



# World Health Organization

## 1 要約およびさらなる研究のための奨励

この環境保健クライテリア (EHC) モノグラフは、超低周波 (ELF) の電界および磁界への曝露により生ずる可能性のある健康影響を扱う。本書は、曝露の発生源および測定、ならびに ELF 界の物理的特性をレビューしている。但し、本書の主な目的は、ELF 界への曝露による何らかの健康リスクを評価し、健康防護プログラムに関する各国当局向けの奨励を作成するためにこの健康リスク評価を利用するため、ELF 界への曝露の生物学的影響に関する科学的文献をレビューすることである。

検討する周波数範囲は、0Hzから100kHzまでである。これまでに実施されている研究の大半は商用周波数 (50または60Hz) 磁界に関するもので、商用周波数電界を用いた研究は少数である。さらに、超低周波 (VLF, 3~3kHz) について、磁気共鳴撮影法に用いられる切替え勾配磁界、および画像表示端末やTV受像機から放射される弱いVLFに関する研究がいくつかある。

本章では、各章からの主な結論および奨励、ならびに健康リスク評価プロセスの全体的な結論をまとめる。本モノグラフにおいて、ある健康影響についての証拠の強さを表現するのに用いる用語は以下の通りである。証拠が単一の研究に限られる場合、または、幾つかの研究についてのデザイン、実施、解釈に関する未解決の疑問が残っている場合、その証拠は「限定的 (limited)」とされる。重大な量的または質的な制約のため、研究がある影響の存在の有無を示していると解釈できない場合、あるいは利用可能なデータがない場合、証拠は「不十分 (inadequate)」とされる。

知識における重要なギャップも同定し、これらのギャップを埋めるための研究ニーズを、「研究のための奨励」と題する節にまとめている。

### 1.1 要約

#### 1.1.1 発生源、測定および曝露

電気が発電され、電線やケーブルで送配電され、または電気製品で使用される場所などでも、電界および磁界が存在する。電気の使用は我々の現代的な生活様式の必要不可欠な一部であるため、電磁界は我々の環境中のどこにでも存在している。

電界強度の単位はボルト毎メートル ( $V m^{-1}$ ) またはキロボルト毎メートル ( $kV m^{-1}$ ) であり、磁界についてはテスラ (T)、またはより一般的にはミリテスラ (mT) またはマイクロテスラ ( $\mu T$ ) で測定される磁束密度が用いられる。

商用周波数磁界への居住環境曝露は、世界中でさほど大きくは変わらない。住居内での磁界の相乗平均値は、欧州で $0.025 \sim 0.07 \mu\text{T}$ 、米国で $0.055 \sim 0.11 \mu\text{T}$ の範囲である。住居内での電界の平均値は、数十 $\text{V m}^{-1}$ の範囲である。特定の電気製品の近傍では、瞬間的磁界の値は、数百【200~300】 $\mu\text{T}$ ほどである。電力線近くでは、磁界は最大で約 $20 \mu\text{T}$ に達し、電界は最大で数千 $\text{V m}^{-1}$ である。

50または60Hzの居住環境磁界への時間平均曝露が小児白血病の発症率の上昇と関連付けられているレベルを超える子供は少数である（1.1.10節参照）。平均曝露が $0.3 \mu\text{T}$ を超える子供は約1~4%、曝露の中央値が $0.4 \mu\text{T}$ を超える子供は僅か1~2%である。

職業曝露は、主に電力周波数の界によるが、それ以外の周波数に起因することもある。作業場での磁界曝露の平均値は、「電氣的職業」では事務職のような他の職業よりも高いことが示されており、電気工（electricians）や電気技師（electric engineers）の $0.4 \sim 0.6 \mu\text{T}$ から、送電線作業者の約 $1.0 \mu\text{T}$ の範囲であり、最も高いのは溶接工、電気運転士や縫製工（ $3 \mu\text{T}$ 超）である。職場における磁界曝露の最大値は約 $10\text{mT}$ に達するが、この値は大電流が流れる導体の存在と常に関連する。電気供給産業で働く労働者は、 $30 \text{kV m}^{-1}$ までの電界に曝露されるかもしれない。

### 1.1.2 身体内部の電界および磁界

超低周波の外部の電界および磁界への曝露は、身体内部に電界および電流を誘導する。ドシメトリは、外部の界と身体内に誘導された電界および電流密度、または、これらの界への曝露に関連するその他のパラメータとの関係を表す。神経や筋肉といった興奮性組織の刺激と関連する、局所的な誘導電界および電流密度が主な対象である。

ヒトおよび動物の身体は、ELF電界の空間分布を大きく乱す。低い周波数では、身体は良導体であり、体外における乱された電界の線は身体表面に対してほぼ垂直である。曝露された身体表面には振動する電荷が誘導され、これが身体内部に電流を誘導する。ELF電界へのヒトの曝露に関するドシメトリの主な特徴は以下の通りである：

- ・ 体内の電界は通常、外部電界より5~6桁小さい。
- ・ 曝露が概ね垂直電界である場合、誘導電界の主な方向も垂直である。
- ・ 所与の外部電界に対して、最も強い誘導電界は、足を通じて地面と完全な接触状態にある身体に生じ、最も弱い誘導電界は、地面から絶縁されている（「自由空間」内の）身体に生じる。
- ・ 地面と完全な接触状態にある身体内部に流れる電流の合計は、組織導電率よりも、体の大きさと形状（姿勢を含む）によって決定される。
- ・ 種々の器官および組織の誘導電流の分布は、それぞれの組織の導電率によって決まる。
- ・ 誘導電界の分布も導電率に影響されるが、誘導電流ほどではない。
- ・ 電界内に置かれた導体との接触によって身体内の電流が生じるような現象も別個に存在する。

磁界については、組織の透磁率が空気と同じなので、組織内の磁界は外部の界と同じである。ヒトおよび動物の身体は磁界を大きく乱すことはない。磁界の主な相互作用は、電界のファラデー誘導であり、導電組織の電流密度と関連する。ELF磁界へのヒトの曝露に対するドシメトリの主な特徴は以下の通りである：

