

**時間変化する電界、磁界及び電磁界による  
曝露を制限するためのガイドライン  
(300GHzまで)**

GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE  
TO  
TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC, AND  
ELECTROMAGNETIC FIELDS (up to 300GHz)

1998年4月

**国際非電離放射線防護委員会**

**International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection**

## 目次

まえがき .....	2
目的と範囲 .....	3
量と単位 .....	4
曝露の制限の根拠 .....	5
電磁界と人体との直接結合メカニズム .....	6
低周波電界との結合 .....	6
低周波磁界との結合 .....	6
電磁界からのエネルギーの吸収 .....	6
間接的結合メカニズム .....	7
曝露の制限の生物学的根拠（100kHzまで） .....	8
電界および磁界の直接的影響 .....	8
電界および磁界の間接的影響 .....	14
生物学的影響と疫学的研究のまとめ（100kHzまで） .....	15
曝露の制限の生物学的根拠（100kHz - 300GHz） .....	16
高周波電磁界の直接的影響 .....	16
パルス及び振幅変調された波形に関する問題 .....	18
高周波電磁界の間接的影響 .....	20
生物学的影響と疫学的研究のまとめ（100kHz - 300GHz） .....	20
EMF曝露制限のためのガイドライン .....	21
職業的曝露と公衆の曝露の制限 .....	21
基本制限および参考レベル .....	21
安全係数についての見解 .....	22
基本制限 .....	22
参考レベル .....	25
接触電流および誘導電流の参考レベル .....	28
複数の周波数の電磁界への同時曝露 .....	30
防護対策 .....	32
文献 .....	33
付録 .....	42
用語解説 .....	42

## まえがき

1974年、国際放射線防護学会（IRPA）は、様々な種類の非電離放射線（NIR）防護の分野で発生する問題を調査する非電離放射線作業グループを作った。1977年にパリで開かれたIRPA会議で、このグループは国際非電離放射線委員会（INIRC）となった。

IRPA/INIRCは、世界保健機関（WHO）の環境保健部門と協力して、国連環境計画（UNEP）が後援するWHOの環境保健基準計画の一環としてNIRに関する多くの保健基準文書を作成した。各文書は、NIRの物理的特性、計測方法と計測機器、発生源、NIR利用技術などの概説、生物学的影響に関する文献の徹底的な調査、ならびにNIRへの曝露の健康リスクに関する評価を述べている。これらの保健基準は、その後で作成された曝露限度値およびその実際的な適用方法の科学的データベースとなった。

第8回IRPA国際会議（モントリオール 1992年5月18～22日）で、IRPA/INIRCの後継として、新しい独立専門組織である国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）が設立された。この委員会は、様々な種類のNIRに関連する可能性の考えられる生物影響を調査し、NIR曝露限度に関する国際指針を作成し、NIR防護のあらゆる問題を扱うために活動している。

静電界・静磁界ならびに超低周波（ELF）電界および磁界への曝露によって生じると報告された生物学的影響をUNEP/WHO/IRPAが調査した（1984, 1987）。それらの刊行物や、UNEP/WHO/IRPA（1993）やAllen他（1991）などの他の多くの刊行物が、本ガイドラインの科学的根拠になった。

用語集は付録に記す。

---

\* 本ガイドライン作成当時の委員会の構成は、次のとおりであった。

A.Ahlbom	（スウェーデン）	
U.Bergqvist	（スウェーデン）	
J.H.Bernhardt	（ドイツ）	1996年5月より委員長。
J.P.Cesarini	（フランス）	
L.A.Court	（フランス）	1996年5月まで。
M.Grandolfo	（イタリア）	1996年4月まで副委員長。
M.Hietanen	（フィンランド）	1996年5月から。
A.F.McKinlay	（英国）	1996年5月から副委員長。
M.H.Repacholi	（オーストラリア）	1996年4月まで委員長、1996年5月から名誉委員長。
D.H.Sliney	（米国）	
J.A.J.Stolwijk	（米国）	
M.L.Swicord	（米国）	1996年5月まで。
L.D.Szabo	（ハンガリー）	
M.Taki	（日本）	
T.S.Tenforde	（米国）	
H.P.Jammet	（フランス）	名誉会員、故人
R.Matthes	（ドイツ）	学術幹事

この文書の作成にあたり、ICNIRPは、次の外部の専門家からご支援頂いた。S.Allen（英国）、J.Brix（ドイツ）、S.Eggert（ドイツ）、H.Garn（オーストリア）、K.Jokela（フィンランド）、H.Korniewicz（ポーランド）、G.F.Mariutti（イタリア）、R.Saunders（英国）、S.Tofani（イタリア）、P.Vecchia（イタリア）、E.Vogel（ドイツ）。また、その他各国の専門家からの多くの貴重なご意見を頂いたことに心から感謝する。

## 目的と範囲

本書の主な目的は、既に分かっている健康への有害な影響を防止するためのEMF曝露制限のガイドラインを確立することである。健康への有害な影響とは、曝露を受けた人またはその子孫の健康に確認可能な損傷を与えるものであり、一方、生物学的影響とは、健康への有害な影響になるかもしれないし、ならないかもしれないものである。

本書では、EMFの直接的および間接的影響に関する研究について述べる。直接的影響は、EMFと人体との直接的相互作用によって生じるもの、間接的影響は、人体とは異なる電位の物体との相互作用が係わるものである。また、実験研究および疫学的研究の結果、基本的な曝露基準、および実際の影響評価に用いられる参考レベルについて論ずる。本書で示すガイドラインは、職業的曝露と公衆の曝露に適用される。

高周波および50/60Hz電磁界に関するガイドラインをIRPA/INIRCがそれぞれ1988年と1990年に出している。時間的に変化するEMFの全周波数範囲（300GHzまで）を扱った本ガイドラインは、今後それらに代わるものになる。静磁界に関しては、1994年に出されたICNIRPガイドラインで扱っている（ICNIRP 1994）。曝露限度を確立するに当たっては、異なる多くの専門家の意見を調整する必要があると認識する。学術論文はその妥当性を検討されるべきであり、また動物実験から人への影響を外挿しなければならない。本ガイドラインに示した制限は、科学データのみを根拠としている。現在分かっている知識では、これらの制限は、時間的に変化するEMFの曝露から防護するため適切なレベルを定めている。指針は、次の2種類で与えられる。

- 基本制限： 確立された健康影響を直接的な根拠として定めた、時間的に変化する電界、磁界および電磁界の曝露に関する制限を「基本制限」と呼ぶ。これらの制限を記述する物理量は、電流密度（ $J$ ）、比エネルギー吸収率（SAR）および電力密度（ $S$ ）であり、周波数によって異なる。曝露を受けた人について容易に測定できるのは、空気中、すなわち体外、の電力密度だけである。
- 参考レベル： これらのレベルは、基本制限を超えるかどうかを決定する目的で、実際の曝露評価を行うために設けられたものである。ある参考レベルは、測定および/または計算を使って関連する基本制限から導き出されたものであり、またあるものは、EMF曝露の知覚および有害な間接的影響に関するものである。基本制限から導き出された物理量は、電界強度（ $E$ ）、磁界強度（ $H$ ）、磁束密度（ $B$ ）、電力密度（ $S$ ）、そして四肢を流れる電流（ $I_L$ ）である。知覚やその他の間接的影響に関する物理量は、接触電流（ $I_C$ ）と、パルス電磁界の場合の比エネルギー吸収量（ $SA$ ）である。個々の曝露状況について、これらの量の測定値または計算値が当該の参考レベルと比較される。参考レベルが満たされれば、関連する基本制限が満たされることは保証されると考えられる。たとえ測定値や計算値が参考レベルを超えたとしても、必ずしも基本制限を超えていることにはならない。ただし参考レベルを超えた場合には、関連する基本制限が満たされているか調べ、追加の防護対策が必要かどうか決定するための調査が必要である。

本ガイドラインは、指定した試験条件下でのEMF放出に制限を加えることを目的とした製品性能基準には直接言及しておらず、また電界、磁界および電磁界を特性づける物理量の計測技術を取り扱っていない。そのような物理量を正確に測定するための計測機器および計測技術についての包括的記述は他の文書にある（NCRP 1981; IEEE 1992; NCRP 1993; DIN VDE 1995）。

