

環境保健クライテリア No. 232 静電磁界

第1章 要約および更なる研究のための奨励

1.1 要約

1.1.1 自然の発生源と人為的发生源

静電界は大気中で自然に発生する。雷雲の下であれば 3kVm^{-1} 近い値が発生する場合もあるが、晴天では 100Vm^{-1} 程度である。それに次いで人間の曝露の一般的な原因となるのが、摩擦によって生じる電荷分離である。たとえば、非導電性のカーペットの上を歩けば数キロボルトの帯電電位が蓄積する場合があります、局所の電界は 500kVm^{-1} に達する可能性がある。直流 (DC)送電線は最大 20kVm^{-1} の静電界を生じる可能性があり、DC を利用する鉄道システムも列車内に最大 300Vm^{-1} の電界を生じる可能性がある。VDU は 30cm の距離で約 $10\sim 20\text{kVm}^{-1}$ の電界を生成する。

地磁気は地表上の位置によって約 $35\sim 70\mu\text{T}$ の幅があり、ある種の動物の方向決定や渡りと関係している。DC 電流を利用する所、たとえば電力を利用する輸送システム、アルミニウム生産などの産業プロセス、ガス溶接などでは、人工的な静磁界が必ず発生する。電車や開発中のリニアモーターカー (MagLev) の内部では、最大 2mT の磁束密度の発生が報告されている。酸化アルミニウムの電解還元では、作業者はそれを上回る最大 60mT の磁界に曝露しており、電気アーク溶接においても溶接ケーブルから 1cm の位置で約 5mT の磁界が発生する。

1970 年から 80 年代にかけて超電導体が出現したことにより、磁気共鳴画像法 (MRI) や磁気スペクトロスコピー (MRS)¹、研究用の核磁気共鳴 (NMR) などの開発を通じて、医学的診断においてさらに強い磁界の利用が急増した。推定では MRI によるスキャンがこれまでに全世界でおよそ 2 億回は行われている。通常の臨床システムにおける MRI スキャナーの静磁界は、永久磁石か超伝導磁石、あるいは両者の組み合わせによって生じ、その磁

束密度は 0.2~3T である。研究分野では、患者の全身スキャンにそれを上回る最大 9.4T の磁界を利用している。MRI 研究のための磁石周辺の漂遊磁界は十分に解明されており、遮蔽磁石内で最小限にすることが可能である。曝露に関しては、オペレータの制御盤における磁束密度は一般に約 0.5mT であるが、それを上回るかもしれない。ただし、そうした装置の製造や検査の際、あるいは治療用 MRI 内で医療処置をほどこす際には、最大 1T あるいはそれ以上の職業曝露が発生する可能性がある。様々な物理学研究や高エネルギー技術も超電導体を利用しており、作業者は 1.5T 程度の高さの磁界に定期的かつ長期間曝露する可能性がある。

1.1.2 相互作用のメカニズム

静磁界と生物系の物理的相互作用については、実験データに基づき以下の 3 種類のメカニズムがはっきりと認められている。

(1) イオン伝導電流との電気力学的相互作用。イオン電流は運動する電荷担体にローレンツ力が作用する結果として静磁界と相互作用する。この相互作用により (流動) 電位および電流の誘導が発生する。流動電位 (flow potentials) は一般に動物や人における心室収縮や大動脈への血液の駆出に関係している。またローレンツ力に起因する相互作用は、血流と反対方向に働く磁気流体力学的な力も生み出す。磁束密度が 15T の場合、大動脈の血流量は約 10%減少すると推定されている。

(2) 磁気角運動量に関する作用、均一な場における磁気異方性構造の向きや、磁界勾配における常磁性体や強磁性体の移動を含む。相互作用のメカニズムとして特に関心が高いのは、内因性および外因性の金属物質に働く力とトルクである。

(脚注)¹ 本書はもっぱら MRI について言及しているが、MRS において発生する曝露も本質的には同一である。

(3) 中間生成物の電子スピン状態に対する作用。スピン相関ラジカルペアの化学特性は、化学および生物学における磁界の作用について長年検討されてきた。10~100mT の静磁界は中間生成物の電子スピン状態への影響の結果、複数の種類の有機化学反応に影響を及ぼす可能性がある。スピン相関ラジカルペアは以下の2つの条件が満たされれば、反応生成物を再結合させたり、その生成を妨げる場合がある。その条件とは、(a) 三重項状態で生成したペアが何らかのメカニズムによって一重項状態に変換されなければならない、(b) 再結合するためにはラジカルがふたたび物理的に遭遇しなければならない。この条件 (a) が磁界に対して感受性を持つ可能性がある。これまでのほとんどの研究はラジカルペアにおける磁界作用を酵素反応を調べるためのツールとして利用してきた。ただし、磁界に起因するフリーラジカルの濃度または流量の変化によって、細胞機能への生理学的影響や、長期的な突然変異影響が生じうるとは考えられない。

