.
- Hore PJ. Rapporteur's report: sources and interaction mechanisms. *Prog Biophys Mol Biol* 87:205–212; 2005.

- Haupt TA, Pittman DW, Barranco JM, Brooks EH, Smith JC. Behavioural effects of high-strength static magnetic fields on rats. *J Neurosci* 23:1489–1505; 2003.
- Ichioka S, Minegishi M, Iwasaka M, Shibata M, Nakatsuka T, Harii K, Kamiya A, Ueno S. High-intensity static magnetic fields modulate skin microcirculation and temperature in vivo. *Bioelectromagnetics* 21:183–188; 2000.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 66:100–106; 1994.
- 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. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0–100kHz). Matthes R, McKinlay AF, Bernhardt JH, Vecchia P, Veyret B, eds. Oberschleissheim, Germany: ICNIRP; Publication 13/2003; 2003.
- 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. Statement on EMF-emitting new technologies. *Health Phys* 94:376–392; 2008.
- International Electrotechnical Commission. Safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. Geneva: Switzerland: IEC; IEC 60601-2-33; 2002.
- Kanal E, Shellock FG, Talagala L. Safety considerations in MR imaging. *Radiol* 176:593–606; 1990.
- Kanal E, Gillen J, Evans JA, Savitz DA, Shellock FG. Survey of reproductive health among female MR workers. *Radiol* 187:395–399; 1993.
- Kangarlu A, Burgess RE, Zhu H, Nakayama T, Hamlin RI, Abduljalh AM, Robitaille PM. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultrahigh field magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging* 17:1407–1416; 1999.
- Kinouchi Y, Yamaguchi Y, Tenforde TS. Theoretical analysis of magnetic field interactions with aortic blood flow. *Bioelectromagnetics* 17:21–32; 1996.
- Kirschvink JL, Walker MM, Diebel CE. Magnetite-based magnetoreception. *Curr Opin Neurobiol* 11:462–467; 2001.
- Konermann G, Monig H. Studies on the influence of static magnetic fields on prenatal development of mice. *Radiologie* 26:490–497; 1986 (in German).
- Liu Y, Edge R, Henbest K, Timmel CR, Hore PJ, Gast P. Magnetic field effect on singlet oxygen production in a biochemical system. *Chem Commun (Camb)* 2:174–176; 2005.
- MacDougall HG, Moore ST. Marching to the beat of the same drummer: the spontaneous tempo of human locomotion. *J Appl Physiol* 99:1164–1173; 2005.
- McKinlay AF, Allen SG, Cox R, Dimbylow PJ, Mann SM, Muirhead CR, Saunders RD, Sienkiewicz ZJ, Stather JW, Wainwright PR. Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0–300 GHz). Chilton: National Radiological Protection Board; Docs NRPB, 15(3); 2004.
- McLauchlan KA, Steiner UE. The spin-correlated radical pair as a reaction intermediate. *Molecular Phys* 73:241–263; 1991.
- Mevisen M, Stamm A, Buntenkotter S, Zwingelberg R, Wahnschaffe U, Löscher W. Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a) anthracene in rats. *Bioelectromagnetics* 14:131–143; 1993.
- Miyakoshi J. Effects of static magnetic fields at the cellular level. *Prog Biophys Mol Biol* 87:213–224; 2005.
- Mur JM, Moulin JJ, Meyer-Bisch C, Massin N, Coulon JP, Loulergue J. Mortality of aluminum reduction plant workers in France. *Int J Epidemiol* 16:256–264; 1987.
- Murakami J, Torii Y, Masuda K. Fetal development of mice following intrauterine exposure to a static magnetic field of 6.3 T. *Magn Reson Imaging* 10:433–437; 1992.
- Nagakura S, Hayashi H, Azumi T. Dynamic spin chemistry: magnetic controls and spin dynamics of chemical reactions. Tokyo and New York: Kodansha and John Wiley; 1998.
- New PF, Rosen BR, Brady TJ, Buonanno FS, Kistler JP, Burt CT, Hinshaw WS, Newhouse JH, Pohost GM, Tavera JM. Potential hazards and artifacts of ferromagnetic and nonferromagnetic surgical and dental materials and devices in nuclear magnetic resonance imaging. *Radiol* 147:139–148; 1983.
- Noble D, McKinlay A, Repacholi M, eds. Effects of static magnetic fields relevant to human health. *Prog Biophys Mol Biol* 87:171–372; 2005.
- Nolte CM, Pittman DW, Kalevitch B, Henderson R, Smith JC. Magnetic field conditioned taste aversion in rats. *Physiol Behav* 63:683–688; 1998.
- Okano H, Ohkubo C. Elevated plasma nitric oxide metabolites in hypertension: synergistic vasodepressor effects of a static magnetic field and nicardipine in spontaneously hypertensive rats. *Clinical Hemorheol Microcirculation* 34:303–308; 2006.
- Okano H, Masuda H, Ohkubo C. Effects of a 25 mT static

- magnetic field on blood pressure in reserpine-induced hypotensive Wistar-Kyoto rats. *Bioelectromagnetics* 22:408–418; 2005.
- Okazaki R, Ootsuyama A, Uchida S, Norimura T. Effects of a 4.7 T static magnetic field on fetal development in ICR mice. *J Radiat Res (Tokyo)* 42:273–283; 2001.
- Pozzo T, Berthoz A, Lefort L. Head stabilisation during various locomotor tasks in humans. *Exp Brain Res* 82:97–106; 1990.
- Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J* 78:707–718; 2000.
- Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W. Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature* 429:177–180; 2004.
- Rockette HE, Arena VC. Mortality studies of aluminum reduction plant workers: potroom and carbon department. *J Occup Med* 25:549–557; 1983.
- Rønneberg A, Andersen A. Mortality and cancer morbidity in workers from an aluminum smelter with prebaked carbon anodes. 2. Cancer morbidity. *Occup Environ Med* 52:250–254; 1995.
- Rønneberg A, Haldorsen R, Romundstad P, Andersen A. Occupational exposure and cancer incidence among workers from an aluminum smelter in western Norway. *Scand J Work Environ Health* 25:207–214; 1999.
- Saunders RD. Static magnetic fields—animal studies. *Prog Biophys Mol Biol* 87:225–241; 2005.
- Schenck JF. Safety of strong, static magnetic fields. *J Magn Reson Imaging* 12:2–19; 2000.
- Schenck JF. Physical interactions of static magnetic fields with living tissues. *Prog Biophys Mol Biol* 87:185–204; 2005.
- Schenck JF, Dumoulin CL, Redington RW, Kressel HY, Elliott RT, McDougall IL. Human exposure to 4.0-tesla magnetic fields in a whole-body scanner. *Med Phys* 19:1089–1098; 1992.
- Schulten K. Magnetic field effects in chemistry and biology. *Adv Solid State Phys* 22:61–83; 1982.
- Shellock FG, Crues JV. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical MR imaging at 1.5 T. *Radiol* 163:259–262; 1987.
- Shellock RG, Crues JV. MR procedures: biologic effects, safety, and patient care. *Radiol* 232:635–652; 2004.
- Sikov MR, Mahlum DD, Montgomery LD, Decker JR. Development of mice after intrauterine exposure to direct-current magnetic fields. In: Phillips, RD, Gillis MF, Kaune WT, Mahlum DD, eds. *Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields, proceedings of the 18<sup>th</sup> Hanford Life Sciences Symposium*. Springfield, VA: National Technical Information Service; 1979: 462–473.
- Snyder DJ, Jahng JW, Smith JC, Houpt TA. c-Fos induction in visceral and vestibular nuclei of the rat brain stem by a 9.4 T magnetic field. *NeuroReport* 11:2681–2685; 2000.
- Spinelli JJ, Band PR, Svirchev LM, Gallagher RP. Mortality and cancer incidence in aluminum reduction plant workers. *J Occup Environ Med* 33:1150–1155; 1991.
- Stephen T, Deutschlander A, Nolte A, Schneider E, Wiesmann M, Brandt T, Dieterich M. Functional MRI of galvanic vestibular stimulation with alternating currents at different frequencies. *NeuroImage* 26:721–732; 2005.
- Tenforde TS. Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. *Prog Biophys Molec Biol* 87:279–288; 2005.
- Tenforde TS, Gaffey CT, Moyer BR, Budinger TF. Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields: experimental observations and theoretical analysis. *Bioelectromagnetics* 4:1–9; 1983.
- Trzeciak HI, Grzesik J, Bortel M, Kuska R, Duda D, Michnik J, Malecki A. Behavioral effects of long-term exposure to magnetic fields in rats. *Bioelectromagnetics* 14:287–297; 1993.
- Ueno S, Iwasaka M. Properties of diamagnetic fluid in high gradient fields. *J Appl Phys* 75:7177–7180; 1994.
- Valles JM Jr, Wasserman SR, Schweidenback C, Edwardson J, Denegre JM, Mowry KL. Processes that occur before second cleavage determine third cleavage orientation in *Xenopus*. *Exp Cell Res* 274:112–118; 2002.
- Weiss J, Herrick RC, Taber KH, Contant C, Plishker GA. Bio-effects of high magnetic fields: a study using a simple animal model. *Magn Reson Imaging* 10:689–694; 1992.
- World Health Organization. *Environmental Health Criteria* 232. Static fields. Geneva: World Health Organization; 2006.
- Zhang QM, Tokiwa M, Doi T, Nakahara T, Chang PW, Nakamura N, Hori M, Miyakoshi J, Yonei S. Strong static magnetic field and the induction of mutations through elevated production of reactive oxygen species in *Escherichia coli* soxR. *Int J Radiat Biol* 79:281–286; 2003.

