

# 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圧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 システムの内外での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、心臓ペーシ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 (Bezaniilla 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巣や渡りの際の方角の手がかり探知に地磁気が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が引き起こされた (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。多様ともいふべき影響が、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 Cruess 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的、またはアルミニウム精錬所や塩素アルカリ工場に働く人、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。膀胱、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 作業的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 Cruess 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のみに基づいており、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, McLaughlan 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. *Radiologe* 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.