曝露量測定

電磁界の生物学的影響を理解するためには、身体および組織の各部の細胞に直接影響を及ぼす電磁界を考察することが重要である。そうすれば曝露量を相互作用点における電磁界の適切な関数として定義することができる。曝露量測定の主要目的は、外部の変動しない電磁界と内部の電磁界との関係を明らかにすることである。曝露量測定における重要分野に、人または動物のボクセルモデルを用いる計算研究と曝露の実験研究とがある。

組織と静磁界との相互作用は、磁界の物理的特性、たとえば磁界ベクトル、磁界勾配、そうした量の積 (しばしば力の積 [force product] と呼ばれる) などを変数としていると考えられる。より大きな相互作用の中には、そうした磁界に関する量、たとえば身体動作や血流に基づく運動を特徴とするものがある。

曝露量測定に関して適切なパラメータは、安全性が懸念される物理的メカニズムによって異なる。強磁性体は当然ながら磁石の周辺では制限される必要がある。そうした物体や、

力またはトルクによって移動し得るインプラントを選別する必要がある。またピーク磁気誘導ベクトルやピーク磁力積といった尺度は有用である。磁界マップも作業者が曝露されるかもしれない磁石周辺の各位置でそうした値を推定する上では有用かもしれないが、それよりも各個人の曝露量測定のほうが実用的かもしれない。

静磁界勾配における全身または身体部位（目や頭）の動きも、動いている時間内は電界および電流を誘導する。曝露量計算は、2~3T を超える磁界内またはその周辺における通常の動きの際に誘導される電界がかなり大きなものになることを示唆しており、磁界内で動く患者、ボランティア、作業者が経験するめまいや場合によっては磁気眼内閃光についての多数の逸話的報告は、それが原因かもしれない。

曝露源は数多く存在しているが、特に重要な曝露源に磁気共鳴映像 (MRI) 装置がある。この 10 年間、MRI を非常に高い磁界強度で作動させるための研究が集中的に行われてきた。現在臨床に用いられている最も一般的なシステムを中心磁界は 1.5T である。しかし現在では 3.0T のシステムが通常の臨床医療に用いられており、2004 年には 100 を超えるシステムが全世界で用いられていた。また研究システムとして 4~9.4T というシステムを臨床撮像用に開発中である。MRI システムの磁界強度が高まれば、それにもなって様々な種類の組織対磁界の相互作用が発生する可能性も高まる。高磁界強度を追求する動きにともない、MRI システムが生成する電磁界と人体との相互作用を理解することがますます重要になっている。

1.1.3 インビトロ研究

インビトロ研究の結果は、相互作用メカニズムを解明する上で、また生体内で調査可能な影響を明らかにする上で有用である。ただし、生体内研究による補強証拠がない場合、インビトロ研究だけでは健康影響を同定するのに不十分である。

インビトロでは静磁界による様々な生物学的影響について研究が行われている。研究対象となる組織も無細胞系（隔離した膜や酵素、生化学反応を取り扱う）や様々な細胞モデル（細菌と哺乳類細胞の両方を利用する）など複数レベルである。これまでの研究におけるエンドポイントには、細胞方位、細胞の代謝活性、細胞膜の生理学的性質、遺伝子発現、細胞増殖、遺伝毒性がある。

こうしたすべてのエンドポイントについて肯定的知見も否定的知見も報告されている。ただしほとんどのデータは再現に失敗している。観察された影響はむしろ多様であり、それらは幅広い磁束密度に曝露したのちに確認されたものである。1T未満のmTという強度で、静磁界がいくつかのエンドポイントに影響を及ぼした可能性を示す証拠が存在している。そうした影響の一部については閾値を報告している研究もあるが、他の研究は明確な閾値のない非線形的な反応を示唆している。

静磁界が細胞の向きに及ぼす影響は1Tを超え磁界で一貫して確認されているが、それが生体内について妥当であるかには疑問の余地がある。少数の研究は、静磁界と遺伝毒性化学物質など他の作用因子との複合作用が、保護的と刺激的の両面で相乗効果を及ぼしている可能性を示唆している。人の健康に関して確固たる結論を導出するには現時点の情報は不十分であり、今後の裏づけが必要である。

