

平成 20 年度 環境省請負業務報告書

## 一般環境中電磁界ばく露に係る情報収集業務

平成 21 年 3 月

社団法人 環境情報科学センター

## はじめに

本報告書は環境省の依頼により社団法人環境情報科学センターが実施した「平成20年度一般環境中電磁界ばく露に係る情報収集業務」の結果をとりまとめたものである。

本調査においては平成18年度以降に学術論文、国際会議等に現れた磁界暴露と健康に関する情報について、専門家によるとりまとめを得た。磁界暴露の健康影響に多くの関心が集まる中、リスク評価のための有益な資料となるものであれば幸いである。

本調査にご協力をいただいた専門家の方々をはじめ、関係各位にあらためて感謝の意を表す。

平成21年3月

社団法人 環境情報科学センター

理事長 丸田 頼一



## I. 背景

電磁界ばく露による健康影響については、平成8年より世界保健機関（WHO）が国際電磁界プロジェクトを開始し、同国際諮問委員会（IAC）により、電磁界ばく露を適切な範囲に抑えるための行動計画等のリスク管理手法も含め、電磁界ばく露のリスクの検討が行われている。平成19年度には、超低周波電磁界に関する健康リスク評価の結果がWHO環境保健クライテリアとして取りまとめられた。また、米国においては、平成11年に米国エネルギー省による商用周波電磁界に関するRAPID計画が終了した後も、カリフォルニア大学を中心に疫学調査の再検討を実施する等、調査研究が継続されている。一方、高周波電磁界領域では、過去10年間で飛躍的に普及した携帯電話の健康リスクについての関心も高まりつつあり、これらの各種周波数電磁界の健康リスク評価動向と、これに対するリスク管理について、国際動向を適切に把握していくことは、国内一般環境における電磁界ばく露の状況調査あるいは電磁界ばく露による健康影響の把握のための調査を必要に応じて実施していくために不可欠である。

## II. 調査目的

本業務は、国際機関や諸外国政府・機関等における電磁界ばく露による健康影響評価の実施状況や規制動向を把握し、結果のとりまとめを行う他、新たに公刊された論文等の文献の中から、電磁界ばく露の健康リスク評価にとって重要な情報を収集し、内容をとりまとめることにより、わが国におけるリスク評価のための基礎資料を得ることを目的とする。

## III. 調査内容

### (1) 電磁界ばく露の健康影響評価及び規制動向に関する国際機関及び諸外国の動向調査

300GHzまでの電磁界を対象として、WHOのIAC会議における討議内容について概要を取りまとめるとともに、諸外国の主な公的機関が行った電磁界ばく露の健康影響評価に関する取組みについて調査を実施し、取りまとめを行った。また、国際機関及び諸外国における電磁界ばく露に関する規制の動向について調査し、取りまとめた。それぞれ以下の専門家が原稿執筆を担当した。

大久保千代治 明示薬科大学客員 教授、電磁界情報センター 所長  
多氣昌生 首都大学東京大学院 教授

### (2) 電磁界ばく露の健康影響評価に関する文献情報調査

300GHzまでの電磁界を対象として、主要学術誌・学会誌の他、環境省より指示のあった医学、疫学、保健物理領域などの関連雑誌等に掲載された電磁界ばく露の健康影響評価に関連する最新の論文について情報を収集し、概要を取りまとめた。それぞれ以下の専門家が原稿執筆を担当した。

牛山 明 国立保健医療科学院 室長  
山口直人 東京女子医科大学 教授

#### IV. 調査結果

調査結果を本報告書にとりまとめた。本報告書は、第一部として電磁界暴露の健康影響評価に関する国際機関および諸外国の動向調査結果を、第二部として電磁界暴露の健康影響評価に関する文献情報調査結果を示す。

<b>第一部 電磁界ばく露の健康影響評価に関する国際機関および諸外国の動向調査結果</b> .....	<b>3</b>
(I) 国際機関等による電磁界ばく露に伴う健康リスク評価動向.....	3
(II) 電磁界ばく露に関する人体防護ガイドラインと規制の動向.....	29
<b>第二部 電磁界ばく露の健康影響評価に関する文献情報調査結果</b> .....	<b>43</b>
(I) 電磁界ばく露の健康影響評価に関する文献情報（実験室研究）.....	43
(II) 電磁界ばく露の健康影響評価に関する文献情報（疫学研究）.....	63



**第一部**  
**電磁界ばく露の健康影響評価に関する国際機関**  
**および諸外国の動向調査結果**





## 第一部 電磁界ばく露の健康影響評価に関する国際機関および諸外国の動向調査結果

### (I) 国際機関等による電磁界ばく露に伴う健康リスク評価動向

平成19年度ならびに平成20年度に実施された国際機関等の電磁界ばく露健康リスク評価動向について報告する。両年度とも国際機関および各国のリスク評価は、2007年にWHOが超低周波(extremely low frequency: ELF 通常300 Hz以下、ただし、今回WHOがリスク評価の対象としているのは100 kHz以下)電磁界の健康リスク評価を終え、環境保健クライテリア(ELF-EHC) No. 322を発行した事もあり、超低周波電磁界への関心は、利害関係者諮問グループ(SAGE)を例外として、減少している。その反面、今後行われる健康リスク評価対象が無線周波電磁界(RF-EMF)である為、関心は無線周波電磁界に移行しており、各国の健康リスク評価も携帯電話などの無線周波電磁界に集中している。

そこで、各周波数帯の電磁界を対象とした健康リスク評価を行っている、世界保健機関(WHO)国際電磁界プロジェクト、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)、ECの新興・新規同定された健康リスクに関する科学委員会(SCENIHR)、スウェーデン放射線防護庁(SSI)を中心に両年度の健康リスク評価動向を紹介する。

平成19年度では、①世界保健機関(WHO)の国際電磁界プロジェクト国際諮問委員会<sup>1)</sup>、②WHOが主催した「超低周波電磁界の防護方策の開発と実施に関するワークショップ」<sup>2)</sup>、③欧州委員会保健・消費者防護総局の「新興・新規同定された健康リスクに関する科学委員会(SCENIHR)」<sup>3)</sup>、④スウェーデン放射線防護庁(SSI)の「電磁界に関する独立専門家委員会(IEG)」による第4回年次報告書<sup>4)</sup>について述べる。⑤英国の英国保健防護庁(HPA)の「超低周波電磁界に関する利害関係者諮問グループ(SAGE)」中間報告書<sup>5)</sup>とこれに対するHPAの助言<sup>6)</sup>を紹介する。無線周波電磁界、特に携帯電話に対するリスク評価として、⑥欧州連合(EU)第6次研究枠組みプログラム(FP6)の「電磁界ばく露の影響：科学から公衆衛生、より安全な職場へ(EMF-NET)」からの電磁界での生殖および生育への影響に関する調査報告書<sup>7)</sup>、⑦オランダ保健評議会(HCN)の電磁界委員会による電磁界に関する年次報告書<sup>8)</sup>、⑧アイルランド通信・海洋・天然資源省の電磁界の健康影響に関する専門家グループ報告書<sup>9)</sup>、⑨英国の「携帯電話と健康研究プログラム」(MTHR)最終報告書<sup>10)</sup>、⑩フィンランド政府の国家研究プログラム「移動体通信の健康リスク評価(HERMO)」最終報告書<sup>11)</sup>、⑪全米科学アカデミー(NAS)の無線機器の潜在的生物学的・健康影響についての研究ニーズの同定に関する最終報告書<sup>12)</sup>を紹介する。

平成20年度では、①世界保健機関(WHO)の国際電磁界プロジェクト国際諮問委員会<sup>1)</sup>、②国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)の「新たな電磁界放射技術に関する声明」<sup>13)</sup>、③欧州委員会保健・消費者防護総局の「新興・新規同定された健康リスクに関する科学委員会(SCENIHR)」からの「電磁界ばく露の健康影響」と題する提言<sup>14)</sup>、④スウェーデン放射線防護庁(SSI)の「電磁界に関する独立専門家委員会(IEG)」による第5回年次報告(2007年版)

15)、⑤オランダ保健評議会 (HCN) の「BioInitiative 報告」に対する評価結果をまとめた報告書、無線周波電磁界、特に携帯電話に対するリスク評価として<sup>16)</sup>、⑥欧州連合 (EU) の第6次研究枠組みプログラム (FP6) の「電磁界ばく露の影響：科学から公衆衛生、より安全な職場へ (EMF-NET)」からの4つの報告書<sup>17-20)</sup>、⑦ロシア非電離放射線防護委員会 (RNCNIRP) の「子供と携帯電話：次世代の健康が危険に曝されている」と題する声明<sup>21)</sup>、⑧フランス保健・青年・スポーツ文化省からの「携帯電話：健康と安全」と題する声明<sup>22)</sup> について紹介する。

## 1. 平成19年度の国際機関等の電磁界ばく露に伴う健康リスク評価動向

### 1.1 第12回 WHO 国際電磁界プロジェクトの国際諮問委員会 2007年6月18～19日 (ジュネーブ)<sup>1)</sup>

以下に国際諮問委員会での議事概要を示す。

- 議長に英国保健保護庁放射線防護部 (HPA-RPD) の A. McKinlay、副議長にマレーシア大学の K. Ng を選出、参加者の自己紹介した。
- 国際電磁界プロジェクト責任者である E. van Deventer が2006年～2007年までの活動報告を行った。
- プロジェクトの協力研究機関として、米国空軍電波研究所 (AFRL)、ドイツの放射線防護局 (BfS)、オーストラリアの放射線防護・核安全庁 (ARPANSA)、英国の HPA-RPD、カナダのオタワ大学、米国国立環境健康科学研究所 (NIEHS) から活動報告を行った。
- プロジェクトへの協力国際機関として、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP)、欧州委員会 (EC)、国際電気通信連合 (ITU)、米国電気電子学会の国際電磁安全委員会 (IEEE-ICES)、国際電気標準会議 (IEC) から活動報告を行った。
- 静電磁界の優先的研究課題については E. van Rongen (オランダ HCN) が、2006年に発行された Static Fields EHC (No. 232) を受けて、今後静電磁界の取り組むべき課題について紹介した。まず、静電界の健康影響について、マイクロショックへの長期間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つもない事から、今後の疫学を含め研究を継続する価値を否定した。静電界の健康影響については、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、適切な手法やばく露情報が欠落している場合が多い事から、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勧告した。また、生物学的結果に対してばく露強度、ばく露期間、磁界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と結論づけた。以下の今後取り組むべき研究課題を示す。

- 相互作用のメカニズム

1. ラジカルペア反応の化学特性 (0.1～10 T)

- 2. 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
    1. 男性/女性/妊婦のボクセルファントムを用いるばく露量測定研究
    2. 目の誘導電流
    3. 心臓の流動電位(flow potentials)
  - ・ 細胞研究
    1. 相互作用メカニズム：ラジカルペアの反応と酵素活性
    2. 物理的パラメータ（強度、期間、反復、SMF[静磁界]勾配）の影響
    3. ヒトの一次細胞における変異原性と転換
    4. ヒトの一次細胞における遺伝子発現
  - ・ 動物実験研究
    1. がん
    2. 発育/神経行動に対する影響
    3. 心臓機能（～20 T）
    4. ヒトボランティアによる実験研究
    5. 前庭機能、頭と目の協調
    6. 認知能力と行動
    7. 心臓血管に対する影響
  - ・ 疫学研究
    1. ばく露源、交絡因子、ばく露者数に関する実行可能性調査
    2. 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）
    3. 職業上のばく露やMRI検査と妊娠結果の関係
    4. 高ばく露職業における短期的影響のコホート研究
- 超低周波電磁界の健康リスク評価をL. Kheifets（米国 カリフォルニア大学）が行った。その中で、2002年のIARCが超低周波磁界を「ヒトに対して発がん性があるかもしれない」と分類したモノグラフを公表した。この分類は、疫学研究のプール分析に基づいており、居住環境での0.3～0.4  $\mu\text{T}$ を越える商用周波磁界ばく露に関連して小児白血病が倍増するという、一貫したパターンが示されている事に基づく。2005年のELF-EHCタスクグループは、兜論文を含め、その後に追加された研究は、この分類を変更するものではないと結論付けた。

ただし、疫学的証拠は、潜在的な選択バイアス等の手法上の問題を指摘し、加えて、低レベルのばく露において、がんが進展するとの生物物理学的メカニズムが存在しないこと、更には、大多数の動物研究では影響を確認出来ないことから、全体として、小児

白血病に関連する証拠は因果関係と見なせるほど強いものではない。

しかし、因果関係があると仮定して、磁界の寄与リスクを推定すると、2000年で発生する症例数は全世界で年間49,000人。住宅内での平均磁界ばく露が0.3 μTを超える環境に住む子供は1%~4%。この条件に基づくと、全世界で年間100~2,400人の範囲と推定されている。これは、同年の発症率全体の0.2~4.95%に相当。よって、仮に超低周波磁界が実際に小児白血病のリスクを高めるとしても、世界規模で考慮すれば、超低周波電磁界ばく露の公衆衛生上の影響は限定的と結論した。

超低周波磁界ばく露とその他の健康への悪影響として、白血病以外の小児がん、成人のがん、うつ病、自殺、心臓血管系疾患、生殖機能障害、発育異常、免疫学的変異、神経行動への影響、神経変性疾患などをそれぞれについてリスク評価を行った結果、タスクグループは、超低周波磁界ばく露とこれら全ての健康影響との関連性を支持する科学的証拠は、小児白血病についての証拠よりも更に弱いと評価した。心臓血管系疾患や乳がんについては、関連がないとしている。

- 超低周波電磁界のFact Sheetと優先的研究課題についてはE. van Deventerが説明した。その中で、Fact Sheetは、この度発行されたELF-EHCに基づき、WHOがその見解をコンパクトに述べた文書である。ELF-EHCとFact Sheetとの関係は後述する。
- 無線周波電磁界の自治体向けのパンフレットについてはE. van DeventerがHPA-RPDのA. McKinlayとARPANSAのC. Royが執筆中であることを説明した。
- 世界の電磁界の研究動向をB. Veyret(フランス ボルドー大学)が説明した。
- 欧州委員会保健・消費者防護総局のSCENIHRをK. Bromen (SCENIHR)が、説明したが、その内容については③で紹介する。
- オランダ保健評議会の活動をE. van Rongen (オランダ HCN)が説明した。
- アイルランド政府の取り組みをR. Dempsey(アイルランド 環境省)が紹介した。
- 仏・露の再現研究の経過説明をB. Veyretが行った。
- 子供へのウェブを使った電磁界の遠隔教育をK. Ngが紹介した。
- 若手研究者向けの電磁界の遠隔教育の進捗状況をB. Veyretが説明した。
- 電磁界研究データベースの現状を大久保千代次(日本 明治薬科大学)が説明した。
- 電磁界ばく露基準データベースの現状をE. van Deventerが説明した。
- 超低周波磁界規制動向と用心(Precautionary)政策への各国の対応を調査したので、その中間報告をS. Kandel(イスラエル)が行った。

- WHO は現在電磁界に関する法整備を行っていない国に対して、電磁界の法令モデルを作成した。WHO の以下の URL からダウンロードできる事を E. van Deventer が紹介した。  
[http://www.who.int/peh-emf/standards/emf\\_model/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/standards/emf_model/en/index.html)
- 労働環境ハンドブックの進捗状況を E. van Deventer が説明した。
- WHO が主催・共催した会議の紹介を K. Ng および E. van Rongen が説明した。

12 回目の国際諮問委員会には、電磁界プロジェクト参加国、国際機関、共同研究センター合わせて 46 名が参加した。会の主題は、諮問委員会開催に合わせて電子版で公表された超低周波電磁界の健康リスク評価書である環境保健クライテリア (ELF-EHC) No. 238 およびこれと同時に発表された Fact Sheet No. 322 であった。ELF-EHC の和訳版は以下より入手できる。

[http://www.env.go.jp/chemi/electric/material/ehc238\\_j/index.html](http://www.env.go.jp/chemi/electric/material/ehc238_j/index.html)

Fact Sheet の和訳版は以下より入手できる。

[http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322\\_ELF\\_fields\\_jp\\_final.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322_ELF_fields_jp_final.pdf)

ここでは、その概要を以下に示す。

1. ELF-EHC は 100 kHz までの低周波電磁界の健康リスク評価を行うことになっているが、実質は 50/60 Hz の商用周波電磁界のリスク評価を行っている。
2. 一般環境で遭遇する超低周波電界の健康リスクはほぼ無いと考えられる。
3. 超低周波磁界の健康リスクは、科学的根拠が明らかな誘導電流に特徴付けされる高レベルの短期的なばく露影響と科学的に不確実性を伴う低レベルの長期的なばく露影響に分けられる。
4. 超低周波磁界の長期的な健康影響としては、種々の疾病が評価されたが、小児白血病が関連する限定的な疫学研究結果が得られている。しかし、関連性を裏付ける生物学的証拠は見つかっていない。よって、超低周波磁界への 2001 年国際がん研究機関が下した「2B (ヒトに対して発がん性があるかもしれない)」との判定を踏襲し、超低周波磁界と小児白血病との関係は因果関係がある程の証拠ではない。
5. リスク管理としては、短期的なばく露影響についてはばく露防護の国際的ガイドラインを政策に反映させること。長期的なばく露影響については科学的根拠の脆弱性があるため、研究の促進、コミュニケーションプログラム、低費用の磁界低減策の 3 項目の予防 (precaution) 的な政策を推奨する。

なお、ELF-EHC とファクトシートとの間には用心 (precaution) 政策について微妙な表現の差が見られる。EHC は WHO が選んだ専門家チームの見解をとりまとめた報告書であって WHO の決定や方針を必ずしも代表するものではないと、最初のページに記載されている。一方、ファ

クトシートは WHO のプレスオフィスが、EHC No. 238 を基に、WHO はこれをどの様に解釈するかを分かり易くまとめた文書である。基本的には、小児白血病への用心 (precautionary) 策である磁界低減に対する考え方以外、両者の見解に相違はない。ELF-EHC と比べファクトシートでは低レベルの長期的な超低周波磁界への用心 (precautionary) 政策としての磁界低減策対策に消極的な姿勢が窺える。

## 1.2 WHO 主催の「超低周波電磁界の防護方策の開発と実施に関するワークショップ」2007年6月20～21日 (ジュネーブ)<sup>2)</sup>

ワークショップ開催に先立つ第12回国際電磁界プロジェクト国際諮問委員会で超低周波電磁界の健康リスク評価書、環境保健クライテリア (EHC) No. 238 とこれに基づくファクトシート NO. 322 が各国政府代表に紹介したが、第13章の防護措置で各国政府に「極低費用あるいは低費用での磁界防護方策としての磁界低減策」について、その意味や意義、実施可能性などについて、関係者の意見を聴取する場として WHO が設定した会議である。会議では、EHC の内容紹介を行い、それに関する意見集約を行うことと、各国の防護措置政策とそのまつわる費用の考え方について情報を共有することが目的である。

初日は、小児白血病に関するリスク評価の現状を振り返った後、健康リスクと公衆衛生上の経済や政策との関係を紹介した。次に「電磁界発生」、「磁界ばく露低減技術」、「電磁界政策の考え方」といった具体的な事例の紹介が行われた。最後に、規制当局、学識者、電気事業者、市民などによる討論が行われた。二日目は、イスラエル、イタリア、中国、オランダ、スウェーデン、スイス、米国 (コネチカット州) で実施されている電磁界政策を紹介した後、リスク管理やコミュニケーションのあり方についてパネル討論が行われた。

参加者は、国際 EMF プロジェクト国際諮問委員会メンバーを中心に、政策者、産業界 (主に電力・送電会社)、市民団体、研究者など、総勢 100 名であった。司会進行は、初日は、EHC タスクグループ会議議長の C. Portier (米国 NIEHS) であり、二日目は、WHO コーディネータであった L. Kheifets (米国 カリフォルニア大学) であった。従来より WHO が主催する会議は、WHO 関係者が何かを決める会議ではなく、関係する研究者や政策決定者が意見交換を行い、情報を共有しながら、最新知見をまとめていくが、コンセンサス形成を行う事はない。会議概は 2008 年末に国際電磁界プロジェクト事務局のホームページから以下の URL より入手できるようになった。

[http://www.who.int/peh-emf/meetings/elf\\_emf\\_workshop\\_2007/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/meetings/elf_emf_workshop_2007/en/index.html)

主な議題は以下の通りである。

- 小児白血病のリスク評価
- 予防原則 (用心原則、Precautionary Principle) に関する考え方の違い

- 電磁界防護に関する費用対便益分析
- 磁界低減方策に関する世界的な相違と類似
- WHO による『数値』の必要性
- EHC への意見

### 1.3 欧州委員会保健・消費者防護総局の「新興・新規同定された健康リスクに関する科学委員会 (SCENIHR)」<sup>3)</sup>

欧州理事会は電磁界(0 Hz～300 GHz) に対するばく露規制に対して一般市民と労働者とを区別して監督している。監督行政組織が異なるためである。一般市民に対しては 1999 年の勧告で、電磁界の基本制限および参考レベルを定めた。この基本制限および参考レベルは、ICNIRP が発表したガイドラインに準拠したもので、ICNIRP ガイドラインは、科学運営委員会(SSC) が承認した。労働者に対しては、欧州理事会および欧州議会は物理的因子としての電磁界による職業ばく露について 2004 年にディレクティブ 2004/40/EC を採択した。さらに、生体毒性・環境に関する科学委員会(CSTEE) は、SSC の意見書の最新版を作成するように要請を受けた。

電磁界の健康への影響については、CSTEE が 2001 年に意見書を発表して以降もかなりの数の科学論文およびレビューが発表されている(そのほとんどが携帯電話に関するものである)。特に 2004 年の英国放射線防護局(NRPB、現在は健康保護庁放射線防護部 HPA-RPD) の報告書「携帯電話と健康」が有名である。NRPB の報告書は近年の論文を詳しく再検討した上で、携帯電話の使用に伴う健康影響について有益な示唆を行っている。その結論は、携帯電話技術によって一般市民の健康が悪影響を受けることを示す明確な証拠は現時点では存在しないが、不確実性が存在することは確かであり、状況が明らかになるまでは引き続き用心(precaution) 的アプローチを採用することを勧告している。そのような背景から SCENIHR に対し、CSTEE の意見書を最新の内容にし、この分野でのヒトの健康に関するリスク評価に影響を及ぼし得る新しい情報を常時監視することを求める要請され、今回の報告書は、静電磁界、超低周波、中間周波、高周波の各周波数帯の電磁界の健康影響と環境への影響を評価したものである。以下にエグゼクティブ・サマ리를示す。

#### エグゼクティブ・サマリ

CSTEE は 2001 年、「電磁界(EMF)、無線周波数電磁界、マイクロ波の健康に及ぼす潜在的影響」について提言をまとめた。SCENIHR は、この提言を改訂し、人への健康リスク評価に影響を及ぼす新たな情報を継続的にモニタすることを求められた。今回の改訂版の準備にあたり、前回の提言以降に公表された科学的データをレビューし、それが前回の提言に対する結論に及ぼす影響を評価した。この提言の主な焦点は、確立されている生物学的メカニズムよりも低いばく露レベル、特に、そのような低レベルでの長期的ばく露において、健康影響



が生じ得るかどうかである。今回の提言は、周波数帯に応じて分けられている。別途、節を設けて環境影響について議論している。

### 無線周波電磁界

2001年の提言採択以降、低レベルの無線周波電磁界ばく露による潜在的健康影響について、疫学、動物、細胞研究を含む膨大な研究が実施されている。

疫学的証拠のバランスから、10年未満の携帯電話端末使用は脳腫瘍あるいは聴神経腫の如何なるリスク上昇をも生じないことが示されている。長期的な使用についてはデータが乏しいので結論は不確かで暫定的なものである。ただし、利用可能なデータから、長期使用者の脳腫瘍については、関連性の証拠が幾つかある聴神経腫を除いて、リスク上昇はないことが示されている。がん以外の疾病については、利用可能な疫学的データは非常に少ない。

特に配慮すべき問題は子供の携帯電話端末使用である。特記すべきデータはないが、子供あるいは若年層は成人よりも無線周波電磁界ばく露に感受性が高いかもしれない。また、今の子供達は、累積ばく露が前の世代よりも多くなるであろう。これまでのところ、子供に関する利用可能な疫学研究はない。

観察ならびに誘発研究は無線周波電磁界ばく露と自律神経症候群（電磁過敏症と呼ばれることもある）との関係を示す一貫した証拠は得られていない。

神経学的影響および生殖影響に関する研究では、1998年に制定されたICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）の制限値以下のばく露レベルにおける健康リスクは何ら同定されていない。

動物研究では、無線周波電磁界ががんを生じさせたり、既知の発がん因子の影響を強めたり、移植したがんの成長を加速するという証拠は示されていない。使用した実験モデルの妥当性や、高レベルばく露のデータがないといった問題が残されている。

細胞研究からは、非熱レベルの電波ばく露が細胞に影響を及ぼすという一貫した証拠は示されていない。

技術の発展は非常に速く、無線周波界ばく露の発生源はますます一般的になっている。しかし、個人の電波ばく露や、ばく露全体に占める個々の発生源の相対的寄与に関する情報は不足している。

結論として、ICNIRPが1998年に制定したガイドライン以下のばく露レベルでは、一貫性をもって立証されている健康影響はない。しかし、この評価のデータベースは、特に長期間・低レベルのばく露について限定的である。

