

電磁場と健康を考える ～ WHO の評価から ～

宮越順二

京都大学生存圏研究所

現代社会は、目には見えないが生活環境に電磁場があふれている。高圧送電線、家庭内の電化製品、医療現場、それに携帯電話やその基地局などである。このような背景から、近年、電磁場の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。ここでは、国内外における電磁場の生体影響研究の現状ならびに世界保健機関(WHO)をはじめとした国際機関の健康への評価を紹介する。電磁場影響を科学的に正しく理解することに主眼をおくが、まだまだ未解明な部分も多く残されている。放射線の影響は研究の歴史も長い。しかしながら、低線量の影響評価は未だ結論が出ていない。電磁場と健康については、研究の歴史も浅く、この講演が日々の生活の中で、環境因子としての電磁場をどのように考えるか、その一助になれば幸いである。

1. 電磁場問題の背景

1990年代に入って以来、電磁場（電磁界、電磁波とも称されるが、ここでは定常電磁場や低周波電磁場、高周波電波と記述する）曝露の健康への影響について、国際的に活発な議論が行われてきている。我々の生活環境には、家電製品の発生する電磁場をはじめとして、医療現場におけるMRI診断（核磁気共鳴）や電磁場加温治療、また、変電所や送配電線下の交流電磁場、携帯電話やその基地局からの高周波電波など、地球上の自然界に存在する以上の電磁場に曝される機会が増している。その中でも我々が現在から将来にかけて生活環境の中で曝される可能性が高いのは、医療の診断におけるMRIの強定常磁場や商用周波数領域における極低周波（ELF）電磁場、そして最近の普及ぶりが目覚ましい携帯電話を代表とした高周波領域の電波やIH（誘導加熱）クッキングヒーターからの中間周波数帯電磁場である。ここでは、生体影響研究が国際的にもほぼまとめられた低周波電磁場を中心として紹介し、研究が現在進行形である高周波電波については中間評価として触れるにとどめる。

図1は周波数別にみた生活環境における電磁場発生源の例を示す。

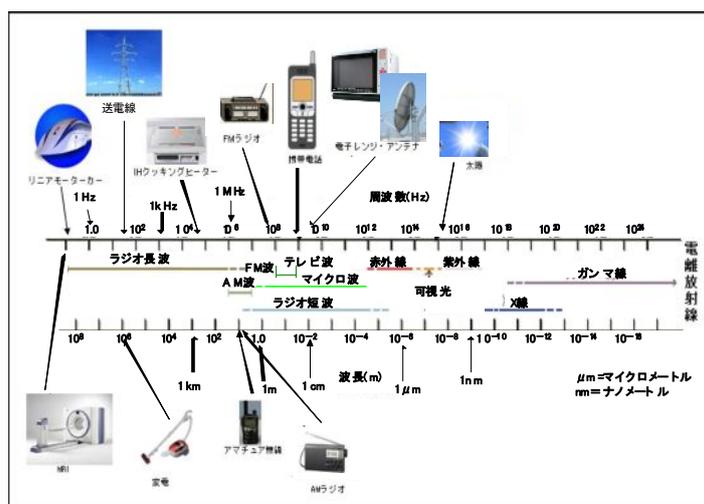


図1 生活環境における周波数別電磁場発生源の例

歴史的には、1979年に米国の疫学者が、高圧送電線の近くに住む子供の白血病発生率が高いことを発表したことが始まりである¹⁾。その後、1990年代では、ELF電磁場について、疫学研究に加えて、動物や細胞を用いた生物学的研究が活発に行われてきた。これまで、一部の疫学調査によりELF電磁場の発がん影響として、特に小児白血病の増加が報告されている²⁾。しかしその一方、成人や小児の他のがんについては、影響なしと報告されている。ELF電磁場の細胞や動物レベルの生物学的研究結果では、生活環境レベルの数万倍を超えると影響が出始めるとされている。多くの電磁場生体影響研究に用いられている磁束密度は、居住環境における影響を主眼にしているため、その曝露レベルは非常に低いものである。そのため、細胞や動物に対する顕著な影響が認められないのも当然かも知れない。このことは、よく知られている電離放射線ですえ、その低線量放射線については、不明な点も多く、現在でも国際的に議論されていることによく似た傾向である。