静磁界の影響については、曝露の強度や期間、反復、勾配といった物理的パラメータに複合的に依存していることが考えられると同時に、生物学的変数も重要な意味を持つと考えられる。細胞の種類、細胞活性、曝露中のその他の生理学的条件といった変数が、実験の結果に影響を及ぼすことが明らかになっている。そうした影響のメカニズムは未知であるが、ラジカルやイオンへの影響が関係しているかもしれない。この点についてインビトロ研究はある程度の証拠を提示している。

ごく少数の研究はMRI信号やその他の複合的な電磁界について生物学的作用を認めているが、それが静磁界単独の作用と異なるものであるとは証明できていない。

以上を総合すると、インビトロ実験は静磁界による具体的作用を明確に示しておらず、したがって健康への悪影響の可能性も示していない。

1.1.4 動物実験

静電界の影響についてはほんの数件の動物研究が行われているのみである。表面電荷の知覚に関するものを除けば、健康への悪影響を示す証拠は何ら提示されていない。

静磁界の作用については多数の動物実験が行われている。人の健康に関連すると考えられるこれらの動物実験のほとんどは、自然の地磁気よりもはるかに強い磁界の影響を調査している。いくつかの研究は、産業界においても比較的強い曝露に相当するミリテスラ領域の電磁界を扱っている。近年では超伝導磁石技術やMRIの登場により、約1Tあるいはそれを超える磁束密度での行動、生理学、生殖への影響が研究されている。ただし、曝露による慢性的影響、特に発がん性との関連の可能性を調査した研究はほとんどない。

神経行動学的研究において最も一貫して見られた反応は、4Tと同等ないしそれ以上の静磁界における実験用齧歯類が不快になって回避的反応と条件忌避を誘発し得ることを示唆している。そうした作用は、前庭器官の内リンパに対する磁気流体力学的作用と一致していると考えられる。それ以外の点ではデータは一貫していない。

脊椎動物または無脊椎動物に属するいくつかの種については、地磁気と同程度の弱い静磁界を利用して方位を把握できることを示す証拠がある。ただしこうした反応は健康に関しては何ら関係していないと考えられる。

約1T(大型動物については0.1T)を超える磁界に曝露すると、心臓および主要な血管周

辺に流動電位(flow potentials)が発生することを示す十分な証拠が存在しているが、それが生理学的にどのような結果をもたらすかはまだ明らかになっていない。豚を利用した実験では、心臓部分を最大 8T の非常に強い磁束密度に数時間曝露させても心臓血管にまったく影響は生じなかった。ウサギに関する実験では、地磁場レベルからミリテスラ領域までの磁界に短時間または長時間曝露させたところ心臓血管に影響が生じたことが報告されているが、その証拠は強固なものではない。

ある研究グループが示した結果は、mT 強度の静磁界にはホルモン調節系を介して早期の血圧上昇を抑制する可能性があることを示唆している。さらに同じ研究グループは、最大 0.2T という低強度の静磁界であっても、血流に局所的影響を及ぼし微小循環を改善するかもしれないことを報告している。一方で別の研究グループは、最大 10T という強い静磁界磁束密度は皮膚の血流および温度を低下させるかもしれないと報告している。ただしこうしたすべてのケースでエンドポイントがかなり不安定であり、薬理学的操作(いくつかのケースにおける麻酔を含む)や固定化が状況を複雑化しているかもしれない。一般に、実験結果が独立して再現されていない場合には確固たる結論を導出することは困難である。

いくつかの研究は磁界曝露が血液細胞や造血系に影響を及ぼす可能性を指摘している。ただし、そうした研究の結果は両義的なものであり、結論の導出には制約がある。また静磁界曝露が血清中の酵素成分やイオン成分に及ぼす影響について入手可能な証拠は、そのほとんどがある 1ヶ所の研究所を出所としている。そうした知見については、結論を導出する前に独立した複数の研究所による確認が必要である。

内分泌系への影響については、ある研究所が行った複数の研究が静磁界曝露は松果体における合成やメラトニン含有量に影響を及ぼす場合があることを示唆している。しかし他の研究所が実施した複数の研究では影響は実証できなかった。静磁界曝露がメラトニン生成に及ぼす抑制作用の知見については、結論を導出する前にさらに研究を実施して確認する必要がある。全体として、松果体以外の内分泌系に対する静磁界の影響を調査した研究

はほんのわずかしかない。一貫した影響は認められていない。

MRI における患者と臨床スタッフ両方の曝露については、生殖と発育が非常に重要な問題である。この点から見て、1T を超える静磁界についての適切な研究はほんのわずかしかない。MRI 研究では静磁界の作用を無線周波数やパルス勾配の電磁界による一般的な作用の可能性と区別できないため、本質的に有用ではない。健康リスクを評価するためには一層の研究が緊急に必要である。