## 中間周波電磁界

中間周波帯については実験データも疫学データも非常に少ない。そのため現在のところ、中間周波帯における急性の健康リスク評価はそれより低いかまたは高い周波数における既知のハザードに基づいている。中間周波電磁界の長期ばく露による健康影響の可能性については、それを適切に推定、評価することが重要である。なぜなら新しく生まれる技術によって中間周波電磁界へのヒトのばく露は増加しつつあるからである。

## 極低周波電磁界

主に小児白血病に関する研究結果から、超低周波電磁界は発がん性があるかもしれない、との従来の結論は現在も有効である。しかし電磁界ばく露がどのように白血病を発生させるかを説明するメカニズムは不明である。またその効果が動物実験で複製されたこともない。

小児白血病症例の一部については超低周波電磁界がその原因となっている可能性がある、という前の意見の推定は現在も有効である。

乳がんと心臓血管系疾患については、最近の研究によって関連する可能性がほとんどないことが示されている。神経変性疾患と脳腫瘍については、超低周波電磁界との関連は依然として不確実である。超低周波電磁界と症状（電気過敏症と呼ばれることもある）との関係は実証されたことがない。

## 静電磁界

静磁界の適切なリスク評価を行う上で妥当なデータが非常に少ない。MRI 装置など静磁界を利用する技術を開発する上では、個人のばく露に関係づけたリスク評価を行う必要がある。

## 環境への影響

関連する種についての良質なデータが依然として欠如しているため、単一のばく露基準がすべての環境種を電磁界から保護する上で適当かどうかを判断するだけのデータがない。同様に、環境に関する基準を人の健康保護に適切な基準と同じものにするか、それと大きく異なるものとする必要があるのかという問題についても、それを判断するだけの十分なデータがない。

## 研究に関する推奨

各周波数域について重要な研究ニーズを識別した。

### 1.4 スウェーデン放射線防護庁 (SSI) の「電磁界に関する独立専門家委員会 (IEG)」による「電磁界と健康リスクに関する最近の研究：IEG の第 4 回年次報告 (2006 年版)」<sup>4)</sup>

スウェーデン放射線防護庁 (SSI) の電磁界に関する独立専門家グループは 2007 年 3 月、電

磁界と健康リスクに関する最近の研究についての2002年から毎年年次報告書を公表し、2007年に第4回年次報告書(2006年版)を公表した。この報告書は、超低周波電磁界と無線周波電磁界に関する最近の研究評価を行っている。

この報告書のエグゼクティブ・サマリを示す。

### 超低周波電磁界

- 遺伝毒性に関する最近の研究

従来の動物及び細胞研究の大多数では、ヒトのばく露に関連する超低周波磁界の遺伝毒性作用についての証拠は認められていない。最近の研究の結果は、超低周波磁界単独での遺伝毒性作用の証拠を強めるものではない。ただし、超低周波磁界が他の化学的及び物理的要因に対する生物学的応答を改変するかも知れないことが示唆されているものの、そこで示唆されているメカニズムは今のところ100  $\mu\text{T}$  未満のばく露レベルで見られる影響を説明するものではない。

- メカニズム

現行のばく露限度の基礎をなす影響(神経及び筋肉の刺激)は、一般環境(平均では1  $\mu\text{T}$  以下)に存在することはほとんどなさそうな強い界(5000  $\mu\text{T}$  以上)及び・または界の傾斜を必要とする。

低いばく露レベルで作用する潜在的可能性のあるものとして、ある種のメカニズムが論じられてきた(例:磁気共鳴現象が関与する狭帯域メカニズムや「ラジカルペア・メカニズム」)。現時点では、後者のメカニズムが仮説上もっともありそうである。ただし、これらのメカニズムはいずれも、小児白血病のリスクへの影響が観察されているばく露レベルには適用できない。

- 最近の疫学研究

最近の小児白血病研究は、従来の疫学的知見と一致するものである。小児白血病の診断後の生存率に関する別の研究は新たなアプローチであり、小児白血病の進行と治療の両方を理解する上で重要となり得るが、再現研究が必要である。これらの結果はいずれも、超低周波磁界には「ヒトに対して発がん性があるかも知れない」というIARCの結論を変更するものではない。

### 無線周波電磁界

- 遺伝毒性に関する最近の研究

無線周波電磁界が多く異なる遺伝毒性エンドポイントに及ぼす影響が、動物研究及び細胞研究の両方で広範なばく露レベルを用いて評価されており、ほとんどの研究では影響は報告されていない。本報告でレビューした最も新しい研究は、無線周波電磁界の遺伝毒性作用についての証拠を強めるものではなさそうである。無線

周波電磁界にばく露した培養細胞における DNA 鎖切断の増加を報告した REFLEX プロジェクトの結果については、結論を導き出すことができるようになる前に、より良く理解する必要がある。

- ヒトを対象とした実験室研究

携帯電話の無線周波電磁界が認識機能に及ぼす影響に関する研究の結果は一貫していないが、認識機能に及ぼす単一の明確な影響は同定できていない。しかしながら、全体としては、最近出版された、多くの良くできた研究では、数年前のより小規模で手法上見劣りする研究において報告された陽性の知見は確認されていない。

最も新しい、誘発電位または事象関連電位に関する良くできた研究では、携帯電話の無線周波電磁界放射による影響はないことが示されている。

オランダ応用科学研究機関(TNO)研究の追試では、第3世代携帯電話端末(UMTS)に類似した基地局無線周波電磁界放射による認識課題遂行能力及び安寧(well-being)への影響は見られなかった。

「無線周波電磁界に過敏な」人々と「過敏でない」人々との違いは、自律神経系に強く影響される幾つかの生理学的パラメータで見ることができるが、これらのエンドポイントは携帯電話の無線周波電磁界放射に影響されない。加えて、無線周波電磁界に過敏だと自称する人々は、過敏でない人々と比較して非常に高い率で、頭痛、吐き気、目眩及びその他の症状を携帯電話の使用中に経験すると報告している。しかしながら、このことは、無線周波電磁界ばく露が実際のものか擬似的なものかには依存しておらず、そのような影響を意識的に予想することを反映しているのかもしれない。

- メカニズム

現行のばく露ガイドラインは、組織の加熱による影響(熱作用)に基づいている。一般に「非熱的」と見なされているレベルのばく露については、生物学的影響に関する幾つかのメカニズムの仮説が検討されている。こうした仮説の1つは、非熱的無線周波電磁界の影響は究極的には熱受容体の活性化の結果である、としている。これらの熱受容体は、温血動物の身体表面やその他の多くの部位(脳や脊髄を含む)にある。

もう1つの仮説は、変調無線周波電磁界信号の「復調」が生じる可能性があることと示唆するものである。しかしながら、非線形であるがゆえに復調が可能であることが既知の生物学的構造としては、細胞膜が唯一且つもっともありそうであるが、これが変調できるのは約1 MHz以下だけである。細胞のその他の非線形要素を検出する実験の結果が待たれるところだが、携帯電話に用いられている周波数帯においては、復調は生物学的に有意ではないというコンセンサスが依然として存在する。

- 最近の疫学研究

携帯電話の使用とがんリスクに関する、最近公表された研究は、疫学研究からの利用可能な証拠についての以前の全体的評価を変更するものではない。特に、デンマークにおけるコホート研究の拡大追跡版は、この結論を変更するものではない。現在利用可能な証拠から、成人の脳腫瘍については、10年以下の携帯電話の使用との間には関連性はないことが示唆されている。より長期の潜伏期間についても、証拠の大多数は関連性を否定するものであるが、データは依然として少ない。携帯電話の短期的な使用と聴神経腫についても、結論は同じである。しかしながら、長期的な使用と聴神経腫については懸念があり、更なる情報が必要である。基地局の近くでの症状に関する研究では、ばく露レベルと症状の罹患率との関連性が示された。これらの結果は、追試を行い、結論を導く前により良く理解する必要がある。

- レビュー

英国の非電離放射線に関する独立諮問グループ (AGNIR) による最近のレビューは、これまでの証拠は、商用周波数電磁界へのばく露がメラトニンのレベルまたは乳がんのリスクに影響を及ぼすという仮説を支持していないと結論付けている。

- 研究の優先順位

全ての電磁界周波数において、WHO の電磁界プログラム、より最近では EMF-NET 及び SCENIHR によって同定された、重要な研究ニーズが依然として残されている。スウェーデン政府は、SSI が管理する研究に対して 1,000 万クローネを追加すると発表した。この資金で放射線防護の全ての分野の研究をカバーしなければならないが、SSI は電磁界を優先すべき分野であると指定している。IEG はこれを非常に前向きに見ており、SSI に対し、電磁界研究に実際に用いられる利用可能な資金の割合を特定するよう推奨している。

## 1.5 英国の英国保健防護庁 (HPA) の「超低周波電磁界に関する利害関係者諮問グループ (SAGE)」中間報告書<sup>5)</sup>とこれに対する HPA の助言<sup>6)</sup>

HPA の「超低周波電磁界に関する利害関係者諮問グループ (SAGE)」の 40 人のメンバーは、電磁界の公衆ばく露に対する用心 (precautionary) のアプローチ、及び、送電線、資産、住宅内配線、家電製品についてのその他の問題に関する、65 ページからなる最初の間接評価を公表した。SAGE のメンバーは、学界 (3 人)、電力業界 (7 人)、地方・全国の個人・運動家 (10 人)、政府及び衛生当局 (11 人)、その他の業界 (3 人)、専門家・資産家グループ (5 人)、ガス・電力市場規制当局の代表 (1 人) であった。

SAGE の中間報告書が 2007 年 4 月に発表された<sup>5)</sup>が、その歴史は 2004 年に英国の電力事業者 ナショナルグリッド社が利害関係者を集めたワークショップを開催した事に始まる。同年当時

のNRPB（放射線保護局、現在はHPA-RPD 保健保護庁放射線保護部）が電磁界のばく露制限に関する文書の発表を受けて、保健省がこのワークショップを政府への助言を行う公式なプロセスと位置づけ、SAGE（Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs）を設置した。SAGEには4つのワーキンググループがあるが、その内の「屋内配線と家電製品」と「電力設備と不動産」のワーキンググループが2007年4月に中間報告書として纏めたものである。同年7月にはSAGEの中間報告を受けて超党派議員による嘆願報告書が保健省に提出され、保健省が中間報告に対するHPAの見解を求め、同年10月にHPAからSAGEの中間報告への助言が出された<sup>6)</sup>。

SAGEの中間報告書には統一された見解は示されていないが、メンバーは、英国政府に対し、屋内配線に対しては、配線回路を環状配線から放射線上配線に、逆相配線を行う、回転ディスクメーターを電子式電気メータになどの提言を、家電製品に対しては、製造者には低費用での磁界低減を検討すると共に販売戦略の可能性を検討する事、HPAには家電製品から磁界ばく露低減策に関する情報提供を求めた。電力設備には一般公衆には自分自身で採れる対策について情報提供を促進する事と、新設の電力線には相配置の最適化を計ることと可能であれば既存の電力線を改造するように勧告している。さらにこれらの対策では効果が無い場合は、132 kV 架空送電線の相を（まだ対策されていないものについて）最適化すること、送電線の近くの「新たな建築物のための回廊（corridors for new build）」オプションにおいて、新たな住宅及び学校の建設制限という、更なるオプションを示したメンバーもいた。これらの利害関係者らが科学に関して異なる見解を有していること、及び、政府に対する「回廊」についての助言に関して合意に達することができなかった。この報告書では、「我々は政府に対し、これらの提言を実施するかどうか、明確な意思決定を強く求める」としている。

「新たな建築物のための回廊」オプションに関する結論は以下の通りである。「このオプションの主な便益は明白である。送電線からの0.4  $\mu\text{T}$  を超える磁界への住宅内ばく露の新たな事例が大幅に予防されることである。平均距離（average distance）という用語で制限を表現することを選んだため、当該距離（例：275 kV 及び400 kV 送電線については60 m）の外側の住居に住む人々は依然として、0.4  $\mu\text{T}$  以上の磁界にばく露することになるという幾つかの例外は生じるものの、これに当てはまるのは15%の人々に過ぎないと推定されるので、0.4  $\mu\text{T}$  は厳密な閾値ではないことから、我々はこれを受け入れた」。この報告書にある表では、送電線中心からの距離は、新たな275 kV 及び400 kV 送電線については60 m、66 kV・110 kV・132 kV 送電線については30 mとすることが望ましい、と示している。より低圧の送電線に対する距離は勧告されていない。SAGEメンバーは、「政府は、社会全体の利益を最大にするため、このオプションを実施するかどうか、明確な政策を主導することが望ましい」としている。

中間報告へのHPA-RPDの助言<sup>6)</sup>は、超低周波磁界と小児白血病との関連性の科学的不確実性に基づいて、用心的(precautionary)アプローチを採用する際に、一般公衆が通常遭遇する磁界ばく露で健康への悪影響を及ぼし得る証拠はあるか、証拠の強さに基づいて、適切で釣り合

いのとれた方策はなかの2点に集約している。

証拠については、①ガイドライン以下の磁界ばく露で健康に悪影響はない。②科学的不確実性があるため明言できないが、因果関係があると仮定した場合、英国では年間2～5名の過剰な小児白血病の発症が推定される。発生源は電力設備以外に家電製品、屋内配線も寄与している。③磁界と小児白血病以外の疾患との関係は小児白血病に対する証拠よりも遙かに弱い。よって用心的(precautionary)方策を検討する必要はない。

用心的(precautionary)措置については、①回廊オプションの採用は、費用便益分析から見て支持されない。②既存の家屋や電力線の移設は正当化されないとのSAGEの意見に賛同する。③高圧送電線への逆相配列を実施すべきとのSAGEの意見を支持する。④製造者が磁界低減策へ努力を促すSAGEの意見を支持する。⑤屋内配線を変更するSAGEの提案を支持する。⑥一般公衆へ高品質で証拠に基づく科学的技術的情報を提供していくことを強く支持する。その際、ばく露低減策方法への助言は不可欠である。⑦提案される用心的(precautionary)方策に必要な費用は、小児白血病の病因解明などの研究などといった、他の潜在的な金銭の利用方法も視野に入れる。⑧英国の小児白血病研究調査団(the UK Childhood Cancer Study Investigators)の研究を継続的にモニターする。⑨磁界ばく露低減に関する費用便益分析研究を支援する。⑩居住環境中の高レベル磁界と小児白血病やその他の健康障害との関連性について評価を継続する。

#### 1.6 欧州連合(EU)第6次研究枠組みプログラム(FP6)の「電磁界ばく露の影響：科学から公衆衛生、より安全な職場へ(EMF-NET)」からの電磁界での生殖および生育への影響に関する調査報告書<sup>7)</sup>

この報告書は、一般公衆が遭遇する低い電磁界強度へのばく露は、生殖または出生前後の生育に有意なインパクトを及ぼさないことが文献から示されているものの、組織の温度を数度以上、または深部体温を1度以上上昇させるような強度のばく露は、影響を生じる可能性が高いと結論付けている。

#### 1.7 オランダ保健評議会(HCN)の電磁界委員会による電磁界に関する年次報告書<sup>8)</sup>

報告書には、第3世代携帯電話端末(UMTS)の基地局電波に類似した電波ばく露による認識遂行能力および安寧への影響を報告したZwamborn等の報告の確認実験についての詳細な分析が盛り込まれている。

#### 1.8 アイルランド通信・海洋・天然資源省の電磁界の健康影響に関する専門家グループ報告書<sup>9)</sup>

報告書は、「これまでのところ、携帯電話端末および基地局から発せられる電波ばく露による短期的または長期的な健康への悪影響は何ら示されていない。電波ががんを誘発するという

ことは示されていない」と結論付けている。

### 1.9 英国の「携帯電話と健康研究プログラム」(MTHR) 最終報告書<sup>10)</sup>

同プログラムは、携帯電話に関する独立専門家グループ (IEGMP) の勧告に基づいて 2001 年に設置されたもので、政府と産業界が当初予算の半分ずつを負担し、独立した管理委員会によって運営された。なお、この報告書の公表に際して、同プログラムの第 2 段階として MTHR2 が継続されることも合わせて発表された。

### 1.10 フィンランド政府の国家研究プログラム「移動体通信の健康リスク評価 (HERMO)」の最終報告書<sup>11)</sup>

同国の大学や研究センターで実施されたこのプログラムは、電磁界の健康影響に関する分野における人々のニーズに回答し、国際的なプロジェクトを支援することを目的としている。WHO の研究課題に掲載された研究ニーズ、および、最近の文献のレビューに基づいて立案された。

### 1.11 全米科学アカデミー (NAS) の無線機器の潜在的生物学的・健康影響についての研究ニーズの同定に関する最終報告書<sup>12)</sup>

この報告書は、米国食品医薬品局 (FDA) の委託を受けて NAS が任命した専門委員会が、電磁界の生物学的影響および健康影響に関する研究ニーズおよび知識の欠落を同定するため、国際的なワークショップを開催し、その内容を取りまとめたものである。

## 2. 平成 20 年度の国際機関等の電磁界ばく露に伴う健康リスク評価動向

### 2.1 第 13 回 WHO 国際電磁界プロジェクトの国際諮問委員会 2008 年 6 月 19~20 日 (ベルリン)<sup>1)</sup>

今回の国際諮問委員会は、ドイツ放射線防護局 (BfS) が資金提供して実施した携帯通信研究プログラムが終了しその成果発表会がベルリンで開催されたのを受けて、ドイツ放射線防護局が国際諮問委員会の会場を提供した為、ベルリンで開催された。前年は超低周波電磁界の健康リスク評価結果と防護措置としての磁界低減策のあり方について、その解釈について議論が集中したが、今回は、ベルリンで 5 月に開催された小児白血病ワークショップと無線周波電磁界のリスク評価に関心が移行した。

以下に国際諮問委員会での議事概要を示す。

- 議長にオーストラリアの放射線防護・核安全庁 (ARPANSA) の C. Roy、副議長にブルガリアの M. Israel 教授を選出、議事録を英国 A. Barrett がとるとして、参加者の自己紹介により会議を開始した。
- 国際電磁界プロジェクト責任者である E. van Deventer が 2007/2008 年の活動報告を行った。



- ・今年が WHO 創設 60 年に当たり、組織を変更した。2008 年から、国際電磁界プロジェクトは、WHO の 9 つあるクラスタの Health Security and Environment に属し、このクラスタの Department としては Public Health and Environment という部、そしてその部の、Intervention for Human Environment ユニットの Radiation Program の一つとして位置づけされることになった。
  - ・2007 年 7 月に WHO の P4 クラスの研究者を 1 年間の契約で公募する予定との案内を行った。
  - ・これまで Fact Sheets と Information Sheets の両方を事務局として情報提供してきたが、WHO プレスオフィスの方針で今後は Fact Sheets のみとする。EMF Dosimetry Handbook も作成したいとの案内があった。
- プロジェクトへの協力国際機関として、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP)、国際がん研究機関、国際電気通信連合 (ITU)、欧州委員会 (EC として EMF-NET, DG SANCO, DG Employment, COST BM0704) から活動報告がなされた。P. Vecchia (ICNIRP) は、小児白血病のリスクファクターに関するワークショップを開催した事、更には Statement on EMF-emitting new technology, Health Physics 94:376-392, 2008 を発表した事を紹介した。また、EMF-NET については B. Veyret (ボルドー大学) より、今年 8 月でその活動を終了するとの案内があった。
- プロジェクトの協力研究機関として、米国空軍電波研究所 (AFRL)、オーストラリアの放射線防護・核安全庁 (ARPANSA)、ドイツの放射線防護局 (BfS)、NIOSH (米国労働安全衛生研究所)、英国の HPA から活動報告を行った。
  - ・ R. Matthes (BfS) は、ドイツの研究 (German Mobile Telecommunication Research Programme (DMF)) を紹介した。
    - ◇ 基地局を含めヒトへの影響をいろいろと調べたが影響はなかった。しかし、子供、老人、不眠症の人々へ睡眠や認識機能への影響は未だ調べていない。
    - ◇ 携帯電話使用と諸疾患発症との前向きコホート研究 COSMOS へのフィージビリティ研究では 5% しか応答しないので、ドイツとしては参加を凍結した。
    - ◇ ドイツでのインターフォン研究の結果は、携帯電話と頭部頸部腫瘍との関連性を見出さなかった。残るのは 10 年以上の長期使用者のみであるが、ばく露量評価が問題である。
    - ◇ 今後は複数の発信源への対処やリスクコミュニケーション (22% の予

算を投入) を研究テーマとしているが、自治体当局が介入すると効果的であるものの余り上手く行っていない。科学の限界と科学的不確実性が問題。

◇ 目下の結論としてはガイドラインの変更は不要である。一方、子供への教育プログラムソフトをドイツ語から英語に翻訳し、BFS のホームページ上から近日中に公開する。

・ S. Mann (HPA) は、平成 19 年度の健康リスク動向で紹介した SAGE 報告に対して特に HPA として対応はしないと述べた。

・ 英国の非電離放射線に関する独立諮問グループ (AGNIR) は静磁界に関する報告を公表した。報告書はホームページから入手可能である。

◇ 8 T 以下の磁界強度での健康影響はほぼ無いと考えている。

◇ 2003 年に行った高周波電磁界のレビューを再度行っているが、発表には今後数年を要す。

・ C. Roy (ARPANSA) は、オーストラリアでは無線周波電磁界の基準は 2003 年に出したが、再検討を予定している。超低周波電磁界は 2008 年中に改訂予定である。

◇ メルボルンでの磁界強度調査では 2~4% が 0.4  $\mu$ T 以上で、それらは電力線の 50 m 以内であった。学校や遊園地の実態調査は今後行う予定である。

- 携帯電話に関する疫学研究状況が J. Schuz (デンマーク) より紹介された。
- COSMOS プログラムについては、フィンランド、デンマーク、スウェーデン、英国、オランダによる実施状況が説明された。
- 小児に特化して脳腫瘍の共同症例対照研究 (CEFALO) についてその詳細が説明された。
  - ・ CEFALO は年齢 7~19 歳を対象に 2004 年 5 月から 2008 年 4 年の調査期間で、約 550 症例群と、これに、性・年齢・居住地域をマッチさせた 1:2 の住民対照群を設けた。
  - ・ ばく露評価はインタビューで行う。
  - ・ 唾液から DNA を収集する。
  - ・ 実施国はデンマーク、ノルウェー、スウェーデン、スイス、英国である。
- 生物学的研究の実施状況が B. Beyret により紹介された。この中で、2007 年に発表された BioInitiative 報告書 (2.5 参照) について紹介された。この報告書に対する国民の関心が高く、各国政府はその対応に追われている。

- 静電磁界について、A. Barret、G. Herbillon (EC)、P. Vecchia (ICNIRP) から紹介された。P. Vecchia からは、ICNIRP の静磁界へのガイドライン作成が最終段階にあり 2009 年初旬には公表される予定との紹介があった。
- 超低周波電磁界については、ハンガリーの G. Thuroczy、R. Matthes から紹介があった。G. Thuroczy からは、変電室近傍に住むアパートの子供を対象とする TransExpo 計画についての説明があった。欧州ではアパート内に変電室を設けている事が多い為である。R. Matthes からは ICNIRP、WHO、BfS が共同で開催した小児白血病ワークショップの紹介があり、未だに小児白血病の病因が不明である事が再確認された。
- 無線周波電磁界については、E. van Rongen (オランダ HCN) から WHO のリスク評価スケジュールが紹介された。
  - ・ 2008 年秋に 6~8 名のコアグループを形成し、2009 年末までに RF-EHC のドラフト案を作成、2010 年にタスク会議を開催、EHC を 2011 年には発行したい。
  - ・ E. van Deventer から、2006 年に提案された無線周波電磁界の研究計画の見直しを 2008 年までに行う予定が紹介された。
  - ・ 自治体担当者向けの無線周波電磁界ハンドブックは 28 ページ小冊子と 4 ページパンフレットを作成する。無線周波電磁界を終えたら超低周波電磁界についても作成したい。
- WHO の研究データベースについては、E. van Deventer が、オランダの研究プログラムを、E. van Rongen が、スイスの研究プログラムと EU の新たなプログラムである COST BM0704 を M. Mosel (スイス) が、日韓 EU 米豪などで構成される GLORE については Ha (韓国) がそれぞれ説明した。なお、GLORE の日本政府担当官庁は総務省である。
- 電磁界基準に関しては、大久保千代次 (明治薬科大学) が日本の動きとして経済産業省の電力小委員会電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書の政策提言 (電力設備に対して ICNIRP のガイドライン値を規制値として導入) について紹介した。ラテンアメリカについては、ペルーの V. Cruz が、オーストラリアについては、C. Roy が説明した。WHO の電磁界基準データベースについて、クロアチアの D. Simunic から、データベースの改訂についての案内があった。世界各国の超低周波電磁界の規制動向や用心的 (precautionary) 政策について、イスラエルの S. Kandel が紹介した。その際、これに関連して E. van Deventer は、EHC 238 はタスク会議の見解であり、WHO は EHC 238 に基づき公式な見解を Fact Sheet 322 として出しているとのコメントを行った。
- リスクコミュニケーションについて、E. van Deventer が必要に応じ WHO も援助すると述べた。また電磁界の遠隔教育システムについて B. Beyret が年内に発足させる予定との見解を述べた。