- ・ 誘導電界および電流は、体に対する外部の磁界の方向に依存する。身体内部の誘導電界は全体として、外部の磁界が身体正面から背面に向かう場合に最大となるが、いくつかの器官では、外部の磁界が身体の側面から側面に向かう場合に最大となる。
- ・ 最小の電界は、磁界の向きが身体の垂直軸に沿う場合に生じる。
- ・ 所与の磁界強度および磁界の向きに対して、身体が大きいほど誘導電界も大きくなる。
- ・ 誘導電界の分布は、種々の器官および組織の導電率に影響される。これらは誘導電流密度の分布に対して限定的な影響を有する。

### 1.1.3 生物物理学メカニズム

ELF電界および磁界に関する、様々な提案された直接的および間接的な相互作用のメカニズムの妥当性について調べた。特に、ある界への曝露により生物学的過程で発生する「シグナル」を、固有のランダムノイズと区別できるかどうか、また、そのメカニズムが科学的原理および現状の科学的知見を疑うものかどうかについて調べた。多くのメカニズムは、ある強度よりも高い界においてのみ、妥当性のあるものとなる。しかしながら、妥当性のあるメカニズムが同定されなくても、基本的な科学的原理が支持されるならば、非常に低い界レベルでの健康影響の可能性を排除することはできない。

電磁界と人体との直接的相互作用について提案されている多くのメカニズムのうち、神経網における誘導電界、ラジカルペア、およびマグネタイトの3つが、他のものより低い界レベルで潜在的に作用するものとして突出している。

ELF電界または磁界への曝露により組織に誘導された電界は、内部電界強度が数 $\text{V m}^{-1}$ を超える場合に、生物物理学的に妥当な方法で単一有髄神経繊維を直接刺激する。より弱い電界は、単一の細胞に対立するものとしての神経網のシナプス伝達に影響を与える可能性がある。多細胞生物では一般的に、神経系によるこのようなシグナル過程を使用して弱い環境シグナルを検出する。神経網による識別の下限値は $1\text{mV m}^{-1}$ であることが示唆されているが、現時点での証拠に基づけば、閾値は $10\sim 100\text{mV m}^{-1}$ あたりにありそうである。

ラジカルペア・メカニズムは、一般に認められている様式であり、磁界が特定の種類の化学反応に影響し、一般的に、低磁界では反応性のあるフリーラジカル濃度が増加し、高磁界ではそれらが減少する。このような増加は、 $1\text{mT}$ 以下で見られている。このメカニズムが渡り鳥の飛行と関連する証拠がいくつかある。理論的根拠に基づき、またELFおよび静磁界によって生じる変化が類似していることから、約 $50\mu\text{T}$ の地磁気以下の商用周波数の界は、それほど大きな生物学的意味をもたないと考えられる。

マグネタイト結晶は、様々な形の酸化鉄の小さな強磁性体結晶であるが、動物およびヒトの組織に少量だが見られる。フリーラジカルと同様、これは移動性の動物の方向付けと誘導に関連している。ヒトの脳にも少量のマグネタイトが存在するが、弱い地磁気を検出する能力を与えているわけではない。極端な仮定に基づいた計算から、ELF磁界がマグネタイト結晶に及ぼす影響の下限値は、 $5\mu\text{T}$ であることが示唆されている。

化学結合の切断、荷電粒子に対する力、および種々の狭い帯域幅の「共鳴」メカニズムなど、その他の直接的な生物物理学的相互作用は、一般環境および職業的環境で発生する電磁界レベルでの相互作用について妥当性のある説明を提示しているとは考えられていない。

間接影響に関しては、電界に誘導される表面電荷が感知され、導体に触れた際に痛みを伴うマイクロショックを受ける。接触電流は、小さな子供が例えば家のバスタブの水栓に触れた際に生じる。これにより弱い電界（恐らくバックグラウンドのノイズレベル以上）が骨髄に誘導される。しかしながら、これらが健康へのリスクとなるかどうかは不明である。

高圧送電線は、コロナ放電の結果として帯電したイオンの雲を生じる。これが、風に運ばれる汚染物質の皮膚や体内の気道への沈着を増加させ、健康に有害な影響を及ぼす可能性があることが示唆されている。しかしながら、最も高い曝露を受ける個人においてさえ、仮に長期的な健康リスクがあったとしても、コロナイオンが大きな影響を及ぼすことはなさそうである。

上記で考察した3つの直接的メカニズムのいずれも、一般的に人々が遭遇する曝露レベルでは疾患発症率を増加させるという妥当性がないと考えられる。事実、これらは数桁以上高いレベルにのみ妥当となり、また間接的メカニズムについてはまだ十分に研究されていない。妥当性のあるメカニズムが同定されていないことから、有害な健康影響の可能性を排除することはできないが、このことは生物学と疫学からのより強力な証拠の必要性を高めている。

#### 1.1.4 神経行動

商用周波数電界への曝露は、表面電荷の影響を通じて、知覚から不快感までの明確な生体反応を生じる。これらの反応は、電界強度、周囲環境条件ならびに個人の感受性に依存する。直接的知覚の閾値は、ボランティアの10%で $2\sim 20\text{ kV m}^{-1}$ であり、不快感の閾値は、ボランティアの5%で $15\sim 20\text{ kV m}^{-1}$ であった。人から地面へのスパーク放電は、ボランティアの7%が $5\text{ kV m}^{-1}$ の電界で痛みを感じるということがわかっている。帯電した物体からの地面と接触した人を通した放電の閾値は、その物体の大きさにも左右されるため、特別な評価が必要である。

界強度が高く、急速なパルス磁界は、末梢神経または中枢神経組織を刺激する。このような影響は磁気共鳴撮影（MRI）の処置中に生じ、また経頭蓋磁気刺激に使用される。直接的神経刺激についての誘導電界強度の閾値は、数 $\text{V m}^{-1}$ 程度である可能性がある。この閾値は、数ヘルツから数千ヘルツの周波数範囲にわたり一定であると考えられる。てんかんに罹っている人

またはてんかんに罹りやすい人は、中枢神経系（CNS）におけるELF誘導電界に対する感受性がより高いと思われる。さらに、CNSの電気刺激に対する感受性は、発作の家族歴、三環系抗うつ剤、神経弛緩薬、およびその他の発作を低下させる薬剤の使用に関連しているようである。