本ガイドラインが満たされていても、補綴用金属、心臓のペースメーカーや細動除去器、人工内耳などの医用装置との電磁的干渉、あるいはそれらの装置への影響は必ずしも防止されない。ペースメーカーのような

埋め込み電子機器の正常動作の妨害は、ここで勧告する参考レベルを下回るレベルでも起きる可能性がある。これらの問題の回避に関する助言は、本文書の範囲外であり、他の文書で得ることができる (UNEP/WHO/IRPA 1993)。

このガイドラインは定期的に改訂され、また時間的に変化する電界、磁界および電磁界の健康への有害な影響の確認が進展するにつれて更新される予定である。

## 量と単位

電界は電荷の存在にのみ関連するのに対して、磁界は電荷の物理的運動 (電流) によって生じる。電界Eは電荷に力を及ぼし、ボルト/メートル ( $\text{Vm}^{-1}$ ) で表される。同様に磁界は電荷に物理的な力を及ぼすことができるが、それは電荷が運動している時のみである。電界および磁界は大きさと方向を持つ (すなわちベクトルである)。磁界は2つの方法、すなわち磁束密度B (テスラ [T])、または磁界強度H (メートル当たりのアンペア [ $\text{Am}^{-1}$ ]) で表わすことができる。この2つの量には次式のような関係がある。

$$B = \mu H \quad (1)$$

ここで、 $\mu$  は比例定数 (透磁率) である。真空や空気中、ならびに非磁性物質 (生物学的物質を含む) 中では、 $\mu$  の値は  $4 \times 10^{-7}$  ヘンリー/メートル [ $\text{Hm}^{-1}$ ] である。従って、防護を目的とした磁界の記述には、BまたはHの数量のどちらか一方を明確にすれば十分である。

遠方界の場合、平面波モデルが電磁界伝搬の適切な近似である。平面波の特性は次のとおりである。

- 波面が平面である。
- EおよびHベクトルと伝搬方向が互いに垂直である。
- EおよびHの位相が同じで、振幅比E/Hが空間のどこでも一定である。自由空間では、振幅比E/H = 377オームで、これを自由空間の特性インピーダンスという。
- 電力密度S、すなわち伝搬方向に垂直な単位面積当たりの電力は、電界および磁界と次式のような関係がある。

$$S = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \frac{1}{377} E^2 = 377 H^2 \quad (2)$$

近傍界の場合、状況はかなり複雑である。EおよびHの極大、極小が、遠方界の場合のように、伝搬方向に沿った同じ点に生じないためである。近傍界では、電磁界の構造は非常に不均質で、377オームという平面波インピーダンスからは大きく変動する。すなわち、ほぼ電界だけの領域とほぼ磁界だけの領域ができる。近傍界での曝露を明確に表わすのは難しい。EとHの両方を測定しなければならず、またそのパターンが複雑であるからである。したがって近傍界の場合に電力密度は曝露制限を表すのにあまり適切な数量ではない (遠方界の場合のようには適切でなくなる)。

時間的に変化するEMFに曝露されると、体内に電流が流れたり、生体組織にエネルギー吸収が起きたりするが、それは結合メカニズムと周波数によって決まる。体内電界と電流密度にはオームの法則によって、次のような関係がある。

$$J = \sigma E \quad (3)$$

ここで、 $\sigma$  は媒質の導電率である。様々な周波数範囲および波形を考慮に入れ、本ガイドラインでの曝露評価の物理量は次のとおりである。

- 10MHzまでの周波数範囲では電流密度、 $J$ 。
- 110MHzまでの周波数範囲では電流、 $I$ 。
- 100kHz～10GHzの周波数範囲では比エネルギー吸収率、SAR。
- 300MHz～10GHzの周波数範囲でのパルス電磁界の場合には比エネルギー吸収量、SA。
- 10～300GHzの周波数範囲では電力密度、 $S$ 。

本ガイドラインで用いるEMFと曝露評価の物理量および単位の概要を表1に示す。

表1．電界、磁界、電磁界および曝露評価の物理量とそのS I単位

量	記号	単位
導電率		メートルあたりのシーメンス ( $S m^{-1}$ )
電流	$I$	アンペア ( $A$ )
電流密度	$J$	平方メートルあたりのアンペア ( $A m^{-2}$ )
周波数	$f$	ヘルツ ( $Hz$ )
電界強度	$E$	メートルあたりのボルト ( $V m^{-1}$ )
磁界強度	$H$	メートルあたりのアンペア ( $A m^{-1}$ )
磁束密度	$B$	テラス ( $T$ ) = $10^4$ ガウス ( $G$ )
透磁率	$\mu$	メートルあたりのヘンリー ( $H m^{-1}$ )
誘電率		メートルあたりのファラッド ( $F m^{-1}$ )
電力密度	$S$	平方メートルあたりのワット ( $W m^{-2}$ )
比エネルギー吸収	$SA$	キログラムあたりのジュール ( $J kg^{-1}$ )
比エネルギー吸収率	SAR	キログラムあたりのワット ( $W kg^{-1}$ )

## 曝露の制限の根拠

この曝露制限ガイドラインは、あらゆる既刊の科学的文献を徹底的にレビューした上で、作成された。文献レビューに適用した判断基準は、報告された様々な研究結果の信頼性を評価するために作成されたもので (Repacholi and Stolwijk 1991; Repacholi and Cardis 1997)、その結果、確立された影響のみがこの曝露制限の根拠として用いられた。長期のEMF曝露によるがんの誘発は、確立されているとは考えられなかったため、本ガイドラインは短期的曝露による即時的な健康影響、たとえば末梢神経および筋肉の刺激、導電性物体に触れることによって生じる感電および熱傷、EMF曝露中のエネルギー吸収の結果生じる生体組織温度の上昇などに基づいている。がんリスクの増加など曝露の長期的影響の可能性について、ICNIRPの結論は以下のとおりである。疫学研究では、このガイドラインで勧告した50/60Hzの磁束密度レベルをかなり下回るレベルの曝露と発がん作用の可能性との関連を示唆はするものの、説得力に乏しい証拠が提出されているが、得られているデータは曝露制限設定の根拠とするには不十分である。

ELFまたはELF振幅変調EMFの短期曝露のインビトロ (試験管内実験) での影響をまとめると、EMF曝露に対する一過性の細胞または生体組織の反応が観察されたが、曝露と反応との明らかな関係は観察されなかった。反応の多くがインビボ (生体を用いた実験) で実証されていないので、これらの研究の価値は、健

健康影響の評価においては限定的なものである。このためインビトロ研究のみでは、EMFの健康影響可能性の評価において主要な根拠として役立つデータが提供されたとはいえない。

## 電磁界と人体との直接結合メカニズム

時間的に変化する電界および磁界が生物と直接的な相互作用をする場合についての、3つの基本的結合メカニズムが確立されている（UNEP/WHO/IRPA 1993）。

- 低周波電界との結合
- 低周波磁界との結合
- 電磁界からのエネルギーの吸収

### 低周波電界との結合

時間的に変化する電界と人体との相互作用は、電荷の流れ（電流）、拘束電荷の分極（電気双極子の形成）、生体組織に既に存在する電気双極子の再配向現象を生じる。これら異なる作用の相対的大きさは、人体の電気的特性、すなわち導電率（電流の流れを決定する）および誘電率（分極作用の大きさを決定する）によって決まる。生体組織の種類によって導電率と誘電率は異なり、また周波数依存性もある。体外の電界が人体に表面電荷を誘起させ、これによって人体に誘導電流が生じる。誘導電流の分布は、曝露条件、人体の大きさおよび形、電界内での人体の位置によって決まる。

### 低周波磁界との結合

時間的に変化する磁界と人体との物理的相互作用は、誘導電界および渦電流を生じる。誘導電界および電流密度の大きさは、電流ループの半径、生体組織の導電率、および磁束密度の大きさとその時間変化率に比例する。磁界の大きさと周波数を一定とすると、ループが最大の場合に、誘起される電界は最も強くなる。人体のどの部分であろうと、誘導電流の正確な経路と大きさは組織の導電率によって決まる。