## 10-3 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) (ICNIRP 2010)

### ICNIRP ガイドライン

#### ICNIRP 声明

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

### 国際非電離放射線防護委員会\*

#### 序論

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

#### 目的と範囲

本文書刊行の主目的は、全ての確立された健康への

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

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

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

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

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

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



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

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

## 物理量と単位

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

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

ここで、 $\mu$  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、 $\mu$  の値は  $4\pi \times 10^{-7}$  ヘンリー/メートル ( $H m^{-1}$ ) である。したがって、防護を目的とした磁界の表記には、物理量  $B$  または  $H$  のどちらか一方を明確にすればよい。

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

表1. 本ガイドラインで用いる物理量とそのSI単位

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

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

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

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

- 電界  $E_i$  ; および
- 電流  $I$

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

## ばく露制限の科学的根拠

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

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

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

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

## 電界および磁界と身体との結合メカニズム

人体や動物などの身体は低周波の電界の空間分布を

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

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

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

- 磁界の強度と方向を一定とする時、身体が大きければ大きいほど強い電界が誘導される。その理由は、作られる誘導電流ループが大きくなるからである。
- 誘導電界および誘導電流は身体に対する外部磁界の向きによって決まる。通例、磁界の向きが身体の前側から背側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、 $5 \text{ kV m}^{-1}$  電界中ではボランティアの 7% が感じる一方、 $10 \text{ kV m}^{-1}$  電界中では約 50% が感じる。帯電物体から接地した人体への火花放電の閾値は物体の大きさに依存するため、個別の評価が必要である。

低周波EMFへのばく露により誘導されるものも含めた電氣的刺激に対する電氣的興奮性の神経および筋組織の応答は長年にわたって十分に確立されてきた (例えば、Reilly 2002; SaundersとJefferys 2007)。神経モデルを用いた理論計算に基づき、ヒトの末梢神経系の有髄神経線維はおよそ  $6 \text{ V m}^{-1}$  (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  $2 \text{ V m}^{-1}$  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のが原因で、また約10 Hz以下ではゆっくりした脱分極刺激に対して神経が順応<sup>1</sup>することが原因で、それぞれ閾値が上昇する。

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

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

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

これらの影響の閾値の最小値は、~100 Hz 以下の周波数で存在し、その大きさは100 mV m<sup>-1</sup> 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<sup>2</sup>を通して頭部へ直接印加した弱い電界が、ヒトの脳の電気的活動および機能に及ぼす影響を研究した。一つのグループ (Kanai 他 2008) は、大脳皮質視覚野刺激を視覚野活動の特性周波数、すなわち暗条件では 10 Hz 付近、または明条件では 20 Hz 付近で行う場合、皮質性閃光 (見かけ上は網膜に誘発される閃光と似たもの) が誘発され、それより高い周波数または低い周波数では起こらないことを報告した。もう一つのグループ (Pogosyan 他 2009) は、視覚-運動タスクを遂行中のボランティアの皮質運動野に 20 Hz 信号を印加し、タスク遂行中に手の動きが遅くなる変化が、小さいが統計的に有意にみられ、20 Hz の運動野活動周波数との同期の増大と一致することを見出した。これより低い刺激周波数では影響は見られなかった。要約すると、両グループは、網膜閃光閾値より強いレベルの 10-20 Hz の電界が、大脳皮質の視覚野および運動野で進行中のリズム性の電気的活動と相互作用し得ること、視覚処理と運動との協調にわずかに影響することがあることを見出し、十分な強さの 10-20 Hz の EMF に誘導された電界には同様の影響があるかも知れないという示唆をもたらした。

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

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

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

2005; WHO 2007a)。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

いくつかの哺乳類の種において、150 kV m<sup>-1</sup>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  $\mu$ T を超える平均ばく露について過剰リスクがあるかも知れないことを示唆したが、一方、その分析の著者らは、彼らの結果が磁界と小児白血病との因果関係を示すとは解釈できないと強く注意した。

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

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

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

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

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

### 今回推奨される低周波ガイドラインの論拠

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4 mm以下のボクセルサイズを用いた高解像度の誘導電界計算から、本ガイドラインの目的にとって最も有用なドシメトリの結果が得られた (Dimbylow 2005; Bahr 他 2007; Hirata 他 2009; Nagaoka 他 2004)。外部電磁界が均一で、向きが体軸に平行 (電界の場合) または垂直 (磁界の場合) の時、身体内に誘導される電界は最大になる。計算によれば、50 Hz磁界により脳組織に誘導される電界の局所的ピーク値の最大値は、外部磁界1 mT当たりおよそ23–33  $\text{mV m}^{-1}$ 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  $\text{mV m}^{-1}$ 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  $\text{kV m}^{-1}$ 当たりおよそ1.7–2.6  $\text{mV m}^{-1}$ であり、皮膚においては、外部電界1  $\text{kV m}^{-1}$ 当たりおよそ12–33  $\text{mV m}^{-1}$ 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 $50 \text{ mV m}^{-1}$ 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 $800 \text{ mV m}^{-1}$ 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 $4 \text{ V m}^{-1}$ 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 $10 \text{ mV m}^{-1}$ 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、 $400 \text{ mV m}^{-1}$

