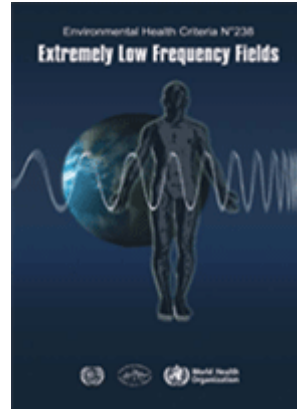


WHO 電磁波プロジェクト
環境保健基準モノグラフ 第238巻

超低周波電磁界

Extremely Low Frequency Fields

Environmental Health Criteria Monograph No.238



【序言／目次／第1章／第12章／第13章の全訳】

翻訳：上田昌文（NPO 法人市民科学研究室）

【訳者からのひとこと】

この翻訳は、世界保健機構（WHO）の「電磁波プロジェクト」が10年をかけてまとめた『環境保健基準 超低周波電磁界』の部分的な日本語訳です。翻訳したのは、以下の「目次」において赤字で示した章（序言、目次、第1章、第12章、第13章、付録）であり、それぞれの章は全文訳になっています。2007年6月18日にWHO電磁波プロジェクトのサイトに公開されたこの文書は、全体で400ページにもなる大冊です。現在日本では、経済産業省が組織したワーキンググループにおいて低周波電磁界の防護対策が検討されている最中であり、この問題に関心のある方々に、防護対策に特に関連が深い部分を選んで、できるだけ早く正確に翻訳して提供することが重要であると考えました。この翻訳を今後の議論に役立ててもらえればと思います。専門用語については極力、定訳のあるものはそれを用いるようにしました。誤訳のないように努めました。もし何か訳文に関してお気づきの点がありましたら、市民科学研究室までご連絡ください。なお、この翻訳文を引用や転載される場合は、訳者名を添えるようにしていただけると幸いです。

2007年7月13日

上田昌文（NPO 法人市民科学研究室・代表）

目次

序言

世界保健機構環境保健基準計画

電磁場

領域

方法

極超低周波数環境保健基準

世界保健機構専門家ワーキンググループ参加者

謝辞

略語

1 要約および今後の研究のための勧告

1.1 要約

1.1.1 発生源、測定法および曝露

1.1.2 生体内の電磁界

1.1.3 生物物理学的メカニズム

1.1.4 神経行動的反応

1.1.5 神経内分泌系

1.1.6 神経変性疾患

1.1.7 心血管疾患

1.1.8 免疫および血液

1.1.9 生殖および発育

1.1.10 癌

1.1.11 健康リスク評価

1.1.12 防護手段

1.2 研究のための勧告

1.2.1 発生源、測定法および曝露

1.2.2 線量測定

1.2.3 生物物理学的メカニズム

1.2.4 神経行動学的反応

1.2.5 神経内分泌系

1.2.6 神経変性疾患

1.2.7 心血管疾患

1.2.8 免疫および血液

1.2.9 生殖および発育

1.2.10 癌

1.2.11 防護手段

2 発生源、測定法および曝露

2.1 電場および磁場

2.1.1 場の概念

2.1.2 量および単位

2.1.3 指向性

2.1.4 時間変化・調波および変動

2.1.5 場の動揺、遮蔽

2.2 交互場の発生源

2.2.1 電場

2.2.1.1 自然発生源

2.2.1.2 人工場

2.2.2 磁場

2.2.2.1 自然発生源

2.2.2.2 人工場

2.3 曝露の評価

2.3.1 一般的考察

2.3.2 磁場への住居内曝露の評価：計測をふくまない方法

2.3.2.1 距離

2.3.2.2 室内コード

2.3.2.3 場の蓄積の計算

2.3.3 磁場の住居内曝露の評価：計測をもちいた方法

2.3.3.1 住居内の即時計測

2.3.3.2 住居内の長期計測

2.3.3.3 個人的曝露の監視

2.3.4 装置からの磁場への曝露の評価

2.3.5 学校での曝露の評価

2.3.6 磁場への非職業的曝露の評価：議論

2.3.7 磁場への職業的曝露の評価

2.3.8 電場への曝露の評価

2.3.9 曝露評価：結論

3 生体内の電磁界

3.1 序論

3.2 動物および人体の模型

3.3 電場線量計測

- 3.3.1 基本的な相互作用機構
- 3.3.2 計測
- 3.3.3 計算
- 3.3.4 計測と計算の比較
- 3.4 磁場線量計測
 - 3.4.1 基本的な相互作用機構
 - 3.4.2 計算：単一場
 - 3.4.3 計算：非単一場
 - 3.4.4 計算：実験室間比較および模型効果
- 3.5 接触電流
- 3.6 各種曝露の比較
- 3.7 顕微鏡的線量計測
- 3.8 結論

4 生物物理学的メカニズム

- 4.1 序論
- 4.2 蓋然性の概念
- 4.3 推計学的効果・限界値および用量反応関係
- 4.4 誘導電流と場
 - 4.4.1 場に誘導される電流
 - 4.4.2 雑音との比較
 - 4.4.3 脊髄神経刺激限界値
 - 4.4.4 神経網と信号検知
 - 4.4.5 変動
 - 4.4.6 誘導電流の熱的効果
 - 4.4.7 誘導電流に関する要約
- 4.5 場のその他の直接的効果
 - 4.5.1 イオン化と結合の破壊
 - 4.5.2 荷電粒子にはたらく力
 - 4.5.3 磁化粒子のはたらく力
 - 4.5.4 遊離基
 - 4.5.5 せまい帯域幅の効果
 - 4.5.5.1 サイクロトロン共鳴
 - 4.5.5.2 ラーモア際差運動
 - 4.5.5.3 量子力学的共鳴現象
 - 4.5.6 推計学的共鳴
- 4.6 場の間接的効果

- 4.6.1 表面荷電および微小衝撃
- 4.6.2 接触電流
- 4.6.3 宇宙線の偏向
- 4.6.4 空中汚染物質への効果
 - 4.6.4.1 コロナイオンの生成
 - 4.6.4.2 汚染微粒子の吸入
 - 4.6.4.3 力線下の曝露
 - 4.6.4.4 健康への含意
- 4.7 結論

5 神経行動学的反応

- 5.1 電気生理学的考察
- 5.2 被験者による実験
 - 5.2.1 表面荷電
 - 5.2.2 神経刺激
 - 5.2.3 網膜機能
 - 5.2.4 脳の電氣的活動
 - 5.2.5 睡眠
 - 5.2.6 知覚効果
 - 5.2.7 過敏性
 - 5.2.8 気分と機敏性
- 5.3 疫学的研究
 - 5.3.1 抑鬱
 - 5.3.2 自殺
- 5.4 動物実験
 - 5.4.1 知覚と場の検知
 - 5.4.2 覚醒と忌避
 - 5.4.3 脳の電氣的活動
 - 5.4.4 神経伝達機能
 - 5.4.5 知覚機能
- 5.5 結論

6 神経内分泌系

- 6.1 被験者による実験
 - 6.1.1 松果体ホルモン：メラトニン
 - 6.1.1.1 実験室での研究
 - 6.1.1.2 住居および作業場での研究

6.1.2 下垂体その他のホルモン

6.2 動物実験

6.2.1 メラトニン

6.2.1.1 室内飼育した齧歯類

6.2.1.2 季節繁殖性の動物

6.2.1.3 ヒト以外の霊長類

6.2.2 下垂体その他のホルモン

6.2.2.1 下垂体・副腎効果

6.2.2.2 その他の内分泌研究

6.3 試験管実験

6.3.1 試験管内でのメラトニン生成への影響

6.3.2 試験管内でのメラトニン活性への影響

7 神経変性疾患

7.1 アルツハイマー病

7.1.1 病理学

7.1.2 疫学

7.2 筋萎縮性側索硬化症

7.2.1 病理学

7.2.2 疫学

7.3 パーキンソン病、多臓器硬化

7.3.1 病理学

7.3.2 疫学

7.4 議論

7.5 結論

8 心血管疾患

8.1 急性的影響

8.1.1 心電図変化、心拍数およびその変動

8.1.2 血圧

8.2 長期的影響

8.3 議論

8.3.1 心拍数変動仮説

8.3.2 疫学的証拠

8.4 結論

9 免疫および血液

- 9.1 免疫系
 - 9.1.1 人体研究
 - 9.1.2 動物実験
 - 9.1.3 細胞実験
- 9.2 血液系
 - 9.2.1 人体研究
 - 9.2.2 動物実験
 - 9.2.3 細胞実験
- 9.3 結論

10 生殖および発育

- 10.1 疫学
 - 10.1.1 母体の曝露
 - 10.1.1.1 ビデオ受像機
 - 10.1.1.2 電気ベッド
 - 10.1.1.3 その他の住居および作業場での曝露
 - 10.1.2 父親の曝露
- 10.2 哺乳類実験動物への影響
 - 10.2.1 電場
 - 10.2.2 磁場
 - 10.2.2.1 出生前発達への影響
 - 10.2.2.2 多世代研究
 - 10.2.2.3 試験管内の哺乳類胎児への影響
 - 10.2.2.4 父親の曝露の影響
- 10.3 非哺乳類実験動物への影響
 - 10.3.1 鳥類胎児－10.3.1.1 発達
 - 10.3.1.2 既知奇形因子との相互作用
 - 10.3.2 他の非哺乳類動物
- 10.4 結論

11 癌

- 11.1 国際癌研究所 2002 年評価：要約
- 11.2 疫学的研究
 - 11.2.1 小児白血病
 - 11.2.1.1 疫学
 - 11.2.1.2 傾向および地域的関連
 - 11.2.1.3 新データ

- 11.2.1.4 疫学的証拠の評価：可能な説明
- 11.2.2 成人癌
 - 11.2.2.1 乳癌
 - 11.2.2.2 白血病および脳腫瘍
 - 11.2.2.3 その他の癌
- 11.2.3 疫学：結論
- 11.3 実験動物における発癌性
 - 11.3.1 齧歯類検体
 - 11.3.1.1 大規模・生涯研究
 - 11.3.1.2 白血病・リンパ腫
 - 11.3.1.3 脳腫瘍
 - 11.3.2 電磁波と発癌物質への同時曝露
 - 11.3.2.1 肝臓腫瘍前病変
 - 11.3.2.2 白血病・リンパ腫
 - 11.3.2.3 乳癌
 - 11.3.2.4 皮膚腫瘍
 - 11.3.2.5 脳腫瘍
 - 11.3.3 転移癌
 - 11.3.4 動物における遺伝毒性
 - 11.3.5 非遺伝毒性的研究
 - 11.3.6 動物実験：結論
- 11.4 試験管内での発癌性研究
 - 11.4.1 遺伝毒性効果
 - 11.4.1.1 極超低周波数磁場単独の遺伝毒性効果
 - 11.4.1.2 複合的遺伝毒性効果
 - 11.4.2 腫瘍遺伝子および癌関連遺伝子の発現
 - 11.4.3 変異・増殖および細胞死
 - 11.4.4 懸隔連結細胞間連絡
 - 11.4.5 遊離基
 - 11.4.6 試験管内での結論
- 11.5 全体の結論

12 健康リスク評価

- 12.1 序論
- 12.2 害悪の特定
 - 12.2.1 健康への生物学的効果と悪影響
 - 12.2.2 急性効果

- 12.2.3 慢性効果
- 12.3 曝露評価
 - 12.3.1 住居内曝露
 - 12.3.2 職業的曝露
- 12.4 曝露反応評価
 - 12.4.1 限界値
 - 12.4.2 疫学的方法
- 12.5 リスクの特徴づけ
 - 12.5.1 急性効果
 - 12.5.2 慢性効果
 - 12.5.3 リスクの特徴づけにおける不確実性
 - 12.5.3.1 生物物理学的機構
 - 12.5.3.2 曝露計測
 - 12.5.3.3 疫学
- 12.6 結論

13 防護手段

- 13.1 序論
- 13.2 保健政策における一般事項
 - 13.2.1 環境保健リスクのとりあつかい
 - 13.2.2 保健政策に影響する要因
- 13.3 科学的情報
 - 13.3.1 排出と曝露の基準
 - 13.3.2 予見されるリスク
- 13.4 予防に依拠した政策手段
 - 13.4.1 既存の予防的超低周波数政策
 - 13.4.2 費用と実効性
- 13.5 議論および勧告
 - 13.5.1 勧告

付録：小児白血病の量的リスク評価

- A.1 曝露分布
- A.2 寄与比率推定を使用した電磁波と小児白血病のための曝露・反応分析
- A.3 リスクの特徴づけ

注

用語集

序言

世界保健機構環境保健基準計画

世界保健機構環境保健基準計画は 1973 年に、以下の目的のために創始された。

- (i) 環境汚染物質への曝露と人体の健康とのあいだの関連に関する情報を評価し、曝露基準を設定するための指針を提供すること。
- (ii) 新規のあるいは潜在的な汚染物質を特定すること。
- (iii) 汚染物質の健康への影響に関する知識の欠如を特定すること。
- (iv) 国際的な比較を可能にするために、毒物学および疫学的方法の調和をはかること。

ここでは、世界保健機構が健康を、単なる病気あるいは虚弱の欠如ではなく、身体的・精神的および社会的に完全に幸福な状態として定義していること(WHO, 1946) に注意しなくてはならない。

環境保健基準に関する最初の専門論文としては、水銀についてもものが 1973 年に刊行されたが、それ以来、ますますおおくの化学的・物理的要因の評価がおこなわれている。それにくわえてこれらの専門論文は、遺伝性・神経性・催奇形性・腎臓性などの毒物に対して、毒物学的方法の評価をすすめてきた。そのほか、疫学的指針、発癌物質の短期試験の評価、生物学的指標、高齢者への影響などに関する研究もなされてきた。

本計画は元来、世界保健会議の決議、および 1972 年の人間環境に関する国連総会の勧告にしたがい、推進されることになったものである。その後この作業は、国連環境計画・国際労働機関および世界保健機構の共同事業である国際化学安全計画の一部となった。あらたな協力者の助力をえて、職業保健と環境的影響の重要性が完全に認識された。環境保健基準の専門論文は、ひろく世界中で使用され評価されている。

電磁界[電磁場]

電磁波に関する 3 本の専門論文は、極超低周波数電磁場、静的・極超低周波数磁場および無線周波数電磁場への曝露による、ありうる健康への影響に、焦点をあてている(WHO, 1984; 1987; 1993)。これらの論文は、国連環境計画と国際労働機関と、以前は国際放射線防護連合の国際非電離放射委員会との、そして 1992 年以降は非電離放射防護国際委員会との、協力により作成されている。