しかし人体は電氣的に均質ではない。誘導電流密度は、解剖学的、電氣的に実物に近い人体モデルと高度の解剖学的分解能をもつ計算手法を使って、計算することができる。

### 電磁界からのエネルギーの吸収

低周波電界および磁界への曝露では、通常、無視しうる程度のエネルギー吸収しか生じず、測定できるような温度上昇はない。しかし約100kHz以上の周波数の電磁界への曝露では、顕著なエネルギー吸収および温度上昇が生じる。一般には、均一な電磁界（平面波）への曝露でも、体内には非常に不均一なエネルギーの蓄積と分布が生じる。これを曝露量測定および計算によって評価しなければならない。

人体によるエネルギーの吸収に関して、電磁界を4つの範囲に分けることができる（Durney et al. 1985）。

- 約100kHzから約20MHz未満までの周波数範囲。この周波数範囲では、周波数の減少とともに胴体での吸収は急激に減少し、顕著な吸収は首と下肢に生じる。
- 約20MHz～300MHzの周波数範囲。この周波数範囲では、全身の吸収が比較的大きくなる。ただし、人体の部分（例えば頭）での共振を考慮に入れれば、さらに高い周波数までがこの範囲に含まれる。
- 約300MHz～数GHzの周波数範囲。この周波数範囲では、顕著な局所的、不均一な吸収が生じる。
- 約10GHzを越える周波数。この周波数範囲では、主に人体表面でエネルギー吸収が生じる。

生体組織では、SARは体内電界強度の2乗に比例する。平均SARおよびSAR分布は計算あるいは実験測定値から推定される。SARの値はつぎの要因によって決まる。

- 入射電磁界のパラメータ、すなわち周波数、強度、界の向き（偏波）、および発生源と対象物体の相対的配置（近傍界または遠方界）。
- 曝露を受ける人体の特性、すなわち体格、内部および外部の幾何学的形状、様々な組織の誘電的性質。
- 地面の影響および曝露を受ける人体の近くの他の物体の反射の影響。

人体の長軸が電界ベクトルに平行で、平面波曝露の状態（つまり遠方界曝露）である時、全身SARは最大値に達する。吸収エネルギーの大きさは、曝露される人体の大きさを含む多数の要因によって決まる。「標準的人間」（ICRP 1994）は、非接地の場合、70MHzに近い共振吸収周波数をもつ。より背の高い人の場合、共鳴吸収周波数は幾分低くなり、より背の低い成人、子供、赤ん坊や座った人の場合、共振吸収周波数は100MHzを超える。電界の参考レベルの値は、人体でのエネルギー吸収の周波数依存性に基づいている。接地した人では、共振吸収周波数は約半分になる（UNEP/WHO/IRPA 1993）。

10MHz以上の周波数で動作している装置（例えば誘電加熱器、携帯電話）の場合、近傍界での人への曝露が起きる。この条件でのエネルギー吸収の周波数依存性は、遠方界についてのものとは大きく異なる。ある特定の曝露条件下での携帯電話のような特定の機器では磁界が支配的かも知れない。

近傍界曝露の評価において、体内誘導電流および生体組織での電磁界強度の数値モデル計算が、測定と同様に有用であることが、携帯電話、ウォークトーカー、放送塔、船舶通信機器、誘電加熱器について実証された（Kuster and Balzano 1992; Dimbylow and Mann 1994; Jokela et al. 1994; Gandhi 1995; Tofani et al. 1995）。これらの研究の重要なところは、近傍界曝露は高い局所SAR（頭、手首、踵など）をしばしば生じ、全身および局所SARは高周波発生源と人体との距離に強く依存することを示したことである。そして最後に、測定によって得られたSARデータが、数値モデル計算によって得られたデータと一致するという点である。全身平均SARおよび局所SARは、様々な曝露条件で観察される影響を比較するのに便利な量である。SARについての詳しい議論は、他の文書にある（UNEP/WHO/IRPA 1993）。

約10GHz以上の周波数では、電磁界の生体組織への侵入深度は小さく、SARは吸収エネルギーを評価するのに良い尺度ではない。電磁界の入射電力密度（ $Wm^{-2}$ で表す）がより適切な曝露評価の物理量である。

## 間接的結合メカニズム

間接的な結合メカニズムは2種類ある：

- 人体が、異なる電位の物体（すなわち人体か物体のどちらかがEMFによって帯電している）と接触した時に発生する接触電流。
- EMFと、人が装着している、あるいは人に埋め込まれた医療装置との結合（この文書では考慮しない）。

EMFによる導電性物体の帯電は、その物体と接触する人体を通過する電流を生じる（Tenforde and Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993）。そのような電流の大きさと空間分布は、周波数、物体の大きさ、人体の大きさおよび接触面積によって決まる。強い電磁界に曝露した物体と人が接近すると、過渡的放電（火花）が発生することがある。

## 曝露の制限の生物学的根拠(100kHzまで)

ここでは周波数100kHzまでの電界および磁界の生物学的および健康影響に関する文献のレビューを述べる。この周波数範囲では、生体組織における電流の誘起が相互作用の主なメカニズムである。0から1 Hzまでの周波数範囲については、基本制限および参考レベルの生物学的根拠がICNIRP (1994) に示されている。もっと詳細なレビューは、他の文献 (NRPB 1991, 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993; Blank 1995; NAS 1996; Polk and Postow 1996; Ueno 1996) で述べられている。

### 電界および磁界の直接的影響

**疫学的研究** 商用周波電磁界への曝露との関連でみたがんリスクの疫学的研究について多数のレビューが行われている (NRPB 1992, 1993, 1994; ORAU 1992; Savitz 1993; Heath 1996; Stevens and Davis 1996; Tenforde 1996; NAS 1996)。電磁界への曝露との関連でみた生殖への有害な影響のリスクについても同様のレビューが行われている (Chernoff et al. 1992; Brent et al. 1993; Shaw and Croen 1993; NAS 1996; Tenforde 1996)。

**生殖への影響** 妊娠への影響に関する疫学的研究で、視覚的表示装置 (VDU) で作業する女性における生殖への有害な影響を裏付ける一致した証拠は得られていない (Bergqvist 1993; Shaw and Croen 1993; NRPB 1994a; Tenforde 1996)。例えば、VDUを使用している妊婦とVDUを使用していない妊婦とを比較したメタアナリシス (複数の研究のデータを一括した分析) では、流産または奇形のリスク増加はみられなかった (Shaw and Croen 1993)。その他に、VDUの放射電界および磁界の実測的を絞った2つの研究が行われた。一方の研究が、ELF磁界と流産との関連を示唆したのに対し (Lindbohm et al. 1992)、もう一方は、そのような関連をみいだせなかった (Schnorr et al. 1991)。症例数が多く、達成率が高く、詳細な曝露評価を行った前向き研究 (Bracken et al. 1995) は、出生時の体重、子宮内成長率は共に、いかなるELF電磁界への曝露とも関連しなかったと報告した。有害な影響と曝露レベルの高さも関連しなかった。この研究での曝露量測定には、住居の外にある送電線の送電量、7日間の個人曝露測定、住居内の24時間測定、電気毛布、温水ベッドおよびVDUの使用についての自己申告が含まれた。現在入手可能な情報においては、VDUへの職業上の曝露と生殖への有害な影響との関連を裏付けることはできない (NRPB 1994a; Tenforde 1996)。

**居住環境におけるがんリスク** ELF磁界への曝露とがんリスクの増加との関連の可能性をめぐってかなりの議論がある。Wertheimer and Leeperが高電流規格と分類した配電線への住居の接近度と小児がん死亡率との関連を報告してから (1979)、この問題に関するいくつかの報告が出された。発端となったこの研究が持ち出した基本仮説は、送電線のような屋外発生源が居住環境中の50/60Hz磁界の一因となっていることが小児がんのリスク増加と関連づけられる可能性があるというものである。