CNSの一部である網膜の機能は、直接的な神経刺激を生じるよりも弱いELF磁界への曝露によって影響される。チラチラする光の感覚（磁気閃光と呼ばれる）は、誘導電界と網膜内の電氣的に刺激された細胞との相互作用により生じる。網膜の細胞外液における誘導電界強度の閾値は、20 Hzで約 $10\sim 100\text{ mV m}^{-1}$ と推定されている。しかし、この値には著しい不確実性がある。

ボランティア研究における、脳の電氣的活動、認知、睡眠、過敏性および気分などのその他の神経行動的影響に関する証拠は、あまり明確ではない。一般的に、このような研究は、上述の影響を誘導するために必要とする曝露レベル以下で実施され、最善でも微妙な一時的な影響の証拠しか生じない。このような反応を引き出すために必要な条件は、現在のところ明確には定義されていない。ある認知課題の遂行において、反応時間と正確さの低下に及ぼす電磁界依存性の影響の存在を示唆するいくつかの証拠があり、これは脳の相対的な電氣的活動に関する研究結果によって裏付けられている。磁界が睡眠の質に影響を及ぼすかどうかを調査している研究では、矛盾した結果が報告されている。これらの矛盾の一部は、研究間でデザインに違いがあることに起因している可能性がある。

電磁界全般に対して過敏であるという人々もいる。しかし、二重盲検誘発研究の証拠から、報告されている症状は電磁界曝露とは無関係であることが示唆されている。

ELF電界および磁界への曝露がうつ症状または自殺を誘発することを示す証拠は、矛盾した決定的でないものしかない。よって、その証拠は不十分であると考えられる。

動物では、ELF界への曝露が「神経行動」に影響する可能性が、様々な曝露条件を用いて多くの観点から探求されている。確たる影響はほとんど認められていない。動物が商用周波数電界を検出できるという説得力のある証拠がある。これはほぼ間違いなく、表面電荷が影響する結果であり、一時的な興奮または軽度なストレスを誘発する。ラットの検出範囲は $3\sim 13\text{ kV m}^{-1}$ である。齧歯類は $50\text{ kV m}^{-1}$ 以上の強度の電界を忌避することが示されている。他の可能な電界依存性の変化は充分には定義されていない。実験研究では、微妙で一時的な影響の証拠しか示されていない。磁界への曝露が脳内のオピオイドやコリン作用性の神経伝達系の機能を修飾させるかもしれないという証拠がいくつかあり、これは、鎮痛および空間記憶課題の習得や遂行に及ぼす影響を調査している研究結果によって支持されている。

### 1.1.5 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職業的疫学研究の結果から、商用周波数電界または磁界への曝露は神経内分泌系に有害な影響を及ぼさないことが示唆されている。これは特

に、松果体から放出されるメラトニンや、下垂体から放出され代謝と生理のコントロールに関与するいくつかのホルモンを含め、神経内分泌系の特定のホルモンの循環レベルに特に適用する。ある種の曝露の特徴と関連するメラトニン放出の時期に、微妙な違いが観察されることが時々あるが、このような結果は一貫していない。同じようにホルモンレベルに影響を及ぼしうる、様々な環境および生活様式上の要因による交絡の可能性を排除することは非常に困難である。ELF曝露がボランティアの夜間のメラトニンレベルに及ぼす影響に関するほとんどの実験室研究では、可能性のある交絡因子のコントロールに配慮した場合には、影響は見られなかった。

商用周波数電界および磁界がラットの松果体や血清メラトニンレベルに及ぼす影響を調査している多数の動物研究から、曝露により夜間にメラトニンが抑制されたという報告もあった。メラトニンレベルの変化は、 $100 \text{ kV m}^{-1}$ までの電界曝露に関する初期の研究で最初に観察されたが、再現できなかった。回転磁界が夜間のメラトニンレベルを抑制することを見出した、より最近の一連の研究の知見は、曝露動物と歴史的対照動物との不適切な比較により弱められた。齧歯類を用いたその他の実験のデータは、数 $\mu\text{T}$ から $5 \text{ mT}$ までの強度レベルをカバーしているが、あいまいなものであり、メラトニンの抑制を示している結果もあれば、何ら変化を示さないものもある。季節によって繁殖する動物では、商用周波数の電磁界への曝露がメラトニンレベルおよびメラトニン依存性の生殖状態に及ぼす影響に関する証拠は、否定的なものが支配的である。商用周波数の電磁界に慢性的に曝露されたヒト以外の霊長類の研究では、メラトニンレベルに及ぼす説得力のある影響は見られていないが、2種類の動物を用いた予備的研究で、不規則な間欠的曝露に対するメラトニンの抑制が報告されている。

*In vitro*研究は比較的少数しか行われていないが、ELF電磁界への曝露が摘出した松果腺でのメラトニン産生または放出に及ぼす影響は様々である。ELF曝露が*in vitro*の乳がん細胞へのメラトニンの作用を阻害するという証拠には興味をそそられる。しかし、このシステムでは、細胞株に研究室間の伝達性を阻害しうるような、遺伝子型および表現型の変動が培地上で頻繁に見られるという欠点がある。

様々な哺乳類における、下垂体-副腎軸のストレス関連のホルモンにおける一貫した影響は示されていない（可能性のある例外としては、知覚されるのに十分なレベルのELF電界曝露の開始後の短時間のストレスがある）。同様に、実施された研究は少数だが、その大半では、成長ホルモン、および、代謝活動の制御に関与している、または生殖および性的発育の制御に関係しているホルモンのレベルにおける、否定的または一貫性のない影響が示されている。

全体として、これらのデータは、ELF電界および／または磁界が、ヒトの健康に有害な影響を与えるほどには神経内分泌系に影響することを示しておらず、よって証拠は不十分であると考えられる。

### 1.1.6 神経変性疾患

ELF界への曝露といくつかの神経変性疾患と関連しているという仮説が立てられている。パ

一キンソン病と多発性硬化症（MS）については、研究の数が少なく、これらの疾病との関連性を示す証拠はない。アルツハイマー病と筋萎縮性側索硬化症（ALS）については、より多くの研究が公表されている。これらの報告には、電氣的職業に就いている人々はALSに対するリスクが高まるかもしれないことを示しているものもある。この関連性は、電気ショックなどの電氣的職業と関連する交絡因子のために起こる可能性があるものの、これまで、この関連性を説明できる生物学的メカニズムは認められていない。全体として、ELF曝露とALSとの関連性についての証拠は不十分であると考えられる。