電磁場生命科学は、その主たる目標としては、科学的に信頼のおける研究成果から、電磁場の生体影響を正当に評価することにある。しかしながら、環境レベルをはるかに超えた磁束密度での生体、細胞や高分子重合体などの電磁場応答研究の成果も本分野の将来への発展につながる重要なものである。これらの成果は、電磁場の線量-効果関係（現在のところ、ELFの場合、線量を磁束密度、誘導電流や曝露時間の因子として考えられている）に基づいたしきい値の推定を可能とするばかりでなく、生命科学そのものに研究の道具として電磁場を利用したり、明らかな電磁場の効果を農学分野や医療・健康面において積極的に活用して

いこうとする研究も進められている。

2. 電磁場影響の評価研究まとめ

2.1 細胞実験

表1 電磁場生体影響の主な評価指標

研究分類	対象	評価指標
インビトロ (In vitro) 研究	細胞	細胞増殖、DNA合成、染色体異常、姉妹染色分体交換、微小核形成、DNA鎖切断、遺伝子発現、シグナル伝達、イオンチャンネル、突然変異、トランスフォーメーション、細胞分化誘導、細胞周期、アポトーシスなど
インビボ (In vivo) 研究	実験動物 (ラット、マウス など)	発がん(リンパ腫、白血病、皮膚がん、乳腺腫瘍、肝臓がんなど)、生殖や発育(着床率、胎仔体重、奇形発生など)、行動異常、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能など
疫学研究	ヒト	発がんやがん死亡(脳腫瘍、小児および成人白血病、乳がん、メラノーマ、リンパ腫など)、生殖能力、自然流産、アルツハイマー症など
人体影響	ヒト	心理的・生理的影響(疲労、頭痛、不安感、睡眠不足、脳波、心電図、記憶力など)、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能など

表1に、細胞レベルからヒト個体まで、これまで研究が行われてきている電磁場生体影響の主な評価指標をまとめた。特に、細胞(分子・遺伝子レベルを含む)を対象とした電磁場影響研究は、世界各国で活発に行われてきている。数多くの論文発表があり、ここでは紙面の関係上、詳細は関連資料を参照されたい^{3), 4)}。研究の多くは発がんとの関連性から、細胞の遺伝毒性(DNA損傷、染色体異常、突然変異など)や機能的変化としての遺伝子発現(がん遺伝子、ストレス蛋白など)に対する電磁場の影響検証が行われている。生活環境レベルの低周波電磁場については、初期の研究で陽性と報告された研究結果も、その後の研究で再現性に乏しく、「影響なし」または検出ができないほど極めて小さいものと考えられている。

携帯電話に関連する高周波電波については、その多くの研究は現在進行中である。これまでの研究成果から、電波による熱効果のないレベルでは、多くの報告は高周波の影響に否定的である。

2.2 動物実験

低周波の電磁場生体影響評価として、マウスやラットを用いた動物実験での検証が1990年代を中心として、数多く進められてきた。多くの動物実験研究では、そのほとん

どが発がんへの影響を検討するものであったが、その他、生殖に関するもの（胎仔の発育や催奇形性について）、神経系に関するもの（行動や感覚機能について）や免疫機能に関するものも行われてきた。もし、低周波電磁場曝露が発がん過程に影響を及ぼしているとするれば、正常な細胞をがん化細胞へと変化させるのか（イニシエーション）、または、イニシエーションを受けた細胞が低周波電磁場曝露により更に悪性腫瘍形成を促進させるのか（プロモーション）、大きな議論であった。検討された低周波電磁場の磁束密度は数 μT から1mTまで幅広く行われ、結果として、ごく一部の研究において、低周波電磁場曝露により白血病や乳腺腫瘍の増加を認める報告はあったが、ほとんどの研究では、発がん影響はないという陰性結果であった⁵⁾。発がん以外の研究（生殖、行動、免疫など）に関する結果も同様で、ほとんどの報告がいわゆる「影響なし」であった。従って、これまで行われてきた動物実験からの検証において、明確な低周波電磁場の影響は見られておらず、「影響あり」とする十分な証拠はない。