小児がんと、住居近傍の送電線によって生じた住居内の商用周波数磁界への曝露に関する研究は十指に余る。これらの研究では磁界への曝露を、短時間の測定や住居と送電線との距離、そしてほとんどの場合、送電線の規格に基づいて推定した。送電線の負荷を考慮に入れた研究もあった。白血病に関連する調査結果が最も一致している。13の研究 (Wertheimer and Leeper 1979; Fulton et al. 1980; Myers et al. 1985; Tomenius 1986; Savitz et al. 1988; Coleman et al. 1989; London et al. 1991; Feychting and Ahlbom 1993; Olsen et al. 1993; Verkasalo et al. 1993; Michaelis et al. 1997; Linet et al. 1997; Tynes and Haldorsen 1997) のうち、5つの研究を除く全ての研究が、1.5~3.0の推定相対リスクを報告した。

磁界の直接測定値も、近接する送電線に基づいた見積もり値も、白血病と診断される以前の様々な時点での曝露についてのおおまかなの代用尺度であり、この2つの方法のうちのどちらがより妥当な曝露評価であ

るかは明らかではない。研究結果は確かに磁界が白血病リスクとの関連においてある役割を果たしているかもしれないことを示唆しているものの、サンプルの数が少ないこと、磁界と送電線への接近度に相関があることなどの理由で、研究結果には不確かさがある (Feychting et al. 1996)。

ほとんどの種類の小児がんの原因がほとんどわかっていない。しかし、社会経済的状態および自動車の排煙による大気汚染などの潜在的交絡因子を制御を試みても、結果にはほとんど影響がなかった。がんやその他の健康問題に関連して電気器具（主に電気毛布）の使用を調査する研究が行われたが、全般的には影響を否定する結果であった (Preston-Martin et al. 1988; Verreault et al. 1990; Vena et al. 1991, 1994; Li et al. 1995)。小児白血病のリスクに関連して電気器具の使用を調べたのは、2つの症例対照研究のみである。そのうち1つはデンバーで行われ (Savitz et al. 1990)、両親の電気毛布の使用との関連を示唆した。もう1つはロサンゼルスで行われ (London et al. 1991)、白血病と、ヘアドライヤーを使用し白黒テレビを見る子供との関連を見出した。

住居と送電線との接近度に基づいて白血病を調べた結果が比較的一致していたことから、米国科学アカデミー委員会は、送電線付近に住む子供は、白血病のリスクが高いように思われると結論した (NAS 1996)。サンプル数が少ないために個々の研究の信頼区間は幅広いものの、これらの研究を総合すれば、結果は一致しており、総合相対リスクは1.5である (NAS 1996)。一方、いくつかの研究での磁界の短期測定値は、50/60Hz磁界への曝露と子供の白血病やその他の種類のがんのリスクとの関連を裏付けるものではなかった。NAS委員会は、このリスク増加が磁界への曝露によって説明されると確信はしなかった。その理由は、白血病患者および対照の住居での磁界計の読み取り値から曝露を見積もった場合には明かな関連がなかったためである。送電線近傍居住と関連する小児白血病の未知のリスク要因が交絡したためと説明される可能性も示唆されたが、何か可能性のある候補要因が前提になっているわけではない。

NAS委員会が報告書を完成した後に、ノルウェーで行われた研究の結果が報告された (Tynes and Haldorsen 1997)。この研究は、あらゆる種類の小児がんの500の症例を扱っていた。近接する送電線によって住居に生じる磁界レベルを計算し、1年間の平均を割り出して各個人の曝露を推定した。白血病のリスクと診断当時の住居の磁界との関連は認められなかった。送電線からの距離、生後1年間の曝露、妊娠時の母親の曝露、対照の中央値レベルを越える曝露のいずれもが、白血病、脳腫瘍、またはリンパ腫と関連がなかった。しかし曝露した症例数は少なかった。

またドイツで行われた研究が、NAS報告書完成後、報告された (Michaelis et al. 1997)。症例129、対照328に基づく小児白血病についての症例対照研究であった。曝露評価は、子供が診断以前に最も長く住んでいた家の子供部屋で24時間磁界測定で行った。0.2  $\mu$ T以上で3.2の相対リスクが観察された。

小児急性リンパ性白血病と60Hzの磁界への曝露との関連性を調べる大規模な米国での症例対照研究 (638人の患者と、620人の対照) をLinnet他が発表した (1997)。寝室の24時間時間荷重平均測定値や様々な他の部屋の30秒測定値を使って磁界曝露を決定した。測定は、子供が診断された年以前の5年間のうちの70%の期間住んでいた家、また対照の場合はそれに相当する期間住んでいた家で行った。診断以前の住居が一定していた症例対照ペアについては電線規格による曝露評価も行った。評価を行うことができたそのようなペアは416組であった。電線規格分類と白血病との関連を示すものはなかった。磁界測定に関しては、さらに興味のある結果が得られた。0.2  $\mu$ Tのカットオフポイントで、アンマッチドとマッチド分析で、それぞれ1.2と1.5の相対リスクが得られた。0.3  $\mu$ Tのカットオフポイントで、45の曝露症例に基づくアンマッチドの相対リスクは1.7であった。したがって測定値を用いた場合は、磁界と白血病リスクの間のポジティブな関連性に示唆的な結果である。この研究は、その規模、高曝露群の対象者数、白血病の発症に応じた測定時期 (一般には診断後24ヶ月以内に行われた)、曝露情報を得るためにその他の尺度を多く取り入れ、多くの潜在的交絡因子を考慮した質の高い解析を行うなどの点で貢献するところが大きい。一方、対照選択の手順、達成率、データの統計的分析方法には弱点がある。また測定に用いた機器は過渡的電磁界や高調波を考慮に入れていなかった。この研究の規模の大きさからいって、この研究結果を他の研究結果と総合した場合、以前の研究で観察された電線規格との関連性は有意に弱まるであろう (必ずしも無効ということにはならないが)。

長年にわたって、磁界への曝露と、子供に二番目に多く見られる種類のがんである小児脳腫瘍とが関連し

ているかどうかということにもかなりの関心が向けられてきた。NAS委員会の報告書の後に完成した3つの研究での発生源は送電線あるいは電気毛布、また磁界の見積もり方法は計算あるいは電線規格と様々であるが、いずれの場合でも脳腫瘍と子供の磁界曝露との関連は裏付けられなかった (Guenel et al. 1996; Preston-Martin et al. 1996a, 1996b; Tynes and Haldorsen 1997)。

成人のがんおよび居住磁界曝露に関するデータは乏しい (NAS 1996)。今日まで発表された若干の研究 (Wertheimer and Leeper 1979; McDowall 1985; Seversen et al. 1988; Coleman et al. 1989; Schreiber et al. 1993; Feychting and Ahlbom 1994; Li et al. 1996; Verkasalo 1996; Verkasalo et al. 1996) は、いずれも曝露症例数の少なさに苦労しており、よって結論は出ていない。

電磁界への曝露と小児白血病を含むがんに関する疫学的研究の結果は、実験研究による証拠立てを欠いているため、曝露指針策定の科学的根拠とするには十分には強力ではないと言うのがICNIRPの見解である。この評価は最近のレビューとも一致している (NRPB 1992, 1994b; NAS 1996; CRP 1997)。

職場環境におけるがんリスク ELF電磁界への曝露と、電気関係の職業に従事する労働者におけるがんリスクとの関連可能性を調べるために多くの疫学的研究が行われてきた。最初に行われたこの種の研究 (Milham 1982) は、職業およびがん死亡数に関する情報を含んだ死亡証明書データベースを利用した。曝露を評価する大ざっぱな方法として、Milhamは、職場での磁界曝露を推定することによって職業を分類し、電気関係労働者の間で白血病のリスク増加を見出した。その後の研究 (Savitz and Ahlbom 1994) が同様のデータベースを利用したが、発生率の上昇が認められたがんの種類は研究によって様々に変わり、特にがんのサブタイプまで調べた場合にその傾向は顕著であった。様々な種類の白血病および神経組織腫瘍のリスク増加、そして少ない例では男性および女性の乳がんのリスク増加が報告されている (Demers et al. 1991; Matanoski et al. 1991; Tynes et al. 1992; Loomis et al. 1994)。これらの研究は、結果が幾分一致しないだけでなく、曝露評価が非常に大ざっぱであり、職場でのベンゼン、溶剤への曝露などの交絡因子を制御していないという難点があった。