環境保健基準専門論文は通常は、評価を実質的にかえるような新規のデータがえられたと

き、曝露がふえてその要因の保健・環境上の影響に対する関心がたかまったとき、あるいは以前の評価から相当な期間が経過したときに、改訂されている。電磁場に関する専門論文も、改訂されながら、静的場（0 ヘルツ）・極超低周波電磁場（100 キロヘルツ未満、本書）・無線周波電磁場（100 キロヘルツ以上 300 ギガヘルツ未満）のそれぞれの周波数帯に関する 3 本の論文として、刊行される予定である。

非電離放射線（周波数帯 0 から 300 ギガヘルツ）を照射する技術がおこしうるあらゆる健康へのリスクの世界保健機構による評価は、国際電磁波計画の責任の範囲内にある。この計画は、電磁波曝露の健康への影響に対する一般の関心に応じて 1996 年に世界保健機構により開始され、「放射線と環境に関する保健ユニット」（RAD）が運営し、電磁界に関する環境保健基準の作成の調整役もここが担っている。

世界保健機構による健康リスク評価事業には、関連する科学文献により構成される、集約的なデータベースの構築もふくまれる。科学界でもそれ以外の世界でも意見の相違があるので、そういう研究の解釈は議論をよぶ。できるかぎり広範囲の意見の一致をえるため、健康リスク評価は、ときにはそのための 1 節をもうけたりもしながら、他の既存の国内的・国際的な専門家集団による評価、とりわけ以下のものにも依拠している。

- ・ 静磁場および超超低周波電磁場に関する、国際癌研究所の専門論文(IARC, 2002)。2001 年 6 月同研究所は正式に、静磁場・超低周波電磁場への曝露の発癌性に関する証拠を評価した。超低周波電磁場がヒトに癌を発生させる可能性があるとして、この報告は結論した。
- ・ 世界保健機構と正式な関係をむすんでいる非政府組織、非電離放射防護国際委員会に対して世界保健機構により委託された、物理学・工学・生物学・疫学的再評価(ICNIRP, 2003)。
- ・ イギリス健康保全局の、非電離放射に関する顧問団による再評価(AGNIR, 2001a; 2001b; 2004; 2006)。

範囲

環境保健基準専門論文は、化学的・物理的・生物学的因子の人体の健康および環境への影響について、批判的に再検討することを目的としている。したがってここでは、評価に直接に関係する研究はとりあげられることになる。しかしそのことは、これまでにおこなわれたすべての研究に言及することを意味しない。ここでは世界中のデータが使用され、引用は要約や再検討からではなく、原典となった研究からなされる。未発表の研究が考慮されることもあるが、優先性はつねに既発表のデータにおかれる。未発表のデータは、関連する既発表のデータがないか、あるいは未発表のデータがリスク評価にとって特に重要であるときにのみ使用される。未発表の私的なデータを、その秘匿の必要性をそこなうこと

なく使用する方法に関する政策的言明は、WHO (1990)にみられる。

人体へのリスクを評価するにあたっては、もしえられるのであれば、健康な人間のデータが、一般に動物のデータよりも有益な情報を提供する。動物実験や試験管実験は、補助的なものであり、主として人体研究には欠如している証拠を提供するために使用される。人間の被験者をもちいた研究においては、ヘルシンキ宣言(WMO, 2004) の条文をふくむ倫理的諸原則を、遵守することが必須とされる。

あらゆる研究は、影響が存在するというものもしないというものもふくめて、証拠の重要性を考慮して、それ自体の価値にもとづいて評価・判断されなければならない。曝露が結果を生じさせる可能性が、あげられた証拠によってどれほど変化させられるのかを、判定することが重要である。一般に、研究は再現可能であるか、あるいは類似の研究に合致するか、していなくてはならない。結果が生じるという証拠は、ことなる種類の（疫学的と実験的など）研究が同一傾向の結論を出していれば、さらに強化される。

環境保健基準は、国内的・国際的な規制当局が、リスク評価およびそれにつづくリスク管理の政策判断を、おこなうのを助けることを目的としている。これは、データが許すかぎりのリスク評価を示すものであるが、いかなる意味においても、規制ないし基準設定を勧告するものではない。規制や基準設定をなすのは政府のみである。しかし電磁場に関する環境保健基準は、非電離放射防護国際委員会のような団体に対して、国際的な曝露基準を再検討するための科学的な基礎を提供する。

手順

この環境保健基準の刊行にいたるまでの手順について以下に論じる。

「放射線と環境に関する保健ユニット」(RAD) 協力センターの연구원ないしは顧問により準備された最初の草稿は、メドラインやパブメドのような公開データベースや、国際癌研究所と非電離放射防護国際委員会の論文レビューに、ひとまず依拠している。RAD におくられた文書草稿は、場合によっては、その科学的価値と客観性を判定するために、少人数の専門家集団により再検討されることもある。第一草稿として一旦受理された文書は、その完全性と正確さについて諮問し、必要なら資料を追加するために、編集されることなく、全世界の 150 ヶ所をこえる環境保健基準連絡拠点に配付される。連絡拠点は、通常は政府により指定されるが、協力センターであることもあるし、特定専門分野で有名な個人の科学者であることもある。彼らによる論評がなされるまでに普通は数か月かかる。RAD の調整役担当者により受理され承認された論評をも組み込んだ第二草稿は、専門的な検討のためにワーキンググループのメンバーに送付されるが、彼らはその 6 か月以上後に会合をひ

らくことになる。

ワーキンググループのメンバーは、組織の代表としてではなく、個人の科学者として働く。彼らの任務は、文書中の情報の正確性・重要性・適切性をみさだめ、言及された周波数範囲の電磁場への曝露による、健康および環境へのリスクを評価することである。よりすすんだ研究と安全性の改善のための、勧告と要約も要求される。ワーキンググループの構成は、会合の主題（疫学・生物学・生理学・医学・公衆衛生）により要求される専門性や、科学に対する意見や性別・地理的配分などを考慮して発表される。

世界保健機構ワーキンググループの構成は持続的発展・健康環境部門の事務次長により承認される。このワーキンググループは、世界保健機構のなかでは、健康へのリスクを評価する、もっとも高い段階の委員会である。

ワーキンググループは、電磁波環境保健基準専門論文の草稿を批判的かつ徹底的に再検討し、電場と磁場の両方への曝露によるあらゆる健康へのリスクを評価し、全会一致により合意し、会合後には変更できない最終の結論および勧告を作成する。

世界保健機構は非政府組織の重要な役割を認識している。関連する国内および国際的団体の代表は、オブザーバーとしてワーキンググループに加わるべく招待されることがある。オブザーバーが価値のある貢献をなすこともありうるが、彼らは議長に招待されたときのみ発言できる。オブザーバーは最終評価には参加しない。最終評価に責任を負うのはワーキンググループのメンバーだけである。ワーキンググループは必要に応じて、会合を非公開とすることができる。

環境保健基準の作成に著者・顧問ないしは助言者として参加するすべての個人は、科学者として個人の能力を発揮することに加えて、現実のものであれ潜在的なものであれ、作業中に利益相反に気付かされたときにはいつでも、そのことを世界保健機構に報告する義務を負う。彼らは利益相反に関する言明に署名しなくてはならない。このような手続きは、手順の透明性と誠実さを保証する。

ワーキンググループが再検討を完了し、調整者（RAD）が草稿の一貫性と完全性について満足したら、草稿は用語編集・脚注点検および写真製版準備にまわされる。人間環境保全部長による承認ののち、環境保健基準は世界保健機構出版局に、印刷のために提出される。このときには最終原稿の複製が、ワーキンググループの議長と書記に推敲のために渡される。

超低周波電磁場環境保健基準

この環境保健基準は、超低周波数（0 ヘルツ超 100 キロヘルツ以下）の電場および磁場への曝露による、ありうる健康への影響に焦点をあてている。これまでは電力周波数（50 から 60 ヘルツ）の磁場への曝露による健康への影響に関する研究が多く、ほかに電力周波数の電場への曝露の影響に関するものが少数あった。それにくわえて、磁気共鳴画像に使用される超長波電磁界（3 から 30 キロヘルツ）の切り替え傾斜磁場や、あるいはもっと普通には、テレビのブラウン管から放出されるより微弱な超長波の電磁場への曝露による影響に注目した研究もみられた。

超低周波電磁場環境保健基準は、病気の種別に応じて構成されている。それぞれ別の専門家集団が、神経変性疾患（7 章）・心血管疾患（8 章）・小児白血病（11.2.1 節）および防護手段（13 章）に着目した原稿を準備するために会合した。そういう専門家集団の構成員名は以下に掲載されている。その他の章の原稿は、顧問あるいは世界保健機構協力センターや RAD の成員により準備された。そのなかには、イギリス王立理工科医科大学のポール・エリオット教授、カナダ・ビクトリア大学のマリア・スタックリー教授、フランス・国立ボルドー化学物理学大学院のベルナール・バイレ博士、さらには専門家集団あるいはワーキンググループの成員でもある諸個人が含まれる。それぞれの章の原稿は、本書の草稿として一本化される前に、それぞれ別個に外部の審査員により審査されている。

環境保健基準の草稿は、一本化された後で外部審査を受けた。編集上の変更および科学上の微小な修正は、世界保健機構編集局に伝えられ、最終原稿は、ワーキンググループ会合に先だってワーキンググループのメンバーに送付された。

ワーキンググループは 2005 年の 10 月 3 日から 7 日にかけて、ジュネーブの世界保健機構本部で会合をもった。環境保健基準の本文はそののち、世界保健機構のエミリエ・バン・デベンテル、大久保千代次両教授、イギリス保健庁のリック・サウンダーズ博士、オランダ保健会議のエリック・バン・ロンゲン博士、カリフォルニア大学ロサンゼルス校保健学部のリーカ・ケイフェッツ教授、アメリカ国立環境保健研究所のクリス・ポルティエール博士からなる編集グループに、文意を明確で一貫したものにするために送付された。ワーキンググループによる最終検討と、科学面および文面の点検をへて、環境保健基準は 2007 年 6 月 18 日に、電磁波プロジェクトのウェブサイト上发表された。

1 要約および今後の研究のための勧告

本環境保健基準（EHC）モノグラフは、超低周波（ELF）の電磁界[電磁場]への曝露による健康への影響の可能性を取り扱っている。EHCモノグラフでは、ELF電磁界[電磁場]の物理的特性ならびに曝露の発生源および測定法をレビューする。しかし、主要な目的は、これらの界への曝露によるあらゆる健康リスクを評価し、この健康リスク評価を用いて各国当局に対する健康防護プログラムに関する勧告を作成するために、ELF界への曝露による生物学的影響に関する科学論文をレビューすることである。

検討下の周波数の範囲は0Hzから100kHzである。研究の大半は、電力周波数（50または60Hz）磁界について実施されており、電力周波数電界を用いた研究は僅かである。さらに、超長波（VLF、3～30kHz）電磁界、磁気共鳴画像に用いる切り替え傾斜磁場、およびディスプレイ装置およびテレビから放出されるより弱いVLF電磁界に関する研究が多数ある。

本章では、各セクションの主な結論および勧告、ならびに健康リスク評価プロセスの全体的な結論を要約する。ある健康転帰に関する証拠の強さを表すために本モノグラフで使用する用語は、以下の通りである。1つの研究に限定されている場合、または一群の研究のデザイン、実施または解釈に関する疑問が未解決である場合に、証拠は「限定的」とする。「不十分な」証拠は、研究が質的または量的に大きい制約があるために影響の有無のいずれを示しているのかを解釈不能な場合、またはデータを入手できない場合に使用する。知見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に必要な研究は「研究のための勧告」と題するセクションに要約した。

1.1 要約

1.1.1 発生源、測定法および曝露

電磁界は、電気が作られ、送電線やケーブルの中を流れたり分布する場所、または電気製品を使用する場所にはどこでも存在する。電気の利用は、我々の現代の生活様式に欠かせないものであるため、これらの界は我々の周囲のいたるところに存在する。

電界の強さを表す単位はボルト・パー・メートル（V/m）またはキロボルト・パー・メートル（kV/m）であり、磁界についてはテスラ（T）で磁束密度を測定するが、より一般的にはミリテスラ（mT）またはマイクロテスラ（ μ T）を用いる。

電力周波数磁界への住居内での曝露は、世界中どこでも劇的に異なるものではない。家庭

内の磁界の幾何平均の範囲は、ヨーロッパでは 0.025 から 0.07 μ T、米国では 0.055 から 0.11 μ T である。家庭内での電界の平均値は、数十ボルト・パー・メートルの範囲内である。特定の電気器具の周囲では瞬間的に磁界の強さが数百マイクロステラにもなる。送電線の近くでは、磁界は約 20 μ T、電界は最大数千ボルト・パー・メートルに達する。

居住環境での 50 または 60 Hz 磁界への時間平均曝露が、小児白血病の発生増加に関連する過剰なレベルの小児は殆どいない（セクション 1.1.10 を参照）。約 1% から 4% の小児の平均曝露は 0.3 μ T を超え、僅か 1% から 2% の小児では曝露の中央値が 0.4 μ T を超える。

職業曝露は、主に電力周波数の界への曝露であるが、他の周波数の寄与もありうる。職場における磁界への平均曝露は、「電気関係の職種」の方が事務職などの他の職種よりも高く、平均曝露の範囲は電気工および電気技師の 0.4~0.6 μ T から、送電線や配電線の作業者の約 1.0 μ T まであり、溶接工、鉄道機関士およびミシンオペレーターで最も高い（3 μ T を超える）ことが判明した。職場における磁界への最大曝露量は約 10mT に達することがあり、これは必ず高電流を伝導する電線の存在と関連する。電力産業の労働者は最大で 30 kV/m の電界に曝露しうる。

1.1.2 生体内の電磁界

超低周波数の外部の電磁界への曝露は、生体内に電界および電流を誘起誘導する。線量測定により、外部の界と生体内の誘導電界および電流密度との関係、またはこれらの界への曝露に関連する他のパラメータが表される。局所的に誘導される電界および電流密度は、神経および筋肉などの興奮組織の刺激と関連することから、特に関心のあるところである。

ヒトおよび動物の体は ELF 電界の空間分布を著しく乱す。低周波において生体は、良い導体であり、体外の摂動を受けた力線は体表面に対してほぼ垂直である。曝露した生体表面で周期的変化が誘導され、これが体内の電流を誘導する。ヒトの ELF 電界への曝露について、線量測定の重要な特徴は以下の通りである：

- 通常、体内の電界の大きさは、外部電界よりも 5 から 6 桁小さい。
- 垂直な界への曝露が大半である場合は、誘導される場の主な方向も垂直である。
- ある外部電界について、ヒト生体について最も強く誘導された場は足が地面に完全に接触している状態のヒト生体であり（電氣的に接地）、最も弱く誘導された場は地面から絶縁した（「自由空間」中の）生体である。
- 完全に接地している生体内を流れる全電流は、組織伝導率ではなく、むしろ身体の高さおよび形状（姿勢を含む）によって決まる。