ELF曝露とアルツハイマー病との関連性を調べている少数の研究には一貫性がない。しかし、アルツハイマー病の死亡率ではなく罹患率に焦点を置いた高品質の研究では、関連性が示されていない。まとめると、ELF曝露とアルツハイマー病との関連性についての証拠は不十分である。

### 1.1.7 心血管系疾患

短期および長期曝露の実験研究はいずれも、電気ショックは明白な健康ハザードであることを示しているが、環境または職業的に通常遭遇する曝露レベルでは、ELF界と関連する他の危険な心血管影響が起こることはなさそうである。文献上で様々な心血管変化が報告されているが、影響の大部分は小さく、その結果は、研究の内部および研究間で一貫性がない。1つの例外を除き、心血管疾患の罹患率と死亡率に関する研究では、曝露との関連性は示されていない。曝露と心臓の自律調整の変化との間に特別な関連性が存在するかどうかは依然として類推的である。全体として、ELF曝露と心血管疾患との関連性を支持する証拠はない。

### 1.1.8 免疫学と血液学

ELF電界または磁界が免疫系の構成要素に及ぼす影響に関する証拠は、全体として一貫性に欠ける。細胞集団と機能的マーカーの多くは曝露に影響されなかった。しかしながら、 $10\ \mu\text{T}$ ～ $2\text{mT}$ の磁界を用いた一部のヒト研究では、ナチュラルキラー細胞の増加または減少、および白血球の総数（変化なしまたは減少）に変化が観察された。動物研究では、ナチュラルキラー細胞の活性の低下が雌マウスに見られたが、雄マウスまたは雌雄のラットには見られなかった。白血球数も、研究によって減少または変化なしが報告されており、不一致が示されている。動物の曝露は、 $2\ \mu\text{T}$ ～ $30\ \text{mT}$ とさらに広範囲であった。これらのデータの潜在的な健康影響を解釈する際に困難となるのは、曝露と環境条件が大きく異なること、実験動物が比較的少数であること、さらにエンドポイントが広範囲にわたることである。

ELF磁界が血液系に及ぼす影響について実施されている研究は少ない。分化した白血球数を評価した実験で、曝露範囲は $2\ \mu\text{T}$ ～ $2\ \text{mT}$ を用いた。ELF磁界への急性曝露、またはELF電界と磁界を組み合わせた急性曝露では、ヒトまたは動物研究のいずれにおいても一貫した影響は見られなかった。

ゆえに全体として、ELF電界または磁界が免疫系または血液系に影響を及ぼす証拠は不十分であると考えられる。

### 1.1.9 生殖および発育

概して、疫学調査では、ヒトの有害な生殖影響と母親や父親のELF界への曝露との関連性は示されていない。母親の磁界曝露と関連して自然流産のリスクが増加するという証拠もいくつかあるが、この証拠は不十分である。

150 kV m<sup>-1</sup>までのELF電界への曝露が、大集団サイズや数世代にわたる曝露研究を含め、数種類の哺乳類で評価されている。その結果は、一貫して有害な発育の影響が見られないことを示している。

20mTまでのELF磁界に曝露された哺乳類には、全体として外見、内臓または骨格の形成異常は見られなかった。いくつかの研究では、ラットとマウスの両方で若干の骨格異常の増加が示されている。骨格の変化は、催奇形性試験では比較的一般的な知見であり、生物学的には意味がないと考えられることが多い。しかしながら、磁界が骨格形成に及ぼす微妙な影響は排除できない。生殖影響を扱った公表済みの研究は非常に少なく、何らかの結論を導き出すことはできない。

哺乳類以外の実験モデル（ニワトリの胚、魚、ウニおよび昆虫）についての幾つかの研究では、 $\mu$ T レベルの磁界が初期の発育を妨げるかもしれないことを示す知見が報告されている。しかしながら、これら哺乳類以外の実験モデルにおける知見は、対応する哺乳類研究よりも、発育毒性の総合評価における重みは低い。

全体として、発育および生殖への影響についての証拠は不十分である。

### 1.1.10 がん

ELF磁界を「ヒトに対して発がん性があるかもしれない」とした国際がん研究機関の分類（IARC, 2002）は、2001年とそれ以前の利用可能なすべてのデータに基づいている。本EHCモノグラフにおける文献レビューでは、主にIARCのレビュー以後に公表された研究に重点を置く。

#### 疫学

IARCの分類は、小児白血病に関する疫学調査で観察された関連性によって大きく影響された。この証拠は限定的という分類は、2002年以後に公表された小児白血病に関する2件の研究を追加しても変更されなかった。IARCモノグラフの公表以来、他の小児がんに関する証拠は依然として不十分である。



IARCモノグラフ以後、ELF磁界曝露と関連した成人女性の乳がんリスクに関する報告がいくつか公表されている。これらの研究は従来のもよりも大規模で、バイアスに影響されにくく、全体として否定的である。これらの研究により、ELF磁界曝露と女性の乳がんリスクとの関連性についての証拠は著しく弱められ、この種の関連性は支持されていない。

成人の脳腫瘍と白血病に関しては、IARCモノグラフ以後に公表された新たな研究は、ELF磁界曝露とこれらの疾患リスクとの関連性に関する全体的な証拠は依然として不十分であるという結論を変更するものではない。

その他の疾病およびその他の全てのがんについては、証拠は依然として不十分である。

### **実験動物研究**

最も一般的な型の小児白血病である、急性リンパ芽球性白血病の動物モデルは現在のところない。ラットを用いた3件の独立した大規模研究では、自然発生乳がんの発症率に及ぼすELF磁界の影響の証拠は示されていない。ほとんどの研究では、ELF磁界は齧歯類モデルにおける白血病またはリンパ腫に影響しないことが報告されている。マウスの多世代研究では、リンパ腫の増加が報告されているが、技術的に不適切であった。齧歯類のいくつかの大規模長期研究では、造血系、乳腺、脳および皮膚の腫瘍を含め、どの種類のがんにも一貫した増加は示されていない。

ELF磁界がラットの化学物質誘発乳がんおよび影響については、かなりの数の研究が検討された。実験プロトコルの全部または一部に違い（例えば特殊な亜種の使用）があるため、一貫した結果が得られていない。ELF磁界が化学物質誘発または放射線誘発白血病／リンパ腫モデルに及ぼす影響に関するほとんどの研究は否定的であった。新生物発生前の肝病変、化学物質誘発皮膚腫瘍および脳腫瘍の研究では、主に否定的な結果が報告されている。ある研究では、ELF磁界への曝露によってUV誘発皮膚腫瘍の発生が加速されることが報告されている。