- 最後に E. van Deventer より、10 月に開かれる ICNIRP と WHO、ブラジル政府が共催する会議の紹介、電磁界プロジェクトへの資金援助の拡大、次回の IAC 会議は、2009 年 6 月 13 日～19 日に生物磁気学会（BEMS と EBEA の合同会議）がスイスのダボスで開催されるのに合わせ、その前にジュネーブで開催したい旨の発言があり、会議が終了した。

## 2.2 国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）の「新たな電磁界放射技術に関する声明」<sup>13)</sup>

WHO の国際諮問委員会席上でも ICNIRP の委員長である P. Vecchia から説明されたことを紹介したが、「新たな電磁界放射技術に関する声明」の目的は、日常生活や職場で電磁界にさらされるレベルが上昇すると予想されるので、今後導入される新技術を総覧し、その安全性と健康影響を判定するための更なる研究の必要性を評価することである。ここでは声明の結論を紹介する。

「将来の携帯電話通信システムは、現行のシステムと同様に、通話が重要な利用形態であり続けると思われる。ただし、双方向ゲーム、新たな情報、及び映画や TV 等の娯楽サービスといった付加的サービスにより、その機能は大幅に拡大するであろう。将来の端末からのばく露は、現行のシステムよりも低い出力のため低くなるであろうが、1 回あたりの使用時間は長くなるであろう。

通話以外の利用については、身体との距離が大きいので、ばく露は更に低くなるであろうが、1 回あたりの使用時間は長くなるであろう。ただし、帯域幅は増加し、また周波数が高いほど出力の揺らぎは大きくなる。時間と共に一定しない出力変動に何らかの生物学的影響があるかどうかに関しては疑問が残されている。

携帯電話及びインターネットの普及は、将来の無線通信システムに膨大なインパクトを与えている。音声の他に、インターネット・ベースの機器は、対象となるほぼ全てのもの間での通信の確立のために IP 及びインターネットのアドレスを利用する。これにより、制御を目的とした機器間の通信や、生命・安全・環境モニタリングを目的とした環境中の膨大なセンサー網におけるセンサー間の通信が可能となる。これらのセンサーはバッテリー駆動で数年間作動するために低出力・低エネルギーで、ばく露は非常に低くなるであろう。

無線識別装置（RFID）の場合、無線通信は能動的機器と受動的機器の間で行われる。無線通信では電磁スペクトルの利用が増加する傾向にあるが、一般に、出力はより低く、距離はより短くなっている。健康面での観点からすれば、第 2 世代の携帯電話システムについて論じられた長距離システムよりもばく露は低くなるであろう。

その他または通信以外の用途としては、運輸、エネルギー、家庭電気製品、医療機関における重要な利用が幾つか生じつつある。通信とは対照的に、これらの応用技術は高出力に依存しており、より高い強度を生じる傾向がある。ただし、ほとんどの状況では、ヒトのばく露は全体として低いレベルに制限されている。一般に、無線周波数が全帯域において、より集中的に

利用・再利用されることになる。中間周波数のような従来のギャップは、新たな応用技術によって埋められるようであり、また、無線周波電磁界の利用は更に高い帯域に拡大する。

携帯電話業界の経験から、新技術が一旦展開されれば、大量生産と配布によって、その採用率は容易に急増することが示されている。ゆえに、新たな非電離放射線（NIR）発生源の急激な開発について認識し、これらの技術革新に関連する様々な健康面について科学的評価を継続することが重要である。これには、身体の部位、使用時間、対象とする集団、潜在的に広範な帯域にわたる複数の周波数への同時ばく露、等に関する様々なばく露シナリオが含まれるであろう。」

### 2.3 欧州委員会保健・消費者防護総局の「新興・新規同定された健康リスクに関する科学委員会（SCENIHR）」からの「電磁界ばく露の健康影響」と題する提言<sup>14)</sup>

これは2009年1月19日の総会で採択された提言で、その目的は、新たに入手可能になった情報に基づいて2007年3月21日付のSCENIHRの提言（平成19年度の健康リスク評価動向で紹介済み）を改訂し、最高品質のリスク評価を確実にする上での入手可能な科学的証拠の評価のため、手法上の枠組み及び対応するガイドラインを提示することである。科学的根拠として物理学、工学、医学、生物科学からの関連する科学的知見を評価し、無線周波電磁界、中間周波電磁界、超低周波電磁界、静電磁界に分けて要約している。以下にその概要を示す。

#### 無線周波電磁界

SCENIHRは、科学的根拠に基づいて以前の提言を改訂し、以下のように結論付ける：

最も関心を集めているのは、無線周波電磁界ばく露は発がんに関与しているのかどうかという疑問である。以前の提言では、疫学的知見に基づき、10年未満の携帯電話使用はがんの発症と関連していない、と明言した。より長期の使用に関しては、携帯電話を10年以上使用してきた人々は少数であることから、推定を示すのは困難である。その後、追加的な疫学研究が数編公表されている。残念ながら、それらはばく露期間を大幅に拡張するものではないため、これらの研究は2007年の評価を変えるものではない。

放送設備からの無線周波電磁界と小児がんとの間に関連についての新たな改良された研究は、そのような関連の反証を提示している。

動物研究では、携帯電話に類似した無線周波電磁界は、単独でも既知の発がん因子との組み合わせでも、実験室のげっ歯類を用いた発がん性を示さなかった。幾つかの研究では、より強いばく露レベル（最大4W/kg）を採用したが、それでも腫瘍の進展への明白な影響は無かった。更に、遺伝毒性に関する細胞研究では、DNA損傷に対する無線周波電磁界ばく露の関与は提示できない。

3つの独立した系統の証拠（疫学・動物・細胞研究）から、無線周波電磁界ばく露がヒトにおけるがんの増加につながることはなさそうだと結論付けられた。ただし、携帯電話が普及した期

間は、幾つかのがんの誘導期間よりも短いので、携帯電話へのかなりの長期間（10年を大幅に超える）のヒトのばく露が何らかのがんリスクを生じるかどうかを確認するための更なる研究である。

がん以外では、自覚症状に関する複数の研究が実施された。2007年の提言では、科学的研究は無線周波電磁界ばく露と自己申告の症状との間の関連に対する支持を提示することはできなかった、と結論付けている。新たな研究で無線周波電磁界ばく露と単一の症状との間の関連が示されているものの、全体としては、この知見には一貫性が欠けている。このため、科学的研究は無線周波電磁界が自覚症状に及ぼす影響についての支持を提示できていないという結論を変えない。科学的研究は、ノセボ効果（nocebo effect: 何か有害なものについての予測または信念によって引き起こされる不特定の悪影響）が症状の形成に役割を果たしているかも知れないことを示している。

以前の提言と同様に、症状を無線周波電磁界ばく露のせいにする人々を含む個々人は無線周波電磁界を検出できる、ということをサポートする証拠はない。

無線周波電磁界はヒトの脳波や睡眠に影響を及ぼすという証拠が幾つかあるが、その影響と健康との関連性は不確かで、メカニズムについての説明がない。更なる研究が必要である。認識機能、感覚機能、構造的安定性、細胞応答など、神経系への影響は無いかあるいは、または一貫性のない影響を示している。

最近の研究では、無線周波電磁界がヒトまたは動物の生殖及び発育に及ぼす影響は示されていない。新たなデータからは、ヒトの健康に関するその他の影響は何ら示されていない。

リスク評価の観点からは、子供に生じる可能性のある無線周波電磁界による影響についての情報は限定的であると認識することが重要である。更に、本報告で考察した疾病以外についての情報が不足している。

### **中間周波電磁界**

特定の分野における中間周波電磁界への職業ばく露は一般公衆のばく露よりもかなり高い。ただし、以前の提言以降に発表された、職業的ばく露条件や一般公衆のばく露についての、中間周波電磁界と健康リスクに関する研究は非常に少なく、疫学研究はない。

その結果、データは依然として非常に限定的で、適切なリスク評価を行うことができない。セキュリティ、店舗、及び特定の産業における、作業者の中間周波電磁界への職業ばく露が増加しているという観点から、この分野における研究に優先順位を与えることが重要である。

### **超低周波電磁界**

SCENIHRは2007年の提言で、超低周波電磁界に関する従来の結論、即ち超低周波電磁界には発がん性があるかも知れないということは依然として妥当であると結論付けた。また、超低周波電磁

界と自己申告の症状(電磁過敏症)との間の一貫した関連は示されていないとも結論付けた。さらに、乳がんと心臓血管疾患については、関連はなさそうであると判断した。神経変性疾患と脳腫瘍については、超低周波電磁界との関連は不確実なままである。

SCENIHR は、本書に示した科学的根拠に基づいて以前の提言を改訂し、以下のように結論付ける：

入手可能な新たな情報は、2007 年の提言の結論を変更するには充分ではない。

超低周波電磁界ばく露とがんを扱っている、数編の新たな疫学研究及び動物研究は、超低周波電磁界には発がん性があるかも知れず、小児白血病の増加に寄与しているかも知れないという、従来の評価を変更するものではない。細胞研究ではこの疫学的知見について説明できるメカニズムは存在しない。超低周波電磁界と自己申告の症状との間の因果関係を支持する新たな研究はない。超低周波電磁界へのばく露によるアルツハイマー病の増加の可能性が新たな疫学研究で示されている。この観察結果についての更なる疫学研究及び実験室研究が必要である。最近の動物研究では、0.10~1.0 mT の磁束密度での神経系への影響が示されているが、このデータにはまだ一貫性がなく、ヒトの健康影響に関する決定的な結論を導くことはできない。

超低周波電磁界ががん以外の疾病に及ぼす影響を調べた最近の細胞研究は非常に少なく、入手可能な研究には重要性がほとんどない。特定の疾病を調べるための仮説に基づく細胞研究が必要である。動物研究及び細胞研究で影響が見られるのは、小児白血病やアルツハイマー病のような疾病との間の関連を示した疫学研究で見られる超低周波電磁界 ( $\mu\text{T}$  のレベル) よりも相当高いばく露レベル (0.10 mT 以上) であるということは、注目に値している。このことから、更なる研究が必要である。

## 静電磁界

SCENIHR は 2007 年の提言で、静磁界に関する適切なリスク評価のためのデータは極めて乏しいと結論付けた。SCENIHR は、本書に示した科学的根拠に基づいて以前の提言を改訂し、以下のように結論付けた：

前回の提言以来、相当数の研究が公表されているものの、そこから導かれる結論に変更は無い：静磁界の適切なリスク評価のためのデータは依然として不十分で、時として矛盾する多くの研究結果を明確にするため、更なる研究が必要である。主に急性ばく露による神経機能について、短期的影響が観察されているが、数 T までの短期的ばく露による健康への持続的な悪影響については、一貫した証拠は無い。

## 環境影響

SCENIHR は、科学的根拠に基づいて以前の提言を改訂し、以下のように結論付けている：

無線周波電磁界、中間周波電磁界、超低周波電磁界への環境ばく露によって生じる可能性のあ

るリスクの評価の目的には、現行のデータベースは不十分である。

## 研究の勧告

科学的根拠は、電磁界スペクトルの様々な周波数帯による健康に関連する可能性のある影響について、不十分で矛盾する情報によって特徴付けられた幾つかの分野を特定している。特定の知識のギャップを埋めることが勧告された。

### 2.4 スウェーデン放射線防護庁 (SSI) の「電磁界に関する独立専門家委員会 (IEG)」による第5回年次報告 (2007年版)<sup>15)</sup>

SSI の IEG は 2008 年 3 月、「電磁界と健康リスクに関する最近の研究:IEG の第 5 回年次報告(2007年版)」を公表した。この報告書は、無線周波電磁界、中間周波電磁界、超低周波電磁界の健康影響に関するドシメトリ、細胞研究、動物研究、ヒト実験室研究、疫学研究の各分野について、前回の年次報告 (2007 年 3 月公表) 以降に発表された主な研究結果をまとめたものである。

### 2.5 オランダ保健評議会 (HCN) の「BioInitiative 報告」に対する評価結果をまとめた報告書<sup>16)</sup>

HCN の電磁界委員会は 2008 年 9 月、同国住宅・国土計画・環境省 (VROM) の要請により実施した、「BioInitiative 報告」に対する評価結果をまとめた報告書を公表した。この報告書は以下のように結論付けている。

- 本委員会は、BioInitiative 報告の編纂方法、科学的データの選択的利用、及び上述したその他の欠点を考慮して、同報告は現時点の科学的知識を公平でバランスよく反映したものではないとの結論に達した。ゆえに同報告は、電磁界ばく露のリスクに関する現行の見解を見直すための何らかの根拠を提示するものではない。
- BioInitiative 報告は、電磁界が生体系に及ぼすいかなる影響も無視すべきではないと論じており、影響とダメージの違いを無視している。以前の報告書に明記しているように、本委員会はこのアプローチに同意しない。

### 2.6 欧州連合 (EU) の第 6 次研究枠組みプログラム (FP6) の「電磁界ばく露の影響：科学から公衆衛生、より安全な職場へ (EMF-NET)」からの 4 つの報告書<sup>17-20)</sup>

EU の第 6 次研究枠組みプログラム (FP6) の下で実施されている、EMF-NET は 2008 年、以下の調査報告書を公表した。なお対象とする周波数は無線周波電磁界である。

- ① がんに関連するプロジェクトの報告 (バイオアッセイ、形質転換研究、プロモーション研究)<sup>17)</sup>
- ② がんに関連する細胞及び分子レベルのプロジェクトの報告 (遺伝毒性、細胞分化、アポトーシス、遺伝子発現、その他)<sup>18)</sup>



③ 免疫機能及び内分泌系への影響<sup>19)</sup>

④ 血液脳関門、聴覚系、行動、心臓血管系、神経系への影響に関連する実験研究及びプロジェクトの報告<sup>20)</sup>

これらの報告書は、IARCの発がん性分類に類似した、4段階の分類（証拠は充分、限定的、不充分、影響がないことを示唆）を用いて評価を実施した結果、いずれについても、低レベルの無線周波電磁界ばく露による悪影響を示す証拠は不十分あるいは限定的であり、影響がないことを示唆する証拠が認められるものもあると結論付けている。

## 2.7 ロシア非電離放射線防護委員会（RNCNIRP）の「子供と携帯電話：次世代の健康が危険にさらされている」と題する声明<sup>21)</sup>

RNCNIRPは2008年4月、「子供と携帯電話：次世代の健康が危険にさらされている」と題する声明を発表した。この見解の概要を以下に示す。

- RNCNIRPの委員は、携帯電話システムの電磁界の影響から子供の健康を守ることは、極めて緊急性が高いと強調している。我々は政府当局に対し、この来るべき脅威に対して社会全体が最大限の注意を払い、将来の世代の健康に対する悪影響を防護するための適切な措置を講じるよう訴える。
- 携帯電話を使用する子供は、自分の脳と健康を電磁界放射にさらしているということを実感できない。我々は、このリスクはタバコやアルコールが子供の健康に及ぼすリスクよりもずっと低いものではないと確信している。不作為によって子供の健康を危険にさらさないようにするのは、我々の専門家としての義務である。

## 2.8 フランス保健・青年・スポーツ文化省からの「携帯電話：健康と安全」と題する声明<sup>22)</sup>

フランス保健・青年・スポーツ文化省は2008年1月、「携帯電話：健康と安全」と題する声明を発表した。この声明は、「現時点では、携帯電話端末の使用が成人や子供の健康に対して有意なリスクを生じることを示す科学的証拠はないという、各国及び国際的な専門家の結論を認識している」とする一方、「携帯電話端末の多頻度・長期的使用に関連する僅かな健康影響のリスクの存在について確たる結論を下すことはできない」ことから、「特に子供については、携帯電話端末の使用を適度にすること」、「子供向けにはこれらの機器を慎重に購入・使用すること」を推奨している。

### 参考文献

1. <http://www.who.int/peh-emf/en/>
2. [http://www.who.int/peh-emf/meetings/elf\\_emf\\_workshop\\_2007/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/meetings/elf_emf_workshop_2007/en/index.html)
3. Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), Health & Consumer Protection Directorate-General, European Commission. Scientific possible effects of

electromagnetic fields (EMF) on human health. The SCENIHR adopted this opinion at the 16th plenary of 21 March 2007 after consultation.

[http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihhr/docs/scenihhr\\_o\\_007.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_007.pdf)

4. Swedish Radiation Protection Agency. SSI Rapport 2007:04. Recent Research on EMF and Health Risks. Fourth annual report from SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields, 2006. [http://www.ssi.se/ssi\\_rapporter/pdf/ssi\\_rapp\\_2007\\_4.pdf](http://www.ssi.se/ssi_rapporter/pdf/ssi_rapp_2007_4.pdf)
5. Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs (SAGE) Precautionary approaches to ELF EMFs, First Interim Assessment  
[http://www.rkpartnership.co.uk/sage/Public/SAGE%20first%20interim%20assessment.pdf#search='3\)](http://www.rkpartnership.co.uk/sage/Public/SAGE%20first%20interim%20assessment.pdf#search='3'))
6. HPA Advice on the First Interim Assessment of SAGE  
[http://www.hpa.org.uk/webw/HPAweb&HPAwebPrinterFriendly/HPAweb\\_C/1204276682532?p=1207897920036](http://www.hpa.org.uk/webw/HPAweb&HPAwebPrinterFriendly/HPAweb_C/1204276682532?p=1207897920036)
7. EMF-NET: Effects of the exposure to electromagnetic fields: from science to public health and safer workplace. WP2.2 Deliverable report D4bis: Effects on reproduction and development. Due date of deliverable: August 2006, Actual submission date: November 2007. Person in charge: Dr. Carmela Marino.  
[http://web.jrc.ec.europa.eu/emf-net/doc/Reports/EMF%20NET%202.2\\_%20D4bis.pdf](http://web.jrc.ec.europa.eu/emf-net/doc/Reports/EMF%20NET%202.2_%20D4bis.pdf)
8. Health Council of the Netherlands. Electromagnetic fields: Annual Update 2006. The Hague: Health Council of the Netherlands, 2007; publication no. 2007/06.  
<http://www.gr.nl/index.php>
9. Irish Department of Communications, Marine and Natural Resources. Health Effects of Electromagnetic Fields. Expert Group on Health Effects of Electromagnetic Fields. March 2007.  
<http://www.dcmnr.gov.ie/NR/rdonlyres/9E29937F-1A27-4A16-A8C3-F403A623300C/0/ElectromagneticReport.pdf>
10. Mobile Telecommunications and Health Research Programme. Report 2007. MTHR Programme Management Committee.  
[http://www.mthr.org.uk/documents/MTHR\\_report\\_2007.pdf](http://www.mthr.org.uk/documents/MTHR_report_2007.pdf)
11. HERMO – A Finnish Research Programme. Health risk assessment of mobile communications. Final Report. 2007. [http://www.uku.fi/hermo/english/Final\\_report.shtml](http://www.uku.fi/hermo/english/Final_report.shtml)
12. Identification of research needs relating to potential biological or adverse health effects of wireless communications devices. Committee on identification of research needs relating to potential biological or adverse health effects of wireless communications devices. Nuclear and Radiation Studies Board. Division on Earth and Life Studies. National Research Council. National Academies. The National Academies Press, Washington, D. C. 2008, ISBN-13:978-0-309-11294-9,  
[http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=12036](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12036)
13. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Statement on EMF-emitting new technologies. Health Physics 2008; 94(4): 376-392
14. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). Health effects of exposure to EMF.  
[http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihhr/docs/scenihhr\\_o\\_022.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_022.pdf)

15. Swedish Radiation Protection Authority (SSI). Recent Research on EMF and Health Risks Fifth Annual Report from SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic fields, 2007. SSI Rapport 2008:12.  
[http://www.ssi.se/ssi\\_rapporter/pdf/ssi\\_rapp\\_2008\\_12.pdf](http://www.ssi.se/ssi_rapporter/pdf/ssi_rapp_2008_12.pdf)
16. Health Council of the Netherlands. Bioinitiative Report. September 2, 2008.  
<http://www.gr.nl/pdf.php?ID=1743&p=1>
17. EMF-NET: Effects of the exposure to electromagnetic fields: From science to public health and safer workplace. WP2.2 Deliverable report D3b. Reports on cancer-related projects (bioassay, transgenic study, promotion study). 2008.
18. EMF-NET: Effects of the exposure to electromagnetic fields: From science to public health and safer workplace. WP2.2 Deliverable report D4: Reports on cancer related projects at cellular and molecular level (genotoxicity, cell differentiation, apoptosis, gene expression, etc.). 2008.
19. EMF-NET: Effects of the exposure to electromagnetic fields: From science to public health and safer workplace. WP2.2 Deliverable report D5. Effects on immune function and the endocrine system. 2008.
20. EMF-NET: Effects of the exposure to electromagnetic fields: From science to public health and safer workplace. WP2.2 Deliverable report D5bis. Reports on laboratory studies and projects related to effects on blood brain barrier, auditory system, behaviour, cardiovascular system and nervous system. 2008.
21. Russian National Committee on Non-Ionizing Radiation Protection. Children and mobile phones: the health of the following generations is in danger. Moscow, Russia 14 April 2008.
22. Swedish Radiation Protection Authority (SSI). Recent Research on EMF and Health Risks Fifth Annual Report from SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic fields, 2007. SSI Rapport 2008:12.  
[http://www.ssi.se/ssi\\_rapporter/pdf/ssi\\_rapp\\_2008\\_12.pdf](http://www.ssi.se/ssi_rapporter/pdf/ssi_rapp_2008_12.pdf)

## (II) 電磁界ばく露に関する人体防護ガイドラインと規制の動向

### 1. 世界保健機関によるリスク管理の推奨

2007年6月に世界保健機関（WHO）は、環境保健クライテリア No. 238「超低周波電磁界」を発行し、超低周波（ELF）電磁界のリスク評価を示した<sup>1)</sup>。同時に、ファクトシート No. 322により、リスク評価の結果を要約するとともに、リスク管理についてのWHOとしての推奨事項を示した。その要旨は、次の通りである<sup>2,3)</sup>。

- ① 100  $\mu\text{T}$  より遙かに高いレベルの磁界により人の神経や筋肉が刺激されるメカニズムは、解明されている。各国は、労働者及び一般の人々をこれらの影響から守るために規定された国際的なばく露ガイドラインを採用すべき。
- ② 0.3～0.4  $\mu\text{T}$  といった低いレベルの磁界を長期間浴びることによる健康影響については、疫学調査(症例対照研究)において、小児白血病が増加するという一貫したパターンが示される。しかし、この調査方法は結果に偏りを生じやすく、また、磁界ばく露とガンの進展のメカニズムを説明する学説もなく、大多数の動物実験でも影響は示されていない。これら理由により、超低周波電磁界と小児白血病の因果関係に関する証拠は弱く、総合的には因果関係と見なせるほど強くない。また、成人がん等他の病気については、関連する証拠は認められない。
- ③ 以上から、低いレベルの磁界を長期間浴びることによる健康影響については、ばく露低減の措置をとることにより、健康上の便益があるか不明。したがって、以下の3つを推奨する。
  - i) 科学的証拠の不確かさを更に低減させるための研究プログラムを推進すべき。
  - ii) 全ての関係者が、情報を提示した上で意思決定を可能とするための効果的で開かれたコミュニケーションの仕組みを構築することが奨励される。
  - iii) 新規設備の建設、設計の際のばく露低減のための低費用の方法(国ごとに異なる)を探し求めることは良い。恣意的に低いばく露規制値の採用に基づく政策は認められない。

電磁界の健康リスク管理については、①の確立されている短期的な生体影響を基礎にしたリスク管理と、③に示された、疫学研究が示唆する不確かな健康リスクの可能性への対策の2つの側面がある。一般公衆の間では、後者への関心が高い。しかし、ファクトシート No. 322 が述べるように、WHO は、健康影響に関する根拠に基づかない、恣意的に低い規制値を認めていない。

### 2. 国際的な人体防護ガイドライン

WHO は、ファクトシート No. 322 において、公衆及び職場における人体防護で考慮すべき国際

的なガイドラインとして、国際非電離放射線防護委員会（International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP）が1998年に公表したガイドライン<sup>4)</sup>（0～300 GHz）と、米国電気電子学会（The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）の国際電磁安全委員会（International Committee on Electromagnetic Safety, ICES）によるIEEE/ICES C95.6規格<sup>5)</sup>を挙げた。このファクトシートは超低周波の電磁界を対象としているので、IEEE/ICESの規格は0～3 kHzの範囲をカバーするC95.6を指しているが、高周波のリスク評価が未完了の現時点では、高周波電磁界に関するリスク管理についても、確立されている短期的な影響を基礎としたガイドラインに基づくリスク管理を推奨していると解釈される。この場合、IEEE/ICES C95.1（3 kHz～300 GHz）<sup>6)</sup>が高周波領域のガイドラインである。

これらのガイドラインは、低周波（<100 kHz）では刺激作用、高周波（>100 kHz）では熱作用が支配的であるという、確立された生体影響をもとにしている点で共通である。しかし、低周波領域では、ばく露限度値の考え方の違いにより、数値的には違いがある。例えば、50/60 Hzの商用周波数において、磁束密度で表される指針値には表2.1のように、5～10倍の違いがある。ただし、ICNIRPは、磁束密度の全身での空間平均値を想定した指針値であり、IEEE/ICESは局所の最大値を想定した数値である点で、単純に比較はできない。なお、磁束密度で表される指針値は参考値であり、刺激作用が支配的な低周波領域で満たすべき本来の制限（基本制限）は、組織（特に中枢神経系）に誘導される電流密度（ICNIRP）や内部電界（IEEE/ICES）であることに注意する必要がある。