の基本制限値が得られる。この制限値は人体の全ての部位の組織に適用される。

基本制限を表2および図1に示す。

## 時間平均

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

## 誘導電界の空間平均

誘導電界の有害な影響を神経細胞および神経ネットワークに限定して考える場合、局所的な誘導電界を平均すべき距離や体積を明確にすることが重要である。正当な生物学的基礎と計算手法上の制約に関する要求を満足するための実際的な折衷案として、ICNIRPは、切れ目なく連続する小さな $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ 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 ( $\text{V m}^{-1}$ ) |
|---------------|----------------|----------------------------|
| <b>職業的ばく露</b> |                |                            |
| 頭部のCNS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                        |
| 頭部と体部の全組織     | 3 kHz– 10 MHz  | $2.7 \times 10^{-4} f$     |
|               | 1 Hz– 3 kHz    | 0.8                        |
| 3 kHz– 10 MHz |                | $2.7 \times 10^{-4} f$     |
|               | <b>公衆ばく露</b>   |                            |
| 頭部のCNS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                        |
| 頭部と体部の全組織     | 3 kHz– 10 MHz  | $1.35 \times 10^{-4} f$    |
|               | 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。



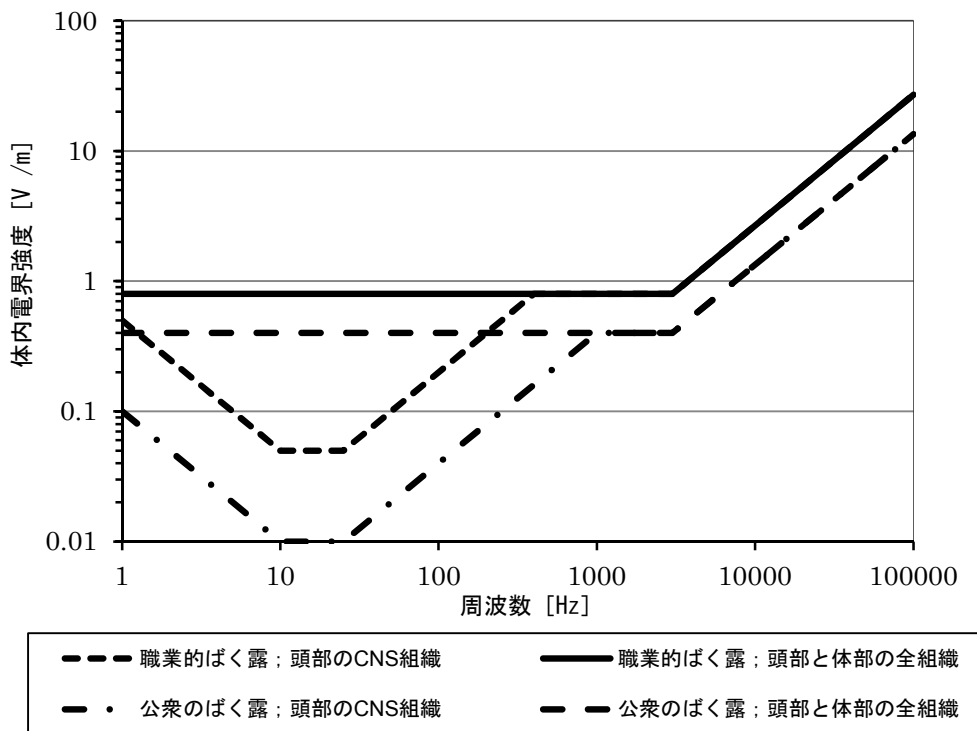


図1. CNSおよびPNSへの影響に係わる体内電界強度に基づく公衆ばく露と職業的ばく露に対する基本制限  
(訳者注：原文の凡例では、単にCNS、PNSと表記されている箇所を、表2に対応させて、それぞれ、頭部のCNS組織、頭部と体部の全組織と訳した。)

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1mm<sup>3</sup>である(Jefferys 1994)。したがって、生物学的に合理的な平均化距離は、1から7mmまでの範囲となる可能性がある。実用的見地からは、ミリメートルレベルの解像度での誘導電界の計算において満足できる精度を得ることは困難であり、そのような測定はなお困難である。ある身体組織の1つのボクセル内の最大値は、立方体ボクセルの角部分の階段近似誤差を大きく受けやすい。より安定したピーク近似値を得るための解決方法は、ある身体組織での誘導電界の99パーセンタイル値をピーク値として選択することである。しかし、ピーク値が解像度に依存することから、これは生物学的観点からはやや恣意的な選択である。空間平均のための別の選択肢は、局所的電界を小さな体積中または線分に沿っての平均値と定

義することである (ReillyとDiamant 2003)。

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

## 参考レベル

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

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

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

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

## 外部電界および外部磁界の空間平均

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

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

| 周波数範囲        | 電界強度<br>E ( $\text{kV m}^{-1}$ ) | 磁界強度<br>H ( $\text{A m}^{-1}$ ) | 磁束密度<br>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 | $5 \times 10^2 / f$              | $8 \times 10^2$                 | $1 \times 10^{-3}$       |
| 300 Hz–3 kHz | $5 \times 10^2 / f$              | $2.4 \times 10^5 / f$           | $0.3 / f$                |
| 3 kHz–10 MHz | $1.7 \times 10^{-1}$             | 80                              | $1 \times 10^{-4}$       |

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<br>E ( $\text{kV m}^{-1}$ ) | 磁界強度 H<br>( $\text{A m}^{-1}$ ) | 磁束密度<br>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                                | $1.6 \times 10^2$               | $2 \times 10^{-4}$       |
| 50 Hz–400 Hz | $2.5 \times 10^2 / f$            | $1.6 \times 10^2$               | $2 \times 10^{-4}$       |
| 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 | $8.3 \times 10^{-2}$             | 21                              | $2.7 \times 10^{-5}$     |

注:

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

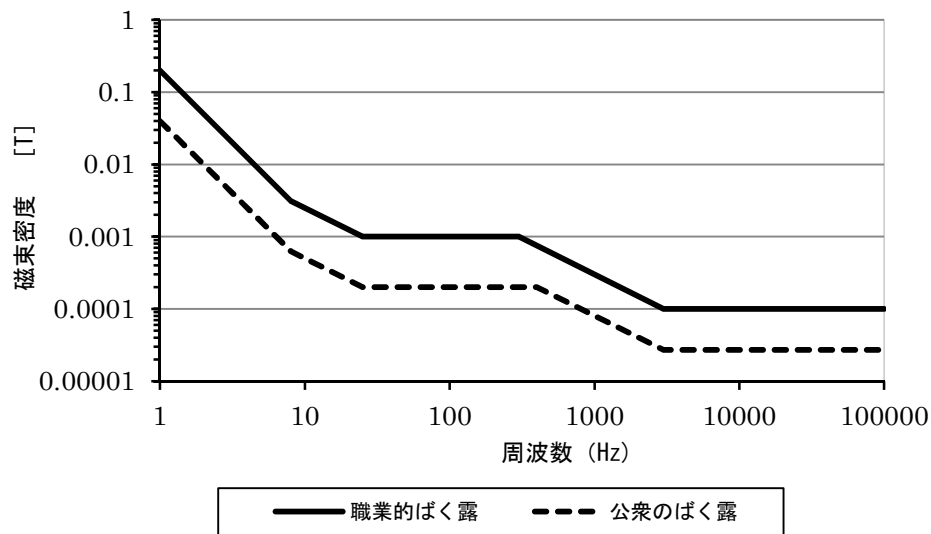


図2 時間変化する磁界へのばく露に対する参考レベル (表3、4を参照)