- ・ 様々な臓器および組織における誘導電流の分布は、これらの組織の伝導率によって決まる。
- ・ 誘導電界の分布は伝導率の影響も受けるが、誘導電流の影響よりも少ない。
- ・ 電界に位置する導電性物体と接触することによって生体内の電流が生じる別の現象もある。

磁界は、組織透過性は空気と同様であることから、組織中の磁界は外部磁界と同一である。ヒトおよび動物の生体は磁界を著しく乱すことはない。磁界の主な相互作用はファラデーの電界誘導であり、伝導組織における電流密度と関連する。ヒトの ELF 磁界への曝露について、線量測定の重要な特徴は以下の通りである：

- ・ 誘導電界および電流は、外部の界の方向によって決まる。体内に誘導される界は全体として、界が身体の前から後の方向へ向いている時に最大となるが、一部の臓器は界が左右の方向の場合に最大値となる。
- ・ 垂直な体軸に沿った方向の磁界の場合に、電界誘導が最も弱くなる。
- ・ ある一定の磁界の強さおよび方向では、体が大きいほど大きい電界が誘導される。
- ・ 誘導電界の分布は様々な臓器および組織の伝導率の影響を受ける。誘導電流密度の分布に対する影響は限定的である。

1.1.3 生物物理学的メカニズム

ELF 電磁界について提唱された直接的および間接的な様々な相互作用メカニズムの可能性、特に界への曝露によって生物学的プロセスにおいて生成される「信号」を本来のランダムノイズと識別することが可能かどうか、そしてそのメカニズムは科学原理および最新の科学知識に異議を唱えるものかどうかを調べる。多くのメカニズムは、界がある特定の強さを超える場合にのみ妥当となる。しかし、基本的な科学原理を順守する限り、同定された妥当と思われるメカニズムがないことによって、非常に低レベルの界における健康への影響の可能性が除外されることはない。

電磁場と人体との直接的な相互作用について提唱された数多くのメカニズムの内、3つのメカニズムは他よりも低レベルの界で作用する可能性があるものとして傑出している。すなわち、神経回路網、ラジカル対および磁鉄鉱における誘導電界である。

ELF 電界または磁界への曝露によって組織において誘導された電界は、内部の界の強さが数ボルト・パー・メートルを超えると、生物物理学的に可能な方法で直接個々の有髄神経線維を刺激する。神経回路網におけるシナプス伝達に対しては、単一の細胞の場合よりも

はるかに弱い界が影響を及ぼしうる。このような神経系による信号処理は一般的に、弱い環境シグナルを検出するために多細胞生物で用いられている。神経回路網の弁別の下限は 1mV/m であると示唆されてきたが、最新の証拠に基づくと、閾値は約 $10\sim 100\text{mV/m}$ である可能性の方が高いと思われる。

ラジカル対のメカニズムは広く受け入れられている。このメカニズムでは、磁界は特殊な化学反応に影響を及ぼし、一般的には反応性の高いフリーラジカルの濃度を低磁場では増加させ、高磁場では減少させる。これらの増加は、 1mT 未満の磁界で見られてきた。このメカニズムを鳥の渡りのナビゲーションと関連付ける証拠が幾つかある。理論的根拠に基づくと、また、ELF および静磁界により生じる変化は似ていることから、約 $50\mu\text{T}$ である地球磁場よりもはるかに弱い電力周波数の界は、生物学的にあまり重要ではないと思われることが示唆される。

磁鉄鉱結晶は、酸化鉄から成る様々な形の小さな強磁性結晶であり、極微量ではあるが動物およびヒトの組織において見つかっている。フリーラジカルと同様に、移住動物の帰巢本能およびナビゲーションと関連付けられている。ただし、ヒトの脳に存在する極微量の磁鉄鉱は、弱い地球磁場を検知する能力を付与しない。極端な仮説に基づく計算では、ELF 電磁界の磁鉄鉱結晶に対する作用の下限値は $5\mu\text{T}$ であると示唆されている。

化学結合の切断、荷電粒子への力および様々な狭帯域「共鳴」メカニズムなどの、その他の界の直接的な生物物理学的相互作用は、公共の環境および職場環境で遭遇する界のレベルにおける相互作用の妥当な説明を提供するものとは考えられない。

間接的な影響について、電界により誘導された表面電荷は認識可能であり、表面電荷が誘導されると、導電性物体に触れた時に有痛性のマイクロショックを生じうる。接触電流は、例えば低年齢小児が家庭内の浴槽中の蛇口に触れた時に生じうる。これは、骨髄において小さな電界、おそらく暗雑音レベルを超える電界を生じる。しかし、これらが健康に対するリスクを意味す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荷電したイオン雲を生成する。これらは、空気中汚染物質の皮膚および体内の気道への沈着を増加させて、健康に有害な作用を及ぼす可能性があることが示唆されている。しかし、最も多く曝露した人でも、コロナイオンの長期の健康リスクに対する影響は、仮にあったとしても小さな影響しかないと思われる。

上記で検討した3つの直接的なメカニズムはいずれも、人々が一般的に遭遇する曝露量で、疾患発生率を上昇させる原因である可能性はないと思われる。実際、これらのメカニズムは曝露量が数桁高くなった場合にのみ妥当となる。間接的なメカニズムは現時点では十分

調べられていない。同定された妥当と思われるメカニズムがないからと言って、健康への有害な影響の可能性は除外されないが、生物学および疫学からの、より強固な証拠が必要である。

1.1.4 神経行動学的反応

電力周波数電界への曝露は、表面電荷効果による認知から不快感までの、明確な生物学的反応を引き起こす。これらの反応は、界の強度、周囲の環境条件および個人の感受性によって決まる。ボランティアの10%の直接知覚の閾値範囲は2から20kV/mであった。また、5%は15～20kV/mで不快であると感じた。ヒトから地面への火花放電は、5kV/mの界でボランティアの7%が疼痛を感じる事がわかっている。荷電体から接地したヒトへの放電の閾値は荷電体の大きさによって決まる。従って、特別な評価が必要となる。

高強度場、すなわち高速パルス磁界は、末梢および中枢神経組織を刺激しうる。このような作用は、磁気共鳴画像（MRI）施行中に起こる可能性があり、経頭蓋磁気刺激に用いられている。神経を直接刺激するための誘導電界の閾値の強さは、数ボルト・パー・メートルにすぎない可能性がある。閾値は、数ヘルツから数千ヘルツの周波数の範囲で一定である可能性が高い。てんかんに罹患している人またはてんかんになりやすい人は、中枢神経系（CNS）における誘導ELF電界の影響をより強く受ける可能性が高い。さらに、CNSの電気刺激に対する感受性は、痙攣の家族歴ならびに三環系抗うつ薬、神経遮断薬および痙攣の閾値を下げる他の薬剤の使用と関連する可能性が高いと思われる。

CNSの一部である網膜の機能は、直接神経を刺激するELF磁界よりもはるかに弱いELF磁界への曝露によって影響を受ける可能性がある。閃光感覚、いわゆる磁気閃光は、誘導電界と電氣的に興奮した網膜細胞との相互作用の結果生じる。網膜の細胞外液における誘導電界の閾値の強さは、20Hzで約10から100mV/mの間であると推定された。しかし、この数値にはかなりの不確実性がつきまとっていた。

ボランティア研究における、脳電気活動、認知、睡眠、過敏症および気分に対する影響などの他の神経行動学的作用についての証拠はさらに不明確である。一般的にこのような研究は、前述した作用を惹起するために必要とされるよりも低い曝露量で実施されており、せいぜい微妙かつ一過性の影響のみについての証拠しか得られていない。このような反応を誘発するために必要な条件は、現在のところ明確ではない。反応時間、および一部の認知作業遂行における正確性の低下に対する電磁界依存性の作用の存在を示唆する証拠がある。これは、脳全体の電気活動に関する研究の結果によって支持されている。磁界が睡眠の質に影響を及ぼすかどうかを調べる研究からは、相反する結果が報告された。これらの

不一致は、研究デザインの差が一因である可能性がある。

一部の人々は一般的に EMF に対する過敏症を訴える。しかし、二重盲検誘発試験からの証拠は、報告された症状が EMF への曝露と関連性がないことを示唆している。

ELF 電磁界への曝露によってうつ症状または自殺が引き起こされることを示す証拠は相反するものであり、決定的なものではない。以上から、証拠は不十分であると考えられる。

動物において幅広い曝露条件を用いて多くの観点から、ELF 電磁界への曝露が神経行動学的機能に影響を及ぼす可能性が調べられてきた。確固たる作用は殆ど確立していない。おそらく表面電荷効果の結果として動物は電力周波数電界を検知可能であり、短期覚醒や軽度のストレスが誘発されうることを示す説得力のある証拠がある。ラットの検知範囲は 3 から 13kV/m である。齧歯類は、50kV/m を超える強さの電磁界に嫌悪を示すことが示されてきた。可能性としてありうる他の電磁界依存性の変化は、それほど明確ではない。実験研究では、微妙かつ一過性の影響のみについての証拠しか得られていない。磁界への曝露により、脳におけるオピオイドおよびコリン作動性の神経伝達系の機能が調節されうることを示す証拠があり、これは鎮痛に対する作用および空間学習の習得と成績に対する作用を調べた研究の結果により支持されている。

1.1.5 神経内分泌系

ボランティア研究ならびに住居と職業に関する疫学調査の結果から、神経内分泌系は電力周波数の電界または磁界への曝露によって有害な影響は受け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を含む神経内分泌系の特定のホルモンの循環濃度、および下垂体から放出され、体の代謝と生理の制御に関与する多数のホルモンに当てはまる。曝露に関するある特質に関連してメラトニンが放出される時期について、時に若干の差異が認められたが、これらの結果は一貫性のあるものではなかった。ホルモン濃度にも影響を及ぼしうる様々な環境要因および生活習慣要因による交絡の可能性を消失させることは極めて困難である。ボランティアにおける夜間のメラトニン濃度に対する ELF 曝露の影響に関する殆どの実験研究では、慎重に交絡の可能性をコントロールした場合には影響がないことが判明した。

電力周波数の電磁界がラットの松果体および血清中のメラトニン濃度に与える影響を調べた多数の動物研究の内、一部の研究は曝露の結果、夜間のメラトニン抑制を生じたと報告した。100kV/m までの電界への曝露に関する初期の研究において最初に観察されたメラトニン濃度の変化は再現することができなかった。さらに最近の一連の研究からの知見は、円偏光磁場により夜間のメラトニン濃度が抑制されることを示したが、曝露させた動物と

既存対照との比較が不適切であったことから弱いものとなった。数マイクロステラから5mTまでの強さのレベルにわたる、齧歯類における他の実験からのデータはいずれともとれるものであり、一部の結果はメラトニンの抑制を示したが、一部の結果では変化が示されなかった。季節繁殖性の動物では、電力周波数の電磁界への曝露がメラトニン濃度およびメラトニン依存性の繁殖状態に与える影響を示す証拠はほとんどなかった。2匹の動物を使用した予備研究では不規則かつ間欠的な曝露に反応したメラトニンの抑制が報告されたが、メラトニン濃度に対する確実な影響は、ヒト以外の霊長類において長期にわたる電力周波数の場への曝露を行った研究では認められなかった。

in vitro 研究は比較的少数しか実施されていないが、ELF 電磁界への曝露が摘出した松果体におけるメラトニンの産生または放出に及ぼす影響は様々であった。ELF への曝露によって in vitro で乳癌細胞に対するメラトニンの作用が妨げられることを示す証拠は興味深いものである。しかしこの系には、本細胞株は研究室間の承継可能性を妨げうる、培養中の遺伝型および表現型の浮動を示すことが多いという欠点がある。

知覚するのに十分なほど高いレベルの ELF 電界への曝露発現後の短期ストレスの可能性を除いて、様々な哺乳類種における下垂体・副腎系のストレス関連ホルモンにおいて一貫した影響は見られなかった。同様に、僅かな研究しか実施されていないが、成長ホルモンの濃度および代謝活動の制御に関わるホルモンや生殖および性的発達の制御に関連するホルモンの濃度において観察された影響は、ほとんどないか、または相反するものであった。全体として、これらのデータは、ELF 電界および/または磁界によるヒトの健康に有害な影響を及ぼすような形での神経内分泌系への影響を示しておらず、従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 電磁界への曝露が幾つかの神経変性疾患と関連すると仮定されている。パーキンソン病および多発性硬化症については、研究の数は少ないが、これらの疾患との関連性を示す証拠はない。アルツハイマー病および筋萎縮性側索硬化症 (ALS) については、それよりも多くの研究が発表されている。一部の報告は、電気関係の職業に従事する人は ALS のリスクが上昇しうることを示唆している。現在のところ、この関連性を説明できる生物学的メカニズムは確立されていない。ただし、電気ショックなどの電気関係の職種に関連する交絡に起因している可能性がある。全体として、ELF への曝露と ALS との関連性を示す証拠は不十分であると考えられる。

ELF への曝露とアルツハイマー病との関連性を調べた研究は殆どないが、相反するもので

ある。しかし、アルツハイマー病の死亡率ではなく罹病率に焦点を当てたより質の高い研究では、関連性が示されていない。全体として、ELF への曝露とアルツハイマー病との関連性を示す証拠は不十分である。

1.1.7 心血管疾患

短期曝露および長期曝露に関する実験研究により、電気ショックは明らかな健康障害であるが、ELF 電磁界に関連する他の心血管系の有害な作用は環境上および職業上一般的に遭遇する曝露量で起こる可能性は低いことを示唆している。文献において様々な心血管系の変化が報告されているが、作用の大半は小さく、結果は研究内および研究間で一致していない。1件を除き、心血管疾患の罹病率および死亡率と曝露との関連性を示す研究はなかった。曝露と心臓の自律神経制御の変化との間に特異的な関連性が存在するかどうかについては依然として推論の段階である。全体として、証拠は ELF への曝露と心血管疾患との関連性を支持するものではない。

1.1.8 免疫および血液

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概して相反するものである。細胞集団および機能的マーカーの多くは曝露による影響を受けなかった。しかし、ヒトを対象とした $10\mu\text{T}$ から 2mT までの電磁界に関する一部の研究では、ナチュラルキラー細胞（細胞数の増加と減少の両方が示された）および総白血球数（変化なし、または数の減少が示された）の変化が認められた。動物研究では、ナチュラルキラー細胞の活性低下が雌マウスで見られたが、雄マウスや雌雄ラットでは見られなかった。白血球数についても不一致が示され、別々の研究において減少または変化なしと報告された。動物の曝露の範囲はさらに広く、 $2\mu\text{T}$ から 30mT であった。曝露および環境の条件のばらつきが大きいこと、被験対象の数が比較的少ないこと、およびエンドポイントの幅が広いことから、これらのデータから健康への影響の可能性を解釈することは困難である。