表 2.1 商用周波数(50/60 Hz)における磁界の指針値 (単位 mT)

	一般公衆				管理環境（職業的ばく露）			
	IEEE/ICES		ICNIRP		IEEE/ICES		ICNIRP	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
全身	0.904		0.1	0.083	2.71		0.5	0.417
四肢	75.8	63.2	—		75.8	63.2	—	

注：ICNIRPは参考レベル、IEEE/ICES規格は最大許容ばく露レベル(MPE)

商用周波数における指針値は、いずれも長期的影響の可能性に関して議論されている、1マイクロテスラ(μT)以下の磁束密度とは大きくかけ離れた数値である。

高周波領域でのガイドラインについては、熱作用が根拠となっており、人体組織1 kg当たりに吸収される電力(Specific Absorption Rate, SAR [W/kg])が基本制限である。電界強度や磁界強度で表される参考レベルは、全身で平均したSARが職場環境では0.4 W/kg、一般公衆では0.08 W/kgとなる数値を導出して定められている。ただし、高周波電磁界の人体による吸収は、電界と体軸の相対的な向き（偏波）や地面への接地条件によって異なるので、もっとも

吸収が大きい条件を仮定している。すなわち、全身が均一に、電界の向きが体軸と平行な条件を想定している。したがって、携帯電話端末のように、身体に近接して使用し、局所にばく露が集中する場合には、この参考レベルは適用できない。このため、局所に集中するばく露に対しては、局所 SAR の最大値で制限する。

一般公衆の局所 SAR に関する許容限度値は、ICNIRP ガイドラインと現在の IEEE/ICES 規格では、組織 10 g の平均値について 2 W/kg と同じである。しかし、IEEE/ICES 規格の 2005 年の改定までは、ICNIRP が 10 g の組織での平均値に適用するのに対し、IEEE/ICES では 1 g の組織での平均値で規定していた。このため、人体に非常に接近して使用する機器では、実質的には 2 倍程度 IEEE/ICES の方が厳しい規制となっていた。

米国では、連邦通信委員会 (FCC) が高周波電磁界の規制を行っている。FCC の規制は、2005 年以前の IEEE 規格に基づいており、1 g 平均のままである。

局所 SAR に関しては IEEE/ICES が厳しい制限を設けていたが、他に関しては ICNIRP の方が概して制限が厳しい。例えば、中波帯とマイクロ波帯で、特に公衆のばく露に関しては、ICNIRP より IEEE/ICES の方が、指針値が高く、さらに、時間平均も取り方についても、ICNIRP は職場環境と公衆でいずれも 6 分間であるのに対し、IEEE/ICES では、職場環境 (管理環境) で 6 分間、公衆 (非管理環境) では 30 分である。これは、IEEE/ICES では、ばく露限度値の数値だけみると非管理環境では 1/5 の厳しい値となっても、6 分間以下の短時間のばく露についての許容値は、管理環境と非管理環境で同じレベルが許容されることになる。こうした違いが今でも残されている。

ICNIRP ガイドラインは、欧州連合において広く使用されるほか、世界各国で利用され、一部では公式にも採用されている。IEEE/ICES 規格は、米国では標準規格として広く認知され、特に米軍の電磁界利用施設の管理に古くから用いられている。ただし、民間の任意規格であるという位置づけであるため、連邦政府機関である FCC は、無線通信機器、施設の管理にばく露ガイドラインとして IEEE/ICES 規格をそのまま利用することが困難である。現在は、1992 年版のガイドラインをもとにした基準を採用しているが、2005 年の改定を規制値に反映するためには、連邦政府に定められた手続きが必要である。このため、局所 SAR の規制値は 1 g 平均値のままとなっている。

### 3. 欧州連合の規制

1999 年に、欧州連合 (EU) は、欧州理事会勧告として、公衆に対する電磁界ばく露からの人体防護について、ICNIRP ガイドラインの数値を採用するよう勧告した<sup>6)</sup>。EU はその後 2004 年に、職場での人体ばく露が ICNIRP のガイドラインを満たすよう義務づけることを欧州指令として命じた<sup>7)</sup>。欧州指令はメンバー国に対して強制力があり、指令から 4 年後に法規制を施行しなければならない。職場環境のばく露については指令であり、公衆のばく露が勧告であった

理由は、職業安全は欧州政府による規制の対象であるのに対して、公衆の環境に関する規制は、メンバー国の国内問題と位置づけられるので、欧州政府の権限が及ばないためである。

電磁界環境からの公衆の防護が、規制ではなく勧告であり、強制力がないというものの、後述のように、多くのメンバー国で、実質的にこの勧告に基づいたリスク管理が行われている。すなわち、ICNIRP ガイドラインの値を用いた一般公衆の環境における規制が行われている。

環境の電磁界は、強制力のある欧州指令の対象でなく、国内問題であるが、製品の輸出入は国際間の問題であり、製品の満たすべき規格は欧州指令による規制の対象になる。したがって、一般公衆の使用する製品は、欧州政府の規制対象に含まれる。具体的には、製品の電磁気両立性（電磁ノイズ等に関する規制）の要件を規定した EMC 指令における、無線機器及び電気通信端末機器を規制する R&TTE 指令<sup>8)</sup>において、ICNIRP ガイドラインに基づく強制力のある規制が施行されている。規制対象は、当初は携帯電話端末による人体ばく露の制限であったが、携帯電話端末以外の機器についても、測定評価方法の標準化が進んでいることから、適用対象が広がっている。

#### 4. 欧州議会・理事会指令（職業者の防護）

労働における健康と安全に関する枠組み指令 89/391/EEC(1989年6月12日)<sup>9)</sup>の第16条に規定された個別指令のうち、物理的因子として、振動 2002/44/EC、騒音 2003/10/EC に続く18番目の個別指令として、2004年に電磁界に関する指令 2004/40/EC<sup>7)</sup>が制定された。この指令は、「物理的要因（電磁界）に起因するリスクへの労働者のばく露についての健康および安全の最低要求事項に関する2004年4月29日付 欧州議会・理事会指令」と題される。この指令は、労働者の健康と安全に関する電磁界への業務上のばく露の短期的有害性を扱う最低要求事項であり、加盟各国は、これより厳格な規則を定めることもできる。法律制定の期限は、2008年4月1日までとされた。

指令は、周波数0から300 GHzの時間変動する電界、磁界および電磁界に関して、ICNIRP ガイドラインの職業ばく露に対する基本制限をばく露限度値（ELV）とした。また、ICNIRP ガイドラインの参考レベルをアクション値と定めた。アクション値は、直接測定可能な電界強度や磁束密度で表現され、測定値がそれらを超えた場合に雇用者に対し、指令の定める行動を義務づける。

指令の公示にともない、そのインパクトについての検討がなされた。指令は法律制定により例外なく規制するので、多くの問題点が指摘された。中でも磁気共鳴画像診断装置（MRI）の周辺での医療従事者のばく露が、指令のばく露限度値を超えることが明らかであり、しかも、そのリスクが必ずしも明確なものでないことから、医療に無用の制約となることを懸念して、指令の法律制定に反対するロビー活動が展開された<sup>10)</sup>。

その一方で、いくつかの国では、速やかに法律制定が実施された。EU 官報（2008 年 9 月 8 日）によれば、イタリア、オーストリア、チェコ、スロバキア、リトアニア、ラトビア、エストニアの 7 カ国が国内法に規制を導入した。

MRI 関係者の強い働きかけの結果、指令の法律制定期限を当初案より 4 年間延期して、2012 年 4 月 30 日までとする提案が 2007 年 10 月 26 日付けでなされた<sup>11)</sup>。

修正提案の根拠として 3 つの理由を挙げている。

- 指令で定めるばく露限度値が MRI の医療応用に与えるマイナスの影響について、欧州委員会が開始した調査も含む各種調査の分析が完了するまでの時間的猶予のため
- 指令が定めるばく露限度値の根拠となっている ICNIRP の勧告するガイドラインが、指令が採択された以降の研究成果を含む最新の科学的調査に基づいた WHO による電磁界に関する環境保健クライテリアを考慮した、最新の検証を踏まえたものとなるのを待つため
- 同指令による影響を徹底的に分析し、労働者の健康・安全の保護と、電磁界を利用した医療および産業活動の継続・発展の両方を高レベルで保障することを目的とした指令の改正を提案するため

表 4.1 欧州委員会による 5 つの選択肢

(A)	現在の ELV の維持	当初の内容のまま、内容を変えずに法律制定期限を 2008 年 4 月 30 日から 2012 年 4 月 30 日に延期する
(B)	最新の国際的勧告に基づく新たなばく露限界値 (ELV) の採用	ICNIRP は WHO の国際電磁界プロジェクトの結果を受けて、ガイドラインの改訂している。静磁界のガイドラインが 2009 年に公表され、低周波電磁界についても、作業中で、2012 年には改定の完了が期待されている（高周波は、2012 年 4 月に間に合うのが困難と思われる）。ICNIRP のガイドライン改訂あるいは、IEEE/ICES の規格など、現在の ICNIRP ガイドラインより更新されたばく露限度値を用いるというのがこの選択肢である。
(C)	特定事例に対して指令の免除規定	指令の規制範囲から特定の機器や作業環境を除外するものである。ガイドラインに示されるばく露限度値は、特定の機器や環境を前提としたものでなく、一般的に適用される。このため、ある程度の安全側の判断がなされている。一方、機器や環境が特定され、その個別の状況に応じたリスク評価がなされるならば、それらは一般的なガイドラインの適用を免れる、という考え方である。
(D)	最新の国際的勧告に基づく法的拘束力のないアクション	この選択肢は、ICNIRP ガイドラインを、法的規制ではなく慎重な勧告として位置づけ（本来のガイドラインの地位）、欧州規模で共通の安全ガイダンスを導入することである。実施ガイド・広報活動・訓練プログラム・欧州レベルまたはセクターレベルでの社会的パートナー間の自発的合意などを伴う。
(E)	指令の撤回	2004/40/EC 指令を撤回する



この提案は採択され、2008年4月23日付けで欧州理事会指令 2008/46/EC<sup>12)</sup>として発行された。2004/40/EC に対する変更点は、法律制定の実施期限のみである。

その後、欧州委員会は 2004/40/EC 指令の今後の方向性に関する調査研究を組織し、選択肢のたたき台として、表 4.1 に示す 5 つの選択肢を示した。

現在、ワークショップ等で議論がなされているが、(B) または (C) の選択肢が、利害関係者に共通して受け入れられるものと思われる。

## 5. 公衆の低周波磁界ばく露規制の各国の政策

WHO は、2007年6月20～21日に「超低周波電磁界の防護方策の開発と実施に関するワークショップ」を開催した。環境保健クライテリア (EHC) No.238 とファクトシート No.322 で、低コストでの磁界低減を、不確かなリスクの可能性に対する用心として助言したことへの対応についての情報交換が目的である。この中で、低周波電磁界に関する各国の公衆防護対策についてとりまとめた報告が、Shaiela Kandel (イェルサレム・ヘブライ大学) によりなされた。各校の状況について、この報告のスライドに基づき概要を紹介する。ただし、追記すべき事項については、適宜補足する。

[http://www.who.int/peh-emf/meetings/elf\\_emf\\_workshop\\_2007/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/meetings/elf_emf_workshop_2007/en/index.html)

Kandel による各国の政策の概要は表 5.1 の通りである。

表 5.1 各国の ELF に対する政策

政策	国・地域
① 公式の ELF 政策を持たない	アルメニア、バーレーン、カナダ、インド、カザフスタン、マレーシア、モンゴル、タイ、米国、ウズベキスタン、他
② 国際ガイドラインを任意で導入	オーストラリア、ブラジル、デンマーク、フランス、アイルランド、ラトビア、ルクセンブルグ、マルタ、オランダ、ニュージーランド、シンガポール、南アフリカ、韓国、スペイン、スウェーデン、台湾、英国、ベネズエラ
③ 国際ガイドラインを EU 勧告により法制化	オーストリア、フィンランド、ギリシャ、ポルトガル、ノルウェー
④ EU に新加盟にとまなない、国内法を EU 勧告に合わせて改定	チェコ、クロアチア、エストニア、ハンガリー
⑤ 別の根拠による、より厳しい規制	アルゼンチン、中国、日本、ポーランド、ロシア
⑥ 用心による規制	スイス、イタリア

米国とカナダは、低周波電磁界についての連邦としての規制はない。ただし、高周波の規制は早くから行っており、米国の連邦通信委員会（FCC）は 1985 年に、共産圏以外では世界に先駆けて、米国環境政策法（National Environmental Policy Act, NEPA）を根拠に、通信放送施設からの高周波電磁界放射を規制している。また、米国では、州や自治体レベルで規制が行われていることがあり、用心的に厳しい規制が行われる例もある。

表の②において、国際ガイドラインとして利用されているものは、ほとんどが ICNIRP ガイドラインである。しかし、韓国では、米国の IEEE/ICES 規格と ICNIRP ガイドラインの両方を用いており、原則として制限が厳しい方を採用している。低周波については、ICNIRP ガイドラインに従っている。オーストラリアでは、放射線防護・原子力安全庁 (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, ARPANSA) が、電磁界ばく露からの人体防護を担当している。高周波については、3 kHz～300 GHz の規格が 2002 年に制定されている。この規格は、独自のものであるが、ICNIRP ガイドラインに近いものである。一方、低周波(0～3 kHz)の規格については、長い間改定の議論が続いている。現在は、ARPANSA の規格として公表されたものではなく、2006 年 12 月に示されたドラフトが審議されている状況である。基本的には ICNIRP と同様の考え方に基づくが、管理された活動時に、公衆でも 300  $\mu$ T まで許容する点などの違いもある。また、数値化はしないものの、用心のための措置を盛り込む議論もあり、現在でも未確定の状態のようである。

フィンランドについては、2002 年に制定された政令(decreet) 294「非電離放射線への公衆ばく露の制限に関する厚生大臣令」によって規制が行われている。この政令は、100 kHz 以上については、強制力のある規制だが、100 kHz 未満では、超えないことが望ましいという勧告にとどめている。Kandel の示した表にドイツが含まれていない。ドイツでは 1999 年に

連邦排出物規制法（ Bundesimmissionsschutzgesetzesverordnung :

BImSchV) 第 26 条により ICNIRP ガイドラインに基づく規制を法制化しており、この表では③に含まれる。韓国は②に分類されているが、2005 年に架空送電線下の一般公衆に対する磁界規制値を導入している。規制値は ICNIRP ガイドライン値であり、適用対象は架空送電線のみである。

旧共産圏で、最近 EU に加盟した国々には特殊な事情がある。表の④に示した国（ノルウェーを除く）は、共産主義の時代に国家としての規制値をもっていた。非常に厳しい数値であり、実際に守られていたかどうかは確かではないが、規制の枠組みはそのままで、数値だけ EU 勧告（すなわち ICNIRP 指針の値）に整合させた国が多い。

表の⑤は、それぞれの国で独自の考察により、ICNIRP ガイドラインより厳しい規制を行っている例である。ロシア、中国は古くからの考え方により、非常に厳しい制限値が採用されて

きた。WHO による国際電磁界プロジェクトを通して交流を深める中で、ICNIRP ガイドラインに次第に近づいているものの、まだ厳しい数値が用いられている。

日本がこのカテゴリーに入っているのは誤解を招きそうであるが、これは、商用周波数の電界のみに設けられた規制である。1976 年に、電気設備に関する技術基準を定める省令（通商産業省令第 52 号）第 27 条に、架空電線路からの静電誘導又は、電磁誘導による感電の防止に関して、「特別高圧の架空電線路は、常時静電誘導作用により人による感知のおそれがないよう、地表上 1 m における電界強度が 3 kV/m 以下になるように施設しなければならない。」と定めた<sup>13)</sup>。人体への危害を防止することが目的であることが明記されているものの、この規制は電磁界と人体の直接の結合ではなく、導体（送電線下で傘を持った状況を想定）を介して人体が電界を感知することを防止するためのものである。

スイスとイタリアでは、「用心(precaution)」のための厳しい規制を行っている。注意すべき点は、スイス、イタリアともに、人体ばく露(Immission)の制限としては、欧州勧告の値を用いており、設備からの電磁界の放出(Emission)について、厳しい制限を設けている(7 を参照)。

## 6. 経済産業省電力安全委員会報告

2007 年 6 月の WHO による EHC238 文書とファクトシート No.322 の公表を受けて、低周波磁界のわが国における規制の在り方を検討するために、経済産業省は総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会の電力安全小委員会の下に「電力設備電磁界対策ワーキンググループ」を設置し、検討を行った。最終報告書は 2008 年 6 月 30 日付けで公表され<sup>14)</sup>、WHO によるファクトシート No.322 の推奨事項を踏まえて、ICNIRP の 1998 年のガイドラインにしたがって、規制を行うことを提案した。規制の対象は、電力設備から発生する 50/60Hz の磁界のみで、家電製品から発する電磁界は対象に含まない。また、職場環境を含まない。

## 7. 用心のための対策

国際電磁界プロジェクトが長期化した一つの理由は、疫学研究が示唆した、低周波磁界のばく露と小児白血病の弱いながらも有意な相関の評価と、それにとまなう対策の議論であった。低周波電磁界についての環境保健クライテリア No.238 (EHC238)<sup>1)</sup>におけるリスク評価の結論は、2002 年に国際がん研究機関 (IARC) がヒトに対する発がんリスクに関するモノグラフとして取りまとめた、「ヒトに対して発がん性があるかもしれない」(グループ 2B) という評価<sup>15)</sup>が、その後報告された研究を加えても変更されないことを確認している。その上で、不要なばく露を低減するなどの「用心のための措置」を限定的ではあるものの、推奨している。EHC238 文書はプロジェクトが組織したタスクグループの報告書である。したがって、WHO の公式見解ではない<sup>14)</sup>。WHO は、疫学のカットポイントとなった、0.4 μT 程度の弱い低周波磁界が、公衆に対するガイドライン 100 μT (50 Hz) に比べて極めて低いレベルであり、科学的

な根拠に基づく現在のガイドラインが不十分なもの、という誤解をもたらすことを懸念した。このため、WHO の立場をより明確にしたファクトシート No.322<sup>2)</sup> を同時に公表し、科学的根拠に基づくガイドラインを尊重すべきであることを明確にした。ファクトシートでは、磁界のばく露による不確かなリスクを考慮して、磁界へのばく露を減らすための方策をとってもよい、とする一方で、「用心 (precaution)」という表現を排除して、不確かなリスクへの過剰な不安を避ける表現になっている。ファクトシートは EHC と異なり WHO の公式文書である。科学的なアプローチを基礎とする WHO の立場から、科学的根拠に基づくガイドラインと、根拠が十分でない「用心的」措置の優先順位を明確にした。

ここで”precaution”を「用心」と訳しているが、しばしば「予防」と和訳されることがある。しかし、”precaution”は未然防止を意味する「予防」である”prevention”と違い、「用心」または「警戒」といった訳語がより適切である。職場環境の電磁界を規制する欧州指令の文書<sup>7)</sup>では、労働者の災害を未然防止するための一般原則を”general principle of prevention”と表現している。これに対する訳語は「予防原則」である。一方で、”precautionary principle”もまた、「予防原則」と和訳されることが多いことから、混乱が生じる懸念がある。ここでは、区別のために、後者の”precaution”を明確にするために、以下では「用心」という表現を用いている。

国レベルで用心のための規制を実施しているのがイタリアとスイスである。イタリアでは、法的根拠となる枠組み法を 2001 年に制定し、規制値を示した政令を 2003 年に策定した。この政令によって、公園や住居等人々が 4 時間/日以上滞在する場所において、注意値として商用周波の磁界を 10  $\mu\text{T}$  以下に制限している。このほかに、安心目標として公園や住居等人々が 4 時間/日以上滞在する場所において新設の送電線にのみ、3  $\mu\text{T}$  の制限が設けられている。しかし、ばく露制限値は、欧州理事会指令による ICNIRP ガイドラインの値である 100  $\mu\text{T}$  であることに注意が必要である。

スイスの規制は、2000 年に施行された非電離放射線からの防護に関する法令によるもので、ばく露制限値は磁界 100  $\mu\text{T}$ 、電界 5  $\text{kV/m}$  であり、欧州理事会指令と同じであるが、イタリアと同様に、用心的放出制限値として、人が定常的にかなり時間を過ごす場所では磁界 1  $\mu\text{T}$  に制限している。ただし、用心的放出制限には適用除外があり、磁束密度が最小化されるように相配置を最適化すること、コストの妥当な範囲で技術的、運用上で実行可能な対策を講じる場合に除外される。すなわち、スイスの「用心のための」規制はばく露の制限というより、設備の仕様を規定したものといえる。高周波電磁界についても、移動電話基地局と放送無線通信局に対して、電界強度について ICNIRP ガイドラインの 1/10 程度の規制が設けられている。

数値により用心のための規制を行うほかに、各国でさまざまな対策が検討あるいは実施されていることが前述の Kandel により報告されている。現状を維持するために、米国のフロリダ州やミネソタ州では、新設の送電線で既存の磁界強度を上回らないことが規定されている。オランダでは、新設の場合に限り、送電線による磁界の時間平均値が 0.4  $\mu\text{T}$  以下になるように

距離を制限する。その他、さまざまな取り組みがあるが、これらの「用心のための対策」については、WHOによるファクトシートの推奨事項を考慮して考えることが必要と思われる。

## 8. ICNIRPによる静磁界ガイドライン

ICNIRPは、1994年に静磁界に関するガイドライン<sup>16)</sup>を示した。静磁界についての人体防護ガイドラインは、米国および欧州になく、新たな提案であった。

この指針で考慮されている静磁界と人体の相互作用は、磁界中での運動にともなう電界の誘導、磁気力、電子スピン作用の3つの作用である。これらのメカニズムは確立されている。しかし、これらの作用が実際にヒトの健康に明確な悪影響を及ぼす閾値は十分に明らかではない。ガイドラインでは、4 Tを超える静磁界中で頭部を動かしたときに、一過性の影響ではあるが目眩や吐き気を感じることで、当時の生物学実験の研究報告で扱われていた磁界強度の多くが2 Tまでであり、この強度の静磁界への短期的なばく露が高等生物の発育、行動、生理学的指標に影響を与えないことを根拠に、安全側の判断として静磁界ばく露の防護指針値の天井値を2 Tとした。ただし、手足には重要な器官や大きな血管がないので、天井値を5 Tとした。また、職場環境での継続的な静磁界ばく露については、天井値を満たした上で、労働時間内の時間加重平均値を200 mTに制限することとした。この数値の導出は、静磁界中での身体の動きや血流による磁気誘導によって生じる電流密度の制限値を10~100 mA/m<sup>2</sup>と見積もり、この電流密度を生じる静磁界の大きさに安全率を考慮したと説明されている。これらの指針値を職業的ばく露に適用し、公衆のばく露には、職業的ばく露の指針値を満たした上で、さらに継続的な静磁界ばく露の限度値を40 mTと定めた。これらの防護指針値を表8.1に示す。

表 8.1 静磁界のばく露に関する制限値<sup>a, b, c, d</sup> (ICNIRP 1994年<sup>16)</sup>)

ばく露条件		磁束密度
職業的ばく露	労働時間帯 (時間加重平均)	200 mT
	天井値 (全身)	2 T
	天井値 (四肢のみ)	5 T
公衆のばく露	連続ばく露	40 mT

- 注意：心臓ペースメーカーなどの電子機器や強磁性体を体内に埋め込んでいる場合は、上記の限界値で適切に防護できるとは限らない。心臓ペースメーカーの多くは0.5 mT以下の静磁界では誤動作しないと考えられる。強磁性体や電子機器（心臓ペースメーカー以外）の体内埋め込み物を持つ人は数mT以上の静磁界で影響を受ける可能性がある。
- 磁束密度が3 mT以上の場合、金属物体の飛来による危険に注意する必要がある。
- アナログ式の時計、クレジットカード、磁気テープ、コンピュータディスクなどは1 mTのばく露でも影響を受けることがあるが、これは人体の健康とは無関係である。
- 一般公衆が磁束密度が40 mTを超える特別な施設にたまたま出入りすることがあっても、職業的なばく露限界値を超えず、適切に管理された条件においては許容される。

注：この限界値は一律な静磁界に適用されるものである。不均一な静磁界については、100 cm<sup>2</sup>の面積での平均値に適用する。

1999年に欧州委員会が欧州理事会勧告<sup>6)</sup>として、時間変動する電磁界のガイドライン(0~300 GHz)を公衆のばく露に対して勧告した際に、静磁界のガイドラインは取り入れられなかった。職場環境における静磁界の管理についても、欧州指令2004/40/ECに、このガイドラインは引用されなかった。1994年の静磁界ガイドラインの根拠が、2 T以上の磁界についてのデータが希少であることであったことから、最新のデータによって、再検討することが必要であった。また、磁気共鳴画像診断(MRI)装置が非常に強い静磁界を扱う必要があることに、無用の制限を課することを避けなければならないという問題もあった。