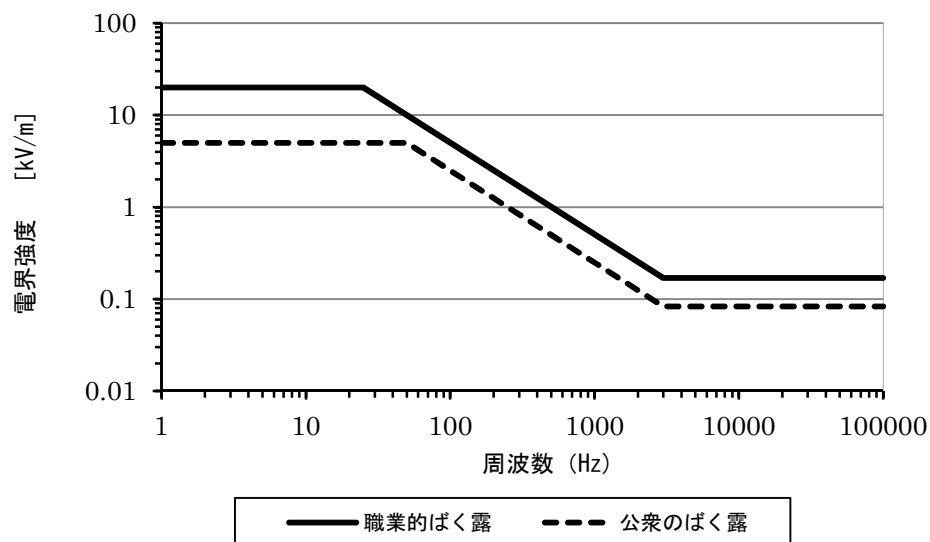


図3 時間変化する電界へのばく露に対する参考レベル (表3、4を参照)

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

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

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

く露に関しては、標準化機関が新しい参考レベルを導出してもよい。

### 電界と磁界へのばく露の加算性

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

### 接触電流の参考レベル

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

表5. 導体からの時間変化する接触電流の参考レベル

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

注: f は、kHzで表わされる周波数。

### 複数の周波数の電界および磁界への同時ばく露

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

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

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

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

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

および

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

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。

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

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； $A_i$ 、 $\theta_i$ 、および  $\varphi_i$  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  $\mu\text{T}$  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. 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.

## 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  $\phi_i$ （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 <sup>-1</sup> ) |                       | 外部電界                    | 磁界                     |
|------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
|            | 脳                          | 体部組織                  | (V m <sup>-1</sup> )    | (μT)                   |
| 職業的<br>ばく露 | $\sqrt{2} \times 100$      | $\sqrt{2} \times 800$ | $\sqrt{2} \times 10000$ | $\sqrt{2} \times 1000$ |
| 公衆<br>ばく露  | $\sqrt{2} \times 20$       | $\sqrt{2} \times 400$ | $\sqrt{2} \times 5000$  | $\sqrt{2} \times 200$  |

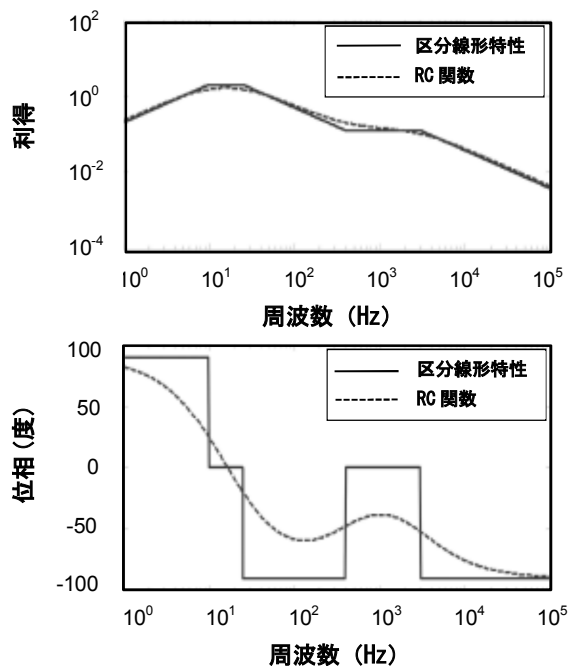


図 A1 誘導電界の重み付けに対する振幅応答と位相応答

## 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/m<sup>2</sup>)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ふ。

**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の周期の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、妊娠中の作業員、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

不随意の筋肉収縮が起きて、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 $3 \times 10^{15}$  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)  $\mu_0$  で割ったものを比透磁率 ( $\mu$ ) 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、実際上、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。

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

**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。
- 4 : 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。



# World Health Organization

WHO ファクトシート 322  
2007年6月

## 電磁界と公衆衛生

### 超低周波電磁界へのばく露

電気の利用は日常生活に欠かせないものとなっています。電気が流れている時は必ず、電線および電気製品の付近に電界と磁界の両方が起こります。1970年代後半から現在まで、このような超低周波 (ELF) の電界および磁界へのばく露が健康に悪い結果を生じるか否かという疑問が提起されています。それ以降今までの間に多くの研究が完了し、首尾よく重要な問題を解決し、今後の研究の目標を絞り込んでいます。

1996年、世界保健機関 (WHO) は、電磁界を放射する技術に関連する健康リスクの可能性を調査するため、国際電磁界プロジェクトを立ち上げました。WHO のタスクグループは最近、ELF 電磁界の健康影響についてのレビューの結論を出しました (WHO 2007)。

このファクトシートは、そのタスクグループの知見に基づくものであり、また、WHO の後援で設立された国際がん研究機関 (IARC) が 2002年に、そして国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) が 2003年に、それぞれ公表した ELF 電磁界の健康影響に関する最近のレビューを最新のものにします。

#### ELF 電磁界の発生源と居住環境ばく露

電界および磁界は、電力線およびケーブル、住宅の配線および電気製品など、電流が流れている所に必ず起こります。電界は、電荷から生じ、ボルト毎メートル (V/m) という単位で測定され、木材や金属のような一般的な素材で遮蔽されます。磁界は、電荷の運動 (すなわち電流) により生じ、テスラ (T) という単位で表わされますが、より身近にはミリテスラ (mT) またはマイクロテスラ ( $\mu\text{T}$ ) で表わされます。一部の国では、ガウス (G) と呼ばれる別の単位が一般に用いられます ( $10,000\text{G}=1\text{T}$ )。磁界はほとんどの一般的な素材で遮蔽されることなく、容易に透過します。電界も磁界も発生源の近くが最も強く、距離と共に減衰します。

ほとんどの電力は、50 または 60 サイクル毎秒、またはヘルツ (Hz) の周波数で動作しています。ある特定の電気製品の近くで、磁界は数百マイクロテスラ程度になります。電力線の真下で、磁界は約  $20\ \mu\text{T}$ 、電界は数千ボルト毎メートルになります。しかし、住宅内の平均的な商用周波磁界はもっと低く、欧州では約  $0.07$  マイクロテスラ、北米では約  $0.11$  マイクロテスラです。住宅内の電界の平均値は最大でも数十ボルト毎メートルです。