ELF 磁界の血液系に対する影響に関してはほとんど研究が実施されていない。白血球分画数を評価した実験における曝露の範囲は $2\mu\text{T}$ から 2mT であった。ヒトまたは動物を対象としたいずれの試験においても、ELF 磁界への急性曝露または ELF 電磁界への複合曝露について一致した影響は認められなかった。

従って、全体として免疫系および血液系に対する ELF 電界または磁界の影響を示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

全体として、疫学研究はヒトの生殖に関する有害転帰と母親または父親の ELF 電磁界への曝露との間の関連性は示していない。母親の磁界への曝露に関連した流産のリスク増加を示す幾つかの証拠があるが、この証拠は不十分である。

群の大きさが大きく、数世代にわたる曝露に関する研究を含む、数種類の哺乳類種において 150kV/m までの ELF 電界への曝露が評価された。結果は一貫して、発育に対する有害作用がないことを示している。

20mT までの ELF 磁界への哺乳類の曝露の結果、肉眼的に外部、内臓または骨格の奇形は生じない。一部の研究は、ラットおよびマウスの両方における骨格の小奇形の増加を示している。骨格変異は奇形に関する研究では比較的一般的な所見であり、多くの場合、生物学的に重要でないと考えられる。しかし、骨格の発育に対する磁界の僅かな影響を否定することはできない。生殖への影響を扱った研究は極僅かしか発表されておらず、それらの研究から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（ニワトリ胚、魚、ウニおよび昆虫）に関する幾つかの研究では、マイクロステラレベルでの ELF 磁界によって初期の発育が妨げられる可能性があることを示唆する所見が報告されている。しかし、哺乳類以外の実験モデルの所見は、発生毒性に関する全体的な評価において、対応する哺乳類の研究ほど重要ではない。

全体として、発育および生殖への影響を示す証拠は不十分である。

1.1.10 癌

2001 年およびそれ以前の入手可能なすべてのデータに基づき、IARC 分類により ELF 磁界は「ヒトに対して発癌性がある可能性がある」と分類された（IARC、2002 年）。今回の EHC モノグラフにおける文献のレビューでは、主に IARC レビュー後に発表された研究に焦点を当てる。

疫学

IARC 分類は、小児白血病に関する疫学研究において観察された関連性の影響を強く受けたものであった。限定的なものである本証拠による分類は、2002 年以降に発表された 2 件の小児白血病の研究を加えても変更はない。IARC モノグラフの発表以降、他の小児癌に関す

る証拠は不十分なままである。

IARC モノグラフに続いて、ELF 磁界への曝露に関連する成人女性の乳癌リスクに関して数多くの報告が発表されてきた。これらの研究の規模は以前の研究よりも大きく、バイアスに影響が少なく、全体として否定的であった。これらの研究により、ELF 磁界への曝露と女性の乳癌リスクとの関連性を示す証拠は相当弱いものとなり、この種の関連性は支持されていない。

成人の脳腫瘍および白血病の場合、IARC モノグラフ後に発表された新たな研究は、全体として ELF 磁界とこれらの疾患リスクとの関連性を示す証拠は不十分であるとの結論を変えるものではない。

他の疾患および他のすべての癌について、証拠は不十分なままである。

動物実験

現時点では、最も一般的な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はない。3 件の独立したラットでの大規模研究では、自然発症乳癌の発生に対する ELF 磁界の影響を示す証拠は得られなかった。殆どの研究は、齧歯類モデルにおける白血病またはリンパ腫に対する ELF 磁界の影響は全くないと報告している。齧歯類における幾つかの大規模で長期にわたる研究では、造血器系腫瘍、乳癌、脳腫瘍および皮膚腫瘍を含む、あらゆる種類の癌について一貫性のある増加は全く示されなかった。

相当数の研究によって、ラットにおいて化学的に誘発した乳癌に対する ELF 磁界の影響が調べられた。相反する結果が得られたが、これは特殊な亜系の使用などの実験プロトコール全体または一部の差異に起因する可能性がある。化学的に誘発、または放射線により誘発した白血病／リンパ腫モデルに対する ELF 磁界への曝露に関する大半の研究は否定的であった。肝臓の前腫瘍性病変、化学的に誘発した皮膚腫瘍および脳腫瘍に関する研究では、大半において否定的な結果が報告された。1 件の研究では、ELF 磁界への曝露時の紫外線誘発皮膚腫瘍形成の促進を報告された。

2 つのグループは、in vivo での ELF 磁界への曝露後に脳組織において DNA 二重鎖切断のレベルが増加したと報告した。しかし、他のグループは様々な別の齧歯類の遺伝毒性モデルを用いて、遺伝毒性作用を示す証拠がないことを見出した。癌に関連する非遺伝毒性を調べた研究の結果は決定的なものではない。

全体として、ELF 磁界への曝露が単独で腫瘍を引き起こすことを示す証拠はない。ELF 磁界への曝露が発癌物質と組み合わせることにより腫瘍発生が増強される可能性があることを示す証拠は不十分である。

*In vitro*研究

全般的に、細胞の ELF 電磁界への曝露の影響に関する研究では、50mT 未満の電磁界では遺伝毒性が誘発されないことが示された。注目に値する例外は、わずか 35 μ T の強さの電磁界での DNA 損傷を報告した最近の研究からの証拠である。しかし、これらの研究は現在評価中であり、これらの知見に関する我々の理解は不十分である。また、ELF 磁界が DNA 損傷物質と相互作用しうることを示す証拠が増加しつつある。

ELF 磁界による細胞周期の制御に関連する遺伝子の活性化を示す明確な証拠はない。しかし、全ゲノムの反応を分析するシステムティックな研究は、今のところ実施されていない。他の多くの細胞研究、例えば細胞増殖、アポトーシス、カルシウムシグナル伝達および悪性化に関する研究の結果は、相反するものであるか、または決定的なものではない。

全体的な結論

2002 年の IARC モノグラフ以降に発表された、ヒト、動物および *in vitro* での新しい研究は全体として、「ヒトに対して発癌性がある可能性がある」とする ELF 磁界の分類を変えるものではない。

1.1.11 健康リスク評価

WHO 憲章によると、健康とは身体的、精神的、および社会的に完全に良好な状態であって、単に病気や虚弱でないというだけではない。リスク評価は、健康または環境の転帰の推定に関係する情報を体系的にレビューするための概念の枠組みである。健康リスク評価は、ある曝露が何らかの特別な措置を必要とするかどうかについての決定を行い、これらの措置への取り組みのために必要なすべての活動を包括するリスク管理への情報として使用することができる。

ヒトの健康リスク評価においては、入手可能な場合はいつでも、ヒトに関する妥当なデータの方が、一般的に動物データよりも有益である。動物および *in vitro* 研究は、ヒトでの研究からの証拠を裏付けること、ヒトでの研究による証拠のデータのギャップを埋めること、あるいはヒトでの研究からの証拠が不十分または証拠がない場合にリスクについての判断

を行うために用いることができる。

影響に肯定的または否定的のいずれの場合でも、すべての研究はそれ自体の価値について評価および判定を行い、その後証拠の重み付けを行ってすべてを統合する必要がある。証拠の組み合わせが、曝露がある転帰を引き起こす可能性をどの程度変化させうるかを判定することが重要である。ある影響に関する証拠は一般的に、異なる種類の研究（疫学および実験）からの結果が同一の結論を示す場合および／または同じ種類の複数の研究が同一の結論を示す場合に強いものと成る。

急性の影響

100 kHz までの周波数の範囲における、健康に対して有害な結果を招きうる ELF 電磁界への曝露について、生物学的な急性の影響が確立している。従って、曝露の制限が必要である。この問題を扱った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、急性の影響に対して十分な防護が得られる。

慢性の影響

毎日の長期にわたる弱い（0.3～0.4 μ T を上回る）電力周波数磁界への曝露は健康リスクを引き起こすことを示唆する科学的証拠は、小児白血病の一貫したリスク増加パターンを立証した疫学研究に基づいている。ハザード評価における不確定性には選択バイアスをコントロールする役割が含まれており、曝露の誤った分類が、磁界と小児白血病との間に認められた関連性にありうる。さらに、実験的証拠およびメカニズムによる証拠はすべて、事実上、低レベルの ELF 磁界と生物学的機能または疾患の状態との間の関連性を裏付けることに失敗している。従って、すべてを考慮すると、証拠は因果関係ありとするには十分強固ではないものの、懸念を抱き続けるには十分強固である。

磁界への曝露と小児白血病との間の因果関係は確立していないが、潜在的に有用な情報を政策に提供する目的で、因果関係を仮定した上で公衆衛生への影響の可能性を算出した。しかし、これらの計算は、曝露の分布および他の仮定に強く依存しており、従って、極めて不確実なものである。因果関係があると仮定すると、曝露に起因する可能性のある世界中の小児白血病症例数は年間 100 から 2,400 例であると推定される。しかし、これは、2000 年に世界中で 49,000 例と推定された白血病の 1 年間の全発生例の 0.2 から 4.9% に相当する。従って、世界的には、仮にあるとしても公衆衛生に対する影響は限定的かつ不確実なものであろう。

多くの他の疾患について、ELF 磁界曝露との関連の可能性が調べられている。これらには、小児と成人の癌、うつ病、自殺、生殖器系の機能障害、発達障害、免疫系修飾および神経疾患がある。ELF 磁界とこれらの疾患のいずれとの間の関係を裏付ける科学的証拠は、小児白血病よりもはるかに弱いものであり、一部の例では（例えば、心血管疾患や乳癌）磁界によって疾患が引き起こされないと確信を提供するのに十分なものである。

1.1.12 防護手段

ELF 電磁界への曝露による確立済みの有害作用から防護するために曝露制限を実施することが必要不可欠である。これらの曝露制限は、すべての関連する科学的証拠の徹底的な調査に基づいて行われるべきである。

急性の影響のみが確立しており、これらの影響から防護するために 2 つの国際的な曝露制限ガイドラインが制定されている（ICNIRP、1998a；IEEE、2002）。

これら確立済みの急性の影響と同様に、ELF 磁界への曝露と小児白血病との間の関連を示す証拠が限定的であるために、慢性の影響の存在については不確実性が存在する。従って、予防的アプローチを採用することが必要である。しかし、曝露ガイドラインにおける制限値を予防措置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。このような行為は、曝露制限が依拠する科学的基礎を損なうものであり、防護を提供するために高価で必ずしも有効な方法ではない。

曝露を低減させるためにその他の適切な予防法を実施することは、合理的かつ正当である。しかし、電力は明らかに健康上、社会的、そして経済的利益をもたらすものであり、予防的アプローチはこれらの利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間の関連を示す証拠の弱さ、および仮に関連性があつたとして公衆衛生に与える影響が限定的であることの両方を考慮すると、曝露減少が健康にもたらす利益は明らかではない。従って、予防手段のコストは極めて低くするべきである。曝露減少を実施するためのコストは国によって異なるであろう。このことから、コストと ELF 電磁界による潜在的风险とのバランスをとるための一般的な勧告を行うことは極めて困難である。

以上を踏まえて、以下を勧告する。

・政策立案者は、公衆ならびに労働者が超低周波電磁界を被曝する場合のガイドライン（被曝基準）を設けるべきである。公衆ならびに労働者の被曝基準、そしてそれを定める場合に科学的なレビューをどう行うべきかに関して何にもまして参照すべきなのは、（ICNIRP

が定めている) 国際的なガイドラインである。

- ・政策立案者は、超低周波電磁界の防護計画を立てるべきである。そしてその中に、公衆もしくは労働者が基準値を超えた被曝をしていないことを確認するためにはどんな電磁波発信源であってもそこからの電磁波を計測する、ということが組み入れられるべきである。

- ・健康と電力がもたらす社会経済的利益の両者は容易に両立しがたい点があるとするなら、被曝を低減するためにはごくわずかなコストで済む予防的措置を講じることが合理的であり、正当なことである。

- ・政策立案者、自治体の計画立案者、企業は施設や電気機器を含む設備を新設する場合には、ごくわずかなコストで済む措置を講じるべきである。

- ・電気・電力機器や装置から漏洩する超低周波電磁界を低減するために工学的な改善を施すことは、たとえば安全性の向上といったようなさらなる利益が得られるのなら、あるいは改善のためのコストがほとんどあるいはまったくかからないのなら、考慮されるべきである。

- ・既存の超低周波電磁界の発生源に変更を加えようとする場合は、安全性、信頼性、経済性を考えて電磁界の低減の対策がなされるべきである。

- ・既存の設備の電力線の配備を変更したり新たに敷設したりする場合は、地方自治体の担当部局は、意図しないところで発生する地下の電流を低減するために、電力線配備に関する規制を強化すべきである。

- ・国の関係省庁は、すべての利害関係者にとって納得のいく政策決定ができるように、有効で開かれたコミュニケーションのための戦略を採用すべきである。そのためには、個人がいかんしてそれぞれの被曝を減らすことができるかに関する情報の提供もなされねばならない。

- ・超低周波電磁界発生源となる主だった規模の施設を設置する場合には、地方自治体の担当部署は、企業と自治体政府と市民との話し合いを進めながら、その施設の設置計画の改良を行うべきである。

- ・超低周波電磁界の被曝の健康影響に関する科学的証拠にはいまだ不確定な部分があるが、政府と企業はその不確定さを低減させることができるような研究計画を推進すべきである。

1.2 研究のための勧告

ELF 電磁界への曝露による健康への影響の可能性に関する知見のギャップを同定することは、本健康リスク評価にとって必要不可欠な部分である。この結果、以下に示す今後の研究のための勧告に至った（表 1 に要約）。

最優先で必要なこととして、この分野におけるデータが存在しないことを考慮すると、通常 300 Hz から 100 kHz とされる中間周波数 (IF) についてのさらなる研究が必要である。これまでのところ健康リスク評価に必要な知識基盤は極僅かしか収集されておらず、既存の研究のほとんどは相反する結果を出していることから、さらなる実証が必要である。健康リスク評価のために十分な IF データベースを構築するための一般要求事項には、曝露の評価、疫学のおよびヒトを対象とした実験研究、ならびに動物および細胞 (in vitro) 研究がある (ICNIRP、2003 ; ICNIRP、2004 ; Litvak、Foster & Repacholi、2002)。

すべてのボランティア研究について、ヒト被験者に対する研究はヘルシンキ宣言 (WMO、2004 年) の各規定を含む倫理原則を完全に遵守して実施することが義務付けられる。

実験研究については、以下の反応の報告を優先すべきである。

(i) 再現または追認された少なくとも幾つかの証拠が存在するもの、(ii) 発癌と関連する可能性があるもの (例えば、遺伝毒性)、(iii) メカニズム解析が可能なほど強固であるもの、(iv) 哺乳類またはヒトの系において起こるもの