2つのグループが、*in vivo*でのELF磁界曝露後の脳組織におけるDNA鎖切断のレベルの上昇を報告している。しかしながら、他のグループが各種の齧歯類の遺伝毒性モデルを用いたところ、遺伝毒性作用の証拠は何ら見られなかった。遺伝毒性以外のがん関連の作用について調べた研究結果は決定的なものではない。

全体として、ELF磁界への曝露のみによって腫瘍が誘発されることを示す証拠はない。ELF磁界曝露が発がん性物質と組み合わせられた場合に腫瘍の進行が高まるかもしれないという証拠は不十分である。

### ***In vitro* 研究**

一般的に、細胞のELF曝露の影響に関する研究では、50 mT以下の磁界では遺伝毒性を誘発し

ないことが示されている。注目すべき例外は、 $35\mu\text{T}$ ほどの低い磁界強度におけるDNA損傷に関する最近の研究からの証拠である。但し、これらの研究はまだ評価中であり、これらの知見について我々は完全に理解していない。ELF磁界がDNA損傷因子と相互作用する可能性があるという証拠も増えている。

ELF磁界によって細胞周期の調節と関連する遺伝子が活性化されることを示す明確な証拠はない。但し、全遺伝子の反応を解析する体系的研究はまだ実施されていない。

その他の細胞研究、例えば細胞増殖、アポトーシス、カルシウムシグナル、悪性転換に関する研究多くでは、一貫性のない、または決定的でない結果が示されている。

### 全体的な結論

IARCモノグラフ（2002年）以後に公表された、新規のヒト、動物およびin vitroの研究は、ELF磁界がヒトに対して発がん性があるかもしれないという全体的な分類を変更するものではない。

#### 1.1.11 健康リスク評価

WHO憲章によれば、健康とは完全な肉体的、精神的および社会的福祉の状態であり、単に疾病又は病弱の存在しないことではない。リスク評価は、健康または環境上の結果の評価に関連する情報の構造的なレビューのための概念的な枠組みである。健康リスク評価は、ある曝露が特定の行動を必要とするかどうか、また、そうした行動の実施に関する決定を下すのに必要なすべての活動を包含する、リスク管理に対するインプットとして利用可能である。

ヒトの健康リスクの評価において、ヒトに関する具体的なデータは一般に、利用可能な場合にはいつでも、動物データよりも有益である。動物およびin vitro研究は、ヒト研究からの証拠を支持したり、ヒト研究からの証拠に残されたデータのギャップを埋めたり、ヒト研究が不十分または存在しない場合においてリスクについての決定を下すのに用いることができる。

すべての研究は、肯定的または否定的な影響のいずれについても、それ自身の特徴に基づき、そしてその後の証拠の重みアプローチにおいて全体として、評価・判断する必要がある。どれくらいの証拠のセットがあれば、曝露がある結果を生じる確率を変化させるかを決定することが重要である。一般に、ある影響についての証拠は、異なる種類の研究（疫学または実験室）で同様の結論が示された場合、および／または複数の同種の研究で同じ結果が示された場合、さらに強められる。

### 急性影響

100kHzまでの周波数範囲のELF電界および磁界への曝露については、健康に対して悪影響を生じうる急性の生物学的影響が認められている。ゆえに、曝露限度が必要である。この問題に

対処する国際的ガイドラインが存在する。これらのガイドラインを遵守することにより、急性影響に対する適切な防護が得られる。

### 慢性影響

日常的な、慢性的な低強度（0.3～0.4  $\mu$ T以上）の商用周波数磁界への曝露が健康リスクを生じるということを示唆する科学的証拠は、小児白血病のリスク上昇についての一貫したパターンを示す疫学研究に基づいている。このハザードの評価における不確かさには、選択バイアスおよび曝露の誤分類のコントロールが、観察されている磁界と小児白血病との関連性において果たすかもしれない役割が含まれる。加えて、事実上すべての実験室での証拠およびメカニズムに関する証拠は、低レベルのELF磁界と生物学的機能または疾患状態の変化との関連を支持することができていない。ゆえに、全体として、因果関係があると考えられるほどには証拠は強くないが、関心を残すには十分に強い。

磁界曝露と小児白血病との間の因果関係は認められていないものの、政策に対して潜在的に有益な情報を提示するため、その因果関係を仮定した上で、公衆衛生上のインパクトの可能性が計算されている。但し、この計算は曝露分布およびその他の仮定とは全く無関係であり、ゆえに極めて不正確である。（磁界曝露と小児白血病との間の）関連性が因果関係であると仮定すると、磁界曝露に帰することができるかもしれない小児白血病の症例数は世界全体で毎年100～2400人と推定される。但し、これは2000年に49000人と推定されている小児白血病の年間発症数の0.2～4.9%である。ゆえに、地球規模では、公衆衛生上のインパクトは、仮にあったとしても限定的で不確かであろう。

その他のいくつかの疾患が、ELF磁界曝露との関連の可能性について調べられている。これらには、小児および成人のその他のがん、抑うつ、自殺、生殖機能不全、発育異常、免疫学的修飾、神経学的疾患が含まれる。ELF磁界とこれらの疾患とのつながりを支持する科学的証拠は、小児白血病についてよりもさらに弱く、いくつかの場合（例えば、心血管疾患や乳がん）においては、磁界が疾患を誘発しないと確信するのに十分な証拠がある。

#### 1.1.12 防護措置

ELF電界および磁界への曝露による認められた有害影響に対する防護のため、曝露限度を履行することが必須である。これらの曝露限度は、関連するすべての科学的根拠の徹底的な調査に基づくことが望ましい。

認められている影響は急性影響のみであり、この影響からの防護のためにデザインされた国際的な曝露限度は二つある（ICNIRP, 1998a ; IEEE, 2002）。

これらの認められた急性影響に加えて、慢性影響の存在についての不確かさがある。これは、ELF磁界への曝露と小児白血病との相関の限定的な証拠があるためである。ゆえに、プレコー