一般に、遺伝毒性やがんに関する動物研究はほとんど行われておらず、何らかの確実な結論を導出することは不可能である。

1.1.5 人に対する実験的研究

静電界は人体などの導電性物体には浸透しない；電界は表面電荷を発生させ、また電界はつねに身体表面に対し垂直である。表面電荷密度が十分に高くなれば、体毛との相互作用や火花放電（マイクロショック）などの作用によってそれを知覚することができる。人間の知覚閾値は様々な因子によって変化するが、 $10\sim 45\text{ k Vm}^{-1}$ の範囲と考えることができる。不快感の閾値もおそらくそれと同程度の幅を持つと思われるが、これまで体系的な研究は行われていない。十分に絶縁された人がアースにつながった物体に触れた場合、あるいはアースに接している人が十分に絶縁された導電性物体に触れた場合、痛みをともなうマイクロショックが発生する可能性がある。ただし、静電界の閾値は絶縁の度合いおよびその他の因子によって変化すると考えられる。

人に対する実験研究のエンドポイントには、末梢神経機能、脳活動、神経行動学的または認知的な機能、知覚、心臓機能、血圧、心拍、血清のタンパク質およびホルモンのレベル、身体および皮膚の温度、治療効果がある。最大 8T までの曝露レベルについて研究されており、純粋な静磁界と MRI の両方が研究対象となっている。曝露期間は数秒から 9

時間までであるが、一般には1時間未満である。入手可能なデータは複数の理由から限られたものである。たとえば、研究対象となっているのは患者または健康なボランティアといったおおむね便宜的な標本であり、通常は被験者数が少ないという理由による。

こうした実験研究の結果は、静磁界曝露が静止したボランティアの神経生理学的反応や認知機能に影響を及ぼすことを示してはいないが、そうした影響の存在を否定することもできない。約2Tを超える静磁界内で活動する作業員、患者、ボランティアに、曝露量に応じてめまいや吐き気が生じることが示されている。ある研究は、1.5TのMRI装置周辺の磁界内では目と手の協調や近くを見る際のコントラスト感度が減少または低下することを示唆している。こうした作用の発生は、磁界の勾配ならびに被験者の動きに依存するものと思われる。複数の研究で血圧および心拍のわずかな変化が観察されているが、それは通常の生理的変動の範囲内であった。心臓血管系のその他の生理学的特性、あるいは血清タンパク質やホルモンに対して静磁界が影響を及ぼすことを示す証拠はない。8Tまでの静磁界への曝露では、人体の温度変化は発生しないと考えられる。

ただし、これらの研究のほとんどは非常に小規模なものであり、便宜的標本に基づいており、しばしば比較不能なグループを含んでいる点に注意が必要である。したがって、本報告で検討した非常に多様なエンドポイントについて、何らかの結論を導出することは不可能である。

1.1.6 疫学研究

疫学研究が行われているのは、大量のDC電流を利用する設備で生じる静磁界に曝露される作業員にほぼ限られている。溶接工やアルミ精錬工、あるいは化学的な分離プロセスで大型の電解槽を利用する様々な産業プラントの作業員のほとんどは、最大で数十mTという中度の静磁界に曝露されていた。ただし、そうした作業員は潜在的に危険な蒸気やエアロゾルにも曝露されている可能性が高く、したがって解釈が困難である。そうした作業

者に対する研究での健康面のエンドポイントは、がん、血液学的な変化およびその結果、染色体異常の頻度、生殖に関する結果、筋骨格障害などである。また少数の研究は、最大 1T という比較的強い静磁界に曝露された可能性がある、女性 MRI オペレータの生殖能力および妊娠に関する結果を調査した。妊娠中に MRI 検査に曝露された健康なボランティアの妊娠結果を調査した研究が 2 つある。

疫学研究の結果として、肺がんや膵臓がん、血液がんなど様々ながんのリスクが増すという報告はあるが、こうした結果は複数の研究で一貫していない。現在までに発表された少数の疫学研究には、静磁界曝露による発がんリスク増加の可能性についていくつかの未解決な問題が残されている。曝露の評価が不適切で、一部の研究では参加者が非常に少ないので、こうした研究はそのような稀な疾病については非常に大きなリスクしか検出できない。そうした研究が有用な情報を提供し得ないことは、一部の労働環境に存在する、より確立されているその他の発がん因子について、明確な証拠がないことが裏づけている。がん以外の健康に関係するその他の影響についてはさらに研究数が乏しい。そうした研究のほとんどは非常に少ない人数を対象としており、また数多くの手法上の制約がある。また MRI オペレータの労働環境など潜在的に強い磁界に曝露されるその他の環境についても、適切な評価が行われていない。現時点では、健康の評価のためのデータは不十分である。