1.2.1 発生源、測定法および曝露

内的および外部の発生源、配線と接地の方法の影響および家庭におけるその他の特徴の相対的寄与を同定するために、様々な国における高レベルの ELF に曝露している家庭の特徴をさらに明らかにすることによって、疫学的评价のための関連する曝露の測定法を同定するに至る洞察が得られる可能性がある。本件の重要な一部として、胎児および小児の ELF 電磁界への曝露、特に電気床暖房および集合住宅におけるトランスからの住居内での曝露について、さらに十分理解することである。

職業曝露の一部は現在の ELF ガイドラインの制限を超えている疑いがある。労働、例えば活線保守、MRI 磁石のボア内または近傍での労働 (およびこれによる切替傾斜 ELF 電磁界) ならびに交通システムでの労働に関連する曝露 (電力周波数以外の周波数を含む) については、さらに多くの情報が必要である。同様に、セキュリティシステム、図書館の消磁システム、電磁調理器および電気ポットなどの発生源を含む、ガイドラインの制限に接近す

る可能性がある、一般社会における曝露について、さらなる知識が必要である。

ELF 磁界と小児白血病との関連性を説明するものとして、接触電流への曝露が提唱されてきた。住宅内の電気の接地および配管方式が、家庭における接触電流を発生させる可能性について評価するために、米国以外の複数の国における研究が必要である。ELF と小児白血病に関して重要な疫学的結果が存在する国々においては、このような研究が優先されるだろう。

1.2.2 線量測定

以前は、実験研究の大半は体内の誘導電流を基本的な測定基準としたものであった。従って、線量測定は誘導電流量に焦点を当てていた。最近になってはじめて外部曝露と誘導電界との関係を調べる研究が始まった。生物学的影響をさらに良く理解するためには、種々の曝露条件下の内部電界についてのさらに多くのデータが必要である。

異なる構成で複数の外部電磁界の複合的影響に起因する内部電界を算出すべきである。基本的な規制へのコンプライアンスの問題を評価するために、電磁界の位相差および空間的变化の寄与へのベクトル加算が必要である。

適切な解剖学的モデリングを用いた妊婦および胎児の高度なモデルについての計算はほとんど実施されていない。小児白血病の問題に関連して、胎児に誘導電界の増大がないか評価することが重要である。職業上および家庭における母体の曝露がこれに関連する。

神経回路網の細胞構築および、誘導電界の影響に対する感受性がより高いと同定された他の複雑な臓器よりも下位のシステムを考慮に入れるために、マイクロでの線量測定モデルをより洗練する必要がある。このモデルリングの過程は、細胞膜電位および神経伝達物質放出に対する影響も考慮する必要がある。

1.2.3 生物物理学的メカニズム

現時点でのメカニズムの理解について明らかな限界があるとして、3つの主な領域がある。すなわち、ラジカル対メカニズム、生体内の磁性粒、および神経回路網などの多細胞系における信号対雑音比である。

ラジカル対メカニズムは、より可能性の高い低レベルでの相互作用メカニズムの1つであるが、すでに細胞の代謝および機能において重要な作用を仲介可能であることが示されて

いる。このメカニズムが発癌に関連するのかどうかを判定するために、このメカニズムが働く曝露の下限値を理解することが特に重要である。ELF 電磁界に曝露した免疫細胞において活性酸素種が増加した最近の研究を考慮すると、免疫反応の一部として活性酸素種を生成する免疫系の細胞を、ラジカル対メカニズムの可能性を調べるための細胞モデルとして用いることが推奨される。

ヒト脳内の磁性粒の存在は、現時点での証拠によると、環境 ELF 磁界に対する感受性を付与すると思われたいが、さらに理論的および実験的なアプローチによって、ある特定の条件下でこのような感受性が存在しうるのかどうかを探究する必要がある。さらに、磁鉄鉱の存在が先に考察したラジカル対メカニズムに加える可能性のある修飾を追及する必要がある。

このことを定量化またはそれに関する制限を決定するための理論的枠組みを構築するために、信号対雑音比を改善するために多細胞メカニズムが脳内でどの程度働くかについてさらに調べる必要がある。海馬および脳の他の部位における神経回路網の閾値および周波数応答に関するさらなる研究を *in vitro* のアプローチを用いて実施する必要がある。

1.2.4 神経行動学的反応

睡眠および精神力が要求される作業の遂行に与える影響の可能性についての実験に基づくボランティア研究を、調和のとれた方法論の手順を用いて実施することが推奨される。過去に用いられたよりも高い磁束密度および広範な周波数（すなわち、キロヘルツの範囲）における用量反応の関係を明らかにする必要がある。

成人ボランティアおよび動物を対象とした研究により、認知に対する急性の影響は強い電界または磁界への短期間の曝露によって生じることが示唆されている。このような影響の特徴を明らかにすることは、曝露ガイドライン作成のために極めて重要であるが、小児における電磁界依存性の影響に関する特異的なデータはない。定期的に職業曝露にさらされる成人および小児を含む、ELF 電磁界に曝露した人における認知および脳波（EEG）の変化に関する、実験に基づく研究を実施することが推奨される。

未成熟動物の行動学的研究から、小児に対する認知の影響があるかどうかを示す有用な指標が提供されている。出生前および生後の ELF 磁界への曝露が神経系および認知機能の発達に及ぼす影響を調べる必要がある。ELF 磁界および誘導電界への曝露が神経細胞増殖に及ぼす影響を脳切片または培養神経細胞を用いて調べることによってこれらの研究を補足することは有用である。

動物におけるオピオイドおよびコリン作動性の反応を示した実験データによって示唆された健康転帰がないかさらに調べる必要がある。動物におけるオピオイドおよびコリン作動性の反応の調節を調べる研究を拡大し、曝露パラメータとこれらの行動学的反応の生物学的基礎を明確にする必要がある。

1.2.5 神経内分泌系

神経内分泌の反応に関する既存のデータベースは、ELF への曝露にはヒトの健康に対する有害な影響はないことを示唆している。従って、追加の研究のための推奨は行わない。

1.2.6 神経変性疾患

数件の研究で、「電気関係の職業」における筋萎縮性側索硬化症のリスク増加が認められた。ELF 磁界がこの稀な神経変性疾患の因果関係に関わっているかを見出すためにこの関連性をさらに調べるのが重要であると考えられる。このことを調べるためには、ELF 磁界への曝露、電気ショックへの曝露ならびに他の潜在的なリスク要因への曝露に関わる情報を伴う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要因であるのかどうかは依然として疑問が残る。現在入手可能なデータは十分ではなく、この関連性についてはさらに調べる必要がある。死亡率データではなくむしろ罹病率データを用いることが特に重要である。

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事項であるとは考えられない。

1.2.8 免疫および血液

ELF 磁界に曝露した成人の免疫および血液パラメータに認められた変化は不一致を示した。また、基本的に小児について入手可能な研究データはない。従って、幼若動物における免疫系および血液系の発達に対する ELF 曝露の影響に関する研究の実施を推奨する。

1.2.9 生殖および発育

ELF 磁界への曝露に関連する流産のリスク増加を示す幾つかの証拠がある。このような関連性は公衆衛生に強く影響する可能性があることを考慮し、さらなる疫学研究が推奨される。

1.2.10 癌

疫学データ（ELF 磁界への曝露と小児白血病リスク増加との間の関連性を示す）と実験およびメカニズムに基づくデータ（この関連性を支持しない）との間の矛盾の解決は、本分野において優先度が最も高い研究である。疫学者および実験科学者が本件について共同研究を行うことを推奨する。新しい疫学研究の情報が有益なものとなるために、曝露の新たな局面、他の要因との相互作用の可能性、または高曝露群に焦点を当てるべきである。そうでない場合は、本研究分野において革新的なものでなければならない。さらに、最近の研究からのデータを追加し、解析に新たな見識を適用することによって、既存のプール解析を最新のものとすることも推奨する。

小児の脳の癌に関する研究は相反する結果を示している。小児白血病と同様に小児脳腫瘍の研究のプール解析では非常に有益な情報が得られるはずであることから、推奨される。この種のプール解析により、選択バイアスの可能性を含めて、費用をかけずにより大きく改善した見識を既存のデータから得ることができ、試験が十分に均質な場合は、リスクに関する最良の推定が得られる。

成人の乳癌については、さらに最近の研究より、ELF 磁界への曝露との関連性がないことが説得力を持って示された。従って、この関連性を調べるさらなる研究の優先度は非常に低くする必要がある。

成人の白血病および脳腫瘍については、職業曝露した個人から成る既存の大規模コホートを最新のものとすることを推奨する。白血病および脳腫瘍について、職業曝露に関する研究、プール解析およびメタアナリシスは一致しておらず、決定的なものではない。しかし、新しいデータがその後発表されており、このデータを用いてこれらの解析を最新のものとする必要はある。

研究室間で広く承継可能な、低レベル ELF 磁界に対する反応に関する適切な *in vitro* モデルおよび動物モデルを確立することによって疫学的証拠に取り組むことが優先される。

ELF 磁界への曝露の影響を調べるための適切な実験動物モデルを提供する目的で、小児白

血病の遺伝子導入齧歯類モデルを作製する必要がある。そうでない場合は、既存の動物研究では、証拠の重さは ELF 磁界単独には発癌作用がないことを示している。従って、ELF 磁界を複合発癌物質として厳密に評価する *in vitro* および動物研究に高い優先度が与えられる必要がある。

他の *in vitro* 研究については、ELF 磁界への間欠的な曝露による遺伝毒性作用を報告した実験は再現する必要がある。

1.2.11 防護手段

科学的に不確実な分野における健康防護政策の作成および政策の実施、特に ELF 磁界および「ヒトに対して発癌性がある可能性がある」と分類された他の物質に対する予防措置の採用、予防措置の解釈および予防手段の効果の評価についての研究が推奨される。社会に対してある物質が引き起こす健康リスクの可能性について不確実性がある場合は、一般市民および労働者の適切な防護を確保するために予防手段が正当化されうる。ELF 磁界の問題については限定的な研究しか実施されていないこと、およびその重要性から、さらに多くの研究が必要である。これにより、各国が予防措置を各国の健康防護政策に取り入れることに役立つであろう。

特に電磁界に焦点を当てた、リスクの認識および情報の伝達に関するさらなる研究を勧告する。一般的にリスクの認知に影響を与える心理的要因および社会的要因については、広く調べられてきた。しかし、電磁界の場合におけるこれらの要因の相対的な重要度を解析する、または電磁界に特異的な他の要因を同定するために実施された研究は限定的なものである。最近の研究により、潜在的リスクのメッセージを伝達する予防手段は、関心を高めることによっても、関心を低下させることによってもリスクの認識を変化させうる事が示唆されている。従って、この領域においてさらに踏み込んだ研究が正当化される。

ELF 磁界低減のための費用便益分析／費用効果分析を開発するための研究を実施する必要がある。政策の選択肢が社会にとって有益であるかどうかを評価するための費用便益分析および費用効果分析の実施については、公共政策の多くの領域で研究が行われてきている。ELF 磁界について本分析を実施するために、どのパラメータが必要であるかを同定する枠組み作りが必要である。評価に不確実性が存在することから、数量化可能なパラメータと数量化不可能なパラメータを組み合わせる必要があるだろう。

12 健康リスク評価

12.1 はじめに

物理的、化学的、生物学的な物質に対する曝露がもたらす健康リスクの管理は、任意の曝露レベルにおいて起こり得る作用に関する科学的で、理想としては定量的な評価（リスク評価）によって通知される。リスク評価の結果に基づき、その他の因子も考慮に入れて、当該物質からのリスクを除去、あるいは除去できない場合にはこれを最小化すること（リスク管理）を目標とした意思決定プロセスが始められる。下記の考察は、化学物質への曝露による人間の健康に関するリスク評価の原則を説明した WHO 環境保健基準 210 (WHO、1999) に基づいている。これらの原則は、一般的に適用が可能であり、ここにおいても ELF 電磁界に対して使用されてきている。

リスク評価は、曝露が健康あるいは環境に及ぼす作用を推定する場合に、該当する情報を構造的に審査するための機構を提供してくれる概念的なフレームワークである。リスク評価の手順は、大きく 4 つのステップに分割される。傷害性確認、曝露評価、曝露-反応評価、リスク判定である。

- *傷害性確認*の目的は、人間に対する有害作用の証拠の重みについて、毒性ならびに作用機序に関して得られるすべてのデータの評価をもとに、定量的に評価することである。主に、二つの疑問点を取り扱われる。(1) ELF 電磁界が、人間の健康に危害を加える恐れがあるか否か、そして (2) どのような状況下において、確認された傷害性が起こり得るか、である。傷害性確認は、様々なデータの分析に基づいているが、これは、人間での観察から研究室で実行された実験、また考えられる作用機序にいたるまでその範囲がおよぶ可能性がある。
- *曝露評価*は、様々な条件下において EMF 曝露の性質と程度を測定するものである。曝露評価の実行では、多面的アプローチを採用することができる。これには、環境曝露および個人曝露の測定などの直接的な技術、ならびにアンケートやコンピュータ技術などの間接的方法などがある。
- *曝露-反応評価*は、受けた曝露と作用発生の関係を定量的に特性付ける手続きである。ほとんどのタイプの考えられる有害作用（すなわち、神経、行動、免疫、生殖、発生に及ぼす作用）では、それ以下では有害作用が発生しないレベル（すなわち、閾値）の EMF 曝露があると一般的に考えられている。しかしながら、癌などの他の作用につ

いては、閾値は存在しない可能性がある。

- ・ *リスク判定*は、リスク評価手続きの最終ステップである。その目的は、意思決定をする上で必要とされる、リスクに関する基本的な科学的証拠および根拠を提供することによって、リスク管理をサポートすることにある。リスク判定では、妥当する曝露シナリオのもとでの人間の健康に対するリスクの推定が提示される。このように、リスク判定は、利用可能な科学的証拠の評価および統合であり、人間に対するリスクの特性、重要度、しばしば規模を推定するために使用され、これには、特定の状況下で EMF への曝露から結果すると合理的に推定される不確定要素の認識および特性付けも含まれる。

健康リスク評価は、リスク管理へのインプットとして利用することができ、これには次のものが含まれる。(1) 曝露がなんらかの特定の行為を必要とするか否かについて、決定を下すために必要なすべての活動、(2) いずれの行為が適切であるか、(3) これらの行為の実行、である。このようなリスク管理の行為については、第 13 章で詳細に考察している。

12.2 傷害性確認

12.2.1 生物学的作用と健康有害作用

WHO 憲章によれば、健康とは、身体的、精神的、社会的に完全に安寧な状態であり、単に疾病あるいは虚弱が存在しないことではない。健康に対する実際の傷害性を確認する前に、生物学的作用と健康に対する有害作用の違いを明確にすることが役に立つ。生物学的作用とは、この場合には、ELF 電磁界への曝露に対するすべての生理的な反応である。健康に対してなんらの影響も及ぼさない生物学的作用もあれば、有用となる結果をもたらすものもあるが、病理学的な状態、すなわち健康に対する有害作用をもたらすものもある。ELF 曝露に起因する迷惑あるいは不快感は、それ自身では病理学的なものではないが、具体化すれば、個人の身体的および精神的な安寧に影響を及ぼす可能性があり、その結果もたらされる作用は、健康への有害作用とみなされる場合がある。