最近の3つの研究が、職場でのELF電磁界曝露を測定し、就業期間を考慮に入れることによって、それ以前の研究の欠陥のいくらかを克服することを試みた (Floderus et al. 1993; Theriault et al. 1994; Savitz and Loomis 1995)。曝露を受けた人にがんリスクの増加が観察されたが、リスクが増加したがんの種類は研究によって様々であった。Floderus 他 (1993) は白血病との有意な関連を見出した。Theriault 他 (1994) も関連を認めたが、その関連は弱く、有意ではなかった。またSavitz and Loomis (1995) の研究では、関連は認められなかった。白血病のサブタイプに関してはさらに結果の乖離が大きくなるが、解析の対象数が少なかった。神経組織腫瘍に関しては、Floderus 他 (1993) が、神経膠芽腫 (星状膠細胞腫III-IV) のリスク増加を認めたのに対し、Theriault 他 (1994) およびSavitzとLoomis (1995) は、神経膠腫 (星状膠細胞腫I-II) の増加について示唆的証拠しか見いだせなかった。もし職業的磁界曝露とがんとが真に関連しているならば、より精巧な曝露データに基づいたこれら最近の研究にこそ、より強い一致性とより強力な関連性が期待できるはずである。

ELF電界とがんとの関連可能性についても調べられている。Theriault他 (1994) の磁界についての研究に参加した3つの電力会社の電界データも解析された。それらの電力会社のうちの1社については、白血病にかかった労働者は対照労働者より電界に曝露されていた可能性が高いと報告された。それに加えて、高い電界と磁界の両方組み合わせた曝露を受けていたグループのほうが関連が強かった (Miller et al. 1996)。第二の電力会社については、白血病と職場電界への累積的曝露の大きさとの関連は認められなかったが、脳腫瘍との関連は一部の解析で示された (Guenel et al. 1996)。大腸がんとの関連も報告されたが、電力会社労働者についての他の大規模な研究では、この種のがんについては見いだせなかった。第三の電力会社については、高い電界と脳腫瘍または白血病との関連はみられなかったが、この研究は規模が小さかったため、小さな変化は、たとえあったとしても検出される可能性は少なかった (Baris et al. 1996)。

最近、アルツハイマー症と磁界への職業的曝露との関連が示唆されたが (Sobel and Davanipour 1996)、この影響は確証が得られていない。

**実験研究** ここでは周波数100kHz以下の電界および磁界の生物学的影響に関する実験研究の概要とその評価を述べる。コントロール下で曝露を受けたボランティアの研究と、細胞、生体組織および動物個体についての実験研究のそれぞれの結果についてに分けて議論する。

**ボランティア研究** 時間的に変化する電界に曝されると人体表面に交流電荷が誘起され、体毛の振動が起こる結果として、電界が感知される。いくつかの研究が、大半の人は20 kVm<sup>-1</sup>以上の強い50/60Hzの電界を感知可能であり、一部の人は5 kVm<sup>-1</sup>以下の電界を感知可能なことを示している（UNEP/WHO/IRPA 1984; Tenforde 1991）。

60Hzの電界と磁界（9 kVm<sup>-1</sup>, 20 μT）の組み合わせ曝露を受けたボランティアにおいて、心臓機能に小さな変化が生じた（Cook et al. 1992; Graham et al. 1994）。安静時心拍数の僅かな、しかし有意な低下が、曝露中または曝露直後に見られた（1分当たり3～5回減少）。この反応は、もっと強いレベル（12 kVm<sup>-1</sup>, 30 μT）あるいは弱いレベル（6 kVm<sup>-1</sup>, 10 μT）への曝露では見られず、また被験者を精神的に緊張させた状態では反応は弱くなった。これらの研究では、磁界の存在に気付く被験者はいなかった。また感覚についての広範な質問紙および知覚試験では一貫した結果は見られなかった。

2～5 mTの50Hz磁界に曝された人についての実験研究では、生理学および心理学的に有害な影響は観察されなかった（Sander et al. 1982; Ruppe et al. 1995）。Sander他（1982）およびGraham他（1994）の研究では、血液化学、血液細胞数、血中ガス、乳酸塩レベル、心電図、脳波図、皮膚温、血中ホルモンレベルの変化は観察されなかった。また、ボランティアを使った最近の研究でも、60Hzの磁界への曝露が血中の夜間メラトニンレベルに影響を与えることは示されなかった（Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996）。

十分に強力なELF磁界は末梢神経および筋肉組織に直接に刺激を与え得るので、神経路損傷検査を目的として手足の神経を刺激するために短い磁界パルスが臨床使用されている。実験的な磁気共鳴画像システムで1kHzの勾配磁界に曝露されたボランティアにおいて、末梢神経および筋肉の刺激が誘発されたことも報告された。閾値となる磁束密度は数mTで、この値は勾配の急激な切り替えによって生じたパルス磁界による末梢組織における誘導電流密度では約 1 Am<sup>-2</sup>に相当する。組織に1 Am<sup>-2</sup>を越える電流密度を誘起する、時間的に変化する磁界は神経興奮を引き起こし、心室細動などの不可逆的な生物学的影響をもたらす可能性がある（Tenforde and Kaune 1987; Reilly 1989）。人の腕の節電図記録を行った研究では（Polson et al. 1982）、中央神経幹を刺激するには10<sup>4</sup> Ts<sup>-1</sup>のdB/dtをもつパルス磁界が必要であることが見い出された。また磁気刺激の持続時間が興奮性組織刺激の重要なパラメータであることも見い出された。

ボランティアを用いた視覚および精神機能の研究からは、閾値が100 mAm<sup>-2</sup>以下の現象もあり得ることが導かれている。ボランティアの頭と肩に取り付けた電極に弱い商用周波数電流を通じた状態で複雑な推理テストを行ったところ、反応潜伏時間が変化したことが報告された。電流密度は10～40 mAm<sup>-2</sup>と推定された（Stollery 1986,1987）。また多くの研究が、3～5 mT以上のELF磁界曝露中にボランティアは、磁気閃光として知られる視覚的な微かな光の明滅現象を体験したと報告している（Silny 1986）。この作用は頭部に微弱な電流を直接流すことによっても生じさせることができる。20Hzでは、網膜での電流密度約10 mAm<sup>-2</sup>がこの現象の閾値と推定されている。この値は電気的興奮性組織における代表的な内因性電流密度を上回るものである。周波数がこれより低くても、高くても、閾値はこれより高くなった（Lovsund et al. 1980; Tenforde 1990）。

50Hz曝露時の視覚誘発電位についての研究が行われ、影響の発生閾値は60mTの磁束密度であることが示された（Silny1986）。この結果と一致して、50Hz、5 mTの磁界を用いたSander 他（1982）の研究でも、12 kVm<sup>-1</sup>、30 μTまでの60Hzの電界、磁界を組み合わせ用いたGraham 他（1994）の研究でも、視覚誘発電位への影響は見られなかった。

**細胞および動物研究** ELF電界および磁界の生物学的影響を調べる多くの研究が行われているものの、生体機能に重大な混乱が生じる閾値となる電界・磁界の特性を決定するような体系的研究はほとんどなされていない。誘導電流密度が閾値を越えると、誘導電流が神経および筋肉組織を直接に刺激することは、充分立

証されている (UNEP/WHO/IRPA 1987; Bernhardt 1992; Tenforde 1996)。しかしながら、興奮性組織を直接に刺激することは不可能な電流密度でも、進行中の電気活動に影響を与え、神経の興奮性に影響を与えるかもしれない。直接刺激に必要なレベル以下であっても、中枢神経系の活動は隣接する神経細胞の活動によって生じる内因性電界に敏感に影響を受けることが知られている。