1.1.7 健康リスクの評価

静電界

静電界への曝露については、慢性的あるいは遅延的影響について何らかの結論を導出できるほどの研究は存在しない。IARC (IARC、2002 年) は、静電界の発がん性を判断するのに十分な証拠はないと指摘している。

静電界の急性影響についてはほんのわずかな研究しか行われていない。全体としてその研究結果は、健康への急性の悪影響として認められるのは電界の直接知覚とマイクロショックによる不快だけであることを示唆している。

静磁界

疫学研究および実験研究から入手可能な証拠は、慢性的あるいは遅延的影響について何らかの結論を導出するには不十分である。IARC (IARC、2002年) は人に対する静磁界の発がん性については十分な証拠がなく、また動物実験からも関連性のあるデータは入手できないと結論している。したがって現在のところ、ヒトに対する発がん性については分類できないという判断である。

テスラ領域の静磁界ならびに関連する磁界勾配への短期曝露はいくつかの急性影響を引き起こす。

人間のボランティアや動物に関する研究では、血圧や心拍数の変化といった心臓血管系の反応が時々観察されている。ただしそうした反応は、最大 8T の静磁界への曝露については通常の生理的変動の範囲内であった。

実験によって検証されているわけではないが、計算上では誘導される流動電位(flow potentials)によって 3 種類の影響が生じる可能性があることに注意が必要である。3 種類の影響とは、心拍の微小な変化 (健康に対する影響はまったくないと考えられる)、異所性収縮の誘導 (こちらのほうが生理学的に重要かもしれない)、再帰性不整脈の発生可能性の増加 (心室細動につながる可能性がある) である。最初の 2 つの作用における閾値は 8T を上回ると考えられているが、第 3 の作用における閾値はモデル化の複雑性のため現時点では推定が困難である。再帰性不整脈に特に感受性を持つ人間は 1 万人当たりおよそ 5~10 人であり、そうした人の発症リスクは静磁界および磁界勾配に曝露することで高まると考えられる。

ただし入手可能なデータが限られているため、以上の知見をまとめて上記のエンドポイントに対する静磁界の作用について確たる結論を導出することは不可能である。

静磁界勾配内における身体の移動ではめまいや吐き気といった感覚が発生し、静磁界が約2~4Tを超える場合には眼内閃光や口内の金属質の味覚が生じる場合もある。こうした影響は過渡的なものに過ぎないが、人に対しては悪影響を及ぼすかもしれない。目と手の協調への影響と合わせると、繊細な作業を実施する作業員（たとえば外科医）の遂行能力が低下し、同時に安全性に影響が生じる可能性がある。

その他の生理学的反応に対する作用も報告されているが、実験結果が独立して再現されていない場合には確固たる結論を導出することは困難である。

1.1.8 各国の管轄当局に対する奨励

各国の管轄当局に対しては、静電磁界による望ましくない影響から公衆と作業員の両方を防護するプログラムを実施するよう奨励する。ただし、静電界による主な影響は身体組織への放電による不快感であることから、防護プログラムは強い電界への曝露が生じる状況とそうした状況の回避法について情報を提供するだけになる可能性がある。静磁界について確認されている急性影響に対しては、それを防ぐためのプログラムが必要である。曝露による長期的あるいは遅延的影響については現在のところ十分な情報がないため、WHO (www.who.int/emf) が策定中の費用対効果に優れた予防措置を講じて、作業員および公衆の曝露を制限することが必要かもしれない。

各国の管轄当局は、人々の静磁界への曝露を制限する、合理的な科学に基づいた基準を採用すべきである。健康に基づく基準を設けることは、作業員と公衆に対する基本的な防護措置となる。静磁界については国際基準 (ICNIRP、1994年) があり、これを付属文書1

に記載する。ただし、WHO は、科学文献に記載された最新の証拠に照らしてこれを見直すことを奨励する。

各国の管轄当局は、静磁界曝露によって発生する可能性がある影響を防止する既存プログラムを確立あるいはそれを補足すべきである。磁界の産業および科学的利用に対する防護措置は、工学的設計管理、隔離距離の利用、行政的管理に分類される。救急用あるいは医療用電子器具との磁気干渉からの付随的ハザード、ならびに外科および歯科のインプラントのための防護措置は、静磁界の健康への悪影響に関して特に懸念される領域である。強い磁界を発生する装置内では、強磁性のインプラントや固定されていない物体に機械的な力が及ぶため予防措置が必要である。