12.2.2 急性作用

EFL 電磁界は、それに曝露した人間の神経システムに影響を及ぼすことが可能であり、非常に高い曝露レベルでは神経刺激など健康に対する有害な結果をもたらす。低レベルでの

曝露は、中枢神経系の神経組織の興奮性に変化をもたらし、それにより記憶、認識、その他の脳の機能に影響を及ぼす可能性がある。これらの神経系に対する急性作用が、国際ガイドラインの基礎となっている。しかし、一般的な環境およびほとんどの労働環境における低レベルの曝露では、これらのことが発生する確率は低い。

ELF 電界への曝露は、表面電荷を誘発し、これはマイクロショックなど、知覚はできるが傷害性のない作用をもたらす可能性がある。

12.2.3 長期作用

連日の長期的な低強度 ELF 磁界への曝露が健康リスクをもたらす可能性があることを示唆する科学的証拠は、小児白血病のリスク増加において一貫したパターンが示された疫学研究を基にしている。傷害性評価における不確定要素には、対照選択バイアスおよび曝露誤分類が果たす役割などがある。さらに、事実上すべての研究室における証拠ならびに機序に関する証拠は、低レベル ELF 磁界曝露と生物学的機能あるいは疾患状態の変化との間の関連を支持していない。このように諸般の事情を考え合わせると、証拠は、因果関係があるとみなすに足るほど強いものではなく、それゆえ、ELF 磁界は、発癌性の可能性があるものと分類されるにとどまっている。

これ以外の多くの疾病についても、ELF 磁界曝露との関連の可能性が調査されてきている。調査されたものには、小児および成人のその他のタイプの癌、うつ病、自殺、生殖障害、発育不全、免疫修飾、神経疾患、心血管系疾患などがある。ELF 磁界への曝露とこれらのいずれかの疾患との関連を支持する科学的証拠は、小児白血病に対するものよりも弱く、さらにいくつかの事例では（例えば心血管系疾患または乳癌）、証拠は磁界がこれらの疾患を惹起しないという確信を与えるに十分なものである。

12.3 曝露評価

電磁界への曝露は、瞬間値あるいは時間的な平均値で表すことができる。いずれの値も、発生源パラメータあるいは測定値から算出することができる。

12.3.1 住宅での曝露

住宅での曝露の場合、様々な国のデータは、ELF 磁界強度の幾何平均が家を通じて大きく変わらないことを示している。家の中の ELF 電界平均値は、数十ボルト／メートルにまで上がる可能性がある。ある種の器具の近くでは、瞬間磁界値は、数百マイクロテスラまで

上昇する可能性がある。電力線のそばでは、磁界は約 $20\mu\text{T}$ にまで達し、電界は、数百～数千ボルト／メートルになりうる。

小児白血病に関する疫学研究は、平均住宅 ELF 磁界値が $0.3\sim 0.4\mu\text{T}$ を超えるものを癌のリスク因子として焦点をあててきている。いくつかの徹底的な調査の結果は、約 $0.5\sim 7\%$ の児童が時間平均曝露で $0.3\mu\text{T}$ を超えており、また $0.4\sim 3.3\%$ は、 $0.4\mu\text{T}$ を越えた曝露を受けていることを示している。ELF 磁界曝露と小児白血病に関するケースコントロール研究に基づいた計算では、ほぼ同様の範囲の結果が出ている。

12.3.2 職業被曝

職業被曝は、主に電力周波数およびその高調波である。職場での磁界曝露は、約 10mT にまで上る可能性があり、これには大電流を流している導体の存在が常に関連している。電力供給業界では、労働者は最大 30kV/m の電界に曝露する可能性があるが、これは身体内で電界を誘発するため、接触電流およびマイクロショックの発生上昇がもたらされる。

12.4 曝露－反応評価

曝露－反応評価は、個人が受けた曝露と作用発生の関係を特性付ける手続きである。曝露－反応関係を評価する方法は数多くあるが、これらの評価を実行するためには、多くの仮定を使用しなければならない。

12.4.1 閾値

いくつかの作用では曝露との関係が連続的であるが、閾値が存在するものもある。これらの閾値を測定するにあたっては、ある程度の不正確性がともなうだろう。不確定要素の都合いは、曝露限度を導出する目的で組み込まれる安全要素の値に部分的に反映される。

周波数依存閾値は、電氣的に興奮性の組織、特に中枢神経系の組織に対する急性作用において、すでに確認されている。これらの作用は、ELF 電界あるいは磁界への曝露によって身体組織内で誘発される電界および電流によってもたらされる（第 5 章を参照）。ICNIRP（1998a）は、中枢神経系（CNS：脳および脊髄、頭部および胴体に位置する）の機能での急性の変化に対して、電流密度閾値の 100mA/m^2 を確認しており、これらの組織で誘発される電流密度に対して労働者では 10mA/m^2 、一般公衆では 2mA/m^2 の基本制限を推奨している。神経組織の生理学に関する一般的考察により、これらの制限は 4Hz から 1kHz の間では一定、この周波数より上あるいは下では上昇するべきであることが示唆されている。

さらに近年、IEEE (2002) は、50%の健常成人で脳機能に変化を起こすための誘導電界強度の閾値を 20Hz で 53mV/m と確認している。考慮された作用には、眼閃誘発およびその他のシナプス相互作用に対する作用などがある。IEEE は、脳での誘導電界強度の基本制限として、「管理された」環境では 17.7mV/m、一般公衆では 5.9mV/m を推奨している。眼閃閾値は 20Hz を超えると上昇するため、IEEE が推奨する基本制限は、760Hz までは周波数比例法則に従い、それを超えると 100kHz までは末端神経刺激に基づいた制限となる (IEEE、2002)。最終的な効果としては、電力周波数 (50/60Hz) およびそれを超える部分では、IEEE (2002) の推奨するガイダンスよりも ICNIRP (1998a) の推奨するガイダンスの方が厳しくなっている (下記の 12.5.1 節を参照)。この主な原因は、電界強度および誘導電流密度が上昇を始める閾値としての周波数区分 (IEEE では 20Hz、ICNIRP では 1kHz) が異なることによる (Reilly、2005)。

長期作用に対する閾値は確認されていない。

12.4.2 疫学的方法

曝露-反応関係を疫学的に特性付ける上でもっとも一般的な方法は、曝露単位ごとあるいは曝露カテゴリを通じての相対リスクまたはオッズ比の推定を出すものである。

ほとんどの疫学研究は、後者の方法を使用している。概略すると、ELF 磁界および小児白血病に関する研究について最近行われたプール解析 2 件が、用量反応分析を提示している。これらの分析は、曝露カテゴリおよび連続的な曝露データの両方をもとにして行われている。これらの分析はいずれも、リスク増加が 0.3~0.4 μ T あたりから検出可能となることを示している。これらの値を超えた曝露レベルに関し、現時点のデータでは、高曝露カテゴリでの事例数が少なすぎるため、これ以上の分析はできない。

12.5 リスク判定

12.5.1 急性作用

電氣的に興奮性の組織、特に CNS 内の組織に対する急性作用をもとにした曝露限度は、いくつかの国際組織によって提案されてきている。50Hz での一般公衆に対する現行の ICNIRP (1998a) ガイドラインは、電界が 5kV/m、磁界が 100 μ T であり、60Hz では、それぞれ 4.2kV/m、83 μ T となっている。労働者に関しては、それぞれ 50Hz では 10kV/m および 500 μ T、60Hz では 8.3kV/m および 420 μ T となっている。IEEE (2002) の曝露レベルは、一般公衆に対する 60HzEMF の曝露が 5kV/m および 904 μ T となっている。職業グ

ループに関しては、IEEE レベルは 60Hz で 20kV/m および 2710 μ T である。IEEE および ICNIRP がそれぞれ独自に提示したガイドラインでの相違は、異なる有害反応閾値、異なる安全要素、異なる移行周波数すなわち標準機能が特性を変更する周波数を使用したことに由来する（第 12.4.1 節を参照）。

12.5.2 長期作用

疫学的データから単一のエンドポイントに対してリスクを特性付ける最も一般的な方法は、寄与割合を使用するものである。寄与割合は、確立された曝露-疾患関係に基づいており、曝露が寄与した（疾患）症例の割合である。寄与割合は、当該集団が曝露した場合に発生した集団内での症例数と、当該集団が曝露していない場合と同じ集団内で発生した症例数とを、当該集団の他の性質は変わらないものと仮定して比較したものである。因果関係の仮定は、この評価では非常に重要である。第 11 章および本章の後半で述べられているように、小児白血病と ELF 磁界曝露に関する疫学的データには数多くの制限があり、また多数の実験研究による支持証拠がないことから、この種の仮定を受け入れることは難しい。しかしながら、公衆衛生に及ぼしうる影響に関するなんらかの洞察を提供する目的で、関連に因果関係があるものと仮定して、リスク判定が実行されてきている。

ELF 磁界曝露からもたらされる可能性のある小児白血病に関する寄与割合は、多くの文献で計算されている（Banks & Carpenter, 1988 ; Grandolfo, 1996 ; 職業安全と衛生に関する国立委員会（NBOSH - National Board of Occupational Safety and Health et al. 1996 ; NIEHS, 1999）。Greenland および Kheifets (2006) は、小児白血病と ELF 磁界曝露に関してプールされた 2 件の別のデータセット（Ahlbom ら、2000 ; Greenland ら、2000）の分析をさらに詳しく述べ、プール解析に含まれていたよりも多くの国における寄与割合の推定をカバーした最新の評価を提示した。世界的規模で見れば、曝露に関する情報のほとんどは、工業国から来ている。アフリカや南アメリカなど、曝露に関する典型的な情報が入手できない地域が世界には数多くある。主な研究地域、つまり北米、ヨーロッパ、ニュージーランド、アジアの一部からのオッズ比は、同様の値であるが（そして、それゆえ、これらの地域で得られたデータのプール解析による推定値が現行の計算で使用可能である）、曝露分布に関してはこれらの地域間で大きな違いがある。その他の地域との間、またその他の地域同士では、これと等しいか、あるいはより大きな違いがあると予想される。それゆえ、工業国のデータから算出された寄与割合の推定値を、途上国をカバーする目的で確証的に一般化することはできない。

また Greenland および Kheifets (2006) は、立てられた仮定を変更することで、寄与割合の推定における不確定さの分析も実行している（この分析に関する詳細は補遺で述べられ

ている)。ケースコントロール研究での曝露分布を使用した場合、計算された寄与割合は、一般的にヨーロッパおよび日本の研究では1%未満、北米の研究では1.5~3%であった。曝露調査に基づくと、寄与割合値は、全地域に関しては1%から5%の間でばらついた。これらの数値に対する信頼限界は、かなり大きなものであった。さらに、これらの計算が曝露の蔓延度および分布に関する仮定ならびに曝露が疾患にもたらす作用に大きく依存しているため、非常に不正確となっている。そのため、因果関係ありと仮定した上で、世界的規模で言うならば、算出された寄与数値の最良の点推定値（10の位で四捨五入）では、ELF磁界曝露に寄与することが可能な小児白血病の年間症例数は100症例から2,400症例の範囲にある（これらの数字は、補遺の図A3およびA4から導いた；Kheifets, Afifi & Shimkhada, 2006）。これは、2000年に世界全体で約49,000例と計算された年間白血病総症例数の0.2~4.9%にあたる（IARC, 2000）。

12.5.3 リスク判定での不確定性

12.5.3.1 生物物理学的機序

ELF電磁界について提案された様々な直接的および間接的な相互作用の機序に関し、その生物物理学的な説得力は、特に生物学的過程あるいは実体の中でそのような電磁界に曝露することで発生する「信号」が、内在的なランダムなノイズと区別されるか否か、ということに依存している。どの機序が妥当であるかについては、大きな不確定性がある。人間の身体と電磁界の直接的相互作用に関する機序では、低電磁界レベルにおいてその他のものよりも働いている可能性があるものとして、3つの機序が際立っている。それは、神経組織ネットワークでの誘導電界、ラジカル対の持続時間延長、磁鉄鉱への作用である。

12.5.3.2 曝露測定

現時点では、あるとすれば曝露のどの側面が傷害をもたらしうるのかが判明していない。特定の行為は、曝露の一側面を軽減するが、同時に他の側面を知らぬ間に高めている可能性もあり、もしその側面が因果関係の要素であるならば、リスク増加がもたらされることになる。しかし、通常の仮定は、曝露は少ない方が好ましく、曝露の一側面を軽減することは、同時に傷害性の恐れがあるその他の側面も低下させる、というものである。これらの仮定のいずれも確実ではない。事実、いくつかの実験室での研究は、EMFによって惹起される生物学的作用が、電磁界の周波数および強度の窓内でばらつくことを示唆している。このような複雑で特殊なパターンは毒性学および疫学で受け入れられている教義のいくつかに反するものであるが、これらが現実であるかもしれないという可能性は無視することができない。

12.5.3.3 疫学

0.3~0.4 μ T を越える平均磁界曝露と小児白血病との間で一貫して観察される相関関係は、偶然、選択バイアス、誤分類、または相関関係あるいは真の因果関係と交絡する可能性のあるその他の因子によるものである可能性がある。プール解析が多数に基づいているとすれば、ありうる説明として偶然は確率が低いと思われる。ありうる交絡因子を考慮に入れてもリスク推定値は変化せず、また電界あるいは磁界の側面を提示していない要素からの実質的な交絡はまずないと思われる。選択バイアス、特にケースコントロール研究での対照の選択は、ELF 磁界曝露と小児白血病との間で一貫して観察される相関関係に部分的に寄与している可能性がある。曝露評価の困難性によって、曝露における非特異的な誤分類が大きくもたらされた可能性があるが、このことが観察された相関関係の説明を提供するとは思えず、実際にはリスクの大きさに対する過小評価に結びつく可能性もある。曝露誤分類は、ありうる用量-反応関係にも不確定性を持ち込む可能性がある。寄与割合の推定値が相対リスクおよび曝露蔓延度から計算され、そのいずれもが曝露誤分類によって影響を受けることから、寄与割合も曝露誤分類に影響される可能性がある。

しかし、相対リスクに対する作用と曝露誤分類に対する作用は、逆方向に働く傾向がある。

12.6 結論

ELF 電磁界への曝露に関して、健康に有害な結果をもたらす可能性がある周波数範囲の 100 kHz までについては、急性生物学的作用が確立されている。それゆえ、曝露限度が必要とされる。この問題に対応した国際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で、適切な防護が得られる。