1997年にトランスジェニックマウスを用いて、電波により白血病が増加するという報告があり⁶⁾、2000年代に入り高周波電波の発がんへの影響評価も活発に行われている。欧米や我が国を中心として動物実験研究が推進されてきている。これまでの研究報告からは、そのほとんどの結果は、動物の発がんをはじめ、体重や寿命に関して電波の影響を認めていない⁷⁾。ただ、多くの研究は現在進行中であり、まだ確定した結論には至っていない。前述のトランスジェニックマウスの陽性結果についても、再現実験が行われている。

2.3 疫学研究

疫学研究は、細胞や動物実験に比べて、ヒトのデータという意味で一般社会に対する結果の影響力は大きいものがある。しかしながら、その反面、人々はいろんな環境で生活しており、研究の主題となる因子について純粋に調査することは不可能であり、結果を左右しかねない集団の選別方法や他の影響因子（選択バイアスや交絡因子という）が統計的評価を狂わす可能性は排除できない。前述したように、低周波電磁場の発がん影響を初めて指摘したのは、1979年の疫学研究報告である。その後、国際的な議論が高まる中、1990年代には、欧米で数多くの低周波電磁場に関する疫学研究が実施された⁸⁾。2000年に入って、我が国でも国立環境研究所のとりまとめで、この分野の疫学研究が初めて行われた⁹⁾。

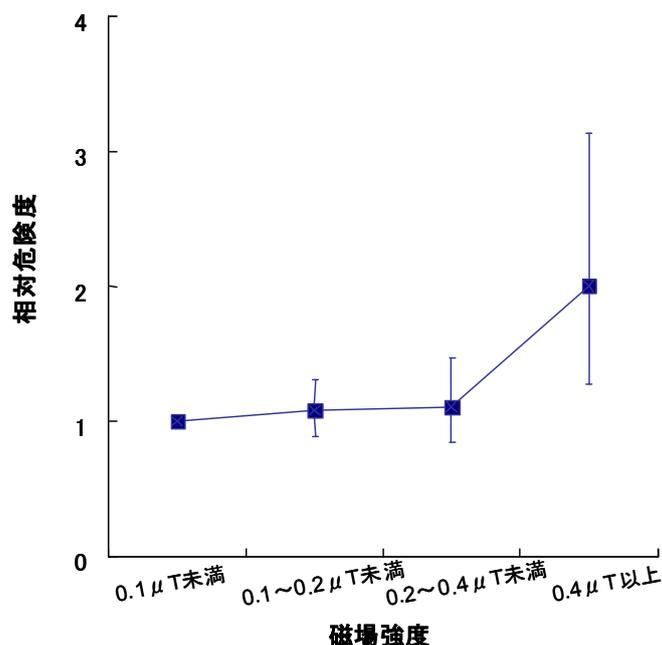


図2 9カ国の小児白血病の症例対照研究プール分析

図2は、低周波電磁場（正確にはELF磁場）と小児白血病の発生について、主な9つの疫学研究をまとめたものである。解析結果は、0.4 μ T未満（ほぼ99.2%の家庭が対象となる）の生活環境に住んでいる子供の低周波磁場曝露と白血病発生リスクとの間には関連性がなく、「影響なし」と考えられる。しかしながら、居住環境の低周波磁場レベルが0.4 μ T以上の場合（約0.8%の子供が対象となる）、白血病の相対リスクがほぼ2倍に増加し、これら疫学研究のプール分析の結果では、統計的な有意性があることを示している。我が国での疫学研究結果もほぼ同じような傾向を示している。なお、小児の他のがんや成人のがんに関する疫学研究結果からは、低周波電磁場の「影響はない（関連性が認められない）」と考えられている。疫学研究での低周波磁場による小児白血病増加という結果について、これまでのところその生物学的な作用機構は明らかではなく、また、前述した、疫学研究結果の精度を下げる選択バイアスや交絡因子の可能性も完全には否定できないと考えられている。

一方、携帯電話を対象とした高周波電波に関する疫学研究も現在進行中である。世界保健機関(WHO)の下部組織、国際がん研究機関(IARC)がとりまとめる形で、日本、イギリス、スウェーデンなど13ヶ国（ただし米国は不参加）が参加して「The INTERPHONE Study」として行われた。疾患対象として、聴神経腫瘍ならびに脳腫瘍が選ばれ、症例-対照研究