## タスクグループの評価

2005年10月、WHOは、 $> 0$  から100,000ヘルツ（100キロヘルツ）までの周波数範囲のELFの電界および磁界へのばく露により生じるかも知れない健康リスクを評価するため、科学専門家のタスクグループを召集しました。IARCが2002年にがんに関する証拠を調査したのに対し、このタスクグループは多くの健康影響に関する証拠をレビューし、がんに関する証拠を最新のものにしました。このタスクグループの結論および勧告は、WHOの環境保健クライテリア（EHC）モノグラフ（WHO 2007）に公表されています。

タスクグループは標準的な健康リスク評価プロセスに従い、一般の人々が通常で遭遇するレベルのELF電界に関して本質的な健康問題はないと結論しました。したがって、以下では、主としてELF磁界へのばく露の影響を取り扱います。

## 短期的影響

高レベル（100マイクロテスラを十分上回るもの）の急性ばく露によって起きることが確認されている生物学的影響があります。これはよく知られた生物物理学的なメカニズムによって説明されています。外部のELF磁界は身体内に電界および電流を誘導しますが、その強度が非常に高いと神経および筋肉の刺激および中枢神経系の神経細胞の興奮性の変化を引き起こします。

## 長期的影響の可能性

ELF磁界ばく露による長期的なリスクを調べた科学的研究の多くは、小児白血病に焦点を当ててきました。2002年、IARCはELF磁界を「ヒトに対して発がん性があるかも知れない」と分類したモノグラフを公表しました。この分類は、ヒトにおける発がん性の限定的な証拠があり、かつ実験動物における発がん性の証拠が十分ではない因子であることを意味します（ELF磁界以外の例にはコーヒーや溶接蒸気があります）。このように分類された根拠は、疫学研究のプール分析で、0.3~0.4マイクロテスラを上回る商用周波の居住環境磁界への平均的ばく露に関連して小児白血病が倍増するという一貫したパターンが示されたことです。タスクグループは、それ以降に追加された研究によってこの分類が変更されることはない結論しました。

しかしながら、疫学的証拠は、選択バイアスの可能性など手法上の問題によって弱いものになります。加えて、低レベルのばく露ががん発生に関与することを示唆するような生物物理学的メカニズムとして正当と認められたものはありません。要するに、もしこのような低レベルの磁界へのばく露によって何らかの影響があるとすれば、それは今のところ未知の生物学的メカニズムによるものでなければなりません。加えて、動物研究は主として影響なしの結果を示しています。したがって、これら全てを考慮すれば、小児白血病に関連する証拠は因果関係と見なせるほど強いものではありません。

小児白血病はかなり稀な疾患であり、全世界で一年間に新たに発生する症例数は、2000年は49,000人と推定されています。住宅内での平均磁界ばく露が0.3マイクロテスラを上回るとは稀であり、そのような環境に住むのは、子供の1%~4%であると推定されています。もし磁界と小児白血病との関連が因果関係であるならば、磁界ばく露が原因であるかも知れない症例数は、2000年の数値に基づいて、全世界で年間100~2400人の範囲と推定されます。これは、同年の発生数の0.2~4.95%に相当します。したがって、仮にELF磁界が実際に小児白血病のリスクを高めるとしても、全世界的に考えれば、ELF電磁界ばく露が公衆衛生に及ぼす影響は限定的でありましょう。

ELF 磁界ばく露との関連の可能性について、多数の健康への有害な影響が研究されています。白血病以外の小児がん、成人のがん、うつ病、自殺、心臓血管系疾患、生殖機能障害、発育異常、免疫学的修飾、神経行動学的影響、神経変性疾患などです。WHO のタスクグループは、これらの健康影響全てについて、ELF 磁界ばく露との関連性を支持する科学的証拠は小児白血病に関する証拠よりはるかに弱いと結論しました。いくつか例を挙げれば、(すなわち心臓血管系疾患や乳がんに関する) 証拠から、ELF 磁界はこれらの疾患を引き起こさないことが示されています。

## 国際的なばく露ガイドライン

短期的な高レベルのばく露に関連する健康影響は確立されており、これが2つの国際的なばく露制限ガイドラインの基礎をなしています (ICNIRP 1998 ; IEEE 2002)。現時点では、これらの組織は、ELF 電磁界への長期的な低レベルのばく露による健康影響の可能性に関する科学的証拠は、これらのばく露制限値を引き下げることが正当化するには不十分であると見なしています。

## WHO のガイダンス

高レベルの電磁界への短期的ばく露については、健康への有害な影響が科学的に確立されています (ICNIRP 2003)。政策策定者は、労働者および公衆をこれらの影響から防護するために作成されている国際的なばく露ガイドラインを採用すべきです。電磁界防護プログラムには、ばく露が制限値を超過することが予測される発生源からのばく露の測定を含めるべきです。

長期的影響に関しては、ELF 磁界へのばく露と小児白血病との関連の証拠の弱さを考えれば、ばく露低減による健康上の便益は不明です。こうした状況を考慮して、以下を推奨します。

- 政府および産業界は、ELF 電磁界ばく露の健康影響に関する科学的証拠の不確かさを一層少なくするために、科学の動向を監視し、研究プログラムを推進することが望まれます。ELF リスク評価プロセスを経て、知識の欠落部分が同定されました。これらが新たな研究アジェンダの基礎になっています。
- 加盟各国は、情報を与えた上での意思決定を可能とするため、全ての利害関係者との効果的に開かれたコミュニケーション・プログラムを構築することが奨励されます。このプログラムには、ELF 電磁界を放射する設備の計画の過程における産業界、地方自治体、市民の間の調整と協議を改善することも含まれます。
- 新たな設備を建設する、または新たな装置 (電気製品を含む) を設計する際には、低コストでばく露を低減する方法を探索するのもよいでしょう。適切なばく露低減対策は国ごとに異なるでしょう。そうではあっても、恣意的に低いばく露制限値を採用する政策は是認されません。

## 詳細資料

WHO - World Health Organization. Extremely low frequency fields. Environmental Health Criteria, Vol. 238.

Geneva, World Health Organization, 2007. (WHO 環境保健クライテリア・モノグラフ第238巻「超低周波電磁界」)



IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely lowfrequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon, IARC, 2002 (Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 80). (国際がん研究機関・ヒトに対する発がんリスクの評価に関するモノグラフ第 80 巻「非電離放射線、第 1 部：静的および超低周波の電界および磁界」)

ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100 kHz). Bernhardt JH et al., eds. Oberschleissheim, International Commission on Non-ionizing Radiation Protection, 2003 (ICNIRP 13/2003). (国際非電離放射線防護委員会「静的および低周波の電界および磁界、生物学的影響、健康影響 (0 から 100kHz)」)

ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998). Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74(4), 494-522. (国際非電離放射線防護委員会「時間変化する電界、磁界および電磁界(300GHz まで)へのばく露制限のためのガイドライン」)

IEEE Standards Coordinating Committee 28. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz. New York, NY, IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002 (IEEE Std C95.6-2002). (米国電気電子学会規格 IEEE C95.6-2002 「0 から 3kHz までの電磁界への人体ばく露に関する安全レベルの IEEE 基準」)

(本文終わり)

(翻訳について)

Fact Sheet の日本語訳は、WHO から正式の承認を得て、電磁界情報センターの大久保千代次が英文にできるだけ忠実に作成いたしました。文意は英文が優先されますので、日本語訳における不明な箇所等につきましては英文でご確認下さい。(2011 年 5 月)