このような経緯を経て、ICNIRPの静磁界ガイドラインは2009年に改訂され公表された<sup>17)</sup>。ICNIRPによる新しい静磁界ガイドラインの値を表8.2に示す。1994年のガイドラインと比べて、基礎となる健康影響評価に変化はない。しかし、ばく露限度値の表の脚注に見られるように、頭部・体幹でも、条件によっては最大で8 Tまで許容され、四肢では14 Tまで許容されることなど、指針値がかなり緩和されている。1994年のガイドラインで、誘導電流の推定値に基づく説明がなされているものの、職場環境に対する2 Tの指針値についての主な根拠は、2 T以上のデータがほとんど無いことであった。これに対して、最近ではより強い磁界を用いた研究報告が入手できるようになったことが緩和の理由である。4 T以上の磁界中では、動いたときに目眩や吐き気を感じる場合があるので、8 Tまで許容されるのは、磁界中での動きの制限などの作業手順の管理をとらなければならない場合に限られる。また、研究目的など、さらに強いばく露を容認せざるを得ない場合、研究機関の倫理委員会の議により許容される可能性にも言及している。

表8.2 新しいICNIRP指針における静磁界のばく露限度値<sup>a)</sup>

ばく露の特性	磁束密度
職業ばく露 <sup>b)</sup>	
頭部と体感のばく露	2 T
四肢のばく露 <sup>c)</sup>	8 T
公衆 <sup>d)</sup>	
身体の任意の部分	400 mT

- ICNIRPは、これらの限度値を、運用上は空間ピーク値と見なすことを推奨する。
- 特殊な職場への適用に関しては、8 Tまでのばく露が正当化される。ただし、環境が制御され、動きによる誘導効果を制御するために適切な作業実施が履行されていることが条件である。
- 8 T以上のばく露限度値の根拠となるような十分な情報はない。
- 有害な間接的影響の可能性を理由として、ICNIRPは植え込み型医用電子機器や強磁性体物質を含むインプラントを装着した人への不注意による有害なばく露、および飛来物体の危険を予防するために実際的な政策を実行することが必要であると認識する。それは0.5 mT程度の十分に低い制限レベルになる可能性がある。

静磁界に対する新しい ICNIRP ガイドラインで注目されることがいくつかある。一つは、指針値が前のガイドラインに比べて緩和されたことである。欧州指令が職業ばく露を最低要求事項として規制することから、過剰な制約にならないように限度値を設定する必要があることが背景にあると思われる。

もう一つは、埋め込みペースメーカーなどの医療機器への影響を考慮し、一般公衆が不用意に 0.5 mT 以上の静磁界にさらされないように助言している点である。これまでは、医療機器への干渉は、ばく露ガイドラインでは扱わなかった。しかし、医療機器を埋め込んだ人々が、特別な患者ではなく、健常人々の一部であるという認識に変化してきたことが背景にある。しかし、ばく露限度値を決定する際の一貫性において、区別して設定するのが望ましい。

## 9. 測定評価方法の開発動向<sup>18)</sup>

人体の電磁界ばく露を評価するためには、標準化された測定方法が必要である。1999 年の欧州理事会勧告により、その必要性が高まり、欧州電気標準会議 (CENELEC) において、人体ばく露評価の欧州規格の開発が進められた。特に問題となったのは、携帯電話によるばく露評価であった。防護指針の評価は、波源の遠方で全身がばく露される場合は、電界強度や磁界強度で表される参考レベルを評価すればよい。これらの電磁気量の測定は、従来の工学的な測定方法の範囲で可能である。しかし、携帯電話端末のように、人体に非常に接近して使用する機器では、電界強度や磁界強度ではなく、人体組織内の SAR を測定する必要がある。当初は欧州の CENELEC と米国の IEEE でそれぞれ測定方法が開発されていたが、国際的に整合した規格とする必要がある。この背景が、国際電気標準会議に新しい技術委員会である、TC106 「人体ばく露に関する電界、磁界、電磁界の測定方法」が設置される一つのきっかけとなった。1999 年に設置が決定され、活動が開始したのは 2000 年であった。

IEC TC106 で、これまでに標準化された規格は次の通りである。

- (1) IEC 62226-1 (2004 年 11 月) : 低周波及び中間周波数の電界又は磁界によるばく露—人体内に誘導される電流密度と内部電界の計算方法—Part 1 : 一般
- (2) IEC 62226-2-1 (2004 年 11 月) : 低周波及び中間周波数の電界又は磁界によるばく露—人体内に誘導される電流密度と内部電界の計算方法—Part 2-1 : 磁界ばく露—2 次元モデル
- (3) IEC 62226-3-1 (2007 年 5 月) : 低周波及び中間周波数の電界又は磁界によるばく露—人体内に誘導される電流密度と内部電界の計算方法—Part 3-1 : 電界ばく露—理論解析および 2 次元数値モデル
- (4) IEC 62209-1 (2005 年 2 月) : 耳の近くで使用する手持ち機器の SAR 評価方法 (300MHz-3GHz)

- (5) IEC 62233 (2005年10月): 家庭用電気機器及び類似の機器についての電磁界測定方法
- (6) IEC 62311 (2007年8月): 電磁界の人体ばく露制限に関する電子機器、電気機器の評価 (0 Hz - 300 GHz)
- (7) IEC 62369-1 (2008年8月): 周波数範囲 0~300GHz の各種短距離デバイスからの電磁界による人体ばく露評価—Part 1: 電子盗難防止装置 (EAS) 及び無線識別装置 (RFID) 等から発せられる電磁界

この他に、現在開発が進行中の規格がいくつかある。その一つが、人体ばく露に関する交流電力システムから発生する電界、磁界の測定手順 (IEC 62110) であり、わが国からの提案で進んでおり、2009年末頃には国際規格として発行される見通しである。

#### 参照文献

1. World Health Organization: Environmental Health Criteria Monograph No.238. Extremely Low Frequency Fields, 2007.
2. World Health Organization: Fact sheet No. 322, Electromagnetic fields and public health. Exposure to extremely low frequency fields. 2007.
3. <http://www.meti.go.jp/report/data/g80630bj.html>
4. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields. Health Physics 74, 494-522, 1998.
5. IEEE C95.6 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 -3 kHz, IEEE C95.6-2002.
6. The Council of the European Union. Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC), Official Journal of the European Communities 1999; 30(7).
7. Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). Official Journal of the European Union, L184 of 24 May 2004.
8. Directive 1999/5/EC of the European Parliament and of the Council of 9 March 1999 on radio equipment and telecommunications terminal equipment and the mutual recognition of their conformity



9. Council Directive 89/656/EEC of 30 November 1989 on the minimum health and safety requirements for the use by workers of personal protective equipment at the workplace (third individual directive within the meaning of Article 16 (1) of Directive 89/391/EEC) Official Journal L 393 , 30/12/1989 p. 0018 – 0028
10. Institute of Physics Report, MRI and the Physical Agents (EMF) Directive. A report prepared on behalf of the Institute of Physics by Dr Stephen Keevil, Guy's and St Thomas' NHS Foundation Trust and King's College London. November 2008
11. COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL Brussels, 26. 10. 2007 COM(2007) 669 final 2007/0230 (COD). amending Directive 2004/40/EC on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)
12. DIRECTIVE 2008/46/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2008. Official Journal of the European Union. L 114/88. 2008年4月26日.
13. 電気設備に関する技術基準を定める省令（平成9年3月27日通商産業省令第52号）
14. <http://www.meti.go.jp/report/data/g80630bj.html>
15. WHO/IARC: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol.80. Non-ionizing radiation, part1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC Press, Lyon, 2002.
16. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. Health Phys. 1994;66(1):100-106.
17. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. Health Physics, Volume 96, Issue 4, April 2009.
18. 山崎健一「人体ばく露に関連する低周波電磁界の評価方法に関する規格・基準化の動向」電気学会誌 Vol. 129, No. 1, pp.32-35 (2009).

**第二部**  
**電磁界ばく露の健康影響評価に関する**  
**文献情報調査結果**



## 第二部 電磁界ばく露の健康影響評価に関する文献情報調査結果

### (I) 電磁界ばく露の健康影響評価に関する文献情報（実験室研究）

本調査では、超低周波ならびに、高周波の電磁界の生体影響について、2007年および2008年に発表された主要な論文を対象にした。

超低周波は50ないし60 Hz（商用周波）を、高周波は900 Mz～2.4 GHz（携帯電話利用周波数）を対象にした。

対象とした論文は、Journal Citation Reports (JCR)によるインパクトファクターが1.0以上の生体電磁気学、毒性学等に関連のある雑誌に掲載されたものとした。

具体的には、Radiation Research, Bioelectromagnetics, Carcinogenesis, Brain Research, Bioelectrochemistry, Toxicologyなどを対象にした。

以下、超低周波と高周波に分け、さらに動物実験と細胞実験に分けて研究動向をまとめる。

#### 1. 超低周波（50, 60 Hz）

##### 1.1 動物実験

###### 1.1.1 がん

動物実験による長期影響の指標の一つに発がんがある。これまで多くの研究によって、超低周波電磁界の発がん性ならびにプロモーター作用に関しては否定されているが、2007年以降に発表された論文でも同様である。Chungら<sup>1)</sup>は ethylnitrosourea (ENU)を妊娠中に投与することによって仔に脳腫瘍が誘発されるモデルを用いて、生まれた子に60 Hz 電磁界ばく露した際の脳腫瘍の発生への影響を調べた。実験は、最大で500  $\mu$ Tで1日21時間のばく露を4週齢から32または42週まで慢性的に行い、がんの発生率を調べた。その結果、ENUのみ投与群とENUプラス電磁界慢性ばく露群との間に有意な差は見られず、電磁界の影響は認められないとした。

日本の電力中央研究所のNegishiら<sup>2)</sup>は、7,12-dimethylbenz(a)anthracene (DMBA)を新生児に経口投与することで誘発されるリンパ腫、リンパ性白血病に対する電磁界の影響を調べた。実験にはCD-1マウスを用い、1日22時間、最大で350  $\mu$ Tで30週間のばく露を行った。各群、雄雌各50匹合計100匹で実験を行ったところ、電磁界のばく露によりリスクが高くなることはないとした。

Fedrowitz<sup>3)</sup>は、DMBA乳がん誘発ラットモデルを用いて、50 Hz、100  $\mu$ Tのばく露を1日24時間、のべ26週間行い、乳がん誘発頻度の差を調べた。その結果電磁界ばく露群は、Fischer344ラットにおいてシャム群に比べ31%の乳がんの増加が認められた。乳がんモデルにおいてはこれまで多くの実験室の研究で異なる結果が出ている背景があるが、筆者らの主張によれば、異なる結果が出ているのはSprague Dawleyラットの異なる亜種を使用したためということである。本論文での結論はFischer344ラットが磁界による乳がん発生のメカニズムを調べるの

に重要な系統であるとしているが、今後他の研究グループの結果と併せて評価する必要がある。

以上の結果より、超低周波による影響はおおむね否定的ではあるが、WHO 環境保健クライテリア 238<sup>4)</sup>で述べられているように、特殊な系統などを用いた場合に、他と異なる結果も観察されるという報告もあることから、一貫した結果とはなっていない。

### 1.1.2 DNA 損傷

DNA 損傷については、影響の有無に関して一貫した結果が出ていない。

Yukus ら<sup>5)</sup>はSD ラットに対して、50 Hz 最大 500  $\mu$ T の磁界を1日2時間、10ヶ月にわたりばく露を行い、白血球中のDNA損傷を調べた。DNA損傷の指標としては、酸化ストレスマーカーの8ヒドロキシグアニジンならびにその類縁化合物を調べた。その結果、100  $\mu$ T ばく露群のみ有意にこれらの物質が多く検出された一方、500  $\mu$ T では有意ではなかった。各群の例数が少なく(N=3~4)、また磁界強度との関連性は見られないので詳細な検討が必要であると思われる。

Erdal<sup>6)</sup>は、Wistar ラットに対して50 Hz 1 mT の磁界を1日4時間、45日間行い、ラット骨髄細胞の染色体凝集、微小核形成、あるいは、細胞の増殖能などを調べた。その結果、微小核形成が増加したり、細胞分裂能が減少したりする影響が見られた。また、別の論文において、Erdal ら<sup>7)</sup>は同様の実験を行い、Wistar ラットに対して50 Hz 1 mT の磁界を1日4時間、45日間のばく露が、肝においてニトロ化物を増加していることを示したが、その影響は雌のみにみられるということであり、結果に一貫性がみられなかった。

### 1.1.3 行動影響

以下に挙げる3つの論文は行動学的な評価でいずれも当該のばく露条件で影響を認めるものであった。これらの結果はそれ以前の論文、および今後の研究と併せて総合的に評価されるべきであろう。

Manikonda ら<sup>8)</sup>は、Wistar ラットに50 Hz 100  $\mu$ T の磁界ばく露を90日行った時の行動観察から、ばく露群の運動量が多く、それは細胞内Ca<sup>2+</sup>レベルが増加し、Ca<sup>2+</sup>依存性の各種酵素が増加することや、Ca<sup>2+</sup>カルモジュリン依存性タンパクキナーゼの活性低下によるものであると述べている。

Fu ら<sup>9)</sup>は、ICR マウスを用いて、行動学的評価を行った。電磁界のばく露は25 Hz、または50 Hz で、1日1時間、最大2 mT でばく露期間は25日であった。行動学的評価はY字型迷路で評価を行った。移動能力にはばく露の影響は見られなかったが、50 Hz の長期ばく露により、迷路の選択能力に変化がみられ、空間認識能力の減衰が示唆された。

Liu ら<sup>10)</sup>はSD ラットに1日1時間ないし4時間の50 Hz、2 mT のばく露を4週間行ったと

きの行動学的評価を行った。空間認識能力の減少がみられ、これは長期記憶の獲得ならびに保持に影響があるものと推測している。

#### 1.1.4 その他の機能への影響

以下に、発生、生理学的側面からの研究を挙げるが、いずれも健康影響を認めないものである。

Yao ら<sup>11)</sup>は BALB/c マウスの新生仔に、出生後 18 日まで 1 日 3 時間の磁界ばく露を行い目のレンズ機能への影響を調べた。最大 4.5 mT のばく露を行っても、レンズの発生について形態学的、分子生物学的な差異を認めず、影響は見られなかった。

Burchard ら<sup>12)</sup>は、妊娠した乳牛に 60 Hz 30  $\mu$ T の磁界をばく露した際の血中ホルモン変化を調べた。それによると、ばく露を行った群の体重が増加し、各種ホルモンが減少していた。これより、磁界ばく露が決して健康リスクを高めるものではないことを示した。

Canseven ら<sup>13)</sup>は、50 Hz 0.2 mT の磁界を Swiss albino のマウスにばく露した際の薬物性発作反応を見たが、影響はなかった。

## 1.2 細胞実験

### 1.2.1 遺伝毒性

WHO 環境保健クライテリア 238<sup>4)</sup>においては、遺伝毒性に関して「ほとんどの研究は、ヒトの細胞を含む数種の哺乳類細胞における ELF 磁界ばく露について遺伝毒性作用がないことを報告している」と述べられているが、2007 年以降に発表されたものでは、遺伝毒性のありとされる発表も散見された。たとえば、Wahab ら<sup>14)</sup>は、ヒトの末梢リンパ球を用いて姉妹染色分体交換 (Sister Chromatid exchange) を調べた。ばく露条件は 50 Hz で、最大 72 時間、磁束密度は最大で 1 mT であった。彼らの結果によれば、姉妹染色分体交換がばく露群で高い割合で見られた。彼らは考えられるメカニズムとして、低周波ばく露によって、複製部位で DNA クロスリンクが起こることによるという仮説を述べている。

また、Maris ら<sup>15)</sup>は、ヒトグリオーマ細胞株 UVW を用いて、50 Hz 1 mT のばく露を 12 時間行い、遺伝毒性試験 (マイクロサテライトアッセイ) を行った。また、電磁界と  $\gamma$  線照射との相乗効果を調べた。彼らの結果によると、1 mT、12 時間のばく露で、変異が対照群に比べて 3.75 倍に増加していた。また、ガンマ線照射単独に比べ、ガンマ線 + 電磁界の場合に、ミューテーション頻度が高いことを示して電磁界が何らかの相乗的影響を与えていると示唆している。

さらに、Koh ら<sup>16)</sup>は、60 Hz の最大 2.5 mT の磁界ばく露を行うと、ヒトの前立腺がん細胞株の成長が阻害され、アポトーシスが誘導されることを示した。筆者らはこの反応に、カスパーゼ 3 と活性酸素種が関与していることを示し、低周波電磁界の前立腺がんの治療への応用性

に関して言及している。

一方、遺伝毒性がないことを証明した研究報告もある。Cho ら<sup>17)</sup>はヒトの繊維芽細胞株 CCD-986sk を用いて、DNA 合成阻害および DNA 鎖切断作用を持つ抗生物質ブレオマイシンの存在下で 60 Hz、0.8 mT のばく露を行い、染色体の Instability を調べた。その結果、ブレオマイシン共存下で磁界ばく露があった場合、ない場合に比べて微小核ならびに異数性染色体の頻度が増したことを示したが、ブレオマイシンなしでは磁界の影響はなかった。

また弘前大学の Koyama ら<sup>18)</sup>は、ヒトの神経膠芽細胞腫を用いて、60 Hz 電磁界の遺伝毒性の評価を行った。ばく露は最高で 5 mT で最大 24 時間行い、評価は細胞の AP 部位 (DNA 損傷部位) の数を数えることによって行った。細胞は、methyl methanesulfonate または過酸化水素により処理をしたものを使用した。化学処理によって、AP 部位は時間とともに増えたが、これに 5 mT という非常に強い磁界が加わると AP 部位の数がさらに増えることを明らかにした。一方、化学処理をしない細胞では、ばく露の有無で AP 部位は差がないことから、強い電磁界は、化学処理による AP 部位の発現を増長させる役割があることを示した。

なおヒトの細胞実験ではないが、Cellini ら<sup>19)</sup>は、大腸菌 *E. Coli* を用いて 50 Hz の磁界が細胞増殖や細胞活動量に与える影響を調べた。最大 1 mT のばく露で、細胞の増殖や遺伝子の発現には影響はないが、細胞の活動量に影響を与える可能性を指摘し、電磁界が大腸菌に対して何らかのストレスになっているとしているがそれ以上の解析は行っていない。

### 1.2.2 タンパク質発現・遺伝子発現

近年、熱ショックタンパク質 (Hsps) と電磁界ばく露の関係についての報告が多い。一般に Hsps はタンパク質のスーパーファミリーの 1 つとして、熱耐性、抗アポトーシス機能、免疫原性など幅広い機能の調節を行っている。Hsps の中には、細胞が多様なストレスシグナル (熱、重金属など) にばく露された後に誘発されるものもある。したがって、hsp は細胞ストレス全般に関するバイオマーカーとして利用可能であると示唆されているが、発がんとの関連性に関しては不明である。

Bernardini ら<sup>20)</sup>は、ブタ大動脈内皮細胞株を用いて、50 Hz 磁界ばく露下の熱ショックタンパク質 (Hsp27, Hsp70, Hsp90) の発現を調べた。磁界は 1 mT で、ばく露時間は 4 時間であった。この条件下では、Hsp70mRNA の転写が有意に増加していたが、タンパク質量は有意な変化は見られなかった。

Gottwald ら<sup>21)</sup>はヒト急性骨髄性白血病細胞株 HL-60、ラット心筋細胞 H9c2、ヒト心臓細胞 Girardi 細胞を用いて、50 Hz で最大 4 mT のばく露による Hsp72 (Hsp70 ファミリーの一つ：ストレスに応答して誘導されると考えられている) の変化を RNA レベル、タンパクレベルで調べた。その結果では、15 分間のばく露により、Hsp72 の転写が促進されたが、それはタンパク

質レベルには反映されなかった。このことより、Hsp72 が自身のタンパク質合成とは関係なく何か役割を持っている可能性がある」と筆者たちは述べている。

一方、Hsps 以外の遺伝子発現について着目した研究もある。DeI Giudice ら<sup>22)</sup>は、50 Hz の EMF が、(βアミロイド前駆体遺伝子を導入した) ヒトの神経膠腫株 H4 細胞において、βアミロイドタンパク質の分泌に関係があるか調べた。ばく露は 3.1 mT で 18 時間行い、細胞の viability と βアミロイドタンパク質の合成を調べ、その結果、アミロイドの分泌が増加したことを報告している。

Masiuk ら<sup>23)</sup>は、HL-60 細胞および K562 細胞 (骨髄性白血病細胞) を用いて、35 Hz (10 mT) または 50 Hz (20 mT) の磁界ばく露の影響を核内タンパク質である Nucleolin 量に着目して調べた。彼らの結果では、磁界のばく露によって Nucleolin 量が増加したと報告している。

また、マイクロテスラレベルの弱い電磁界ばく露での報告も見られる。

Kanitz ら<sup>24)</sup>は、ヒトグリア細胞を用いて、50Hz の磁界ばく露の際のタンパク質発現を調査した。1.2 μT で 30 分間ばく露すると、10 個のタンパク質がそのレベルを減少させた。また、成長因子 EGF を添加した場合、2 個のタンパク質発現が増加し、4 個が減少したことを報告している。

Girgert ら<sup>25)</sup>は、乳がん細胞株 MCF-7 を用いて、50 Hz 1.2 μT の磁界にばく露を行い、エストロゲン受容体補助因子の発現を調べ、いくつかの補助因子の発現の変化を報告している。結果によれば、結合促進因子の SRC-1、AIB1 が増加し、抑制因子の N-Cor and SMRT が減少していた。筆者らは、乳がん治療におけるタモシキフェン耐性の理由の一つが電磁界によるものではないかと結論している。

### 1.2.3 細胞機能

以下に超低周波電磁界ばく露による細胞機能への影響を検討した論文を挙げる。論文により様々な測定指標を用いており、総合的に見て影響に関して一貫性は見られなかったが、医療応用につながる研究もあり、今後の研究発展が期待される。

弘前大学の Sakurai ら<sup>26)</sup>は、ハムスター由来のインシュリン分泌細胞である HIT-T15 を使用して、インシュリン分泌機能における 60 Hz 電磁界の影響を調べた。60 Hz、2 mT で 2 日または 5 日間の連続ばく露を行ったところ、培地にグルコース非添加で、5 日間ばく露した際に細胞数の増加が見られた。またグルコース非添加で 2 日間、グルコース 100 mg/dl で 5 日間のばく露では、培地中のインシュリンが増加した。また条件によっては細胞内のインシュリンが増加していた。これらのことから、強い EMF 条件が、将来的には糖尿病の治療へつながる可能性を指摘している。

Iorio ら<sup>27)</sup>は、ヒトの精子の運動性に着目し検討をした。健常なボランティアから採取した



精子に 50 Hz で 3 時間、最大 5 mT のばく露を行ったところ、精子の運動性が、5 mT の矩形波で増加した。この効果はばく露後 21 時間まで継続した。反対に、5 mT でも正弦波の場合や、2.5 mT の矩形波の場合は影響はなかった。

Jia ら<sup>28)</sup>は、成長因子 EGF 受容体 (EGFR) が、50 Hz の磁界ばく露によって、EGF 結合能に変化を与えることを報告している。彼らは細胞実験および生化学手法により、EGFR が電磁界ばく露によって 2 つ (あるいはそれ以上) のモノマーのクラスターを形成し EGF の結合を妨げる可能性を示した。

Kroupova ら<sup>29)</sup>は、細胞骨格とクロマチン (染色質) 構造に対する 50 Hz 電磁界の影響を調べた。ヒトの腺がん細胞 A549 を使用して 2 mT のばく露を 96 時間行った。細胞骨格ではアクチン配向において若干の差異が認められたが、クロマチン構造に関しては影響がなかった。

Aldinucci ら<sup>29)</sup>はラット脳から単離したシナプトソーム (神経細胞から軸索終末が取れた状態) に対する影響を調べた。50 Hz 最大 2 mT のばく露においては酸素消費、ATP 産生、膜電位、ミトコンドリア内  $Ca^{2+}$  などへの影響は見られなかった。

## 2. RF (特に携帯電話の使用周波数 900MHz~2.4GHz) の生体影響

### 2.1 動物実験

#### 2.1.1 がん

携帯電話周波数帯電磁界の慢性ばく露と発がんに関して、2007~8 年に 7 つの論文が発表された。これらの研究は周波数や、比吸収率 (SAR) あるいは使用した動物種が異なるなどの差はあるが、おおむね結果はネガティブであった。以下に各論文の要点をまとめる。

Tillmann ら<sup>31)</sup>は B6C3F1 マウスを用いて長期のばく露実験を行い大規模な発がんの検討を行った。使用した条件は 900 MHz (GSM 波) ならびに 1,747 MHz (DCS 波) で全身平均 SAR は、0.4、1.3、4.0 mW/g bw およびシヤムの異なる条件で 1 日 2 時間、週 5 日で 2 年間のばく露を行った。ばく露後に全身の臓器について検索したが、がんの増加はなく、その他の血液学的指標、免疫学的指標にも影響がみられなかったとしている。

名古屋市立大学の Shirai ら<sup>32)</sup>は、Fischer344 ラットを用いて、N-ethylnitrosourea (ENU) 誘発の中枢神経系腫瘍モデルで電波の影響を調べた。使用した条件は 1.95 GHz (W-CDMA) で脳平均 SAR で最大 2 W/kg で、ばく露は 1 日 90 分で週 5 日最大 104 週間 (2 年間) 行った。その結果、腫瘍の発生率に関しては ENU のみ投与群、ENU+電波ばく露群では差がなく、影響は見られなかった。したがって長期ばく露が脳神経系の腫瘍の発生に関与するということはない。