各国の管轄当局は、防護措置が確実に実施されるようにするため、MRI 装置の免許制度を検討すべきである。そうした制度を設ければ、一部の国の基準あるいは 2T を超える強度の MRI 装置について、遵守すべき追加要件を設定することができる。こうした要件は、患者、作業者、ならびに強磁界によって発生する事故や傷害について情報提供に関するものである。

各国の管轄当局は、静磁界に曝露される人々の安全性に関連する、現状の大きな知識のギャップを埋めるための研究に資金を提供すべきである。今後の研究に関する奨励が本書の一部にあるが（以下参照）、これを WHO ウェブサイトにも掲示している (www.who.int/emf)。この WHO の研究課題に従って研究を行う研究者に対し、資金提供を行うべきである。

各国の管轄当局は、作業者の静磁界曝露および患者の MRI 曝露に関する情報を収集するため、MRI 装置に資金を提供すべきである。そうした情報は今後の疫学研究に利用可能なものとすべきである。また、MRI やそれに相当する高強度の磁石、あるいはリニアモーターカーといった新技術の製造に関連する、高い磁界への長期曝露が生じる場所で働く作業者の曝露に関する情報を収集するデータベースに対し、資金提供すべきである。

1.2 今後の研究に関する奨励

静電磁界曝露による健康影響の可能性について我々の知識のギャップを同定することは、本書の健康リスク評価において重要な部分である。以下では今後の研究についての奨励を提示する。

1.2.1 静電界

静電界が健康に及ぼす影響についての研究を継続することにはほとんど便益がないと思われる。マイクロショックへの長時間の曝露によるストレスの可能性を除けば、健康への望ましくない影響を示唆する研究はこれまでに1つもない。したがって、静電界への曝露による生物学的作用については、今後の研究のための奨励は行わない。また、職場または生活環境で静電界に著しく曝露される機会がほとんどないため、疫学研究も是認されない。

1.2.2 静磁界

全体として、これまでに行われた研究は体系的なものではなく、適切な手法や曝露に関する情報が欠落している場合が多い。より体系的なアプローチを支援するため、協調的な研究プログラムを奨励する。また、生物学的結果に対して強度、期間、勾配といった物理的パラメータが持つ重要性について、さらに研究を行う必要がある。

既存の研究に上記の制約があることを考慮し、疫学研究、ボランティア研究、動物およびインビトロの生物学的研究、相互作用のメカニズムに関する研究、理論的または計算的な研究をさらに行うことを奨励する。表1に奨励の内容を要約した。

1.2.2.1 理論的または計算的な研究

計算に基づく曝露量測定は、外部の静磁界と、磁界内を生体組織が移動することで発生する内部の電界および誘導電流との関係を提示する。こうした理論的な手法では特定の組織または器官について電磁界の特性を解明することが可能である。解剖学的に現実的で精細な分解能を持つ成人男性のボクセルファントムが4種類利用可能であり、これが時間変化する電磁界の研究で広く用いられている。ただし、静電磁界についての研究は非常に少なく、今後はこうしたモデルを用いて研究を行うことが必要であると考えられる。特に、異なる時期の胎児を持つ妊婦ファントムなど、異なるサイズのファントムや女性ファントムを使用することが重要である。そうしたモデルを用いた発育研究の結果の解釈を支援するため、妊娠した動物のファントムを用いて同様な研究を行うことができる (優先度 中)。

眼内閃光やめまいと関連する電界および電流を調査するには、非常に精細な分解能を持つ頭および肩の部分のファントムを開発、利用すべきである。こうしたモデルを利用すれば、静磁界における頭部および目の動きによって生じる電磁界や電流を調べることも可能になる。こうした研究は、手術用MRI処置の際に外科医およびその他の臨床スタッフの頭部の動きが減り、目の動きが多くなる状態に特に関係している。また手術用システム周辺にいるスタッフの全身の動きもシミュレートすべきである (優先度 高)。

心臓の詳細なモデルを使用した計算や一般的な心臓病態モデル化が重要と考えられる。こうしたモデルには心臓の微小構造を含めると同時に、磁界や電流が生じる可能性がある心臓内の小血管も含める必要がある。そうした磁界や電流はペースメーカーの鼓動生成や脱分極の伝搬に何らかの影響を及ぼす可能性がある。また計算によって、磁界や磁界勾配に曝露された結果として心臓内に誘導される電流の大きさや空間分布を推定する必要がある。磁界に対する複数の向きについて研究すべきである。これにより、心臓に影響を及ぼすことが計算で示されている電流との比較が可能になる。また補足的な実験研究および室内研究を行うことを奨励する (優先度 高)。