## 10-5 車内及びホームの磁界

超電導リアの車両及びホームについては図 10-5-1 および図 10-5-2 に示す通り磁気シールドを設置しているため、車内及びホームの磁界は、国の基準である国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）のガイドラインの基準値を大幅に下回っており、磁界による影響は極めて小さい。図 10-5-3 および図 10-5-4 に磁界の測定箇所を、図 10-5-5 に測定結果を示す。

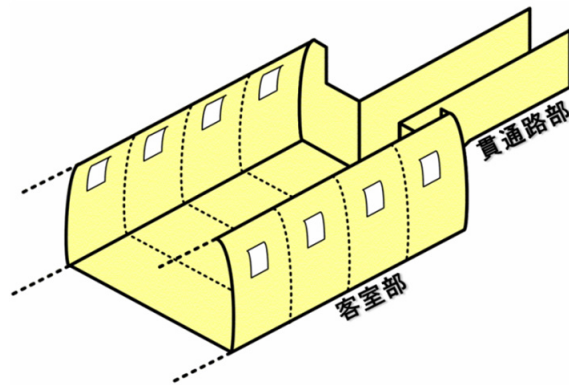


図 10-5-1 車内への磁気シールド設置の概念図

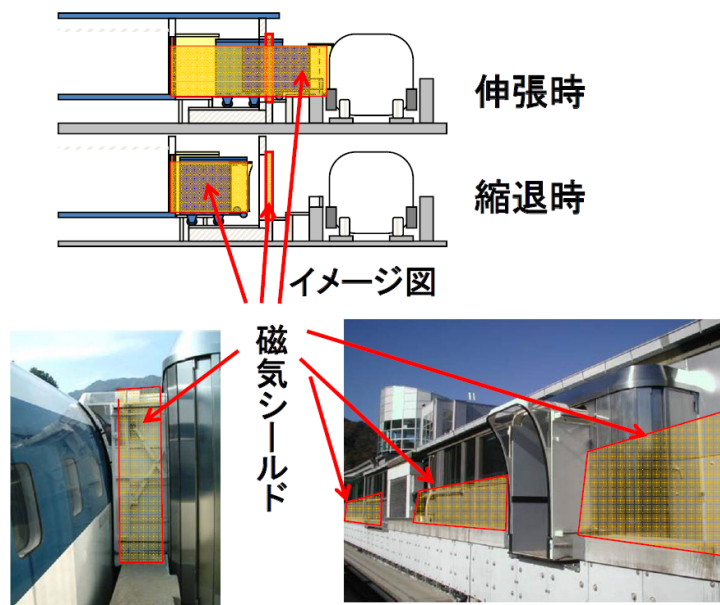


図 10-5-2 ホームへの磁気シールド設置の概念図

- : 対向列車すれ違いによる車内変動磁界のうち最大値の測定箇所
- : 車内静磁界のうち最大値の測定箇所

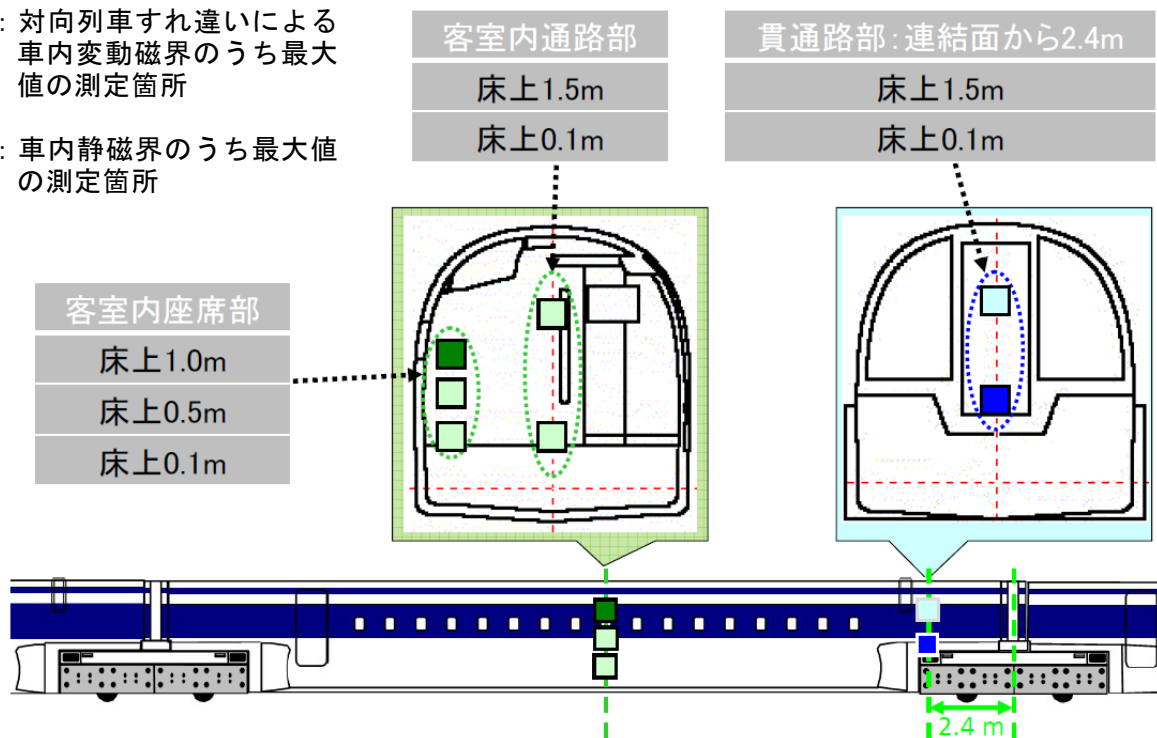


図 10-5-3 車内の磁界の測定箇所

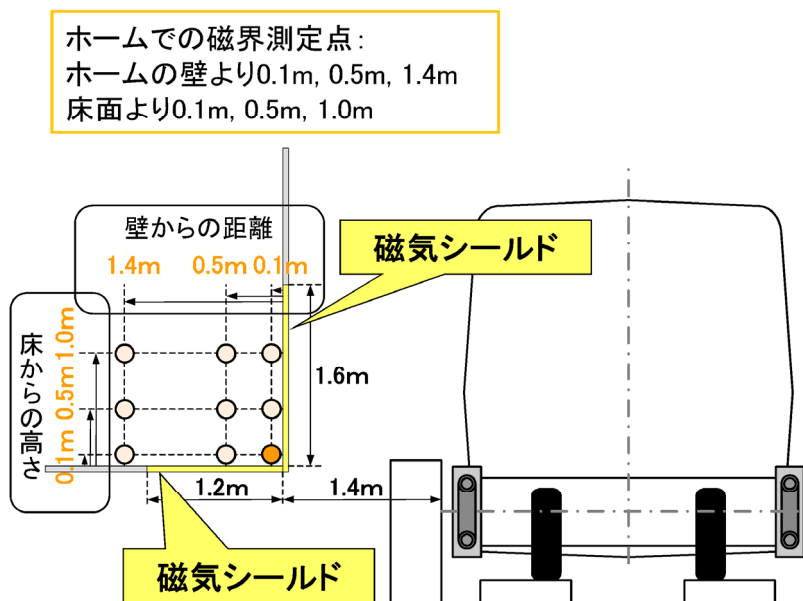


図 10-5-4 ホーム上の磁界の測定箇所

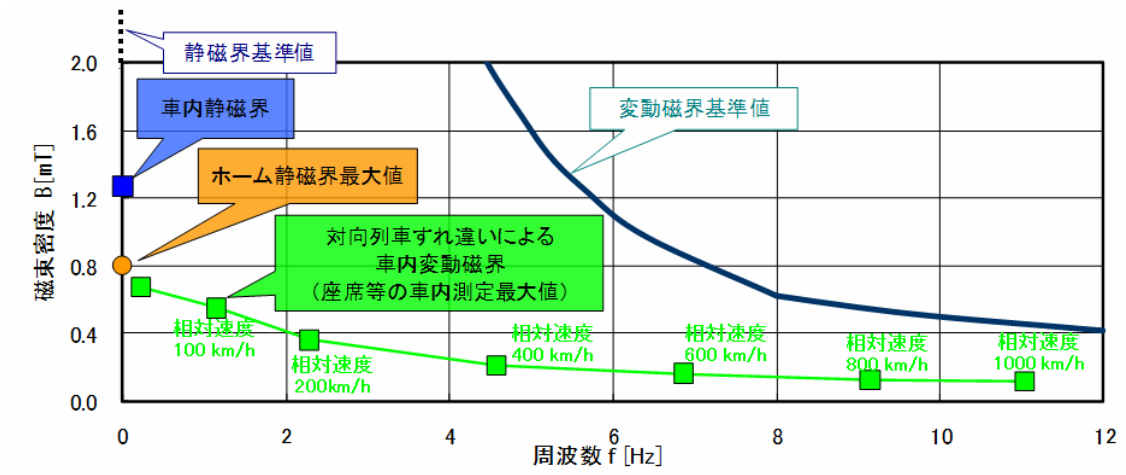


図 10-5-5 車内及びホームの磁界の測定結果

## 10-6 誘導集電装置による磁界

誘導集電装置による磁界については、高さ 10m の標準的な高架橋の下、駅のプラットフォームやコンコース、および車内のそれぞれにおいて国の基準である ICNIRP ガイドラインにおける誘導集電装置の周波数約 9.8kHz に対応する基準値  $27\mu\text{T}$  の 1%未満となることが確認されており、それも踏まえて平成 23 年 9 月に開催された評価委員会において「車上電源として実用化に必要な技術が確立している」との技術評価がなされている。