Sommer ら<sup>33)</sup>は、リンパ腫頻発マウス AKR を用いて、電波の長期ばく露を行った。使用した条件は 1.966 GHz (UMTS 波) で、1 日 24 時間、最大 248 日の連続ばく露であった。SAR 値は全身平均で 0.4 W/kg であった。これらの長期ばく露の結果、ばく露の有無に関わらず、リンパ

腫の発生には差がみられないと報告している。

Oberto ら<sup>34)</sup>は、リンパ腫を多発する Pim-1 遺伝子導入マウスを用いて、900 MHz (GSM 波) の電波ばく露の影響を調べた。全身平均 SAR 値は、0.5、1.4、4 W/kg であり、ばく露は 1 日 1 時間、18 ヶ月の長期ばく露を行ったが、リンパ腫の発生率と電波ばく露には関連が見られなかった。

Smith ら<sup>35)</sup>は、Han Wistar ラットを使用して、902 MHz (GSM 波)、および 1,742 MHz (UMTS 波) の影響を調べた。全身平均 SAR は、0.44、1.33、4 W/kg の 3 条件で 1 日 2 時間、週 5 日で最大 104 週 (2 年間) のばく露を行い、ばく露終了後には解剖して組織学的・形態学的検査も行った。その結果、生存率、解剖学的検査によるがんの発生に関して、いずれも電波の影響を認めなかった。

Saran ら<sup>36)</sup>は、電離放射線の発がん研究で用いられている Patched1 ヘテロノックアウトマウスを用いて、電波の長期ばく露実験を行った。このマウスは、高頻度で腫瘍を発生するが、本実験では、新生マウスに、900 MHz (GSM 波) を 1 日 30 分 2 回、週 5 日、最大 6 ヶ月のばく露 (全身平均 SAR 値は 0.4 W/kg) を行っても、腫瘍の発生率に有意な差は見られなかった。

Hruby ら<sup>37)</sup>は、SD ラットの 7,12-dimethylbenz(a)anthracene (DMBA) 誘発乳がんモデルを使用して、902 MHz (GSM 波) の長期ばく露影響を調べた。ばく露は 1 日 4 時間、週 5 日で期間は 6 ヶ月行った。全身平均 SAR は、0.4、1.3、4 W/kg であった。彼らの結果では、ばく露によって、乳がん体積をはじめコントロール群よりも有意に高い項目がいくつかあったが、量反応関係がみられず、乳がんの発生、ならびに浸潤に対して、RF 電磁界の影響を十分に説明できるものではなかった。

## 2.1.2 遺伝毒性・発生毒性

動物に電波をばく露したあとに遺伝毒性、発生毒性を検討した研究では、ネガティブな結果が示されている一方、脳海馬歯状回の顆粒細胞の変化を報告している例もみられた。顆粒細胞の有意な変化が健康影響と結びついているかどうかも含めて、追試実験が必要である。

Juutilainen ら<sup>38)</sup>は、CBA/S マウスを用いて、78 weeks (1.5 h/d, 5 d/week) の間、NMT 波 (アナログ信号) を使用してばく露を行った (全身 SAR は 1.5 W/kg)。また、902.4 MHz (GSM 波; SAR 0.35 W/kg) の検討も行った。ケージコントロールには陽性対照として、4 Gy の X 線照射したものを用意した。評価としては、赤血球の微小核形成頻度の違いを見たが、有意な影響は見られなかった。また別の実験で、ヒトの ODC 酵素遺伝子導入マウス line K2 を用いて、GSM 波、DAMP 波のばく露を 52 週にわたり行い、上記と同じ指標で検討したが、こちらの実験でも結果は陰性であった。

名古屋市立大学の Ogawa ら<sup>39)</sup>は SD ラットを用いて、妊娠中に頭部に電波をばく露した際の

仔への影響を調べた。ばく露条件は、1.95 MHz (W-CDMA 波) で1日90分を妊娠7~17日の間ばく露を行った。SARは、最大で脳平均が2 W/kg、全身平均が0.2 W/kgであった。産まれた仔の数、奇形、性比や母獣の異常などを検索したが、影響は見られなかったと報告している。

Odaci ら<sup>40)</sup>は、Wistar ラットを用いて、胎児期に900 MHz の GSM 波のばく露をした際の脳海馬の歯状回 (dentate gyrus) における影響を報告している。ばく露は全身平均 SAR 2 W/kg の強度で1日1時間、母獣の妊娠期間の間、毎日行っている。生後4週経過後に脳固定標本作製し、組織学的検索を行った結果、ばく露群において、歯状回の小型円形のニューロンである顆粒細胞 (granule cell) が有意に少なかった。このことから、筆者らは、胎児期にばく露を受けることによって、海馬歯状回の顆粒細胞の発生に影響が生じたと結論しているが、上述したように他の研究による結果の確認が必要である。

### 2.1.3 遺伝子発現・タンパク質発現

動物へのばく露の後に、皮膚、脳、血液中のタンパク質発現、遺伝子発現を調べた研究では、いずれも結果はネガティブであり、動物実験レベルでは影響はないと考えられる。

Sanchez ら<sup>41)</sup>は、ヘアレスラットにおいて、900 MHz、1,800 MHz (いずれも GSM 波) を短期ばく露 (2時間)、亜慢性ばく露 (2時間/日、12週間) したときの、皮膚組織の Hsp25, Hsp70, Hsc (Heat shock cognate protein) 70 の発現を調べた。SARは最大で5.8 W/kg までを検索したが、この条件下では上記の各タンパク質の発現変化は見られなかった。

Paparini<sup>42)</sup>は、BALB/c マウスに1,800 MHz の GSM 波をばく露して脳内の遺伝子発現を RNA マイクロアレイを用いて調べた。ばく露条件は、全身平均 1.09 W/kg (脳平均 0.2 W/kg) で1時間のばく露であった。その結果、遺伝子発現の変化は見られず、本条件では影響がないものと考えられた。

Finnie ら<sup>43)</sup>は、C57BL/6 マウスの全身に対して、900 MHz の GSM 波 (全身平均 SAR 4 W/kg) を1日1時間、5日/週で2年間にわたりばく露を行い、摘出脳標本を用いて、ストレス反応に関連する c-fos の発現を解析した。免疫組織化学的検討の限りでは、c-fos の発現に関して電波ばく露の影響は見られなかった。

Lerchl ら<sup>44)</sup>は、微弱な電波ばく露のメラトニン分泌に与える影響について、ハムスターを用いて検討した。ばく露条件は、900 MHz (GSM 波)、1,800 MHz (GSM 波)、383 MHz (TETRA 波) の3つで、それぞれ全身 SAR は最大 80 mW/kg で最大 60 日のばく露を行った。いずれの条件においても、血中のメラトニン濃度には影響を与えなかった。

また、脊椎動物ではないが、線虫 *C. elegans* を用いた研究も報告されている。Dawe ら<sup>45)</sup>は、1.8 GHz (GSM 変調波 or 定常波) の電波を線虫にばく露した際の熱ショックタンパク質 Hsp16

の発現を調べた。SAR1.8 W/kg で 2.5 時間のばく露を行っても、Hsp16 の発現は見られなかった。

#### 2.1.4 脳神経系への影響

脳神経系への影響に関しては、特にグリア細胞の変化に対して一貫性のない結果が得られている。

Kim ら<sup>46)</sup>は、C57BL マウスの頭部に 849 MHz または 1,763 MHz の CDMA 波をばく露して脳への影響を調べた。ばく露は、1 時間/日、週 5 日で 6 ヶ月又は 12 ヶ月の慢性ばく露で脳局所の SAR 値は 7.8 W/kg であった。結果としては、脳細胞の増殖、細胞死あるいはアポトーシス、ニューロンやグリア細胞の分布の影響は見られないと報告している。

一方、Ammari ら<sup>47)</sup>はグリア細胞の変化について Glial Fibrillary Acidic Protein (GFAP : 神経膠線維酸性蛋白=アストログリア細胞のマーカー) の発現に注目し実験を行った。彼らは、SD ラットの頭部に、①45 分/日、5 日/週で 24 週のばく露 (脳平均 SAR は 1.5 W/kg)、②15 分/日、5 日/週で 24 週のばく露 (脳平均 SAR は 6 W/kg) のばく露を行い、免疫組織化学的に検討した。その結果、②の条件下で、GFAP の増加が見られ、グリア細胞の機能的な変化が起こり、活性型アストログリア細胞の増加を認めたとしている。

Brillaud ら<sup>48)</sup>は 900 MHz の GSM 波を SD ラットの頭部に局所ばく露した際の、脳内のグリア細胞の活性化を GFAP の染色により調べた。ばく露は 15 分間、脳局所 SAR は 6 W/kg であった。GFAP 陽性部位が、前頭葉ならびに線条体に見られた。またばく露の 3 日後でも僅かであるが有意な上昇が見られ、その後は見られなかったことから、一過性の変化である可能性を指摘している。

また、Ammari ら<sup>49)</sup>は上記の報告と類似の実験を行い、脳の活動マーカーとしてのシトクローム c オキシダーゼの酵素活性を調べた。SD ラットの頭部に①45 分/日、脳平均 SAR は 1.5 W/kg で 7 日間、②15 分/日、脳平均 SAR は 6 W/kg で 7 日間、900 MHz (GSM 波) の電波をばく露した。その結果、①の条件では影響は見られないが、②の条件で脳の前頭葉前部、前頭葉、神経組織薄膜 (septum)、海馬、後頭葉皮質でばく露群の酵素活性が低下していたと報告している。

なお、Ammari らの報告ではいずれも、脳平均 SAR は 6 W/kg を用いており、熱による影響も発生している可能性もあるので、より詳細な検討が必要である。

#### 2.1.5 行動学的影響

動物に電磁界をばく露した際の、行動心理、学習心理学的な評価に関してはおおむねネガティブな結果である。

Ammari ら<sup>50)</sup>は、SD ラットの頭部に 900 MHz (GSM 波) の電波をばく露した時の空間記憶につ

いて8方向放射状迷路による行動学的調査を行った。ばく露条件は①45分/日、5日/週で8週又は24週のばく露、脳平均 SAR は 1.5 W/kg、②15分/日、5日/週で8週または24週のばく露、脳平均 SAR は 6 W/kg であるが、いずれの条件においても、空間記憶に対して影響を与えることはなかったという。

また Nittby<sup>51)</sup> は Fischer344 ラットに 900 MHz (GSM 波) の電波を全身ばく露した際に認知機能に与える影響を調べた。ばく露は、全身平均 SAR で最大 60 mW/kg で 2 時間/週で 55 週間のばく露を行った。指標としてはオープンフィールドテストや、各種の記憶テストを行い解析を行っている。結果としては、Episodic-like memory についてばく露群で低下していたが、それ以外の結果では差が見られないという結果であった。

Kumlin ら<sup>52)</sup> は、Wistar ラットの全身に 900 MHz の GSM 波を 2 時間/日、週 5 日、5 週間にわたりばく露し脳への影響を調べた。ばく露時の全身平均 SAR は最大 3 W/kg であった。指標としては脳の形態学的検索、血液脳関門の透過性、行動学的評価 (オープンフィールド、十字迷路、モリス水迷路 他) など多岐にわたる検討を行った。これらの項目はモリス水迷路の結果を除いては、すべて電波ばく露の有無における差が見られなかった。なお、モリス水迷路の結果においては、ばく露した群はシャム群よりも学習と記憶について有意な良好な結果が認められたと報告している。

### 2.1.6 その他の動物実験

その他の動物実験としては、骨髄細胞の分化、脳の微小循環、精子形成、聴覚などへの影響を調べた論文が発表されているが、いずれも実験の条件下では変化を認めないという結果であった。

Prisco ら<sup>53)</sup> は、C57BL マウスを用いて、致死量の X 線を浴びたドナーマウスに、RF ばく露を行ったマウスの骨髄細胞を移植し、ドナーマウスにおける骨髄細胞の挙動を調べた。RF ばく露は、900 MHz の GSM 波 (全身平均 SAR 2 W/kg) を 2 時間/日、5 日/週で 4 週間行った。実験の結果、電波のばく露と、ドナーマウスに移植された骨髄細胞のリンパ球 T 細胞、B 細胞への分化への影響はみられなかった。

国立保健医療科学院の Masuda ら<sup>54,55)</sup> は、SD ラットの頭部に 1,439 MHz の PDC 波をばく露し脳表の微小循環への影響を調べた。微小循環を観察するため、クラニアルウィンドウ法という方法を用いて、顕微鏡で血流を可視化する方法を用いた。急性影響を調べる実験では、脳局所 SAR は最大 4.8 W/kg で、10 分ばく露 20 分オフを 3 回繰り返した。また慢性影響を見る実験では、脳局所 SAR は最大 2.4 W/kg で、1 日 1 時間、週 5 日で、4 週間のばく露を行った。指標としては、血液脳関門透過性、血流中の白血球の挙動、血流速度を調べたが、いずれの条件下でも影響を認めなかった。

Yan ら<sup>56)</sup>は、SD ラットを用いて、精子形成における RF-EMF ばく露の影響を調べた。ばく露は 1.9 GHz CDMA 波で、1 日 2 回、各 3 時間で、18 週間のばく露を行った。その後、精子を採取し、カドヘリン、ICAM-1 の遺伝子発現、精子の運動性、形態的観察、細胞数などについて調べたが、いずれも有意な変化を認めないと報告している。

Parazzaini ら<sup>57)</sup>は、聴覚における影響を調べた。実験は SD ラットを用いて、抗生物質ゲンタマイシンの副作用として知られる聴覚障害をモデルにして行い、蝸牛の機能への影響を調べた。ばく露は 900 MHz の定常波で 2 時間/日、5 日/週で 4 週間継続した（耳局所 SAR 4 W/kg）。結果としては、RF-EMF ばく露とゲンタマイシンの複合的な作用は認められなかった。

## 2.2 細胞実験

### 2.2.1 遺伝毒性

遺伝毒性に関しては、欧州の研究プログラム REFLEX (Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards from Low Energy Electromagnetic Field Exposure using Sensitive in vitro Methods) で行われた研究の一部<sup>58-59)</sup>がねつ造されたものであり論文自体を取り下げるといふ大きな動きがあった<sup>60)</sup>。また、この動きの一方で、Speit ら<sup>61)</sup>は、(取り下げの対象になった) 2005 年に Diem らが行った REFLEX 研究<sup>58)</sup>の再現研究を行った。この実験ではヒトの繊維芽細胞 ES-1 とチャイニーズハムスター繊維芽細胞 V79 細胞を用いて、1,800 MHz の GSM 波 (平均 SAR は最大 2 W/kg) の遺伝毒性に対する影響を調べた。ばく露は間歇ばく露あるいは、24 時間の連続ばく露で、コメットアッセイ、あるいは微小核形成を指標とし、陽性対照としてガンマ線照射を行った。その結果、いずれの実験においても、結果はネガティブなもので、REFLEX 研究の結果とは相反する結果であった。

弘前大学の Koyama ら<sup>62)</sup>は、サルモネラ菌、大腸菌、チャイニーズハムスター卵巣 (CHO) 細胞株 K1 を用いて、2.45 GHz で高 SAR (最大 200 W/kg) の RF-EMF のばく露影響を調べた。細菌を使ったエイムス試験では結果はいずれも陰性で RF-EMF の影響はみられなかった。CHO 細胞を使った HPRT 遺伝子の変異試験では、高 SAR 群で、有意な影響が認められたが、これは RF-EMF の影響ではなく高 SAR による発熱の影響であることが示唆された。

Valbonesi ら<sup>63)</sup>は RF-EMF ばく露によるヒトの栄養胚 (trophoblast) 細胞株 HTR-8/SVneo における熱ショックタンパク質 Hsp70 の発現と DNA 損傷への影響を調べた。ばく露条件は 1,817 MHz の GSM 波 (平均 SAR は最大 2 W/kg) で 1 時間の連続ばく露であるが、この条件下では、いずれの観察指標にも RF-EMF ばく露の影響は見られなかった。

Zeni ら<sup>64)</sup>は、1,950 MHz の UMTS 波のヒト白血球に対する遺伝毒性について調べた。ばく露条件は、6 分間のばく露と 2 時間の非ばく露を繰り返す間歇ばく露であり、最大 44 時間のばく露を行った。実験条件の平均 SAR 値は 2 W/kg で、指標としては微小核形成を調べたが、この条件では影響はなかった。

Baohong<sup>65)</sup>は、ヒトリンパ球を用いて、紫外線 C 波 (UV-C) で惹起される DNA 損傷が RF-EMF ばく露で影響されるかを調べた。ばく露条件は 1.8 GHz の GSM 波 (平均 SAR は最大 3 W/kg) で、1.5 または 4 時間の連続ばく露である。DNA 損傷はコメットアッセイによって定量化を行ったが、DNA 損傷に対して、UV-C と相乗的に働くということではなかった。

Balyaev ら<sup>66)</sup>は、電磁過敏症の有症者と健常者から提供されたリンパ球を用いて、DNA 修復に対する影響を調べた。ばく露は 900 MHz GSM 波 (平均 SAR 37 mW/kg)、あるいは 1,948 MHz の UMTS 波 (平均 SAR 40 mW/kg) を用いてそれぞれ 1 時間のばく露を行った。筆者らの結論によると、電波ばく露によりクロマチンの形態、DNA 修復に関連する p53 結合タンパク (53BP1)、リン酸化ヒストン H2AX ( $\gamma$ -H2AX) の集積が影響を受け、それは有症者か健常者かは関係なく見られたということであった。

Manti ら<sup>67)</sup>は、ヒトリンパ球における X 線誘発による染色体凝集における RF-EMF ばく露の影響を調べた。ばく露条件は、1.95 GHz の UMTS 波 (平均 SAR は最大 2 W/kg) で、24 時間の連続ばく露である。実験の結果、RF-EMF ばく露が、染色体凝集に相乗的に働くことはなかったが、染色体交換の頻度が有意に上昇したことを報告している。

### 2.2.2 遺伝子発現

遺伝子発現に関して、注目されているのは一連の熱ショックタンパク質であるが、複数の実験室の研究報告によれば、影響は見られないことが確認された。

Sanchez ら<sup>68)</sup>は、ヒトの皮膚細胞 (ケラチノサイト) および繊維芽細胞を使用して、1,800 MHz の GSM 波 (平均 SAR 2 W/kg) の 48 時間連続ばく露の影響を調べた。ばく露の有無で、Hsp70、Hsc70、Hsp27 の発現および細胞のアポトーシスをみたが、差はなく、電波ばく露の影響はみられなかった。

Hirose ら<sup>69)</sup>は、ヒトの神経膠芽細胞腫である A172 細胞、また繊維芽細胞 IMR90 を使用して、2.1425 GHz の W-CDMA 波をばく露した際の Hsp27 の発現について調べた。ばく露は 800 mW/kg で、A172 細胞では 2, 24, 48 時間、また IMR-90 細胞では、2, 28 時間の連続ばく露とした。結果はタンパク質レベル、遺伝子レベルとも陰性であり、この条件のばく露が、Hsp27 のリン酸化をはじめとするストレス反応に何ら影響を及ぼすことはなかった。

Chauhan ら<sup>71)</sup>は、ヒト神経膠腫細胞株 U87、ヒト単球細胞株 Mono Mac6 を使用して 1.9 GHz のパルス波ばく露による遺伝子発現への影響を調べた。筆者らは以前に 6 時間までの連続ばく露で遺伝子発現に影響がなかったとしているが、今回のばく露条件は、平均 SAR が最大 10 W/kg で 24 時間の連続ばく露、あるいは 5 分 ON、10 分 OFF の繰り返し 6 時間の間欠的ばく露であった。結果としては、以前の研究と同様、いずれの遺伝子発現においても影響はみられなかった。

Franzellitti ら<sup>73)</sup>は、ヒト栄養胚細胞を用いて、1800MHz GSM 波、TDMA 波による熱ショッ

クタンパク質 Hsp70 の発現への影響を調べた。ばく露条件は、平均 SAR 2W/kg で最大 24 時間のばく露で、Hsp70 または HSC70 はタンパクレベルあるいは、mRNA レベルでの発現の双方を調べた。その結果、ばく露によってタンパク質レベルには変化が無かったが、いくつかの条件に置いては mRNA レベルにわずかな変化が見られたとしているが変化は僅かであるため、再試験などの確認が必要である。

Huang ら<sup>70)</sup>は、Jurkat 細胞（ヒトリンパ芽球 T 細胞）に対して、1,763 MHz CDMA 波を平均 SAR 最大 10 W/kg でばく露した。ばく露時間は、1 時間/日で最大 3 日、または、最大 24 時間の連続ばく露とした。コメットアッセイによる DNA 損傷、マイクロアレイによる遺伝子発現、増殖細胞数等に対する検討を行った。その結果、マイクロアレイ以外の実験においては、影響を認めなかったが、マイクロアレイでの遺伝子発現を検討した結果では、10 個の遺伝子に有意な差が認められた。変化があった遺伝子は、ケモカイン受容体 3 (CXCR3)、インターロイキン 1 受容体などであり、この 2 つの遺伝子に関しては電波のばく露により発現が減少しており、免疫細胞の走化性に影響を与える可能性を筆者らは考察している。

Zao ら<sup>72)</sup>は、ラットニューロンを用いて、1800MHz の GSM 波（平均 SAR 2 W/kg）をばく露し遺伝子発現をマイクロアレイ、RT-PCR によって定量した。マイクロアレイにはラット神経生物学用 cDNA アレイを用いた。その結果、検索したおおよそ 1,200 遺伝子のうち 10 個の遺伝子の発現が減少し、24 個の遺伝子が増加していたと報告している。

### 2.2.3 細胞毒性の評価（Cell Viability、細胞分裂ほか）

この項目では、細胞の Viability や増殖、アポトーシスなどに対して評価した論文を挙げる。ネガティブな報告が多いが、変化があったという論文に関しては、熱影響による作用について十分に検討が必要であると考えられた。

Chauhan ら<sup>74)</sup>は、ヒト白血病細胞株 HL-60、単球細胞株 Mono Mac6、リンパ芽球細胞株 TK6 細胞を用いて、パルス変調された 1.9 GHz の電波（平均 SAR は 1、10 W/kg）を 5 分オン、10 分オフの繰り返し間欠ばく露で 6 時間ばく露を行った。TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\beta$  などサイトカインの産生、細胞のアポトーシス、および細胞周期への影響を調べた結果、影響は見られなかった。

Moquet ら<sup>75)</sup>はマウス神経芽細胞種 N2a 細胞を用いて、935 MHz GSM 波（平均 SAR 2 W/kg）の 24 時間連続ばく露のアポトーシス、細胞増殖に対する影響を調べたが、この実験系では影響が見られなかった。

Hirose ら<sup>76)</sup>は、BALB/3T3 細胞を用い、2.1425 GHz の W-CDMA 波（平均 SAR 80 mW/kg, 800 mW/kg）を 6 週間にわたりばく露し、細胞の形質転換頻度を調べたが、ばく露の影響はみられなかった。

Buttiglione ら<sup>77)</sup>は、ヒト神経芽細胞 SH-SY5Y を使い、egr-1 遺伝子が 900 MHz の GSM 波のばく露によって変化することを報告した。実験は平均 SAR 1 W/kg で 5、15、30 分、6、24 時間



の連続ばく露で細胞増殖・アポトーシスに関連している遺伝子の発現を見たところ、*egr-1* の遺伝子発現が15分で最大になりその後6時間でベースラインに戻った。また、24時間のばく露で、細胞は細胞周期に影響がみられ、それはアポトーシス阻害に関係する *bcl-2*、*survivin* の遺伝子の有意な抑制との関連がみられたとしている。

Joubert ら<sup>78,79)</sup>は、ラットニューロンのアポトーシスに対する電波の影響を調べ報告している。2007年の報告<sup>78)</sup>では、900 MHz GSM波(平均 SAR 0.25 W/kg)を24時間ばく露し、アポトーシスの増加がないことを報告しているが、2008年の報告<sup>79)</sup>では影響が認められたと報告している。その研究では900 MHzの定常波を用い、実験では SAR 2 W/kg で24時間のばく露を行っている。この実験中に培地の温度が2°C上昇したため、彼らは対照として、37°C培養、39°C培養の2つを用意した。ばく露した細胞においては、それらの対照に比べ、アポトーシスが多かったが、免疫染色の結果から、カスパーゼ3の活性化による経路ではなく、アポトーシス促進因子(AIF)が関与する経路でアポトーシスが促進されたと考察している。

Palumbo ら<sup>80)</sup>は Jurkat 細胞株(ヒトリンパT細胞)およびヒト末梢血リンパ球を用いて、900 MHz GSM波(平均 SAR 1.35 W/kg)のばく露のアポトーシス(カスパーゼ3活性)の影響を調べたところ、6時間のばく露で、カスパーゼ3の活性が僅かであるが有意に増加していることを報告している。

#### 2.2.4 その他細胞機能

その他の細胞機能においては、影響あり、または無しの双方の論文が混在している。中でも特に高い SAR において変化を報告している論文については熱作用の疑いもあるため、注意が必要である。

Platano ら<sup>81)</sup>は、900 MHz GSM波が、ラットのニューロンにおける電位依存性カルシウムチャンネルのイオン透過性に影響を与えるかどうかを調べた。実験は SAR 2 W/kg で行い、90秒のばく露を2~3分のインターバルをおき1~3回繰り返すことで行い、カルシウムチャンネルのイオン透過性はパッチクランプ法で調べた。得られたデータからは、電波の有無に関して影響は見られなかった。

Zeni ら<sup>82)</sup>はマウス L922 細胞を用いて、3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone (MX)の存在下で、900MHz GSM波をばく露した際の活性酸素種(ROS)の発生について検討した。MXは水道水の塩素処理の過程で生成される変異原性、発がん性のある化学物質である。ばく露は、平均 SAR 0.3 W/kg、1 W/kg の2つの強さで、おのこの10又は30分のばく露を行い、発生する ROS を測定した。しかしながら、MX 単独処理と、MX+RF-EMF の間に差はなく、電波の影響はみられなかった。

Moisescu ら<sup>83)</sup>は、900 MHz GSM波はクラスリン経路の細胞のエンドサイトシス(食作用)機

能を活性化するとした。SAR 3.2 W/kg で、20 分間ばく露を行うと、蛍光色素の取り込みが促進され、それはクラスリン経路の阻害剤で阻害されたが、カベオリン経路の阻害剤では阻害されなかったことから、電波ばく露がクラスリンコートされた小胞に影響したと考えられた。

Falzone ら<sup>84)</sup>はヒトの精子のミトコンドリア膜電位および運動性に対する影響を調べた。実験は、健常ボランティアから採取した精子に対し、900 MHz GSM 波（平均 SAR 2 W/kg または 5.7 W/kg）で、1 時間のばく露を行った。2 W/kg 群では、膜電位、運動性ともに変化がなかったが、5.7 W/kg では両方に有意な変化が認められた。筆者らはばく露中の熱対策を十分にやっていることから、電波自体の影響の可能性があると主張しており、今後はより詳しい研究が必要であるとしている。

### 3. 実験室研究のまとめ

2007～2008 年に発表された論文をレビューした結果をまとめると次のようになる。

超低周波領域の動物実験においては、発がん性、ならびにプロモーター作用に関してこれまでの研究と同様、ネガティブな結果が見られた。一方、DNA 損傷、行動影響などに関しては、一部の論文で影響が見られているが、類似した研究の結果を考慮すると必ずしも一貫した結果が得られているとはいえない。細胞実験では遺伝毒性・タンパク発現・遺伝子発現・細胞機能に関して、電磁界ばく露による変化があるという論文も見られたが、実験に用いた磁束密度が高いことが特徴である。また、影響を認めた研究の一部には、医療応用につながる可能性があるものも含まれており、今後の展開が期待される。

一方、携帯電話で使用している周波数帯の高周波電磁界の研究では、動物実験では、がん、遺伝毒性、発生毒性、遺伝子発現、タンパク発現、行動学的評価等においては影響が見られない発表が多かった。脳神経系の影響に関しては、グリア細胞の変化に着目した研究で、結果が分かれる場合があるが、それぞれの結果の再現性に対して慎重に検討が必要である。細胞実験では、多くの論文でネガティブな結果が報告されているが、遺伝子発現、細胞のアポトーシスなどに関して一部の論文ではばく露による変化があるという報告も見られた。しかしながらこれらの実験が SAR の強い条件で行っていることを考えると熱による影響を観察している可能性もあり、これらについては詳細な検討が必要であると考えられる。

### 参考文献

1. Chung, M. K., et al., *Lack of a co-promotion effect of 60 Hz rotating magnetic fields on N-ethyl-N-nitrosourea induced neurogenic tumors in F344 rats*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(7): p. 539-48.
2. Negishi, T., et al., *Lack of promotion effects of 50 Hz magnetic fields on 7,12-dimethylbenz(a)anthracene-induced malignant lymphoma/lymphatic leukemia in mice*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(1): p. 29-38.