シヨンのアプローチの使用が正当化される。しかしながら、曝露ガイドラインの限度値を、プレコーシヨンの名の下に恣意的なレベルに引き下げることが推奨されない。そのような行為は、限度値が依拠する科学的基礎を損ない、また高価で必ずしも有効でない防護策となるであろう。

曝露を低減するための、その他の適切なプレコーシヨンの方策の実施は合理的であり、正当化される。但し、電力は明白な健康上・社会的・経済的便益をもたらしており、プレコーシヨンのアプローチはこれらの便益を損なうべきではない。さらに、ELF磁界への曝露と小児白血病との相関についての証拠の弱さ、および、仮に相関があったとしても、それが公衆衛生に及ぼす影響は限定的であることから、曝露低減が健康にもたらす便益は不明である。ゆえに、プレコーシヨンの措置の費用は非常に低いものであることが望ましい。曝露低減の実施費用は国によって異なるので、費用とELF界からの潜在的リスクとのバランスを取るための一般的な奨励を提示することは困難である。

上記の観点から、以下の奨励を提示する。

- 政策立案者は、ELF電界および磁界への急性曝露に対する一般公衆および職業者の防護のためのガイドラインを制定すべきである。曝露レベルおよび科学的レビューのための原則に関する、このガイダンスのための最良の情報源は、国際的ガイドラインである。
- 政策立案者は、ELF電磁界についての防護計画を制定すべきである。これには、ガイドラインの限度を超えないことを確認するため、全ての発生源からの電磁界の測定が含まれる。
- 電力の健康上・社会的・経済的便益を損なわない限り、曝露を低減するための非常に低費用のプレコーシヨンの方策を実施することは合理的であり、是認される。
- 政策立案者、地域社会の計画担当者、製造業者は、新たな施設の建設や、新たな機器（電気製品を含む）の設計の際に、非常に低費用の方策を実施すべきである。
- 安全性の向上といったその他の追加的便益がある、または費用がかからないか非常に低い場合に限り、装置や機器からのELF曝露を低減するため、工学的慣行の変更を検討すべきである。
- 既存のELF発生源の変更を検討する際、安全性、信頼性、経済性の見地とともに、ELF界の低減を考慮すべきである。
- 地方当局は、意図しない大地電流を低減するため、新たな設備の建設または既存の施設の再配線の際の配線に関する規制を施行すべきである。配線の違反または既存の問題を確認する積極的な方策は費用がかかると思われるので、正当化されそうにない。
- 各国当局は、すべての利害関係者による、情報に基づいた意思決定を可能とする、効果的で開かれたコミュニケーション戦略を実行すべきである。これには、個人が自分の曝露を低減できる方法に関する情報提供を盛り込むべきである。
- 地方当局は、主要なELF電磁界発生源の立地を決定する際に、産業界、地方自治体、市民の間で良好な協議を含むなど、ELF電磁界発生施設の計画を改善すべきである。
- 政府および産業界は、ELF電界および磁界への曝露の健康影響に関する科学的証拠における不確かさを低減するための研究プログラムを推進すべきである。

## 1.2 研究に関する奨励

ELF界への曝露による健康影響の可能性に関する知識のギャップを同定することは、健康リスク評価において不可欠である。これは、更なる研究のための以下の奨励につながっている（表1に要約）。

この領域のデータが欠落している現状を鑑み、全てを包括する必要事項として、通常は300Hz～100kHzとされる中間周波数（IF）に関する更なる研究が必要である。健康リスク評価に必要とされる知識ベースが極僅かしか集まっておらず、既存の研究の多くは結果が一貫していないので、さらなる具体化が必要である。健康リスク評価のための十分なIFデータベースを構成するための一般的な要件には、曝露評価、疫学研究、ヒト実験室研究、動物および細胞（in vitro）研究が含まれる（ICNIRP, 2003 ; ICNIRP, 2004 ; Litvak, Foster & Repacholi, 2002）。

加えて、すべてのボランティア研究について、ヒト被験者に関する研究は、ヘルシンキ宣言（WMA, 2004）の条項を含む倫理原則に完全に準拠して実施することが義務付けられている。

実験室研究については、報告されている以下の反応に対し、優先順位を与えることが望ましい：(i) それについて再現または確認された証拠が少なくともいくつかあるもの、(ii) 発がんや潜在的に関連するもの（例：遺伝毒性）、(iii) メカニズムの分析が可能なほど十分に強いもの、(iv) 哺乳類またはヒトにおいて生じるもの。

### 1.2.1 発生源、測定、および曝露

内部および外部の発生源の相対的寄与度、配線／接地慣習の影響、およびその他の住居の特徴を同定するため、異なる国々における ELF 曝露レベルが高い住居のさらなる特徴付けは、疫学評価のための関連する曝露指標の同定に見識を与えることができるであろう。胎児および小児の ELF 界への曝露（特に、電熱式床暖房からの居住環境曝露および集合住宅内の変圧器からの曝露）のより良い理解が、重要な要素である。

いくつかの職業曝露において、現行の ELF ガイドラインの制限値を超えることがありうる。例えば、活線保守作業、MRI 磁石の空間内部または周囲での作業（すなわち勾配切換え ELF 界への曝露）、輸送システムでの作業、に関連する曝露（商用周波数以外への曝露を含む）について、さらなる情報が必要である。同様に、ガイドラインの制限値に近づく可能性のある一般公衆の曝露（例：保安装置、図書館の消磁装置、誘導加熱調理器、湯沸し器といった発生源）についての知識を増やす必要がある。

接触電流への曝露が、ELF 磁界と小児白血病との関連についての可能性のある説明として提案されている。居住環境での電氣的接地および配管の慣習が住居内に接触電流を生じる可能性を評価するため、米国以外の国々での研究が必要である。ELF と小児白血病に関する重要な疫

学研究の結果がある国々において、そのような研究を実施することは、優先順位が高いであろう。

### 1.2.2 ドシメトリ

過去においては、大半の実験室研究は基礎的指標としての体内誘導電流に基づいており、ドシメトリはこの物理量に着目していた。外部からの曝露と誘導電界との関連の探求が始まったのは最近のことである。生物学的影響のより良い理解のため、異なる曝露条件に対する内部電界についてのより多くのデータが必要である。

異なる配置の外部電界および磁界の複合的影響による内部電界の計算を実施することが望ましい。基本制限への遵守問題を評価するため、位相が異なる電界および磁界のベクトル合成、および空間的に変動する電界および磁界の寄与度が必要である。