現状では妊婦に対する高磁界の MRI 使用は抑制傾向にあるが、こうした状況が変化するかもしれない。したがって、高磁界における妊婦の動きや胎児の動きによって胎児内に誘導される電流を調べる、モデル化研究を行うことを助言する。こうした計算（ならびに磁界勾配や無線周波数磁界に関する類似の研究）を実施すれば、胎児に影響が及ぶ可能性を推定することができる(優先度 高)。

1.2.2.2 インビトロ研究

静磁界はいくつかの方式で生物系と相互作用する可能性があるが、健康に影響を及ぼす可能性が最も高いのは、磁界が帯電分子に及ぼす影響と生化学反応率の変化である。

静磁界の生物学的作用については、考えられるメカニズムおよびその対象物について今後の研究が必要である。イオン（たとえば Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）と酵素やラジカルペアの生成との相互作用について、0.01~10T の静磁界が及ぼす影響を調査することを奨励する。こうした調査は困難ではあろうが、モデルシステムでラジカルペアのメカニズムを通じて進行する酵素反応（これは人の健康に関係する）を発見することは有意義である。フリーラジカルのメカニズムによって発生し、害をもたらすことがわかっている毒性のラジカル種（たとえばスーパーオキシド）に研究を集中することも一法である（優先度 中）。

様々な細胞について共突然変異誘発作用が報告されていることは、静磁界の潜在的発がん性に関して特に重要である。この種の研究をヒトの一次細胞を用いて実施すると共に、研究を拡張して形質転換および遺伝子組み換え系を含めるべきである。(優先度 高)

静磁界は特定の曝露条件下ではヒトや哺乳類の細胞における遺伝子発現および関連する機能に影響を及ぼす可能性があるが、この点については入手できる情報がごくわずかである。人の健康に関連する静磁界の影響についての可能性のある分子マーカーを探すため、ヒトの一次細胞に対しプロテオミクスやゲノミクスなどの技法で研究を行うべきである。

(優先度 低)

1.2.2.3 動物実験研究

静磁界に対する長期曝露の影響は動物モデルを利用して調査できる。静磁界の潜在的発がん性に関して具体的情報がないので、長期 (生涯にわたるものを含む) 研究を行うことを奨励する。通常の動物と遺伝子組み換えを行った動物の両方を用いることができる。たとえば、発がんリスクが高まる経路の一つとしてフリーラジカルの増幅を考える場合、スーパーオキシドディスムターゼ遺伝子を欠損させたマウスモデルを用いることができる。このモデルであれば、腫瘍や、フリーラジカルに関連するその他の疾病に対する感受性が著しく増すからである。またマイクロアレイ技法を用いれば、非常に多様な曝露パラメータによる影響を容易に評価し、ゲノムやプロテオームについて定量化することが可能である。(優先度 高)

発育異常や奇形といったリスクを増大させる可能性については体系的な研究を行う必要がある。特に脳の発育は移動によって発生する電流に感受性が高いと考えられる。神経細胞の樹状突起が正常に発育するためには方位に関する作用が非常に重要だからである。また比較的短時間の曝露によって長期的な変化が生じる可能性も存在する。神経行動学的パラメータを研究することで、曝露が脳機能の発育に及ぼす影響を解明するための簡便で高感度の分析を得ることが可能であり、したがってそうした研究の実施を奨励する。脳の特定領域 (たとえば大脳皮質、海馬状隆起) が発育する際に生じる微妙な形態変化を記録する研究も有意義である。遺伝子組み換えモデルは適切なものを使用する必要がある。(優先度 高)

約 2T の磁界に対する動物 (およびヒト) の曝露では電気生理学的影響は生じないとするデータがあるが、それより強い磁界による影響を知ることも有用であろう。したがって動物を利用して、最大 10T あるいはそれ以上の磁界曝露の影響を研究することが有用と思われる。(優先度 中)

これまで動物については上記以外の多様なエンドポイントの研究が行われているが、得られた情報はごくわずかである。そうしたエンドポイントそれぞれについて個別の研究を実施していくことは費用効果的ではないかもしれないので、別のエンドポイントを扱う広範な動物研究を行うほうが有意義かもしれない。(優先度 低)

1.2.2.4 人の実験的研究

静磁界が認知と行動に及ぼす影響をさらに研究すべきである。ただし、現在入手可能なデータは、認知の特定分野に特段のリスクがあると示唆しているわけでもなければ、どのようなパラメータを室内実験で研究すべきかを示しているわけでもない。このように明確な方向性がない以上、考えられるアプローチは注意力、反応時間、記憶力などに関する標準的な試験を含む一連の認知試験によって曝露の影響を調べることであろう。この方法であれば集中的な研究に進む前の当初のスクリーニングとして実施可能である。こうした初期の研究は実験研究の一環としてボランティアで実施できる。(優先度 中)