3. Fedrowitz, M. and W. Loscher, *Exposure of Fischer 344 rats to a weak power frequency magnetic field facilitates mammary tumorigenesis in the DMBA model of breast cancer*. *Carcinogenesis*, 2008. **29**(1): p. 186-93.
4. WHO, *Extremely Low Frequency Fields*, in *Environmental Health Criteria Monograph No. 238*. 2007, World Health Organization Geneva, Switzerland.
5. Yokus, B., et al., *Extremely low frequency magnetic fields cause oxidative DNA damage in rats*. *Int J Radiat Biol*, 2008. **84**(10): p. 789-95.
6. Erdal, N., S. Gurgul, and A. Celik, *Cytogenetic effects of extremely low frequency magnetic field on Wistar rat bone marrow*. *Mutat Res*, 2007. **630**(1-2): p. 69-77.
7. Erdal, N., et al., *Effects of long-term exposure of extremely low frequency magnetic field on oxidative/nitrosative stress in rat liver*. *J Radiat Res (Tokyo)*, 2008. **49**(2): p. 181-7.
8. Manikonda, P.K., et al., *Influence of extremely low frequency magnetic fields on Ca<sup>2+</sup> signaling and NMDA receptor functions in rat hippocampus*. *Neurosci Lett*, 2007. **413**(2): p. 145-9.
9. Fu, Y., et al., *Long-term exposure to extremely low-frequency magnetic fields impairs spatial recognition memory in mice*. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 2008. **35**(7): p. 797-800.
10. Liu, T., et al., *Chronic exposure to low-intensity magnetic field improves acquisition and maintenance of memory*. *Neuroreport*, 2008. **19**(5): p. 549-52.
11. Yao, K., et al., *Absence of effect of power-frequency magnetic fields exposure on mouse embryonic lens development*. *Bioelectromagnetics*, 2007. **28**(8): p. 628-35.
12. Burchard, J.F., D.H. Nguyen, and H.G. Monardes, *Exposure of pregnant dairy heifer to magnetic fields at 60 Hz and 30 microT*. *Bioelectromagnetics*, 2007. **28**(6): p. 471-6.
13. Canseven, A.G., et al., *Pentylenetetrazol-induced seizures are not altered by pre- or post-drug exposure to a 50 Hz magnetic field*. *Int J Radiat Biol*, 2007. **83**(4): p. 231-5.
14. Wahab, M.A., et al., *Elevated sister chromatid exchange frequencies in dividing human peripheral blood lymphocytes exposed to 50 Hz magnetic fields*. *Bioelectromagnetics*, 2007. **28**(4): p. 281-8.
15. Mairs, R.J., et al., *Microsatellite analysis for determination of the mutagenicity of extremely low-frequency electromagnetic fields and ionising radiation in vitro*. *Mutat Res*, 2007. **626**(1-2): p. 34-41.
16. Koh, E.K., et al., *A 60-Hz sinusoidal magnetic field induces apoptosis of prostate cancer cells through reactive oxygen species*. *Int J Radiat Biol*, 2008. **84**(11): p. 945-55.
17. Cho, Y.H., H.K. Jeon, and H.W. Chung, *Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields on delayed chromosomal instability induced by bleomycin in normal human fibroblast cells*. *J Toxicol Environ Health A*, 2007. **70**(15-16): p. 1252-8.
18. Koyama, S., et al., *Extremely low frequency (ELF) magnetic fields enhance chemically induced formation of apurinic/aprimidinic (AP) sites in A172 cells*. *Int J Radiat Biol*, 2008. **84**(1): p. 53-9.
19. Cellini, L., et al., *Bacterial response to the exposure of 50 Hz electromagnetic fields*. *Bioelectromagnetics*, 2008. **29**(4): p. 302-11.

20. Bernardini, C., et al., *Effects of 50 Hz sinusoidal magnetic fields on Hsp27, Hsp70, Hsp90 expression in porcine aortic endothelial cells (PAEC)*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(3): p. 231-7.
21. Gottwald, E., et al., *Expression of HSP72 after ELF-EMF exposure in three cell lines*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(7): p. 509-18.
22. Del Giudice, E., et al., *Fifty Hertz electromagnetic field exposure stimulates secretion of beta-amyloid peptide in cultured human neuroglioma*. Neurosci Lett, 2007. **418**(1): p. 9-12.
23. Masiuk, M., et al., *The expression and intranuclear distribution of nucleolin in HL-60 and K-562 cells after repeated, short-term exposition to rotating magnetic fields*. Int J Radiat Biol, 2008. **84**(9): p. 752-60.
24. Kanitz, M.H., et al., *Investigation of protein expression in magnetic field-treated human glioma cells*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(7): p. 546-52.
25. Girgert, R., et al., *Electromagnetic fields alter the expression of estrogen receptor cofactors in breast cancer cells*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(3): p. 169-76.
26. Sakurai, T., et al., *Exposure to extremely low frequency magnetic fields affects insulin-secreting cells*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(2): p. 118-24.
27. Iorio, R., et al., *A preliminary study of oscillating electromagnetic field effects on human spermatozoon motility*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(1): p. 72-5.
28. Jia, C., et al., *EGF receptor clustering is induced by a 0.4 mT power frequency magnetic field and blocked by the EGF receptor tyrosine kinase inhibitor PD153035*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(3): p. 197-207.
29. Kroupova, J., et al., *Low-frequency magnetic field effect on cytoskeleton and chromatin*. Bioelectrochemistry, 2007. **70**(1): p. 96-100.
30. Aldinucci, C., et al., *Synaptosome behaviour is unaffected by weak pulsed electromagnetic fields*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(6): p. 477-83.
31. Tillmann, T., et al., *Carcinogenicity study of GSM and DCS wireless communication signals in B6C3F1 mice*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(3): p. 173-87.
32. Shirai, T., et al., *Lack of promoting effects of chronic exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular system on development of N-ethylnitrosourea-induced central nervous system tumors in F344 rats*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(7): p. 562-72.
33. Sommer, A.M., et al., *Lymphoma development in mice chronically exposed to UMTS-modulated radiofrequency electromagnetic fields*. Radiat Res, 2007. **168**(1): p. 72-80.
34. Oberto, G., et al., *Carcinogenicity study of 217 Hz pulsed 900 MHz electromagnetic fields in Pim1 transgenic mice*. Radiat Res, 2007. **168**(3): p. 316-26.
35. Smith, P., et al., *GSM and DCS wireless communication signals: combined chronic toxicity/carcinogenicity study in the Wistar rat*. Radiat Res, 2007. **168**(4): p. 480-92.
36. Saran, A., et al., *Effects of exposure of newborn patched1 heterozygous mice to GSM, 900 MHz*. Radiat Res, 2007. **168**(6): p. 733-40.
37. Hruby, R., et al., *Study on potential effects of "902-MHz GSM-type Wireless Communication Signals" on DMBA-induced mammary tumours in Sprague-Dawley rats*. Mutat Res, 2008. **649**(1-2): p. 34-44.

38. Juutilainen, J., et al., *Micronucleus frequency in erythrocytes of mice after long-term exposure to radiofrequency radiation*. Int J Radiat Biol, 2007. **83**(4): p. 213-20.
39. Ogawa, K., et al., *Effects of gestational exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular phones: Lack of embryotoxicity and teratogenicity in rats*. Bioelectromagnetics, 2009. **30**(3): p. 205-12.
40. Odaci, E., O. Bas, and S. Kaplan, *Effects of prenatal exposure to a 900 MHz electromagnetic field on the dentate gyrus of rats: a stereological and histopathological study*. Brain Res, 2008. **1238**: p. 224-9.
41. Sanchez, S., et al., *Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. III: Expression of heat shock proteins*. Int J Radiat Biol, 2008. **84**(1): p. 61-8.
42. Paparini, A., et al., *No evidence of major transcriptional changes in the brain of mice exposed to 1800 MHz GSM signal*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(4): p. 312-23.
43. Finnie, J.W., et al., *Stress response in mouse brain after long-term (2 year) exposure to mobile telephone radiofrequency fields using the immediate early gene, c-fos*. Pathology, 2007. **39**(2): p. 271-3.
44. Lerchl, A., et al., *Effects of mobile phone electromagnetic fields at nonthermal SAR values on melatonin and body weight of Djungarian hamsters (Phodopus sungorus)*. J Pineal Res, 2008. **44**(3): p. 267-72.
45. Dawe, A.S., et al., *Continuous wave and simulated GSM exposure at 1.8 W/kg and 1.8 GHz do not induce hsp16-1 heat-shock gene expression in Caenorhabditis elegans*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(2): p. 92-9.
46. Kim, T.H., et al., *Local exposure of 849 MHz and 1763 MHz radiofrequency radiation to mouse heads does not induce cell death or cell proliferation in brain*. Exp Mol Med, 2008. **40**(3): p. 294-303.
47. Ammari, M., et al., *Effect of a chronic GSM 900 MHz exposure on glia in the rat brain*. Biomed Pharmacother, 2008. **62**(4): p. 273-81.
48. Brillaud, E., A. Piotrowski, and R. de Seze, *Effect of an acute 900MHz GSM exposure on glia in the rat brain: a time-dependent study*. Toxicology, 2007. **238**(1): p. 23-33.
49. Ammari, M., et al., *Exposure to GSM 900 MHz electromagnetic fields affects cerebral cytochrome c oxidase activity*. Toxicology, 2008. **250**(1): p. 70-4.
50. Ammari, M., et al., *Effect of head-only sub-chronic and chronic exposure to 900-MHz GSM electromagnetic fields on spatial memory in rats*. Brain Inj, 2008. **22**(13-14): p. 1021-9.
51. Nittby, H., et al., *Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(3): p. 219-32.
52. Kumlin, T., et al., *Mobile phone radiation and the developing brain: behavioral and morphological effects in juvenile rats*. Radiat Res, 2007. **168**(4): p. 471-9.
53. Prisco, M.G., et al., *Effects of GSM-modulated radiofrequency electromagnetic fields on mouse bone marrow cells*. Radiat Res, 2008. **170**(6): p. 803-10.
54. Masuda, H., et al., *Effects of acute exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain*. In Vivo, 2007. **21**(4): p. 555-62.
55. Masuda, H., et al., *Effects of subchronic exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain*. In Vivo, 2007. **21**(4): p. 563-70.

56. Yan, J.G., et al., *Effects of cellular phone emissions on sperm motility in rats*. Fertil Steril, 2007. **88**(4): p. 957-64.
57. Parazzini, M., et al., *Possible combined effects of 900 MHz continuous-wave electromagnetic fields and gentamicin on the auditory system of rats*. Radiat Res, 2007. **167**(5): p. 600-5.
58. Diem, E., et al., *Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800 MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells in vitro*. Mutat Res, 2005. **583**(2): p. 178-83.
59. Schwarz, C., et al., *Radiofrequency electromagnetic fields (UMTS, 1,950 MHz) induce genotoxic effects in vitro in human fibroblasts but not in lymphocytes*. Int Arch Occup Environ Health, 2008. **81**(6): p. 755-67.
60. News\_from\_Medical\_University\_of\_Vienna\_Website. *Suspicion of an erroneous study by the former Division of Occupational Medicine*. 2008 [cited 2008 23 May, 2008]; Available from: [http://www.meduniwien.ac.at/homepage/news-and-topstories/en/?tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=204&cHash=5adeae2d7c](http://www.meduniwien.ac.at/homepage/news-and-topstories/en/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=204&cHash=5adeae2d7c).
61. Speit, G., P. Schutz, and H. Hoffmann, *Genotoxic effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) in cultured mammalian cells are not independently reproducible*. Mutat Res, 2007. **626**(1-2): p. 42-7.
62. Koyama, S., et al., *Effects of 2.45 GHz electromagnetic fields with a wide range of SARs on bacterial and HPRT gene mutations*. J Radiat Res (Tokyo), 2007. **48**(1): p. 69-75.
63. Valbonesi, P., et al., *Evaluation of HSP70 expression and DNA damage in cells of a human trophoblast cell line exposed to 1.8 GHz amplitude-modulated radiofrequency fields*. Radiat Res, 2008. **169**(3): p. 270-9.
64. Zeni, O., et al., *Evaluation of genotoxic effects in human leukocytes after in vitro exposure to 1950 MHz UMTS radiofrequency field*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(3): p. 177-84.
65. Baohong, W., et al., *Evaluating the combinative effects on human lymphocyte DNA damage induced by ultraviolet ray C plus 1.8 GHz microwaves using comet assay in vitro*. Toxicology, 2007. **232**(3): p. 311-6.
66. Belyaev, I.Y., et al., *Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long-lasting inhibition of 53BP1/gamma-H2AX DNA repair foci in human lymphocytes*. Bioelectromagnetics, 2009. **30**(2): p. 129-41.
67. Manti, L., et al., *Effects of modulated microwave radiation at cellular telephone frequency (1.95 GHz) on X-ray-induced chromosome aberrations in human lymphocytes in vitro*. Radiat Res, 2008. **169**(5): p. 575-83.
68. Sanchez, S., et al., *In vitro study of the stress response of human skin cells to GSM-1800 mobile phone signals compared to UVB radiation and heat shock*. Radiat Res, 2007. **167**(5): p. 572-80.
69. Hirose, H., et al., *Mobile phone base station-emitted radiation does not induce phosphorylation of Hsp27*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(2): p. 99-108.
70. Huang, T.Q., et al., *Molecular responses of Jurkat T-cells to 1763 MHz radiofrequency radiation*. Int J Radiat Biol, 2008. **84**(9): p. 734-41.
71. Chauhan, V., et al., *Analysis of gene expression in two human-derived cell lines*

- exposed in vitro to a 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency field*. Proteomics, 2007. **7**(21): p. 3896-905.
72. Zhao, R., et al., *Studying gene expression profile of rat neuron exposed to 1800MHz radiofrequency electromagnetic fields with cDNA microassay*. Toxicology, 2007. **235**(3): p. 167-75.
73. Franzellitti, S., et al., *HSP70 expression in human trophoblast cells exposed to different 1.8 Ghz mobile phone signals*. Radiat Res, 2008. **170**(4): p. 488-97.
74. Chauhan, V., et al., *Evaluating the biological effects of intermittent 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency fields in a series of human-derived cell lines*. Radiat Res, 2007. **167**(1): p. 87-93.
75. Moquet, J., et al., *Exposure to low level GSM 935 MHz radiofrequency fields does not induce apoptosis in proliferating or differentiated murine neuroblastoma cells*. Radiat Prot Dosimetry, 2008. **131**(3): p. 287-96.
76. Hirose, H., et al., *Mobile phone base station radiation does not affect neoplastic transformation in BALB/3T3 cells*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(1): p. 55-64.
77. Buttiglione, M., et al., *Radiofrequency radiation (900 MHz) induces Egr-1 gene expression and affects cell-cycle control in human neuroblastoma cells*. J Cell Physiol, 2007. **213**(3): p. 759-67.
78. Joubert, V., et al., *No apoptosis is induced in rat cortical neurons exposed to GSM phone fields*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(2): p. 115-21.
79. Joubert, V., et al., *Apoptosis is induced by radiofrequency fields through the caspase-independent mitochondrial pathway in cortical neurons*. Radiat Res, 2008. **169**(1): p. 38-45.
80. Palumbo, R., et al., *Exposure to 900 MHz radiofrequency radiation induces caspase 3 activation in proliferating human lymphocytes*. Radiat Res, 2008. **170**(3): p. 327-34.
81. Platano, D., et al., *Acute exposure to low-level CW and GSM-modulated 900 MHz radiofrequency does not affect Ba<sup>2+</sup> currents through voltage-gated calcium channels in rat cortical neurons*. Bioelectromagnetics, 2007. **28**(8): p. 599-607.
82. Zeni, O., et al., *Formation of reactive oxygen species in L929 cells after exposure to 900 MHz RF radiation with and without co-exposure to 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone*. Radiat Res, 2007. **167**(3): p. 306-11.
83. Moiescu, M.G., et al., *900 MHz modulated electromagnetic fields accelerate the clathrin-mediated endocytosis pathway*. Bioelectromagnetics, 2009. **30**(3): p. 222-30.
84. Falzone, N., et al., *In vitro effect of pulsed 900 MHz GSM radiation on mitochondrial membrane potential and motility of human spermatozoa*. Bioelectromagnetics, 2008. **29**(4): p. 268-76.

## (II) 電磁界ばく露の健康影響評価に関する文献情報 (疫学研究)

### 1. 文献調査について

米国の国立医学図書館 (National Library of Medicine) が提供する医学文献データベース MEDLINE を対象として文献検索を実施した。サービスは Pub Med を用いた。

検索の対象は、2007年4月1日から2009年3月31日までに公表された論文であり、検索のキーワードは「“Electromagnetic field” AND “Epidemiology”」とした。また、言語は英語に限った。

文献検索の結果、62論文が抽出された。それぞれの内容を吟味して、今回の文献レビューの目的に合致した26論文をレビューの対象とした。

### 2. 文献レビュー

文献を整理するに当たり、第一にばく露源によって、「固定発生源からの住民ばく露」、「携帯電話端末使用」、「職業ばく露」に分類した。さらに、それぞれのばく露源について周波数によって分けて検討を行った。

#### 2.1 固定発生源からの住民ばく露

##### 2.1.1 送電線

送電線を中心とした超低周波電磁界ばく露と小児白血病リスクの症例対照研究では、小児が最も長く生活する場所として寝室の磁界強度が評価され、0.1  $\mu\text{T}$  以下に対して0.4  $\mu\text{T}$  以上の磁界ばく露で約2倍の白血病リスクの増加が認められた (Ahlbom A. et al. Br. J. Cancer, 83:692-698, 2000)。このことから、夜間におけるばく露が小児白血病リスクを増加させるという仮説を立てて、既に行われた症例対照研究データをプールして分析した研究が実施された<sup>1)</sup>。使用されたのは、カナダ、ドイツ、英国、米国の症例対照研究のデータであり、これらをプールして、小児白血病1,842症例と対照3,099名の比較分析を行った。その結果、0.1  $\mu\text{T}$  以下と比べて、0.1~0.2  $\mu\text{T}$ 、0.2~0.4  $\mu\text{T}$ 、0.4  $\mu\text{T}$  以上のオッズ比は、1.11 (95% CI: 0.91, 1.36)、1.37 (95% CI: 0.99-1.90)、1.93 (95% CI: 1.11-3.35)であった。この推計値は24時間あるいは48時間測定値に基づくオッズ比1.09、1.20、1.98と変わらないため、夜間の磁界ばく露が影響するという仮説を支持する結果ではなかったと結論づけている。

超低周波磁界ばく露と小児白血病の罹患リスクの関連について多くの研究が実施されてきたが、磁界ばく露が小児白血病発症後の生存率に影響するのではという仮説を検討した研究が報告されている<sup>2)</sup>。ドイツで実施された小児白血病の症例対照研究の症例群である急性リンパ性白血病症例595例をコホートとして追跡調査し、生存期間を分析した。追跡の中央値は9.5年であった。磁界ばく露としては24時間磁界測定が実施されている。0.1  $\mu\text{T}$  以下を基準とし



た場合、Cox 比例ハザードモデルによってハザード比を計算すると、磁界ばく露が 0.1~0.2  $\mu\text{T}$  の群 (34 症例) ではハザード比は 2.6 (95% CI: 1.3-5.2)であり、0.2  $\mu\text{T}$  を超える群 (18 症例) では 1.6 (95 % CI: 0.6-4.4)であり、他の予後因子を調整すると、3.0 (95 % CI: 0.9-9.8)であったという。0.2  $\mu\text{T}$  以上の群は症例数が少なく、精度の高い推計値は得られていない。磁界ばく露が小児白血病患者の世帯に影響を及ぼす可能性について、引き続き研究を進める必要を示していると言える。

超低周波磁界ばく露と小児白血病の症例対照研究における内的妥当性の問題として、小児白血病患者が症例群に参加する際、あるいは健常小児が対照群に参加する際に、送電線から居住地までの距離によって参加率が異なる、いわゆる選択バイアス (selection bias) が影響しているのではないかと懸念されているが、この選択バイアスの影響を調べた研究がカナダから報告されている<sup>3)</sup>。この研究では、実際に参加した対照の他に、参加しなかったが第一に選出された対照候補について、wire coding によって磁界強度を推定した。参加しなかった第一選出候補は、第一選出でなくて参加した対照よりも社会経済状況が悪い傾向があり、それが wire coding による磁界ばく露推計値の高さに関連していたと報告している。実際の研究ではオッズ比は 1.6 (95 % CI: 1.0-2.6)であったが、第一選出の理想の対照で算出した場合のオッズ比は 1.3 (95 % CI: 0.8-2.1)と推定された。選択バイアスの大きさを定量的に示したことは重要な意義を持つ。ただし、wire coding による磁界ばく露の評価は、実測による磁界ばく露評価に比べて精度が劣るために症例対照研究では、ばく露レベルの無方向性の誤分類 (non-differential misclassification) がより大きくなり、その結果としてオッズ比が過小評価される可能性についても考慮する必要があるだろう。

磁界ばく露と小児脳腫瘍のメタ分析が報告されている<sup>4)</sup>。評価の対象として 13 研究が抽出された。サマリーオッズ比は磁界強度の計算値あるいは実測値で 0.2  $\mu\text{T}$  以上に対して 1.14 (95 % CI: 0.78-1.67)、0.3 または 0.4  $\mu\text{T}$  以上に対して 1.68 (95 % CI: 0.83-3.43)であり、実質的なリスク上昇は認められなかったと報告している。2002 年の IARC モノグラフ 80 巻 (IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon, IARC, 2002) では、磁界ばく露と小児脳腫瘍については、グループ 3、すなわち、発がん性について分類不可能という結論であったが、このメタ分析による結果は、IARC の結論と矛盾しない結果であるといえる。