一貫した疫学的証拠は、長期の低強度 ELF 磁界曝露が小児白血病のリスク増加と関連していることを示している。しかし、因果関係に関する証拠は限られており、そのため疫学的証拠に基づいた曝露限度は推奨されないが、なんらかの予防的措置は正当化される。

13 防護手段

13.1 はじめに

ELF 電磁界によって起こり得る健康リスクに関する 25 年間の研究により、多くの知識と理解が得られたが、いまだに重要な科学的不確定性は残されている。神経系に対する急性作用が確認され、これが国際ガイドラインの基礎を形成している。起こり得る長期作用に関しては、疫学的研究は、連日の低強度 EFL 磁界曝露が、小児白血病のリスク増加の可能性をもたらすことを示唆しているが、因果関係があると考えられるほどには証拠は強くなく、それゆえ ELF 磁界は発癌性の可能性があるものとして分類されるにとどまっている。研究されたその他の作用に対する証拠はさらに弱く、これには、小児および成人でのその他のタイプの癌、うつ病、自殺、生殖障害、発育不全、免疫修飾、神経疾患、心血管系疾患などが含まれる。

起こり得る健康上の長期有害作用に関する決定的なデータがないことから、意思決定者は公衆衛生を防護するうえで取り得る幅広い手段に直面する。選択の決定は、科学的データの評価だけでなく、地区の公衆衛生の背景情報および様々な利害関係者の利害関係および圧力のレベルにも依存する。

本章では、ELF リスク管理に対する公衆衛生手段を記述する。現行の国際 EMF 規格およびガイドラインの科学的根拠を見直し、その後、現在ある EMF 政策を概略する。予防原則に基づいたアプローチの使用について考察し、科学的不確定性を考慮に入れ、適切であるとみなされる防護手段に関する推奨を提供する。

本章の文脈においては、用語「政策立案者」は、国および地方自治体の当局、規制者、その他の利害関係者で、政策、方策、規制、技術的規格、運営手続きの策定に責任がある者を意味する。

13.2 健康政策における一般的問題

13.2.1 環境保健リスクの取り扱い

特定の物質が健康に及ぼす影響を取り扱うリスク分析アプローチでは、ほとんどのものが 3 つの基本ステップを含んでいる。

第 1 ステップは、健康上のリスクを確認し、リスクプロファイルあるいはリスクの枠組みを確立することである。これには、健康の背景情報、リスクが及ぶと思われるものの価値、

起こり得る結果に関する簡単な記述が必然的に伴う。また、全体的な国の公衆衛生および労働衛生を背景として、その中でリスク要素を優先することも含まれる。またこのステップは、資源の投入およびリスク評価の依頼も含むことになるだろう。

第 2 ステップは、リスク評価（傷害性確認、曝露評価、曝露-反応評価、リスク判定）を実行することで、これには、本文書で実行されたようにリスク因子の作用に関する科学的評価が含まれる（第 12 章を参照）。いくつかの国では、EMF 健康関連の作用に関する自国の科学的評価を、公式な健康リスク評価手続き（例えば、米国の EMF RAPID プログラム、NIEHS、1999）を通じて実行するか、または独立した諮問委員会（例えば、英国における非電離放射線に関する独立諮問グループ、AGNIR、2001b）を通じて実行する資源がある。その他の国は、より非公式な手続きを通じて、科学的根拠に基づいたガイドラインあるいはこれらに対する変更を策定する場合がある。

最後に、リスク管理方針について、すべての健康リスクの管理では複数の方法があるということ考慮に入れ、考察する必要がある。特に、複雑で、議論の余地がある不確定なリスクに関しては、適切な管理手続きを考案する必要がある。これらの事例の目標は、適切な意思決定手続きを策定し、適切なレベルの予防を適用し、社会の同意を得ることによって、不確定性および不適切な情報に対処する方法を確認することにある。用語「リスク管理」は、リスクが除去あるいは軽減を必要とするか否かについて決定を下す上で必要な行為をすべて含んでいる。リスク管理方針は、規制的、経済的、諮問的、技術的なものに大まかに分類できるが、これらのカテゴリはお互いに排除しあうものではない。このように幅広い要素の集合が、最終的な政策立案あるいは規制立案手続きで考慮に入れられるが、これには、法的命令（法令によるガイダンス）、政治的考慮事項、社会経済的価値、費用、技術的実現可能性、リスクのある人口集団、リスクの期間と規模、リスクの比較、国際取引に対して起こり得る影響などがある。人口集団のサイズ、資源、目標達成の費用、リスク評価の科学的な質、それに続く経営決断など、重要な意思決定因子は、決定の背景ごとによって非常に大きく変化する。リスク管理は複雑で学際的な手続きであり、体系化あるいは統一されることはまずなく、しばしば組織化されておらず、幅広い種類のソースからもたらされる展開しつつあるインプットに反応し得るものであることも認識されている。リスク認識とリスクコミュニケーションは、リスク管理決定が可能な限り最大限の公衆に受容される上で考慮しなければならない重要な要素として、その認識が高まっている。

リスクの確認、評価、管理の手続きを有用となるよう明確なステップで記述することは可能であるが、現実的には、これらのステップはお互いに重なり融合しており、すべての段階で両方向のフィードバックと利害関係者の参加が含まれている反復的な手順として定義されることが理想である（図 10）。

13.2.2 健康政策に影響を及ぼす因子

政策立案者にとって、科学的証拠はかなりの重みを持つが、排他的な基準ではない。最終決定には、社会的価値、例えばリスクの受容性、費用と利益、文化的な嗜好性なども組み込まれる。政策立案者が回答しようと努力している質問は、「健康を守り、促進するためには、どのような行動を取ればよいのか」である。

政府の健康に関する政策は、「公平」すなわち公正なレベルの防護に対する各市民の権利と費用がかかる部分での「効率」とのバランスに基づいている。

確認されたリスクがある場合、特定の物質、技術、介入から生起するリスクあるいは疾患の軽減に対して社会が置く価値は、軽減が実際に起こるという仮定に基づいている。非自発的な曝露に関しては、生涯死亡リスクで 100,000 分の 1 の概念的 (de minimis=無視できるほど小さい) 値が、一般的な閾値 (1,000,000 分の 1 が理想的目標) として受け入れられており、これ以下のリスクは受容できるか改善が非現実的であるとみなされる (WHO、2002)。例えば、ラドンからの電離放射線曝露のリスクは比較的十分に特性づけがなされており、曝露が生涯に 100,000 名につき 1 名を超える放射線誘発の癌をもたらさないよう、曝露を低減しなければならない。

政策の策定にあたっては、規制者は利益を最大にし、社会的コストを最小化しようとする。次に述べる問題は、この手続きの一部であるとみなされている。

- ・ **公衆の健康/安全** — 政策の主要目的は、人口集団への危害を軽減あるいは除去することである。健康に対する有害な作用は、通常は曝露に起因する罹患率ならびに作用が発生する確率によって測定される。これらは、曝露に起因する疾患あるいは死亡の増加事例数あるいは曝露低減によって避けられた事例数によっても測定することが可能である。
- ・ **政策の全体的なコスト** — コストとは、単に金銭的な支出以上のものを指しており、社会全体に対する政策のコストである。その分配については考慮しないが、コストはいくつかの構成部分から成り立っている。(a) 実行した手段に関して社会全体に課せられた直接的コスト、(b) 社会への間接的コスト、例えば、技術の最適以下での利用によってもたらされたもの、(c) 政策によって生み出されたコスト削減、例えば、有用な技術の迅速な実行。

- ・ **公衆の信頼** — 政策に対して公衆が持つ信頼の度合いならびに公衆衛生を適切に防護するための効果的手段として受容する度合いは、多くの国において重要な目的となっている。さらに、公衆が安全であると感じることはそれ自体で重要である。なぜなら WHO の健康の定義は、社会的な安寧を述べており、疾患あるいは虚弱がないことだけではないからである (WHO、1946)。
- ・ **利害関係者の参与** — 公正で、開かれており、透明な手続きが優れた政策立案では必須である。利害関係者の参与には、政策策定の各段階での参加、提案された政策の実行に先立つその審査とコメントを与える機会などがある。このような手続きにより、科学的専門家あるいは政策決定者のみが選択したであろうものとは異なる結果が合法的にもたらされる場合もある。
- ・ **曝露源の非差別的な取り扱い** — すべての曝露源は、曝露を考慮する場合には同じ注意を受けるべきである (例えば、ELF 電磁界では、家庭、家電機器、電力線、変圧器にアースを付けることで磁界を低減する場合)。政策は、曝露低減に関して最も費用効果の高いオプションに焦点を当てるべきである。政策立案者は、(a) 新規あるいは既存の設備に対しては異なる考慮が与えられるべきか、(b) 非自発的曝露と自発的曝露に対する異なる政策は正当化されるか、について決定を下さなければならない。より詳しい情報は、予防原則に関する欧州委員会の声明を参照されたい (EC、2000)。
- ・ **倫理的、道徳的、文化的、宗教的制約** — 利害関係者との相談にもかかわらず、個人あるいはグループは、政策が倫理的、道徳的、文化的に受容できるものであるか、あるいは宗教的な信念に合致したものであるかに関して、視点が異なる場合がある。これらの問題は、政策の実践に影響を及ぼし得るため、考慮する必要がある。
- ・ **可逆性** — 政策の実践がもたらす結果については慎重に考慮しなければならない。政策は、現行の情報に基づいたバランスの取れたものである必要があり、新たな情報が利用可能となった場合には修正できるよう十分な柔軟性を含んでいなければならない。

13.3 科学的インプット

EMF 曝露に起因するすべての傷害に対する科学に基づいた評価が、曝露限度に関する国際

ガイドラインの基礎を形作っており、公共政策の応答に必須のインプットを提供している。限度値を決定する基準および手続きは、「健康に基づいた EMF 規格策定のための WHO フレームワーク」(WHO、2006a) で概略されている。

13.3.1 放射および曝露規格

材料、製品、加工、サービスがその目的に確実に適合するよう、規則、ガイドライン、特性の定義として一貫して用いられる技術的仕様あるいはその他の正確な基準から、規格は成り立っている。EMF の場合には、これらは、放射規格（器具からの放射限度を特定するもの）、測定規格（曝露あるいは放射規格への遵守がどのように確実化されるかについて記述したもの）、曝露規格（生活環境あるいは労働環境に EMF を放射するすべての器具からの人間の曝露限度を特定するもの）などである。

放射規格は、EMF 放射機器に対して様々な仕様を設定し、一般的には技術的な考慮に基づいている。例えば、その他の機器との電磁的な相互作用を最小化するため、あるいは当該機器の効率を最大化するためなどである。放射規格は、通常は国際電気標準会議 (IEC)、米国電気電子技術者協会 (IEEE)、国際電気通信連合 (ITU)、欧州電気技術規格調整委員会 (CENELEC)、ならびにその他の独立組織および国の規格化当局によって策定される。

放射規格は、特に曝露限度の遵守が確実に行われることを目的としているが、規格は健康上の考慮事項にのみ基づいているのではない。一般的に、放射規格は、その器具の使用によって、その他の EMF 放射器具の近隣において使用する場合でも、曝露限度を越えることがないように、機器からの放射への曝露が確実に十分に低くなることを意図している。

人間の EMF 曝露を制限している曝露規格は、EMF が健康に及ぼす影響に関する情報を提供している研究、また物理的特性および使用中のソース、曝露によってもたらされる結果のレベル、リスクのある人口集団をもとにしている。曝露規格は一般的に不特定数のソースから全身体あるいはその一部が曝露することができる最大レベルを基準としている。このタイプの規格は通常は安全因子を統合しており、個人の曝露を制限するための基本ガイドを提供している。このような規格に関するガイドラインは、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP、1998a)、米国電気電子技術者協会 (IEEE、2002) および多くの国の当局が発行している。このことについてはすでに第 12 章で考察した。ICNIRP ガイドラインを採用した国もあるが、その他の国ではこれらに法的な根拠を与えることなく事実上の規格として使用している (WHO、2006b)。

13.3.2 全体像としてのリスク

ELF 磁界への長期的曝露が小児白血病のリスク増加をもたらすか否かについては、科学的な不確定性がある。さらに、そのようなリスクからもたらされることが推定される微小な作用、小児白血病の発生頻度が低いこと、 $0.4\mu\text{T}$ を超える平均曝露がまれであること、妥当な曝露測定を決定することの不確定性（第 12.5.3 節を参照）を考慮に入れると、小児白血病データに基づいて ELF 磁界への平均曝露を $0.4\mu\text{T}$ 未満に抑えることを目標とした曝露限度の実行は、社会にとって全体的な利益となる可能性は低い。

一般公衆の ELF 磁界への実際の曝露は、通常、国際曝露ガイドラインよりもかなり低い。しかし、一般公衆は、低レベルの環境曝露がもたらす長期作用の可能性にしばしば懸念の焦点を当てている。ELF 磁界が発癌性の可能性があるものとして分類されたことで、ELF の曝露限度が十分な防護を提供しているか否かに関し、いくつかの国で再評価がなされることになった。これらの再評価のおかげで、下記で考察するように、多くの国および地方自治体による予防的手段の策定がもたらされた。

13.4 予防原則による政策アプローチ

人口集団を防護することは政治的手続きの一部であるため、国によっては、健康政策に影響を及ぼす因子に対応して、環境ハザードに対して異なったレベルの防護を提供することを選択する場合があると思われる（第 13.2.2 節を参照）。科学的な不確定性に対処するため、防護に対する様々なアプローチが提案されてきている。近年では、予防的政策、特に予防原則に対して言及されることが増えてきている。

予防原則は、科学的な不確定性の状況下で、傷害性に対する強い証拠が得られる前に行動を起こす必要があるような場合において適用されるリスク管理ツールである。その意図は、健康に関して起こり得る重大な危害に対して、より科学的な基礎に基づいた対応を策定するために適切なデータが得られるまで、暫定的な対応法の草案作成を正当化することにある。予防原則は、国際法（EU、1992；国連、1992）でも言及されており、欧州環境法案（EC、2000）の基礎となっている。国の法律においても言及されており、その例としてはカナダ（カナダ政府、2003）およびイスラエル（イスラエル政府、2006）がある。予防原則、ならびにそれと科学および規格の策定との関係については、いくつかの文書において考察されている（Foster, Vecchia & Repacholi, 2000；Kheifets, Hester & Banerjee, 2001）。

13.4.1 既存の予防的ELF政策

長期 ELF 曝露によって起こり得る作用に関し、政策立案者は、文化的、社会的、法的考慮に基づいた幅広い範囲の予防的政策を用いて対応してきた。これには、児童に主に影響を与える疾患を排除することに与えられた重要度、自発的ではなく非自発的な曝露の受容性、意思決定手順において不確定性に与えられた様々な重要度などがある。いくつかの手段は義務であり法によって要求されているが、その他のものは自主的なガイドラインである。その例のいくつかを下記に提示した。