ELF帯域の弱い電気信号が変換されて細胞膜と相互作用し、これが細胞内での生化学反応を引き起こし、ひいては細胞機能および増殖状態の変化に関係する可能性を示唆する多くの研究がある。弱い電磁界下での単一細胞の挙動についての簡単なモデルから、細胞膜の内因性の物理的、生物学的ノイズのレベルを上回るためには、細胞外部からの電気信号は約 $10 \sim 100 \text{ mVm}^{-1}$  (誘導電流密度では約 $2 \sim 20 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ に相当する)以上でなければならないと算定された (Astumian et al. 1995)。また $100 \text{ mVm}^{-1}$ 以下の誘導ELF電界に反応して、膜の何らかの構造および機能特性が変化する可能性を示唆する証拠もある (Sienkiewicz et al. 1991; Tenforde 1993)。 $10 \text{ mVm}^{-1}$ 以下の誘導ELF電界 (約 $2 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下の誘導電流密度に相当する)に反応した神経内分泌の変化 (例えば、夜間メラトニン合成の抑制など)も報告されている (Tenforde 1991, 1996)。しかし以上のような低周波電磁界の生物学的相互作用が健康への悪影響に係るとの明らかな証拠はない。

生体組織に存在する内因性生物電気信号のレベルを上回るレベルの誘導電界および電流が、多くの生理学的影響を引き起こし、かつその影響は誘導電流密度の増加につれて重大さを増すことが示されている (Bernhardt 1979; Tenforde 1996)。 $10 \sim 100 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ の電流密度で生体組織への影響、脳の認識機能の変化が報告されている (NRPB 1992; NAS 1996)。約 $10 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz}$ の周波数で誘導電流密度が $100 \sim$ 数 $100 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ を超えると、神経および神経・筋の刺激閾値を上回る。この電流密度閾値は、数 $\text{Hz}$ 以下および $1 \text{ kHz}$ 以上の周波数では漸次増加する。そして最後に、 $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ を超える極めて高い電流密度では、心臓期外収縮、心室細動、筋肉痙攣、呼吸器不全など深刻で、生命にかかわる影響が発生する可能性がある。 $10 \sim 100 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ を超える誘導電流密度への慢性的曝露によって、生体組織への影響の深刻度と不可逆性はより大きくなる。従って人への曝露は、周波数が数 $\text{Hz} \sim 1 \text{ kHz}$ では、頭、首および胴体での誘導電流密度が $10 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上にならないような電界、磁界に制限することが適切と思われる。

脳組織内での生物マグネタイト粒子に働く振動的磁気回転力およびトルクがELF磁界からの信号変換のひとつのメカニズムの可能性として主張されている。Kirschvink 他 (1992b) が、マグネタイト粒子に働くELF磁気力が細胞膜の電位感受性イオンチャネルの開閉を引き起こすしくみを想像したモデルを提案した。しかしこのモデルの1つの難題は、脳組織の細胞数に比べてマグネタイト粒子が少ないことである。例えば、人の脳組織には1グラム当たり数百万個のマグネタイト粒子が含まれ、それらは $5 \sim 10$ 個の粒子の集合体 $10^5$ 個となって分散していると報告されている (Kirschvink et al. 1992a)。この数からいえば、脳組織の細胞数はマグネタイト粒子の数の約 $100$ 倍あり、ELF磁界とマグネタイト結晶との振動的磁気回転による相互作用がどのようにして脳組織にあるかなり多数の電位感受性イオンチャネルに影響を与えるのかを想定するのは困難である。マグネタイトの生物学的役割、およびこの無機物質がELF磁気信号の変換において果たす役割のメカニズムを明らかにするために更なる研究が明らかに必要である。

電磁界の影響を評価する上で重要な問題は、催奇形性および発達への影響の可能性である。発表されている科学的証拠によれば、低周波電磁界が哺乳類の胎児期および生後の発達に有害な影響を与えることは考えられない (Chernoff et al. 1992; Brent et al. 1993; Tenforde 1996)。また現在利用可能な証拠によれば、 $100 \text{ kHz}$ 以下の周波数の電界および磁界への曝露により体細胞での突然変異や遺伝子への影響が起きるとは考えられないことは明らかである (Cridland 1993; Sienkiewicz et al. 1993)。

文献的には、インビトロ (試験管内実験) で見られたELF電磁界の細胞膜への影響 (イオン輸送、ミトゲンと細胞表面レセプタとの相互作用) および細胞機能および成長の変化 (増殖の増大、新陳代謝、遺伝子発現、蛋白質合成および酵素活性の変化など) に関する多くの報告がある (Cridland 1993; Sienkiewicz et al. 1993; Tenforde 1991, 1992, 1993, 1996)。低周波電磁界が細胞膜のCaイオン輸送およびこのイオンの細胞内濃度に与える影響 (Walleczek and Liburdy 1990; Liburdy 1992; Walleczek 1992)、メッセンジャーRNAおよび蛋白質合成パターンに与える影響 (Goodman et al. 1983; Goodman and Henderson 1988, 1991; Greene et al. 1991; Phillips et al. 1992)、細胞増殖やがんの促進作用に関連するオルニチンデカル

ボキシラーゼ (ODC) などの酵素の活性に与える影響 (Byus et al. 1987, 1988; Litovitz et al. 1991, 1993) にかんがりの関心が集まった。しかしこれら観察された知見を曝露限度の決定に用いる前に、結果の再現性そしてがんやその他の健康への有害な影響との関連性を確立する必要がある。電磁界の遺伝子発現および蛋白質合成への影響についての重要不可欠な観察的知見のいくつかが再現されなかったという事実があるので、この点が強調されるのである (Lacy-Hulbert et al. 1995; Saffer and Thurston 1995)。これらの再現研究の著者は、それまでの研究には貧弱な温度管理、適切な実験内コントロールを用いていないこと、メッセンジャーRNAの転写の解析に分解能の低い技法を用いたことなどの欠点があったことを明らかにした。電磁界曝露に反応したと報告されているODC活性の一時的増加は、増加の程度も小さく、また (フォルボールエステルなどの化学的プロモータとは異なり) 酵素の新たな合成とも関連していない (Byus et al. 1988)。ODCに関する研究は、ほとんどが細胞研究である。ラットの乳がんプロモーション評価系を用いてODCへの影響を示唆した研究 (Mevissen et al. 1995) がひとつあるが、インビボ (生物個体を使った実験) でODCへの影響があるかどうかを明らかにするためには更なる研究が必要である。

ELF電磁界がDNAや染色体の構造を変えるという証拠はなく、従ってそれによる突然変異および腫瘍性形質転換が起こるとは考えられない。ELF電磁界への曝露によるDNAおよび染色体の損傷、突然変異、および形質転換の頻度増加を調べるように計画された実験研究の結果がこれを裏付けている (NRPB 1992; Murphy et al. 1993; McCann et al. 1993; Tenforde 1996)。染色体構造に影響を及ぼさないということは、ELF電磁界が発がんのプロセスに何等かの影響を与えるのであれば、イニシエータではなくプロモータとして働き、DNAまたは染色体に初期損傷を生じさせるのではなく、遺伝子変化を受けた細胞の増殖を促進する可能性がより大きいことを示唆する。細胞内情報伝達経路や遺伝子発現の変化などの後成的影響 (遺伝子損傷以後に生じる影響) を電磁界が与えることによって、がん発育への影響が起こるのかもしれない。従って最近の研究は、化学的発がん物質によるイニシエーション後のプロモーション、プログレッション段階への電磁界の影響可能性の調査に焦点を置いている。

インビトロでの腫瘍細胞の成長、または齧歯類動物に移植した腫瘍の発育に関する研究では、ELF電磁界への曝露の影響可能性を示す強力な証拠は得られなかった (Tenforde 1996)。人のがんとのより直接的な関連についての研究としては、齧歯類動物の皮膚、肝臓、脳および乳腺の腫瘍を用いたインビボ試験でELF電磁界のプロモーション作用が調べられた。皮膚がんのプロモーション作用についての3つの研究 (McLean et al. 1991; Bannug et al. 1993a, 1994) は、化学誘発腫瘍のプロモーションにおいて、商用周波数磁界の連続的または断続的曝露のいずれもが何ら影響しないことが示された。マウスの皮膚がん、60Hz、2 mTの磁界のフォルボールエステルとのコプロモーション作用が実験の初期段階でみられたと報告されたが、この研究が終了した23週の時点までには、この作用の有意性は消失した (Stuchly et al. 1992)。同じ研究者はそれ以前の研究でも、60Hz、2 mTの磁界曝露がDMBA誘発皮膚がん細胞の成長を促進しないことを示している (McLean et al. 1991)。