## 10-7 地下の列車走行に伴う地上における磁界

地下を走行する列車から発生する磁界については、距離の3乗に比例して減衰するため、現在想定している深度を走行する際の地上における磁界は極めて小さい。これについて定量的な値を下記のとおり算出した。なお、超電導リニアから発生する磁界の主な発生源は、車両に搭載された超電導磁石である。推進コイル及び浮上案内コイル等からも磁界は発生するが、超電導磁石と比較して非常に小さいため、超電導磁石から発生する磁界を対象とした。

### 10-7-1 算出方法

超電導磁石からの距離に応じた磁界（B：磁束密度[T]）をビオ・サバル（Biot-Savart）の法則に基づき算出し、これにより算出された値を予測値とした。

ビオ・サバル（Biot-Savart）の法則

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}$$

$\mu_0$ ：真空の透磁率 ( $4\pi \times 10^{-7}$ ) [N/A<sup>2</sup>]

I：電流[A]

s：電流の道のり (m)

r：点Pと点Qの距離 (m)

なお、Bは $|\vec{B}|$ 、rは $|\vec{r}|$ を表す。

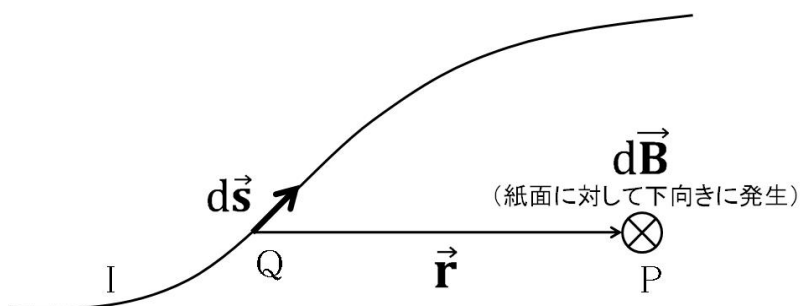


図 10-7-1 ビオ・サバルの法則概念図

(点Qに電流Iが流れたときに、点Pに発生する磁界B)

超電導リニア1編成は、17台車から構成されており、各台車の両側には、超電導磁石が配置されている。個々の超電導磁石からの磁界を上記法則から算出し、すべての台車について合成することにより、1編成の磁界を求めた。図10-7-2に超電導磁石の概要を示す。