超低周波電磁界と小児白血病について多くの症例対照研究が実施されてきたが、成人を含めた全年齢 (0~94 才) を対象とした症例対照研究がオーストラリアから報告されている<sup>5)</sup>。この研究では、1972 年から 1980 年までにオーストラリアのタスマニアでリンパ増殖性疾患、骨髄増殖性疾患と診断された 854 症例と、個人的にマッチさせた総数の対照を比較した結果、送電線から 300 メートル以上離れた場所に住む場合と比べて 50 メートル以内にすむ場合のオッ

ズ比は 2.06 (95 % CI: 0.87-4.91)であったという。50～300メートルに居住する場合は 1.30 (95 % CI: 0.88-1.91)であった。人生の最初の 15 年間に 300メートル以内で過ごした経験がある場合にはオッズ比は 3.23 (95 % CI: 1.26-8.29)であった。さらに、0～5 才の期間を 300メートル以内に居住した場合のオッズ比は 4.74 (95 % CI: 0.98-22.9)であった。小児期における電磁界ばく露が、その後のリンパ増殖性疾患、骨髄増殖性疾患のリスクを増加させることを示唆する結果だが、送電線から居住地までの距離は電磁界ばく露の指標としては正確性が低いこと、交絡因子の考慮がなされていないことから、この研究が直ちに因果関係を示しているとは言い難く、さらに検討が必要である。

磁界ばく露とアルツハイマー病のリスクの関連を調べた疫学研究の結果がスイスから報告されている<sup>6)</sup>。研究デザインはコホート法であり、2000年から2005年までをカバーした 4.7 百万人のスイス国家コホート (Swiss National Cohort) において、送電線からの居住地までの距離で推計した磁界ばく露と神経変成性疾患による死亡の関連を分析した。220～380 kV 送電線の近傍に居住する場合のリスクを、Cox 比例ハザードモデルを用いて分析した結果、220～380 kV 送電線から 50メートル以内に居住する場合のアルツハイマー病のリスクは、600メートル以上離れた場合と比べて、ハザード比で 1.24 (95 % CI: 0.80-1.92)であったという。50メートル以内に 5年以上居住していた場合には、ハザード比は 1.51 (95 % CI: 0.91-2.51)、10年以上では 1.78 (95 % CI: 1.07-2.96)、15年以上では 2.00 (95 % CI: 1.21, 3.33)と居住年数の増加によってリスクも増加する傾向が認められた。この研究でも、磁界ばく露レベルの評価に送電線からの距離が用いられているが、磁界ばく露評価としての精度には限界があることは既に述べたとおりである。さらに、送電線からの距離と相関する、その他の因子が交絡因子として結果に影響を与えている可能性があり、因果関係としての評価には、さらに詳細な疫学研究が必要である。

2003年に米国カリフォルニア州の La Quinta にある中学校教師が、同僚にがんが多発していると訴えたことを受けて、学校の電磁環境とがん罹患との関連を後向きコホート研究で調べた研究が報告されている<sup>7)</sup>。1988年から2005年までに雇用された 137名の教師のうち、16名ががんと診断された。全がんの O/E 比は 2.78 (P=0.000098)、悪性黒色腫の O/E 比は 9.8 (P=0.0008)、甲状腺がんの O/E 比は 13.3 (P=0.0098)、子宮がんの O/E 比は 9.2 (P=0.019)であったと報告されている。60 Hz 磁界との関連は認められなかったが、high frequency voltage transients との相関が認められたという。がん発症は確率的な事象であり、多数の集団の中には、ある確率で多発を疑わせるような患者集積が必ず観察される。そのような患者集積を観察した後で、その集団を対象にして O/E 比を算出すれば、非常に高い値を取ることは自明であり、そのことは偶然の確率で起きた患者集積を示しているのみであり、がんの多発とは言えない。本報告はまさに、そのような誤った解析の典型例であり、high frequency voltage transients との相関も後付けであって因果関係を示唆すらしていない。

疫学的な方法によるばく露評価の結果が台湾から報告されている<sup>8)</sup>。北部台湾の11の小学校の14人の児童と35人の教師を対象として、超低周波電磁界の8時間連続モニタリングを実施した結果、高電圧の送電線(161 kV)の近傍にあるためにばく露レベルが高いと想定された2校では、平均磁界ばく露値は0.38  $\mu\text{T}$  であり、25、50、75パーセンタイル値は、0.15、0.25、0.44  $\mu\text{T}$  であった。その他の9つの学校では、平均磁界ばく露値は0.14  $\mu\text{T}$  であり、25、50、75パーセンタイル値は、0.04、0.06、0.10  $\mu\text{T}$  であり、送電線の近傍の2校ではその他の学校と比較して高い値であったと報告されている。送電線の諸特徴、学校との距離など、多くの因子の複雑な組み合わせでばく露レベルが決定されるが、実際に8時間の連続モニタリングを実施した結果であることは重要な意味を持つ。

### 2.1.2 ラジオ・テレビ送信設備

ラジオ、テレビの送信設備の近傍に居住する住民についての疫学調査が西ドイツから報告されている<sup>9)</sup>。研究は症例対照研究として実施されたが、高出力のラジオ、テレビ送信設備(16のAM送信設備、8のFM送信設備)の近傍の都市を包含している。症例は1984年から2003年に診断された0~14才の白血病患者、対照群は、性、年齢、送信設備のカバーする地域をマッチして住民から無作為に選出された。ばく露レベル上位95%以上と90%未満を比較した分析では、オッズ比は0.86(95% CI: 0.67-1.11)であった。AM、FM送信設備ともにリスクの上昇は示さなかった。送信設備からの距離で見ると、送信設備から10 km以上15 km未満に比べて2 km未満の場合のオッズ比は1.04(95% CI: 0.65-1.67)であったという。ラジオ、テレビ送信設備の近傍に住むことによって小児白血病のリスクの増加は認められないと結論している。この症例対照研究では、ラジオ、テレビの送信設備からのラジオ波電磁界ばく露の評価に際して、波動伝播モデルから計算された電場強度値が用いられたが、この方法の妥当性を検証するために850測定点において、実際の測定値と比較した研究が実施された<sup>10)</sup>。波動伝播モデルで計算された推計値、送信設備からの距離による推計値がどの程度の精度を持つか、計算による推計値が距離による推計値と比べてどの程度、推計精度を改善するかを調べた。その結果、距離による推計値は送信設備が単一の場合はよい推計値となるが、複数の送信設備がある場合には精度が落ちる、ことが明らかとなったという。

携帯電話通信で使用されるラジオは領域の電磁波へのばく露と自覚症状の関連性を調査した疫学研究が報告されている<sup>11)</sup>。329名の住民サンプルを対象として、個人ドシメーターで携帯電話が使用する3つの周波数帯の24時間のばく露プロファイルを測定した。さらに、その間の自覚症状を日記形式で記録してもらい、両者を照合した結果、ラジオ波へのばく露と自覚症状の関連は認められなかったという。また、ラジオ波ばく露はICNIRPのreference levelよりも相当低かったとも報告されている。

最後に、疫学研究とは呼べないが、電磁過敏症であると考えている人が住民の中でどの程度

いるか、電話によるインタビューで調べた研究が報告されている<sup>12)</sup>。オーストリアの住民標本 526 名に対する調査では電磁過敏症と訴える割合は 1994 年の 2 %から 3.5 %に増加したと報告されている。本調査は、対象となった人からの自己申告であり、電話調査であるから、2 度の調査が標準化された質問法を用いて比較可能性が保たれているか、問題である。そのような限界はあるものの、WHO のファクトシートなどで、電磁過敏症という症状を訴える者がいるが、その原因が電磁界ばく露である可能性がないことが明確に示されているにもかかわらず、相変わらず電磁過敏症を訴える人が減らないことは、今後の課題として少なからぬ意味があるといえる。

## 2.2 携帯電話端末使用

携帯電話端末使用と健康に関する INTERPHONE 研究の地域レベルの結果が 4 論文として報告されている<sup>13-16)</sup>。

ノルウェイで実施された INTERPHONE 研究<sup>13)</sup>では、神経膠腫 289 名、髄膜腫 207 名、聴神経鞘腫 45 名と対照 358 名を比較した結果、定常的な携帯電話使用によるオッズ比は、神経膠腫 0.6 (95 % CI: 0.4-0.9)、髄膜腫 0.8 (95 % CI: 0.5-1.1)、聴神経鞘腫 0.5 (95 % CI: 0.2-1.0)であったと報告されている。さらに、6 年以上、携帯電話を使用した場合でも、リスク上昇は認められなかったという。

ドイツで実施された聴神経鞘腫の INTERPHONE 研究<sup>14)</sup>では、聴神経鞘腫患者 97 名と対照 194 名を比較した結果、定常的な騒音へのばく露によるオッズ比は、2.31 (95 % CI: 1.15-4.66)、枯草熱によるオッズ比は 2.20 (95 % CI: 1.09-4.45)と有意な増加を示したが、電離放射線ばく露によるオッズ比は 0.91 (95 % CI: 0.51-1.61)、定常的な携帯電話使用によるオッズ比は 0.67 (95 % CI: 0.38-1.19)で増加を示さなかったと報告されている。

イスラエルで実施された耳下腺腫瘍の INTERPHONE 研究が報告されている<sup>15)</sup>。良性腫瘍 402 例、悪性腫瘍 58 例と対照 1,266 名を比較した比較、携帯電話端末使用者でのリスク上昇は認められなかった (オッズ比 0.87)。携帯電話端末使用と同側のリスクは、携帯電話の使用回数、使用時間が最も高い群では、それぞれ、1.58 (95 % CI: 1.11-2.24) and 1.49 (95 % CI: 1.05-2.13)と有意な上昇を示し、量反応関係も認められたとしている。携帯電話端末使用と同側のリスクを症例対照研究で評価する場合には、想起バイアス (recall bias) が結果を歪めている可能性が問題となるが、本研究の結果を解釈する際にも慎重な検討が必要であろう。

日本で行われた INTERPHONE 研究<sup>16)</sup>では、神経膠腫 88 例、髄膜腫 132 例、下垂体腺腫 102 例と対照 683 名を比較した結果が報告されている。ラジオ波へのばく露評価は腫瘍内の最大 SAR 値、最大 SAR 値の携帯電話使用年数による累積値、最大 SAR 値の携帯電話使用時間による累積値によって行われた。携帯電話端末の定常的な使用によるオッズ比は、神経膠腫では 1.22 (95 % CI: 0.63-2.37)、髄膜腫では 0.70 (95 % CI: 0.42-1.16)であった。SAR による 3

つのおく露指標を用いた分析でも関連は認められなかったと報告されている。

INTERPHONE 研究については参加した 13 カ国全体のデータを分析した結果の公表が待たれており、その後、IARC によるリスク評価が実施される予定となっているので、その結果を待つ必要がある。

## 2.3 職業ばく露

### 2.3.1 超低周波電磁界への職業ばく露

オーストラリアのメルボルンで 1987 年から 1991 年までに組織学的に確定した神経膠腫と診断された患者 414 名（低グレード 110 名、高グレード 304 名）と性、年齢、居住地をマッチした 421 名の住民対照の症例対照研究が報告された<sup>17)</sup>。労働衛生工学の専門家が評価した低周波電磁界ばく露レベルに基づいた分析では、高ばく露群のオッズ比は、全神経膠腫に対して 1.4 (95 % CI: 0.85-2.27)、高グレード神経膠腫に対して 1.51 (95 % CI: 0.90-2.53)であったという。職業性の超低周波電磁界ばく露が神経膠腫のリスクを増加させることを示唆する結果は得られなかったと言える。

デンマーク全体の公共事業作業者のコホート研究<sup>18)</sup>では、3 ヶ月以上の就業歴を有する 28,224 名を対象として、電磁界への職業ばく露レベルと白血病、脳腫瘍、乳癌の罹患リスクの関連性が分析された。多変量解析モデルに、年齢、就業年数、就業開始年、電磁界への職業ばく露レベルを入れて分析した結果、白血病、脳腫瘍、乳癌との関連は認められなかったと報告されている。

職業的な電磁界ばく露と白血病、脳腫瘍に関するメタ分析も報告されている<sup>19)</sup>。1993 年から 2007 年までに公表された論文を総合した結果、白血病については 10 %のリスク増加、脳腫瘍については 13 %のリスク増加が推計され、職業ばく露により白血病、脳腫瘍のリスクが上昇するという仮説は支持されなかったと報告している。

超低周波電磁界への職業ばく露とアルツハイマー病リスクのメタ分析が報告されている<sup>20)</sup>。2006 年 4 月までに公表された論文を調査した結果、14 研究（9 症例対照研究、5 コホート研究）が抽出された。症例対照研究をプールしたオッズ比は 2.03 (95 % CI: 1.38-3.00)、コホート研究をプールした相対危険度は 1.62 (95 % CI: 1.16-2.27)であり、超低周波電磁界ばく露とアルツハイマー病リスクの間に関連が認められたと報告されている。

職業的に磁界にばく露した作業における心血管疾患死亡を調べた米国のコホート研究が報告されている<sup>21)</sup>。The National Longitudinal Mortality Study のコホートを用いて行った研究であり、多変量比例ハザードモデルを用いて人口学的因子の調整を行った調整ハザード比は、0.15  $\mu$ T 未満のベースラインばく露レベルと比較して、中ばく露群（0.15 以上 0.20  $\mu$ T 未満）、高ばく露群（0.20 以上 0.30  $\mu$ T 未満）、超高ばく露群（0.3  $\mu$ T 以上）ともリスクの増加

を示さなかったという。

### 2.3.2 鉄道作業員の 16 Hz 電磁界ばく露

1972 年から 2002 年までにスイスの鉄道作業に従事した作業員 20,141 名のコホート研究の結果が報告されている<sup>22-24)</sup>。

白血病、リンパ腫、脳腫瘍のリスクを分析した報告<sup>22)</sup>では、ばく露レベルの低い作業員と比較した場合、ばく露レベルが高い鉄道運転手のハザード比は、白血病では 1.43 (95 % CI: 0.74-2.77)、骨髄性白血病では 4.74 (95 % CI: 1.04-21.60)、ホジキン病では 3.29 (95 % CI: 0.69-15.63)であった。リンパ性白血病、非ホジキンリンパ腫、脳腫瘍ではリスクの増加は認められなかったという。

神経変性疾患のリスクを分析した研究<sup>23)</sup>では、ばく露レベルの高い鉄道運転手 (平均ばく露は 21  $\mu\text{T}$ ) と、よりばく露レベルの低い駅員とを比較した結果、鉄道運転手の神経変性疾患による死亡のハザード比は、老人性認知症では 1.96 (95 % CI: 0.98-3.92)、アルツハイマー病では 3.15 (95 % CI: 0.90-11.04)であった。パーキンソン病、多発性硬化症ではリスク増加は認められなかったという。

心血管疾患による死亡を分析した研究<sup>24)</sup>では 464,129 人年の観察で 5,413 人の死亡が記録されたが、その中で 3,594 人は心血管疾患による死亡だったという。16 Hz の間断的な磁界へのばく露が高度の鉄道運転手 (生涯ばく露の中央値は 120.5  $\mu\text{T}\cdot\text{years}$ )、ばく露がより少ない軌道切換場エンジニア (生涯ばく露の中央値は 42.1  $\mu\text{T}\cdot\text{years}$ )、車掌 (生涯ばく露の中央値は 13.3  $\mu\text{T}\cdot\text{years}$ )、駅員 (生涯ばく露の中央値は 5.7  $\mu\text{T}\cdot\text{years}$ ) を比較した。Cox 比例ハザードモデルによって分析した結果、駅員と比較した心血管疾患死亡のハザード比は、鉄道運転手で 0.99 (95 % CI: 0.91-1.08)、軌道切換場エンジニアで 1.13 (95 % CI: 0.98-1.30)、車掌で 1.09 (95 % CI: 1.00-1.19)であったという。駅員と比較した場合、不整脈による死亡のハザード比は、鉄道運転手で 1.04 (95 % CI: 0.68-1.59)、軌道切換場エンジニアで 0.58 (95 % CI: 0.24-1.37)、車掌で 1.10 (95 % CI: 0.87-1.93)であった。駅員と比較した場合、急性心筋梗塞による死亡のハザード比は、鉄道運転手で 1.00 (95 % CI: 0.73-1.36)、軌道切換場エンジニアで 1.56 (95 % CI: 1.04-2.32)、車掌で 1.14 (95 % CI: 0.85-1.53)であった。100  $\mu\text{T}\cdot\text{year}$  以上のばく露によるハザード比は、不整脈による死亡では 0.94 (95 % CI: 0.71-1.24)、急性心筋梗塞による死亡では 0.91 (95 % CI: 0.75-1.11)であったと報告されている。

### 2.3.3 高周波電磁界への職業ばく露

高周波電磁界ばく露と男性不妊の関連について、ノルウェイ海軍の軍人 1,487 名から回答を得て行った断面研究が報告されている<sup>25)</sup>。ばく露レベルによって「通信」、「電子」、「レーダー／ソナー」に分類した結果、喫煙歴、軍の教育歴、作業中の身体活動をロジスティック回帰で

調整した不妊のオッズ比は「通信」で 1.72 (95 % CI: 1.04-2.85)、「レーダー／ソナー」で 2.28 (95 % CI: 1.27-4.09)であった。「電子」群ではリスクの上昇は認められなかったという。

さらに、ノルウェイ海軍に勤める男性 10,497 名の断面調査が報告されている<sup>26)</sup>。対象者の 22 %がラジオ波領域の電磁波に高度あるいは超高度にばく露した履歴を持っていた。自己申告による男性不妊は、ラジオ波電磁界へのばく露レベルが上がるにつれて上昇する傾向を示した。高周波出力域の近傍で働いたことがない作業者と比較して、高周波出力域の 10 メートル以内で作業を行った超高度ばく露群では、ロジスティック回帰による男性不妊のオッズ比は 1.86 (95 % CI: 1.46-2.37)であった。ばく露レベルが高度、中程度、軽度に対する調整オッズ比は、1.93 (95 % CI: 1.55-2.40)、1.52 (95 % CI: 1.25-1.84)、1.39 (95 % CI: 1.15-1.68)であり、ばく露レベルとともに不妊のオッズ比は大きくなる傾向が認められたと報告されている。

### 3. 疫学研究のまとめ

本報告では電磁界ばく露と健康について 2007 年 4 月以降に報告された論文をレビューした。総合的なリスク評価が目的ではないから個別的な評価にとどめた。

我が国では超低周波電磁界ばく露と小児白血病に関する症例対照研究、携帯電話端末使用と聴神経鞘腫、神経膠腫、髄膜腫に関する症例対照研究が INTERPHONE 研究の一環として実施され、いずれも国際的なリスク評価において評価の対象となることで相応の役割を果たしている。

今回の文献レビューの中で注目したいのは、以上のような腫瘍性疾患以外にも、アルツハイマー病など、様々な疾患について評価が加えられている点、ラジオ、テレビの送信設備、レーダーなどによる高周波ばく露についての研究、鉄道作業員の疫学研究など、様々なばく露環境について評価が加えられている点であり、引き続き、世界の研究動向に注意して、我が国としても重要度の高い疫学研究の実施に努めて行く姿勢が重要である。

### 参考文献

1. Schüz J, Svendsen AL, Linet MS, McBride ML, Roman E, Feychting M, Kheifets L, Lightfoot T, Mezei G, Simpson J, Ahlbom A. Nighttime exposure to electromagnetic fields and childhood leukemia: an extended pooled analysis. *Am J Epidemiol.* 2007; 166:263-9.
2. Svendsen AL, Weihkopf T, Kaatsch P, Schüz J. Exposure to magnetic fields and survival after diagnosis of childhood leukemia: a German cohort study. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 2007; 16:1167-71.
3. Mezei G, Spinelli JJ, Wong P, Borugian M, McBride ML. Assessment of selection bias in the Canadian case-control study of residential magnetic field exposure and childhood

- leukemia. *Am J Epidemiol.* 2008; 167:1504-10.
4. Mezei G, Gadallah M, Kheifets L. Residential magnetic field exposure and childhood brain cancer: a meta-analysis. *Epidemiology.* 2008; 19:424-30.
  5. Lowenthal RM, Tuck DM, Bray IC. Residential exposure to electric power transmission lines and risk of lymphoproliferative and myeloproliferative disorders: a case-control study. *Intern Med J.* 2007; 37:614-9.
  6. Huss A, Spoerri A, Egger M, Rööslı M; Swiss National Cohort Study. Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol.* 2009; 169:167-75.
  7. Milham S, Morgan LL. A new electromagnetic exposure metric: high frequency voltage transients associated with increased cancer incidence in teachers in a California school. *Am J Ind Med.* 2008; 51:579-86.
  8. Lin IF, Li CY, Wang JD. Analysis of individual- and school-level clustering of power frequency magnetic fields. *Bioelectromagnetics.* 2008; 29:564-70.
  9. Merzenich H, Schmiedel S, Bennack S, Brüggemeyer H, Philipp J, Blettner M, Schüz J. Childhood leukemia in relation to radio frequency electromagnetic fields in the vicinity of TV and radio broadcast transmitters. *Am J Epidemiol.* 2008; 168:1169-78.
  10. Schmiedel S, Brüggemeyer H, Philipp J, Wendler J, Merzenich H, Schüz J. An evaluation of exposure metrics in an epidemiologic study on radio and television broadcast transmitters and the risk of childhood leukemia. *Bioelectromagnetics.* 2009; 30:81-91.
  11. Thomas S, Kühnlein A, Heinrich S, Praml G, Nowak D, von Kries R, Radon K. Personal exposure to mobile phone frequencies and well-being in adults: a cross-sectional study based on dosimetry. *Bioelectromagnetics.* 2008; 29:463-70.
  12. Schröttner J, Leitgeb N. Sensitivity to electricity--temporal changes in Austria. *BMC Public Health.* 2008; 8:310.
  13. Klæboe L, Blaasaas KG, Tynes T. Use of mobile phones in Norway and risk of intracranial tumours. *Eur J Cancer Prev.* 2007; 16:158-64.
  14. Schlehofer B, Schlaefer K, Blettner M, Berg G, Böehler E, Hettlinger I, Kunna-Grass K, Wahrendorf J, Schüz J; Interphone Study Group. Environmental risk factors for sporadic acoustic neuroma (Interphone Study Group, Germany). *Eur J Cancer.* 2007; 43:1741-7.
  15. Sadetzki S, Chetrit A, Jarus-Hakak A, Cardis E, Deutch Y, Duvdevani S, Zultan A, Novikov



- I, Freedman L, Wolf M. Cellular phone use and risk of benign and malignant parotid gland tumors—a nationwide case-control study. *Am J Epidemiol.* 2008; 167:457-67.
16. Takebayashi T, Varsier N, Kikuchi Y, Wake K, Taki M, Watanabe S, Akiba S, Yamaguchi N. Mobile phone use, exposure to radiofrequency electromagnetic field, and brain tumour: a case-control study. *Br J Cancer.* 2008; 98:652-9.
  17. Karipidis KK, Benke G, Sim MR, Yost M, Giles G. Occupational exposure to low frequency magnetic fields and the risk of low grade and high grade glioma. *Cancer Causes Control.* 2007; 18:305-13.
  18. Johansen C, Raaschou Nielsen O, Olsen JH, Schüz J. Risk for leukaemia and brain and breast cancer among Danish utility workers: a second follow-up. *Occup Environ Med.* 2007; 64:782-4.
  19. Kheifets L, Monroe J, Vergara X, Mezei G, Afifi AA. Occupational electromagnetic fields and leukemia and brain cancer: an update to two meta-analyses. *J Occup Environ Med.* 2008; 50:677-88.
  20. García AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol.* 2008; 37:329-40.
  21. Cooper AR, Van Wijngaarden E, Fisher SG, Adams MJ, Yost MG, Bowman JD. A population-based cohort study of occupational exposure to magnetic fields and cardiovascular disease mortality. *Ann Epidemiol.* 2009; 19:42-8.
  22. Rösli M, Lörtscher M, Egger M, Pfluger D, Schreier N, Lörtscher E, Locher P, Spoerri A, Minder C. Leukaemia, brain tumours and exposure to extremely low frequency magnetic fields: cohort study of Swiss railway employees. *Occup Environ Med.* 2007; 64:553-9.
  23. Rösli M, Lörtscher M, Egger M, Pfluger D, Schreier N, Lörtscher E, Locher P, Spoerri A, Minder C. Mortality from neurodegenerative disease and exposure to extremely low-frequency magnetic fields: 31 years of observations on Swiss railway employees. *Neuroepidemiology.* 2007; 28:197-206.
  24. Rösli M, Egger M, Pfluger D, Minder C. Cardiovascular mortality and exposure to extremely low frequency magnetic fields: a cohort study of Swiss railway workers. *Environ Health.* 2008;7:35.
  25. Møllerlækken OJ, Moen BE. Is fertility reduced among men exposed to radiofrequency fields in the Norwegian Navy? *Bioelectromagnetics.* 2008; 29:345-52.

26. Baste V, Riise T, Moen BE. Radiofrequency electromagnetic fields; male infertility and sex ratio of offspring. *Eur J Epidemiol.* 2008; 23:369-77.