(case-control study)で実施された。一部の研究は個別に発表され、「影響あり」とする報告では、例えば、10年以内の携帯電話使用では影響は認められないが、10年以上の長期使用で、わずかにリスクの増加が認められている^{10), 11)}。IARCでは参加国全ての研究をとりまとめ、本国際共同研究の最終結論の概要を本年(2010年)5月にプレスリリースの形で発表した¹²⁾。結論として「10年以上の長期使用者に対する携帯電話使用による脳腫瘍(神経膠腫と髄膜腫)の上昇はないと考えられる。観察されたオッズ比(OR)の低下や、累積長時間通話者のORの上昇、その他、携帯使用側頭葉での神経膠腫の上昇など、因果関係の正確な解釈は難しい。」と述べている。

3. 携帯電話の使用規制

航空機の機内や病院内で携帯電話の電源を切るように言われるのは、携帯電話から発生する高周波電波が、操縦や治療などに用いられている精密機器の動作を阻害する可能性があると考えられているからである。機器の電磁環境適合性(EMC: Electromagnetic Compatibility)を守り、いわゆる電波妨害を起こさないように慎重を期している。また、電車内のラッシュ時やシルバーシート近辺で携帯電話の電源をオフにするようアナウンスされるのは、主として心臓ペースメーカーの誤作動を防止する目的である。現在の規定では、22cm離れていれば安全である。1億台を超える携帯電話が国内で用いられている現状でも、これまでに、携帯電話によるこのような事故の事例はない。いずれにしても人命にかかわることであり、100%の安全を目指した対策である。携帯電話については、事故につながりかねない運転中の使用(現在、運転中に手で持った使用は規制されている。)やバス、電車内での使用など、いわゆるマナーの方が大きい問題かも知れない。

4. 世界保健機関(WHO)の評価と動向

電磁場生体影響評価について、特にELF電磁場の発がん影響については、IARC(リヨン、フランス)で2001年に評価会議が開催された。演者はこのWHO-IARCの専門委員として会議に参加したので、この会議の経過を簡単に紹介する。世界各国から21名の専門委員(アメリカ合衆国10名、イギリス、フランス各2名、日本、カナダ、ドイツ、スイス、スウェーデン、デンマーク、フィンランド各1名)が集まり、全専門委員による3段階の発がん性評価が行われた。第1段階として実験動物レベル、第2段階としてヒトの疫学研究、これらの結果をふまえて、第3段階として全体の最終評価を実施した。

表 2 IARC による発がん性分類

発がん性の分類及び分類基準	既存分類結果 [934例]
グループ1: 発がん性がある (Carcinogenic to humans) 人への発がん性を示す十分な証拠がある場合に用いる	カドミウム、ダイオキシン(2,3,7,8-TCDD)、アスベスト、たばこ(能動、受動)、アルコール飲料、X線、太陽光 [他を含む102例]
グループ2A: おそらく発がん性がある (Probably carcinogenic to humans) 人への発がん性を示す証拠は限定的であるが、動物への発がん性に対して十分な証拠がある場合に用いる	PCB、ホルムアルデヒド、ディーゼルエンジン排ガス、紫外線、太陽灯(日焼け用ランプ) [他を含む69例]
グループ2B: 発がん性があるかもしれない (Possibly Carcinogenic to humans) 人への発がん性を示す証拠が限定的であり、動物実験での発がん性に対して十分な証拠が無い場合に用いる	クロロホルム、鉛、コーヒー、ガソリン、漬け物、ガソリン、エンジン排ガス、超低周波磁場 [他を含む246例]
グループ3: 発がん性を分類できない (Unclassifiable as to carcinogenicity to humans) 人への発がん性を示す証拠が不十分であり、動物実験での発がん性に対しても十分な証拠が無い場合に用いる	カフェイン、原油、水銀、お茶、蛍光灯、静磁場、静電場、超低周波電場 [他を含む516例]
グループ4: おそらく発がん性はない (Probably not carcinogenic to humans) 人及び動物実験において発がん性がないことを示唆する証拠がある場合に用いる	カプロラクタム(ナイロンの原料) [1例]