- ・ **慎重な回避** — この予防原則に基づいた政策は、電力周波数 EMF に対して策定された。これは、施設の方向転換および電気系ならびに機器の再設計を低コストから比較的 low コストで行うことで、ELF 電磁界に対する人間の曝露を低下させるためにとるステップと定義された (Nair, Morgan & Florig, 1989)。慎重な回避は、オーストラリア、ニュージーランド、スウェーデンなどいくつかの国で政策の一部として採用されている (表 85 を参照)。実行することができる低コストの手段には、新しい電力線のルートを学校から遠ざけること、通行権のある場所の近くでは磁界を低減するよう電力線の導線を位相調整し配置することなどがある。
- ・ **受動的な規制行為** — この推奨は、ELF 問題に関して米国で導入されたもので (NIEHS, 1999)、曝露を低下させるための実際的手段を講じる代わりに、個人の曝露を低下させる方法について公衆を啓蒙することを唱えている。
- ・ **予防的放射コントロール** — この政策はスイスで施行されたもので、放射レベルを「技術的および運営的に実現可能な限り」低く保つことによって、ELF 曝露を低下させるために使用された。放射を最小化させる手段は、また「経済的に実行可能」でなければならない (スイス連邦評議会, 1999)。機器あるいは特定クラスの機器からの放射レベルはコントロールされるが、全ソースの EMF からの人間曝露の最大レベルとしては、国際曝露限度 (ICNIRP, 1998a) を採用している。
- ・ **予防的曝露限度** — 予防的手段として、いくつかの国では曝露に対する限度を低くしている。例えば、2003 年にイタリアが ICNIRP 規格を採用したが、EMF 曝露に対しては更なる二つの限度を導入した (イタリア政府, 2003)。(a) 特定の場所、例えば児童の遊び場、住宅地、学校の敷地などに対しては、ICNIRP 基準レベルの 10 分の 1 にあたる「注意レベル」、ならびに (b) 新しいソースと新しい住宅にのみ適用されるよ

りさらに制限的な「品質目標」である。50Hz に対してそれぞれ選ばれた 10 μ T および 3 μ T は、恣意的なものである。このレベルにおいて起こり得る急性作用の証拠もなければ、白血病に関する疫学的研究で、3 μ T の曝露が 10 μ T あるいは 100 μ T の曝露よりも安全であることを示唆する証拠もない。

電力周波数電磁界の曝露に適用された様々なタイプの予防的政策のその他の例を、表 86 に示した (Kheifets ら、2005)。世界各地での EMF 規格に関する完全なデータベースは、WHO 国際 EMF プロジェクトのウェブサイトにて提示されている (WHO、2006b)。

13.4.2 コストと実現可能性

規制者が直面する問題は、様々な目的と制約条件の間で、トレードオフをどのように決定し評価するかということである。リスクに対するゼロ容認が求められた場合、このことはコストが重要ではないことを意味しており、これは資源に制限がある場所では問題となる。これとは反対に、技術に傷害性があると証明されていない条件下で、これらの技術の使用および導入を受容することは、起こり得る健康への影響を無視し、社会が支払うつもりのないコストを課すことになる可能性がある。

実利主義的な見地から、政策決定はコストの考慮なしでは下すことはできず、これらのコストは利益との関係において考えられなければならない。政策オプションのコストと利益は、最も幅広いレベルにおいて考慮されなければならない。また様々な利害関係者に対するコストと起こり得る利益が理解できるような方法で提示されなければならない。コストは、それが業界、消費者、あるいはその他の者が負担するにせよ、すべて含まれていなければならない。安全性に関して非常に慎重でありたいとする社会の正当な欲求を受容した場合でも、ELF 電磁界への曝露低減に関して非常に低コスト手段以上のものを正当化するのは難しいであろうと思われる。

EMF に対する予防的行為のコストと利益を考慮するためのアプローチの例は、様々な国で見られる。電力線からの電磁界を低減するために取り得る行為のコスト評価の 1 例は、オランダである (Kelfkens ら、2002)。ここでは、国の地理学的記録を用いて、電力線に近隣する住宅を確認し、これから様々なレベルの ELF 磁界に曝露している住宅の数を算出した。その後、取り得る 4 種の介入方法が検討された。これはベクトル列の再配置、位相導体反転、電力線の移転ならびに埋設で、それぞれの方法について、住民が近隣に住んでいる電力線に関してコストが出された。また、これらの各手段が電力線への様々な電磁界レベルでの距離における変化に与える作用も算出した。コストを任意の電磁界レベルへの曝露から除去された住宅数で割ることにより、「住宅利得ごとの平均コスト」が提示された。

0.4 μ T に関しては、住宅ごとのコストは、ベクトル列の再配置が 18,000 ユーロ、位相導体反転が 55,000 ユーロ、電力線移転が 128,000 ユーロ、埋設が 655,000 ユーロであった。この種の分析は、政策立案者にとって、技術的手段とその他の手段、たとえば電力線あるいは住居の移転などの検討および比較ができるため利用価値がある。

電力線からの EMF および学校での EMF に関連した徹底的な「仮定」政策分析が、1990 年代後半にカリフォルニアで行われた。この研究の著者らは、次の質問に対し、実利主義的アプローチおよび義務倫理的アプローチの両方から考察した。「低コストあるいは高コスト EMF 除去手段をとる前に、EMF がもたらす疾患影響の範囲について、どの程度にまで確実である必要があるか？」その結果は、「政策オプション」文書に概略されている。コンピュータモデルが作成され、これにより様々な変数、例えばコスト、疾患の可能性、疾患の範囲が及ぼす影響を利用者が検討できるようになった (von Winterfeldt ら、2004)。費用効果分析は、科学的確実性が「合理的な疑いを超えた」レベルに満たない場合、比較的 low cost での除去手段が、費用効果の観点から正当化することが可能であると示唆する傾向にあった。このアプローチはカリフォルニアでは公式には実行されておらず、同地では zero cost あるいは low cost 政策が最近改めて是認されている。

スウェーデンの 5 つの政府当局が、「意思決定者のガイダンス」を 1996 年に発行しており、この中で合理的な支出での慎重さが推奨されている。いくつかの事例研究に関してコスト推定の例が提示されている。同ガイダンスの著者らによる予防原則の定義に基づくなら、検討対象の環境において正常とみなすことができる範囲から電磁界が大きく逸脱している場合に、手段を検討しなければならない (NBOSH、1996)。

死亡あるいは疾患症例を予防することの利益に関して理論的な数値を設定しようとする場合、EMF 以外の領域から広範な文献が利用できる。経済的価値を得るための主な 2 アプローチは、「人的資本」と「支払意思額」である。「人的資本」は、死亡によってもたらされる社会損失を計算する試みであり、例えば、当該人物が残りの人生で得たであろう給与の損失額を推定することや、あるいはより複雑な分析では、例えば疾患を治療するための社会コストなどが含まれる。「支払意思額」は、個人または全体としての社会が、疾患あるいは死亡を予防するために自発的に支払う額を観察する試みである。これは例えば、高リスク職業で人々に払われる超過給与や地震ゾーンに住むことを避けるために自発的に人々が支払う額を見ることでなされる。

「人的資本」と「支払意思額」のいずれも、社会特異的なアプローチである。例えば、WHO による「南米およびカリブ海における糖尿病のコスト」(Alberto ら、2003) の分析では、人的資本アプローチすなわち早期死亡および障害によってもたらされた所得の損失計算を用い、南米およびカリブ海での早期死亡は、一人当たり 37,000 ドルと価値付けられた。し

かし、受動喫煙に起因する早期死亡の経済的価値に関する WHO の分析 (Adams ら、1999) では、人命損失に対する「支払意思額」に一人当たり 480 万ドルとした USA の EPA 研究、また人命損失の価値を一人当たり 500 万ドルとした他の研究を引用している。給与リスクのトレードオフ法が、この金額を決定するために使用されている。

これらの例は、研究者および国や地方自治体当局が、ELF 曝露に由来する起こり得る健康リスクが予防的手段を実行するに十分であるほど重大であると仮定した上で、いくつかのシナリオをどのように分析したかについての洞察を提供してくれる。これらの活動を実行する資源がない国に対しては、考慮したすべての証拠に基づき、作業グループが適切であるとみなした推奨を下記に提示した。

13.5 考察および勧告

各国は、国際的な科学に基づいたガイドラインを採用するよう奨励されている。EMF の場合には、規格設定の国際的調和が、各国がめざすべきゴールである (WHO、2006a)。規格を補助する目的で予防的手段を考慮する場合、これらが科学に基づいたガイドラインの土台を壊さない方法で適用されなければならない。

様々なオプションを考慮した結果、政策立案者は、一般公衆および労働者を ELF 電磁界の曝露から防護するため、適切で国に特異的な手段を選択し、実行することになる。各政策オプションの評価において該当する因子を表 87 で提示した。予防的手段は、一般的には、義務的強制力を通じてではなく、自主的規定、奨励、共同プログラムを通じて実行される。また予防的手段は暫定的政策ツールとして考えられるべきである。

リスク認識とコミュニケーション

一般公衆の不安を煽る可能性がある要素は多くあるが、そのひとつは政策に世界的統一がないことである。リスクに対する人々の認識は、個人的要素、外部的要素、リスクの性質に依存している (Slovic、1987)。個人的要素には、年齢、性別、文化的あるいは教育的背景などがあり、また外部的要素はメディアおよびその他の形式の情報配布、現行の政治的および経済的状况、意見の動向、当該国の規制手続きならびに政治的意思決定の構造で構成される。

またリスクの性質も、一般公衆が状況に対してコントロールを有している程度、EMF の配置における公正さおよび公平さの程度、特定の疾患への恐れの種類 (例えば、癌対頭痛) に応じて、様々な認識をもたらす可能性がある。リスクに対する公衆の認識に寄与してい

る因子の数が多くなるほど、一般公衆の懸念の可能性は大きくなる。一般公衆の懸念は、公衆、科学者、政府、業界の間での情報とコミュニケーションを通じて軽減させることが可能である。効果的なリスクコミュニケーションは、リスクに関する科学的な計算の提示だけでなく、倫理的モラル的な懸念に関するより幅広い問題を討議するフォーラムでもある（WHO、2002）。

諮問

ELF 電磁界リスクの受容性は、その他の環境保健リスクに比べ、それが科学的情報に関するものであるのと同様、最終的には、少なくとも政治的および社会的な価値と判断に関するものでもある。一般公衆の信頼と信用を確立するためには、利害関係者が適切な時点において意思決定に参加する必要がある。ELF 利害関係者には、政府当局、科学界および医学界、擁護団体、消費者防護組織、環境防護組織、計画者や不動産業者など影響を受けるその他の職業、また電力業界や電気機器製造業を含む業界などがある。このような問題では常に共通見解があるわけではないが、採用された見解は、透明で、証拠に基づいたものであり、批判的吟味に耐えられるものでなければならない。

定期的な評価の必要性

新しい科学的情報が利用できるようになるに従って、曝露ガイドラインおよび規格はアップデートされるべきである。研究によっては、その証拠の強さ、あるいは研究の対象となった健康上の転帰の重症度によって、ガイドラインおよび規格の科学的基礎の再評価を、他の研究よりも強く促進する可能性がある。規格あるいは政策の変更は、対象となった分野での研究の結果が一貫したものであることを確認するため、科学的根拠を全体として適切に評価した後でのみ、行われるべきである。

曝露の低減

予防的アプローチの推奨において、すべてに優先する原則は、とられた行為はいずれも、電力がもたらす基本的な健康上、社会的、経済的利益を損なうものであってはならないということである。現行の科学的証拠の点から見て、また残されている重要な不確定性を考慮すると、いかなる予防的アプローチであれ、それが電力による健康上、社会的、経済的利益に及ぼす影響について評価を実行することが推奨される。これらの利益が損なわれないという前提で、曝露を低減するために予防的手続きを実行することは合理的であり正当化される。曝露低減の実行コストは国によって様々であり、そのため、ELF 電磁界からのリスクとコストのバランスをとるための一般的な推奨を提示することは非常に難しくなっ

ている。ELF 磁界への曝露と小児白血病の関係に関する証拠の弱さ、ならびに公衆衛生に及ぼし得る限定された影響を考慮に入れるなら、曝露低減が健康にもたらす利益は不明であり、そのため曝露低減のコストは非常に小さいものであろう。

13.5.1 勧告

上記に鑑みて、以下を勧告する。

- ・政策立案者は、公衆ならびに労働者が超低周波電磁界を被曝する場合のガイドライン（被曝基準）を設けるべきである。公衆ならびに労働者の被曝基準、そしてそれを定める場合に科学的なレビューをどう行うべきかに関して何にもまして参照すべきなのは、（ICNIRP が定めている）国際的なガイドラインである。

- ・政策立案者は、超低周波電磁界の防護計画を立てるべきである。そしてその中に、公衆もしくは労働者が基準値を超えた被曝をしていないことを確認するためにはどんな電磁波発信源であってもそこからの電磁波を計測する、ということが組み入れられるべきである。

- ・健康と電力がもたらす社会経済的利益の両者は容易に両立しがたい点があるとするなら、被曝を低減するためにはごくわずかなコストで済む予防的措置を講じることが合理的であり、正当なことである。

- ・政策立案者、自治体の計画立案者、企業は施設や電気機器を含む設備を新設する場合には、ごくわずかなコストで済む措置を講じるべきである。

- ・電気・電力機器や装置から漏洩する超低周波電磁界を低減するために工学的な改善を施すことは、たとえば安全性の向上といったようなさらなる利益が得られるのなら、あるいは改善のためのコストがほとんどあるいはまったくかからないのなら、考慮されるべきである。

- ・既存の超低周波電磁界の発生源に変更を加えようとする場合は、安全性、信頼性、経済性を考えて電磁界の低減の対策がなされるべきである。

- ・既存の設備の電力線の配備を変更したり新たに敷設したりする場合は、地方自治体の担当部局は、意図しないところで発生する地下の電流を低減するために、電力線配備に関する規制を強化すべきである。

- ・国の関係省庁は、すべての利害関係者にとって納得のいく政策決定ができるように、有効で開かれたコミュニケーションのための戦略を採用すべきである。そのためには、個人がいかにしてそれぞれの被曝を減らすことができるかに関する情報の提供もなされねばならない。

- ・超低周波電磁界発生源となる主だった規模の施設を設置する場合には、地方自治体の担当部署は、企業と自治体政府と市民との話し合いを進めながら、その施設の設置計画の改良を行うべきである。

- ・超低周波電磁界の被曝の健康影響に関する科学的証拠にはいまだ不確定な部分があるが、政府と企業はその不確定さを低減させることができるような研究計画を推進すべきである。