MRI の利用が拡大し、たとえば手術用 MRI での処置では磁石内にいる患者の直近に臨床スタッフがいるため、磁界勾配における頭と目の協調、認知能力、行動についてさらに研究を行う必要がある。めまいなど磁界によって発生する前庭機能障害のメカニズムと強度についてはさらに研究を行うことが特に重要である。というのも、医療スタッフが磁界内で長時間、複雑な職務を遂行するケースが増えているからである。(優先度 高)

同様に心臓機能に関する追加研究も有用であろうし、それによって心臓血管系に対する影響を調べることができる。また 3T を超える磁界についても同様の研究を実施し、そうした磁界が存在する日常的な臨床環境の潜在的リスクを評価することが必要であろう。(優先度 低)

1.2.2.5 疫学研究

高い静磁界に曝露される作業者のカテゴリーはいくつかあり、これには MRI オペレータ、アルミニウム精錬工場の作業員、ある種の輸送業務に携わる作業員（地下鉄、リニアモーターカー、通勤列車、軽便鉄道）が含まれる。ある種のがんなどの稀な慢性疾病については、疫学研究への参加が可能な曝露量の多い職業グループを同定するため、実行可能性調査を行う必要がある。さらにそうした職業における他の種類の曝露についても、実行可能性調査を行う必要がある。それによって十分な数の作業員を同定できた場合には、ネスト症例対照アプローチがおそらく最適であろう。というのも曝露や重要な交絡因子（たとえば電離放射線）について詳細なデータを取得する必要があるからである。十分な数の曝露被験者を確保するには、おそらく国際協力に基づく研究が必要になるであろう。（優先度 高）

より一般的で潜伏期間が短い疾病については、曝露量が多い特定の職業グループ（たとえば MRI システムを製造する産業の作業員）を同定し、時間をかけて追跡する方法が可能である。様々な疾病に関する情報はそうした作業員の定期健康診断から入手可能かもしれないが、これらの情報を利用できるのは比較可能な非曝露グループについても同等の情報入手できる場合に限られる。手術用 MRI を使用する外科医、看護婦、その他のスタッフについて健康診断を行えば、そうしたシステムで作業員が曝露される静磁界のレベル、期間、頻度について有用な情報を得られるであろう。同様に、一部の病院では患者記録があるかもしれない、そこからかつて曝露したもののその後症状は良性であるとわかった人々についてデータが得られる可能性がある。（優先度 高）

職業上の静磁界曝露に関連する妊娠へのリスクについて前向き研究を実施することは、MRI 検査を受けざるを得なかった妊婦の妊娠結果に関する追跡調査と同様に有用である。（優先度 高）

他の周波数域に関する経験から、疫学研究に用いる電磁界曝露を信頼できる形で推定することは非常に難しい場合があり、曝露の代替尺度（たとえば職業名や特定発生源からの

距離) では必ずしも十分に正確な評価ができないことがわかっている。したがって曝露の測定には専用計器を使用する必要がある。比較的小型の個人用曝露測定器は ELF 電磁界の研究で非常に有用なことが立証されている。したがって、個人用曝露測定器により疫学研究における曝露評価は大幅に進歩するであろう。ただし曝露測定器については数値と実験結果とによって妥当性を確認する必要がある。磁界強度、磁界勾配、曝露時間、そして理想としては運動による磁界の変化率も記録することが望ましい。(優先度 高)

表 1 研究に関する奨励

相互作用のメカニズム

ラジカルペア反応の化学特性 (0.1~10T)

ヒトの細胞を用いた共突然変異誘発作用

理論的または計算的研究

男性/女性/妊婦のボクセルファン トムを用いる曝露量測定研究

目の誘導電流

心臓の流動電位(flow potentials)

インビトロ研究

相互作用メカニズム：ラジカルペアの反応と酵素活性

物理的パラメータ (強度、期間、反復、SMF[静磁界]勾配)の影響

ヒトの一次細胞における変異原性と転換

ヒトの一次細胞における遺伝子発現

動物実験研究

がん

発育/神経行動に対する影響

心臓機能 (~20T)

ボランティアによる実験研究

前庭機能、頭と目の協調

認知能力と行動

心臓血管に対する影響

疫学研究

曝露源、交絡因子、曝露者数に関する実行可能性調査

慢性疾病 (例えば、がん) のネスト症例対照研究 (実行可能な場合)

職業上の曝露や MRI 検査と妊娠結果の関係

高曝露職業における短期的影響のコホート研究