簡単にまとめると以下のようになる。

1. 極低周波 (ELF) 磁場の発がん影響評価として「グループ 2B」(ヒトに対する発がん性の可能性があるかも知れない) と分類した。
2. この「グループ 2B」の根拠として、疫学研究により ELF 磁場が小児白血病の増加を示唆していることをあげている。
3. 静磁場、静電場ならびに極低周波電場の発がん影響評価として「グループ 3」(ヒトに対する発がん性について分類はできない) と分類した。

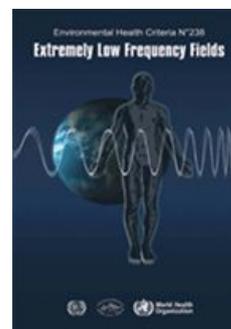
この「グループ 3」の根拠として、発がん性を評価できる十分なデータがないためとしている。

グループ 2B の根拠としては、やはり疫学研究結果が大きく影響していた。表 2 にこれまで実施されてきた IARC の発がん評価の代表例を示す。なお詳細は、IARC モノグラフ 80 巻を参照されたい¹³⁾。

その後、2005 年に WHO は、がん以外の影響も含めて ELF 電磁場の生体影響評価を行うタスク会議を開催した。この会議は環境保健クライテリア (EHC: Environmental Health Criteria) を作成するためのもので、最終稿までに約 2 年の時間を要したが、Web 公表は 2007 年 6 月¹⁴⁾ さらに 2008 年 2 月に刊行本として出版された¹⁵⁾。図 3 は、この 2 月に出版された ELF・EHC

の表紙と各章の見出しタイトルである。全章は英語表記であるが、クライテリアの概要を記述した重要な第1章はフランス語、ロシア語ならびにスペイン語でも章末に加えられ、全519ページの大作である。

1. 要約と更なる研究に対する推奨
2. 発生源、計測、曝露
3. 体内ドシメトリー
4. 生物物理学メカニズム
5. 神経行動反応
6. 神経内分泌系
7. 神経変性障害
8. 心臓血管系疾患
9. 免疫、血液系
10. 生殖と発達
11. がん
12. 健康リスク評価
13. 防護措置(一般的課題、科学的結果、議論と推奨)



http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html

図3 WHOが刊行した極低周波電磁場(ELF)に関する環境保健クライテリア

国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) は、これまでも非電離放射線の国際ガイドラインを策定してきており、世界各国はこのガイドラインを参考としてそれぞれ基準を設けてきている。(IEEEのガイドラインを重視する国もある) ICNIRPはWHOの電磁場プロジェクト (EMF Project) と全面的なパートナーでもあり、EHCの発刊に合わせて、国際ガイドラインの見直しを検討し、近々公表される予定である。なお、今後のWHOの高周波電波に関する生体影響評価は、当初の予定からかなり遅れ、IARCの発がん評価が2011年5月下旬、WHOのEHC作成タスク会議は2013年ごろに実施予定である。

5. 電氣的 (電磁) 過敏症

この十数年で、電磁場に敏感で体調の不良を訴えている人々の声が世界的に増している。マスコミなどでは、いわゆる「電磁波過敏症」と称しているが、正確には、WHOは「電氣的 (電磁) 過敏症 (EHS: electrical hypersensitivity)」と呼んでいる。微弱な電磁場に曝されると、皮膚症状 (発赤、灼熱感など) や自律神経系症状 (頭痛、疲労感、めまい、吐き気など) が現れる。原因と考えられる電磁場に、特別な周波数帯はなく、低周波でも高周波でも起こりうるらしい。

1990年代後半あたりから、欧米の一部の病院でこの過敏症患者のケアが行われている。特に北欧で患者数が多いとされている。WHOは、2004年に、チェコのプラハ市でEHSのワークショップを開催し、演者も出席した¹⁶⁾。EHSは化学物質過敏症（いわゆるシックハウス症候群など）とは異なると考えられている。現時点でEHSに関する科学的データは極めて少なく、情報も不十分である。また、自覚症状を持つ「患者」に盲検法（患者はいつ電磁場に曝されたかわからない）でその因果関係が調査されてきたが、これまでのところ電磁場との関連性は全く認められていない。

一方、我が国では、電氣的（電磁）過敏症の自覚を持つ「患者」の方々は、受け入れてくれる病院を探すのに苦慮している。また、科学的証明がないことで、電磁場に対する極度の不安から発症しているのではないかと考えている学者もいる。現時点では、国際的な統一見解も無く、生活環境の電磁場利用がますます高まる中、生命科学や臨床医学の分野で取り組むべき将来的な重要課題の1つであると考えられる。