肝臓の部分切除をしたラットにおいて化学発がん物質によるイニシエーションとフォルボールエステルによるプロモーションをした肝がん病巣の発育についての実験で、強度が0.5 ~ 50  $\mu$ Tの50Hzの磁界曝露はプロモーション、コプロモーション作用がないことが明らかになった (Rannug et al. 1993b, 1993c)。

化学的イニシエータで処理した齧歯類動物の乳がんの発育に関する研究は、0.01 ~ 30mTの範囲の商用周波数磁界曝露のプロモーション作用を示唆した (Beniashvili et al. 1991; Loscher et al. 1993; Mevissen et al. 1993, 1995; Baum et al. 1995; Loscher and Mevissen 1996)。磁界に曝露されたラットに観察されたこれらの腫瘍発生率の増加は、磁界が松果体メラトニン抑制を引き起こし、その結果としてステロイドホルモンレベルの上昇と乳がんリスクの増加を起こすことに関連するのかもしれないとの仮説が提案された (Stevens 1987; Stevens et al. 1992)。しかしELF磁界の乳がんプロモーション作用に関するこれらの調査結果が意味するところについて結論を導き出す前に、別個の研究機関による研究結果の再現が必要である。また最近の研究でELF磁界曝露が人のメラトニンレベルに重大な影響を与えることが裏付けられなかったことにも注意しなければならない (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996)。

## 電界および磁界の間接的影響

電磁界の間接的影響は、人と物体、例えば金属構造物など異なる電位の物体、との物理的接触（触れる、擦れ合うなど）によって生じる。そのような接触の結果、物体または人体に蓄積していた電荷が流れる（接触電流）。約100kHzまでの周波数の場合、物体から人体への電流は筋肉および/または末梢神経に刺激を与える可能性がある。電流レベルの上昇につれて、感知、感電および/または熱傷による痛み、握った物体を手放すことができない、呼吸困難などが起こり、また電流が極めて高いと心室細動が起きる（Tenforde and Kaune 1987）。これらの影響の閾値には周波数依存性があり、10～100Hzで閾値が最も低い。末梢神経反応の閾値は、数kHzの周波数まで低いままである。適切な工学技術および/または管理体制によるコントロールで、さらには防護衣の着用などで、これらの問題の発生を防止することができる。

人が電位の異なる物体に実際に触れなくても、非常に接近すると火花放電が発生することがある（Tenforde and Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993）。接地されていないボランティア集団の一人一人に接地された物体に指を近づさせた結果、火花放電の感知閾値は、この集団の10%の人では $0.6 \sim 1.5 \text{ kV m}^{-1}$ と低い値であった。この曝露状況での不快感の閾値は約 $2.0 \sim 3.5 \text{ kV m}^{-1}$ であった。大きな接触電流では筋肉収縮が生じる。男性ボランティアの場合、帯電した導体を手放すことが不可能になる現象の50パーセントイル閾値は、50/60Hzで9 mA、1 kHzで16 mA、10kHzで約50 mA、そして100kHzで約130 mAと報告されている（UNEP/WHO/IRPA 1993）。

100kHzまでの周波数の電磁界による様々な間接的影響の電流閾値を表2にまとめる（UNEP/WHO/IRPA 1993）。

表2 . 間接的影響の閾値電流の範囲 (子供、成人女性、成人男性を含む)

間接的影響	各周波数における閾値電流 (mA)		
	50/60Hz	1kHz	100kHz
接触感知	0.2-0.4	0.4-0.8	25-40
接触した指の痛み	0.9-1.8	1.6-3.3	33-55
痛みを伴うショック / 離脱電流閾値	8-16	12-24	112-224
重篤なショック / 呼吸困難	12-23	21-41	160-320

### 生物学的影響と疫学的研究のまとめ(100kHzまで)

乳がんは例外的である可能性があるものの、商用周波数磁界にがんのプロモーション作用があるとの実験的証拠はほとんど得られていない。ELF電磁界が細胞内情報伝達および内分泌調節（両者はイニシエートされた細胞の増殖を促進して、腫瘍の発育に影響を与えることが考えられる）に影響を与えるかどうかを明らかにするために更に動物研究を行う必要があるが、現在のところELF電磁界の発がんへの影響についての説得力のある証拠はなく、これらのデータを曝露ガイドライン策定の根拠に用いることはできないと結論せざるをえない。

細胞および動物実験研究で、誘導電流密度が $10 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下では、健康への悪影響が懸念されるような低周波電磁界の影響は認められていない。さらに高い誘導電流密度レベル（ $10 \sim 100 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ ）では、神経系の機能的変化や生体組織へのその他の影響など、重大な影響が一貫して観察されている（Tenforde 1996）。

送電線近くの住民についてのELF電磁界とがんリスクとの関連についてのデータは小児白血病のリスクが僅かに高いことを示している点では明らかに一致性がある（新しい研究ほど、それ以前の研究で観察された弱い関連性に対して疑問を投げかけているが）。しかし他のどの種類の小児がんあるいはどの種類の成人のがんでもそのようなリスクの上昇はなかった。小児白血病と送電線近傍居住との関連性仮説の根拠は不明である。もしこの関連が送電線から発生するELF電磁界との関連でないならば、未知の白血病リスク要因が何らかの形で送電線と関連するのかもしれない。これら疫学的データは、実験研究による裏付けがないため、曝露ガイドラインに盛り込まれるには不十分である。

電気関連労働者に、白血病、神経組織腫瘍などの特定の種類のがんのリスクが増加し、また乳がんもある程度増加しているとの報告がある。ほとんどの研究が、被験者の磁界曝露レベルを推定して分類する方法として職業名を使用した。最近の数件の研究では曝露評価により精巧な方法を用いている。これらの研究は全般として白血病または脳腫瘍のリスク増加を示唆したが、リスクが増加したがんの種類には研究間で大きな不一致があった。これらのデータは、ELF電磁界曝露ガイドラインの根拠とするには不十分である。多くの疫学的研究において、生殖への有害な影響の一貫した証拠は得られていない。

実験研究およびボランティア実験での生物学的反応の測定からは、日常的曝露レベルの低周波電磁界が有害な影響を与える懸念はほぼない。生命に影響のない神経系機能への作用の電流密度閾値は、1 kHzまでの周波数で $10 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ と推定された。ボランティアを使った実験で一貫して見られた曝露の影響は磁気閃光現象の出現と、ELF電磁界曝露中または曝露直後の心拍数のわずかな減少であったが、これらの一時的影響がどのような長期的健康影響と関連するかについては証拠がない。弱いELF電界、磁界の曝露を受けた齧歯類で夜間の松果体メラトニン合成が低下することが観察されているが、コントロール下でELF電磁界曝露を受けた人では一致した影響は報告されていない。これらの研究のなかには60Hzで $20 \mu\text{T}$ までの磁界曝露を行ったものもあったが、血中メラトニンレベルへの確かな影響は報告されなかった。

## 曝露の制限の生物学的根拠(100kHz - 300GHz)

ここでは周波数100kHzから300GHzまでの電磁界の生物学的影響ならびに健康影響の可能性に関する文献のレビューを行なう。より詳細なレビューには次のものがある (McKinlay et al.1996; UNEP/WHO/IRPA 1993; Polk and Postow 1996; NRPB 1991; Repacholi 1997)。