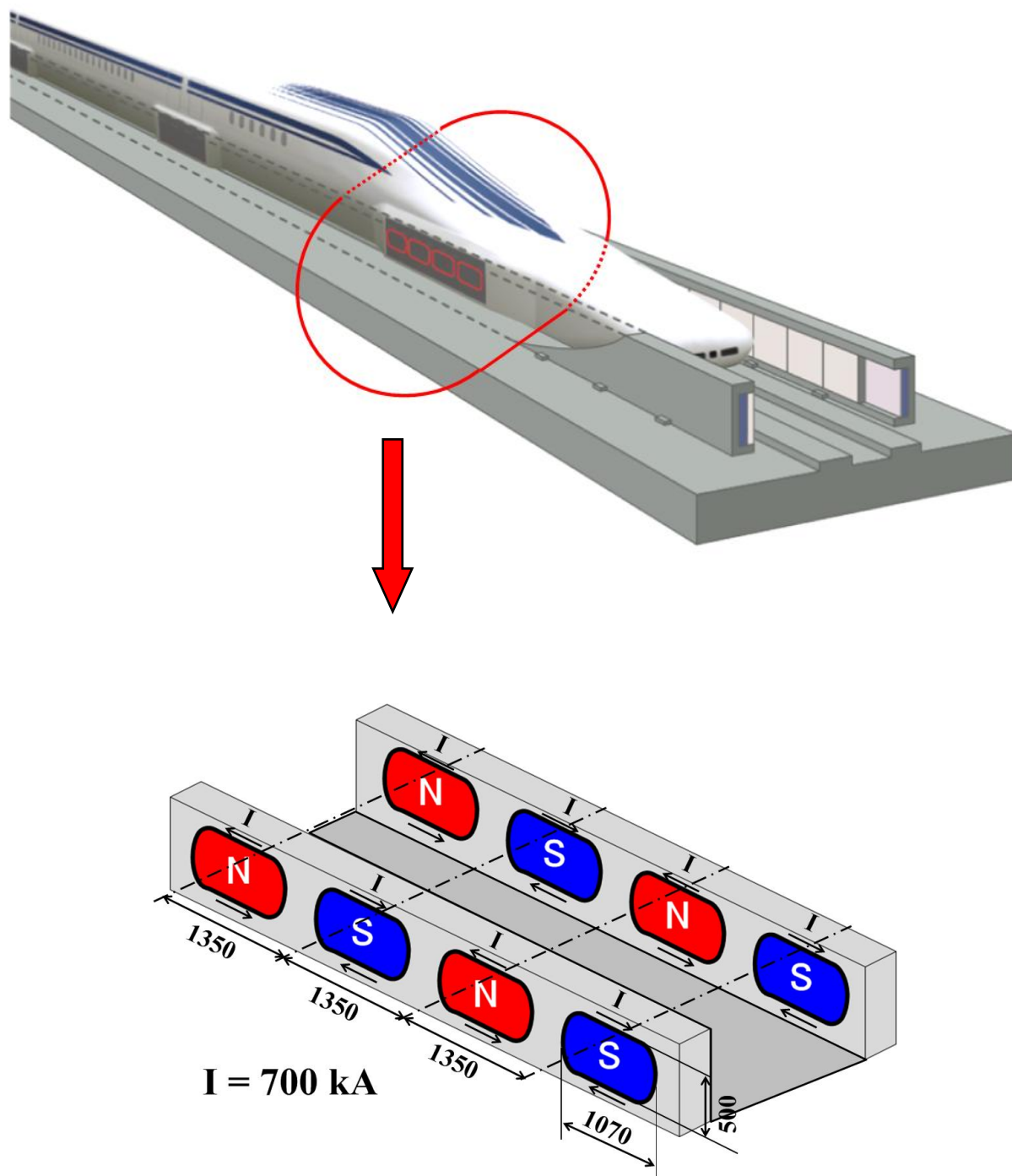


図 10-7-2 超電導磁石を拡大した概略図（磁界の算出にあたっての前提条件）

### 10-7-2 実測値と算出値の比較

山梨リニア実験線における実測結果と、ビオ・サバールの法則を用いて算出を行った結果との比較を、図 10-7-3 に示す 2 地点（線路脇 4m、高架下 8m）において行った。

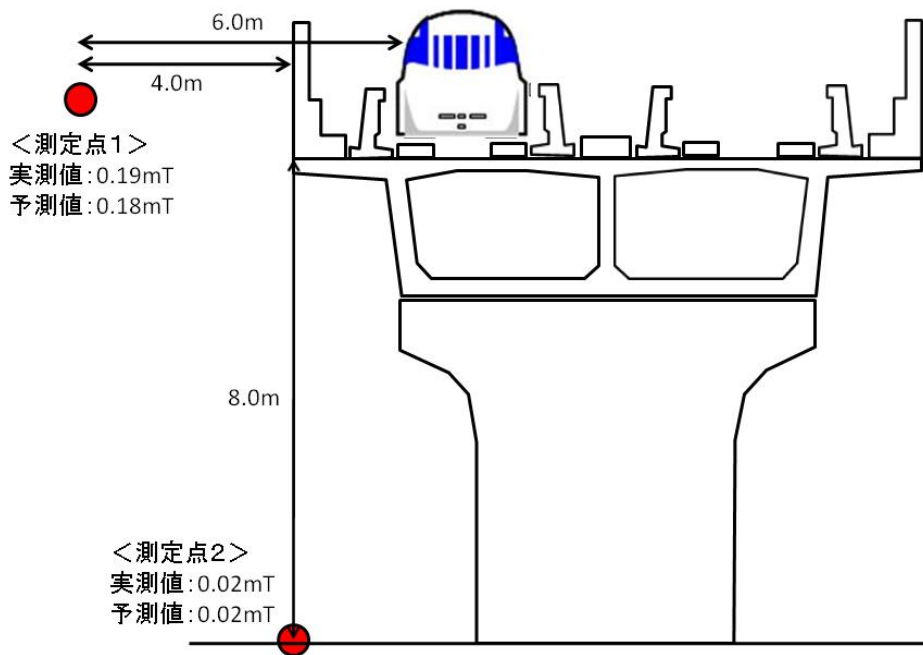


図 10-7-3 山梨リニア実験線における実測値と予測値の比較

上記の通り、実測値と算出値は一致しており、信頼性の高い手法である。また、地下の走行時においても地質の影響を殆ど受けないため、本手法を適用する上で問題点は無い。

### 10-7-3 地上における磁界

浅深度トンネル及び大深度トンネルを走行する際の磁界の算出値および基準値を表 10-7-1 に、算出地点のイメージを図 10-7-4 及び図 10-7-5 に示す。なお、表の磁界の基準値については、「特殊鉄道に関する技術上の基準を定める告示の解釈基準」に基づき、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) の基準 (表 10-7-2) に従うこととされており、超電導磁石の間隔と列車の走行速度から求めた周波数に応じた値を記載している。表に示す通り、算出値は基準値を大幅に下回っており、影響は極めて小さいことがいえる。

表 10-7-1 磁界の算出値および基準値

| 算出ケース | 算出位置の説明                             | 磁界 ( mT ) | 基準値 ( mT )            |
|-------|-------------------------------------|-----------|-----------------------|
| 1     | 浅深度トンネルの地面上での算出値<br>(トンネル上部より約 20m) | 0.0006    | 1.2<br>(500km/h 走行時)  |
| 2     | 大深度トンネルの地面上での算出値<br>(トンネル上部より約 40m) | 0.0001    | 13.8<br>(150km/h 走行時) |



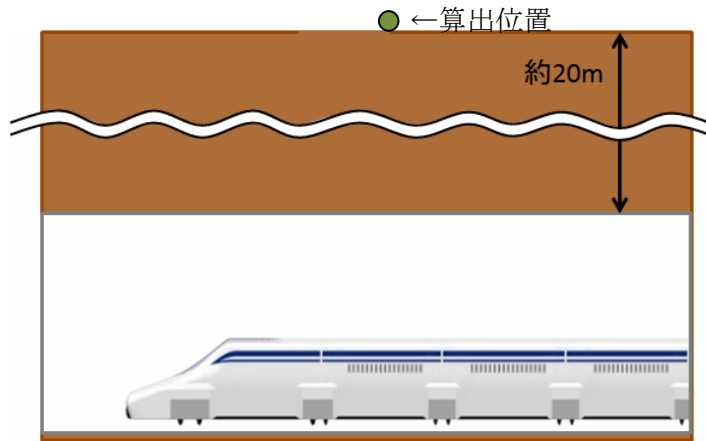


図 10-7-4 地上における磁界の算出位置イメージ（ケース1）

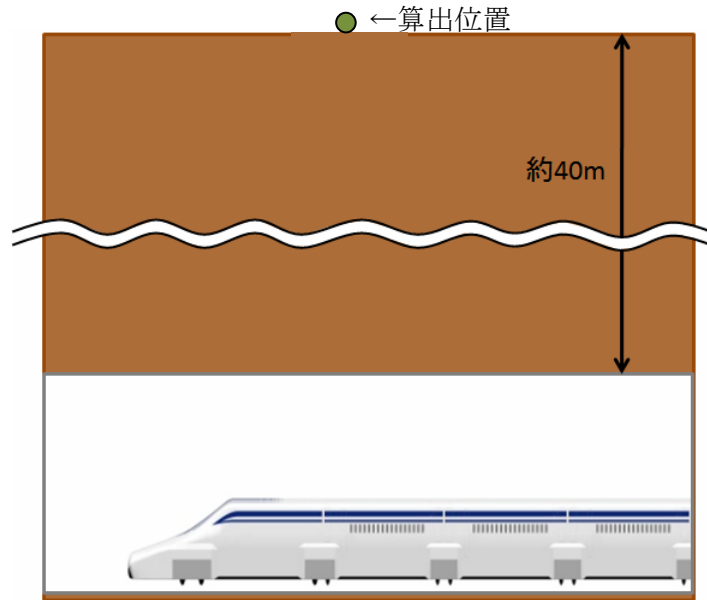


図 10-7-5 地上における磁界の算出位置イメージ（ケース2）

表 10-7-2 国際非電離放射線防護委員会のガイドラインに基づく基準

|               | 静磁界 | 変動磁界     |       |
|---------------|-----|----------|-------|
| 周波数 $f$ [Hz]  | 0   | 1~8      | 8~25  |
| 磁束密度 $B$ [mT] | 400 | $40/f^2$ | $5/f$ |