6. 電磁場生体影響とリスクコミュニケーション

上述のように、現代社会はいたるところで電気をエネルギーとして動いており、さらに情報通信をはじめ、生活環境における電磁場の役割は極めて大きく、この流れは、将来にかけてますます加速してゆくものと考えられる。利便さが高くなる一方で、電磁場に対する危惧、特に健康への影響について不安を抱く人々が多いことも事実である。これまで演者は、IARCの発がん評価会議の専門委員やWHOのタスク会議メンバーとして、国際機関の電磁場生体影響評価に携わってきた。その中でも特にWHOのタスク会議においては、リスクコミュニケーションの重要性が各国の多くのメンバーから指摘されていた。ここで取り上げた電磁場は、低周波や高周波で、電離能力もなく、一般的に「放射線」といわれている電離能力のあるエックス線やガンマ線とは異なる電磁場である。エネルギー面からいえば、細胞のDNAを直接傷つけることは考えにくいところだが、一般社会における「電磁場」ということばは、「放射線」と同じように受け止められている可能性も高い。関係省庁（経済産業省、総務省など）やその関連機関では、ホームページを利用するなど一般の人々への周知に努力している。さらに、全国で電磁場と健康に関する講演会を開催し、より多くの人々に現状を伝え、理解を深める方策も実施しているところであるが、一方では、電磁場の不安を助長させるような多くの出版物やホームページが見受けられるのも事実である。

電磁場と健康の理解にはリスクコミュニケーションが重要である。しかしながら、生命科

学領域で、未解明な（不確定な）ところは、新しい研究なくして、リスクコミュニケーションにも限界がある。研究の推進とリスクコミュニケーションの同時進行が極めて重要であると考ええる。

7. おわりに

一科学者として、自身は、機会あるごとに、これまでに明らかにされた科学的検証の結果をよりわかり易く紹介し、さらに未解明なものは未解明であることを正確に伝えるように努めている。携帯電話やコンピュータのワイヤレスバッテリー、電気自動車の無線給電など、電磁誘導を用いた非接触エネルギー伝送技術をはじめとして、近い将来の電磁場利用は高まるばかりである。このように増加の一途をたどる将来の電磁場環境を考えると、未解明な部分については、生命科学の先端技術を駆使して、さらに研究を推進してゆく必要があると考える。その一方、電磁場と生体の応答解明を長年研究してきた経験から、低い強度の電磁場応答には生命科学の限界さえも感ずる。このように科学者として、研究推進の努力に加えて、正確で、かつ、お互いの理解が深まるリスクコミュニケーションの重要性を痛感する。

8. 参考文献

1. Wertheimer N, et al: Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* **109**: 273-284, 1979
2. Ahlbom A, et al: A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* **83**: 692-698, 2000
3. 宮越順二（編者）：電磁場生命科学．京都大学学術出版会、2005
4. 宮越順二：超低周波磁界の国内規制動向、アイソトープニュース No. **651**, 10-17, 2008
5. Kato M (Ed.): *Electromagnetics in Biology*. Springer, Japan, 2006
6. Repacholi MH, et al: Lymphomas in *E-Pim1* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* **147**: 631-640, 1997
7. Moulder JE, et al: Mobile phones, mobile phone base stations and cancer: a review. *Int. J. Radiat. Biol.* **81**: 189-203, 2005
8. Kheifets L, et al: Review; Childhood Leukemia and EMF: Review of the Epidemiologic Evidence. *Bioelectromagnetics Supplement* **7**: S51-S59, 2005

9. Kabuto M, et al: Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. *Int J Cancer* **119**: 643-650, 2006
10. Lönn S, et al: Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma. *Epidemiology* **15**: 653-659, 2004
11. Schoemaker MJ, et al: Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: results of the Interphone case-control study in five North European countries. *Br J Cancer* **93**: 842-848, 2005
12. http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf
13. WHO: WHO-IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. **80**, Part 1, Static and Extremely Low-frequency Electromagnetic Fields. 2002
14. http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html
15. WHO: Extremely Low Frequency Fields-Environmental Health Criteria N° 238-, 2008
16. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs296/en/index.html>