適切な解剖学的モデリングを有する妊婦および胎児の改良モデルについての計算は、極少数しか実施されていない。小児白血病の問題に関連して、胎児に生じる可能性のある強い誘導電界を評価することが重要である。母親の職業曝露および居住環境曝露の両方がこれに関係している。

誘導電界の影響に対してより敏感であることが同定されている、神経網およびその他の複雑な器官以下の系の細胞構造を考慮するためのマイクロドシメトリ・モデルを改善する必要がある。このモデリングの過程では、細胞膜の電氣的ポテンシャルおよび神経伝達物質の放出への影響を考慮する必要もある。

### 1.2.3 生物物理学メカニズム

現状におけるメカニズムの理解において、明白な制約がある主要な領域が3つある。これらは、ラジカルペア・メカニズム、身体内の磁性粒子、および、神経網のような多細胞系統における信号/雑音比 (S/N 比) である。

ラジカルペア・メカニズムは、より妥当な低レベル相互作用メカニズムの一つであるが、細胞の代謝および機能において有意な影響を仲介できるということはまだ示されていない。ラジカルペアが発がんのメカニズムに関連しているかどうかを判断するため、それが作用する曝露の下限値を理解することが特に重要である。ELF 界に曝露された免疫細胞内で活性酸素種が増加することが示された最近の研究に鑑み、免疫反応の一部として活性酸素種を産出する免疫系の細胞を、潜在的なラジカルペア・メカニズムを調査するための細胞モデルに用いることを奨励する。

現時点における証拠に基づけば、ヒトの脳における磁性粒子 (マグネタイト結晶) の存在が、環境中の ELF 磁界に対する感受性を与えることはなさそうであるが、特定の条件下でそのよう

な感受性が存在するかどうかを、さらなる理論的および実験的アプローチによって探求することが望ましい。さらに、マグネタイトの存在による、上記で論じたラジカルペア・メカニズムへの何らかの改変を追跡することが望ましい。

その定量化またはそれに対する制限の決定のための理論的枠組みを開発するため、S/N 比を改善するための多細胞メカニズムが脳内で働く範囲をさらに調査することが望ましい。海馬および脳のその他の部位における、神経網の閾値および周波数反応のさらなる調査を、*in vitro* アプローチを用いて実施することが望ましい。

#### 1.2.4 神経行動

睡眠と精神的負荷作業課題遂行に及ぼす影響の可能性について、調和の取れた手法を用いた実験室ベースのボランティア研究を奨励する。以前に使用されたよりも高い磁束密度と広範囲な周波数（即ち、キロヘルツ範囲）における曝露量－反応関係を同定する必要がある。

成人ボランティアおよび動物研究から、認知への急性影響は、強い電界または磁界への短期間の曝露で生じることが示唆されている。このような影響の特徴付けは、曝露ガイダンスの策定にきわめて重要であるが、小児の電磁界依存性影響に関する個別のデータが不足している。定期的に職業曝露を受ける成人および子供を含む、ELF界に曝露される人々の認知および脳電図（EEG）の変化について、実験室ベースの研究を実施することを奨励する。

未成熟な動物を用いた行動研究から、小児の認知影響の可能性についての有益な指標が提示されている。出生前と出生後のELF磁界への曝露が神経系の発育および認識機能に及ぼす影響を研究することが望ましい。これらの研究は、ELF磁界および誘導電界への曝露が神経細胞の成長に及ぼす影響に関する、脳切片または培養したニューロンを用いた研究によって補足される。

動物のオピオイドおよびコリン性反応を示す実験データによって示唆されている潜在的な健康結果を、更に調査する必要がある。動物のオピオイドおよびコリン性反応の変調を調査する研究を拡張することが望ましい。これらの行動反応についての曝露パラメータおよびメカニズムの生物学的基礎を定義することが望ましい。

#### 1.2.5 神経内分泌系

神経内分泌反応に関する既存のデータベースから、ELF曝露がヒトの健康に有害な影響を与えることは示されていない。ゆえに、さらなる研究に関して奨励することはない。

#### 1.2.6 神経変性疾患

「電氣的職業」では筋萎縮性側索硬化症（ALS）のリスクが高まることが、いくつかの研究

で観察されている。ELF磁界がこの稀な神経変性疾患の原因に関与しているかどうかを見出すため、この関連性をさらに調査することが重要と考えられる。この研究では、ELF磁界曝露、電気ショック曝露、ならびにその他の潜在的リスク因子への曝露に関する情報を含む、大規模な前向きコホート研究が必要である。

ELF磁界がアルツハイマー病のリスク因子を構成するかどうかは依然として疑問である。現在の利用可能なデータは十分ではなく、この関連性をさらに調査することが望ましい。特に重要なことは、死亡率データではなく、罹患率データを使用することである。

### **1.2.7 心血管疾患**

ELF磁界と心血管疾患のリスクとの関連性についてのさらなる研究は、優先順位が高いとは考えられない。

### **1.2.8 免疫学および血液学**

ELF磁界に曝露された成人の免疫および血液学的パラメータにおいて観察された変化には矛盾が示されており、子供に関する利用可能な研究データは本質的にはない。ゆえに、ELF曝露が未成熟な動物の免疫系および造血系の発育に及ぼす影響についての研究を実施することを奨励する。

### **1.2.9 生殖および発育**

ELF磁界曝露と流産のリスク上昇との関連についての証拠がいくつかある。このような関連性が公衆衛生に及ぼす影響は潜在的に高いことを考慮して、さらなる疫学研究を奨励する。

### **1.2.10 がん**

疫学データ（ELF磁界曝露と小児白血病のリスク上昇との関連性を示している）と実験およびメカニズムに関するデータ（上記の関連性を支持していない）との不一致を解決することが、この領域における研究の中で優先順位が最も高い。これについて、疫学者と実験科学者との共同研究を奨励する。新たな疫学研究を有益なものとするには、曝露の新たな側面、他の因子との潜在的相互作用、または高曝露群に着目するか、あるいはこの研究領域における革新的な別の方法を用いなければならない。加えて、最近の研究データを追加、および新たな見識をこの分析に適用することにより、既存のプール分析を更新することも奨励する。

小児の脳腫瘍に関する研究では、一貫性のない結果が示されている。小児白血病と同様に、小児の脳腫瘍に関する研究のプール分析が、非常に有益なものとなるはずであり、よってこれを奨励する。そのようなプール分析は、既存のデータに対して、選択バイアスの可能性に関するものを含む、より多くのより良い見識を、費用のかからない方法でもたらすことができる。



また、そうした研究が十分に均質ならば、リスクの最良推定値を提示することができる。

成人の乳がんについての最近の研究では、ELF磁界への曝露との関連性はないことが明白に示されている。ゆえに、この関連性についてのさらなる研究には低い優先順位を与えることが望ましい。

成人の白血病および脳腫瘍については、職業的に曝露された個人に関する既存の大規模コホート研究を更新することを奨励する。白血病および脳腫瘍に関する職業研究、プール分析およびメタ分析は、一貫性がなく決定的でない。但し、その後公表された新たなデータを、これらの分析の更新に利用することが望ましい。

研究室間での広範なやり取りが可能な、低レベルELF磁界への反応に関するin vitroおよび動物モデルを確立することにより、疫学的証拠に対処することに優先順位を与える。

ELF磁界曝露の影響を研究するための適切な実験動物モデルを提供するため、小児白血病についてのトランスジェニック齧歯類モデルを開発することが望ましい。既存の動物研究については、証拠の重みは、ELF磁界単独では発がん作用がないを示している。ゆえに、ELF磁界が発がん補助因子として厳密に評価されている、in vitroおよび動物研究に対して高い優先順位を与えることが望ましい。

その他のin vitro研究に関しては、間欠的なELF磁界曝露の遺伝毒性を報告している実験を再現することが望ましい。

### 1.2.11 防護措置

科学的に不確かな分野における健康防護政策の策定および政策の実施に関する研究奨励、特に、ELF磁界およびその他の「ヒトに対して発がん性があるかもしれない」と分類された因子に対するプレコーションの使用、プレコーションの解釈、プレコーション的措置の影響の評価、を奨励する。ある因子が社会に課す潜在的な健康リスクについて不確かさが存在する場合、公衆および作業員の適切な防護を確実にするため、プレコーション的措置は是認されるかもしれない。ELF磁界に関するこの問題については限られた研究しか実施されていない。その重要性から、さらなる研究が必要である。これは、各国がプレコーションを健康防護政策に統合することを支援するであろう。

特に電磁界に焦点を当てた、リスク認知およびコミュニケーションに関するさらなる研究が望ましい。リスク認知全般に影響を及ぼす心理学的および社会学的要因が広く調査されている。但し、電磁界に関してこれらの要因の相対的重要性を分析する、または電磁界に特有のその他の要因を同定するために実施されている研究は限られている。最近の研究では、リスクに関する暗黙のメッセージを伝えるプレコーション的措置は、懸念を増す、または減らすことによって、リスク認知を改変しうることを示唆されている。ゆえに、この領域におけるより深い調査

が正当化される。

ELF磁界の緩和に関する費用対便益／費用対効果分析の開発に関する研究を実施することが望ましい。ある政策オプションが社会にとって有益かどうかを評価するために費用対便益および費用対効果分析を使用することは、公共政策の多くの分野において研究されている。ELF磁界についてこの分析を実施するため、どのパラメータが必要かを同定する枠組みの開発が必要である。この評価における不確かさのため、定量化可能および定量化不能なパラメータを組み込む必要がある。

<b>表1 さらなる研究のための奨励</b>		
<b>発生源、測定および曝露</b>		<b>優先順位</b>
	異なる国々における ELF 磁界曝露が高い住居のさらなる特徴付け	中
	職業的 ELF 曝露 (MRI 内部等) についての知識のギャップの同定	高
	米国以外の国における居住環境の配線が子供に接触電流を誘導する可能性の評価	中
<b>ドシメトリ</b>		
	外部の電界および磁界と体内の電界とを関連付けるさらなる計算ドシメトリ, 特に異なる向きの電界と磁界への複合曝露に関して	中
	妊婦および胎児における誘導電界および誘導電流の計算	中
	神経網およびその他の複雑な器官以下の系の細胞構造を考慮した, マイクロドシメトリック・モデルのさらなる洗練	中
<b>生物物理学的メカニズム</b>		
	表現型機能の一部として活性酸素種を生成する免疫細胞内でのラジカルペア・メカニズムのさらなる研究	中
	ELF 磁界への感受性におけるマグネタイトの役割の可能性についてのさらなる理論的および実験的研究	低
	理論的および <i>in vitro</i> アプローチを用いた, ELF によって誘導される内部電界が神経網等の多細胞組織に及ぼす閾値反応の決定	高
<b>神経行動</b>		
	ボランティア (小児および職業的に曝露される被験者を含む) の認識, 睡眠および EEG 研究, 高い磁束密度の広範な ELF 周波数を用いる	中
	出生前および出生後の動物の曝露がその後の認識機能に及ぼす影響に関する研究	中
	動物のオピオイドおよびコリン性反応についてのさらなる研究	低
<b>神経変性疾患</b>		
	「電氣的」職業における, および ELF 磁界曝露に関連する筋萎縮性側索硬化症のリスクについてのさらなる研究, および ELF 磁界曝露に関連するアルツハイマー病についてのさらなる研究	高
<b>免疫学および血液学</b>		
	ELF 磁界曝露が未成熟の動物の免疫および造血系の発育に及ぼす影響に関する研究	低
<b>生殖および発育</b>		
	流産と ELF 磁界曝露との相関の可能性についてのさらなる研究	低
<b>がん</b>		
	小児白血病に関する既存のプール分析の新たな情報による更新	高
	小児の脳腫瘍に関する既存の研究のプール分析	高
	成人の白血病, 脳腫瘍, 職業的に曝露される集団に関する既存のプール分析およびメタ分析の更新	中

	ELF 研究に用いるための小児白血病のトランスジェニック齧歯類モデルの開発	高
	In vitro および動物研究を用いた発がん補助作用の評価	高
	In vitro 遺伝毒性研究の再現	中
<b>防護措置</b>		
	科学的に不確かな分野における健康防護政策の策定および政策実施に関する研究	中
	電磁界に焦点を当てた、リスク認知およびコミュニケーションに関するさらなる研究	中
	ELF 界の緩和に関する費用対便益／費用対効果分析の開発	中