### 高周波電磁界の直接的影響

**疫学的研究** マイクロ波の曝露を受けた人での生殖への影響およびがんリスクに関しては、限られた数の研究しか行なわれていない。これに関する文献の概要はUNEP/WHO/IRPA (1993) から発表されている。

**生殖への影響** 分娩中の子宮収縮痛を緩和する目的でマイクロ波温熱療法を受けた女性について広範な調査を行った二つの研究では、胎児への有害な影響の証拠は何も見出されなかった (Daels 1973, 1976)。しかしマイクロ波の職業的曝露を受けた労働者における妊娠の結末及び新生児の出生時欠損症についての7つの研究では、ポジティブな結果とネガティブな結果が報告されている。女性のプラスチック溶接工及び短波温熱療法士についての比較的大規模な疫学研究のいくつかでは、流産又は胎児奇形の発生率に統計的に有意な影響は見出されなかった (Kallen et al. 1982)。しかしこれとは対照的に、同じような女性労働者集団についての他の研究では流産及び出生時欠損症のリスク増加が見い出された (Larsen et al. 1991; Ouellet-Hellstrom and Stewart 1993)。男性のレーダー作業員についての研究では、マイクロ波曝露と彼らの子供たちのダウン症のリスクとの間に何の関連も見出されなかった (Cohen et al. 1977)。

全体として、生殖とマイクロ波曝露についての研究は、非常に不十分な曝露評価、そして多くの場合に対象者の数が少ないことが欠陥になっている。概してこれらの研究の結果はネガティブであるが、高曝露グループの人たちについてさらに疫学データを集め、またもっと精密に曝露を評価しなければ、生殖への影響について確固とした結論を引き出すことは困難であろう。

**がんリスク** がんリスクとマイクロ波曝露の研究はほとんど存在せず、また全般的に定量的な曝露評価を欠いている。航空機産業と米軍におけるレーダー労働者についての2つの疫学研究は、全罹病率または全死亡率の増加の証拠を何も見出さなかった (Barron and Baraff 1958; Robinette et al.1980; UNEP/WHO/IRPA 1993)。Lillienfeld 他 (1978) による、低レベルのマイクロ波曝露を慢性的に受けたモスクワの米国大使館従業員についての研究の結果も同様であった。Selvin他 (1992) は、家の近くの大型マイクロ波送信機からの照射に慢性的に曝露された子供たちの間にがんリスクの増加は何も見られないと報告した。もっと最近の研究も、マイクロ波曝露を受けた労働者や軍人の間で神経組織腫瘍の有意な増加を示すことは出来なかった (Beall et al.1996; Grayson 1996)。携帯電話のユーザーの間では全死亡率の過剰はみられなかったが (Rothman et al.1996a 1996b)、現時点においてがんの発生率又は死亡率への影響について調査するのは時期尚早である。

軍人の間でのがんリスク増大の報告がひとつあるが (Szmigielski et al.1988)、調査対象集団の規模も曝露レベルも明示されていないため、その研究結果の解釈は困難である。より最近のSzmigielski (1996) の研究では、高周波電磁界に曝露した軍人の間で白血病とリンパ腫の発生率が高いことが判明したとしているが、曝露評価の定義が不十分である。RF送信局の近くの居住者に関する最近の2、3の研究では白血病発生率の局地的増加を示唆している (Hocking et al.1996; Dolk et al.1997a,b) が結果は確定的ではない。全体的に見て、発表されている少数の疫学的研究の結果のもたらすがんリスクに関する情報は限られたものに過ぎない。

**実験研究** ここでは100kHzから300GHzの周波数範囲の電磁界の生物学的影響についての実験研究を要約

し、批判的に評価する。コントロール下で曝露を受けたボランティアを用いた研究の結果と、細胞、生体組織及び動物個体を用いた実験研究の結果とに分けて議論する。

**ボランティア研究** Chatterjee 他（1986）による研究で、周波数がほぼ100kHzから10MHzまで増加するにつれて、高強度の電磁界への曝露の主たる影響は、神経及び筋肉の刺激から加熱へと変化することが実証された。100kHzでは主な感覚は神経がチクチクするというものだったが、10MHzでは皮膚上の温かさの感覚であった。したがってこの周波数範囲での基本的な健康防護基準は、興奮性組織の刺激及び加熱作用を回避するものとしなければならない。10MHzから300GHzまでの周波数では、電磁エネルギーの吸収によって生ずる主な影響は加熱であり、1 - 2 を超えるような温度上昇は、熱疲憊や熱射病などの有害な健康影響を及ぼす可能性がある（ACGIH 1996）。熱ストレスの強い環境における労働者についての研究も、体温が生理的熱ストレスに近いレベルにまで上昇するにつれて、単純な課題遂行の成績が低下することを示している（Ramsey and Kwon 1988）。

約100～200 mAの高周波電流を下肢から流したボランティアは温感を体験したと報告されている。この時のSAR値から判断すると、下肢に1 をこえる局所的な温度上昇は生じそうもない（Chatterjee et al.1986; Chen and Gandhi 1988; Hoque and Gandhi 1988）。そこでこの1 という温度上昇は、好ましくない健康影響を引き起こさない温度上昇の上限値として示唆された（UNEP/WHO/IRPA 1993）。ボランティアに関するデータとしては、50MHzまでの周波数についてGandhi他（1986）が、また110MHz（FM放送帯域上限）までの周波数についてTofani 他（1995）が報告しており、過大な加熱作用を避けうる値として、下肢での電流100 mAという参考レベルを支持している（Dimbylow 1997）。

磁気共鳴イメージング装置内で電磁界の曝露を受けた、安静中のボランティアの熱調節応答について、いくつかの研究者グループによって報告されている（Shellock and Crues 1987; Magin et al.1992）。一般的には全身SARが4 W/kg未満の条件の下での30分間までの曝露による中心体温の上昇は1 未満であることが、これらの研究で実証された。

**細胞および動物研究** 10MHz以上の電磁界の熱的相互作用についての実験動物、たとえば齧歯類動物、犬、人以外の霊長類などの行動的および生理的反応に関する報告は多数ある。熱感受性と熱調節応答は視床下部、および皮膚と体内各部に存在する熱受容体の両者に関連する。温度変化に反応した求心性信号は中枢神経系に集まり、主要な神経内分泌制御系の活動を变化させる一方、恒常性維持に必要な生理的、行動的反応をひき起こす。

約4 W/kgの吸収を起こす電磁界に曝露した実験動物には熱調節応答の特徴的なパターンが現れ、体温は最初上昇し、熱調節メカニズムが始動したあと安定化する（Michaelson 1985）。この応答の初期段階では、細胞間隙から組織液が血流中に移動することによる血液量の増加、及び心拍数、心室内血圧の上昇を伴う。これらの心臓の動力学的変化は、体表面への熱伝導を効率良く行うための熱調節応答を反映したものである。体温上昇をもたらすレベルのマイクロ波を動物に長時間曝露すると、最終的にこれらの熱調節メカニズムは破たんをきたす。

齧歯類及びサルについてのいくつかの研究はまた、熱調節応答に関係した行動変化について明らかにした。ラットとサルの課題遂行成績の低下が1 - 3 W/kgの範囲のSAR値で観測されている（Stern et al.1979; Adair and Adams; deLorge and Ezell 1980; DAndrea et al.1986）。サルでは、熱調節のための行動変化は、視床下部領域の温度がわずかに0.2 - 0.3 上昇したときに始まる（Adair et al. 1984）。視床下部は正常な熱調節プロセスのコントロールセンターであると考えられ、結腸温度が一定に保たれている条件下でも、視床下部のわずかな温度上昇によってその活動は変化する。

電磁エネルギー吸収により1 - 2 の体温上昇を生ずるようなレベルについては、細胞及び動物個体を用いた研究で多数の生理学的影響の特徴が調べられた（Michaelson and Elson 1996）。それらの影響としては、神経及び神経筋機能の変化；血液脳関門の透過性の増加；眼の障害（水晶体白濁と角膜異常）；ストレスに伴う免疫系の変化；血液学的変化；生殖機能の変化（精子産生の減少など）；催奇形性；細胞の形態、水分および電解質含有量、膜機能の変化などが含まれる。

強い電磁界への生体の部分的曝露という条件下では、眼や睾丸など熱に敏感な組織に著しい熱的損傷が起こり得る。2、3時間のマイクロ波曝露はウサギの眼に白内障を引き起こす。そのときSAR値は100 - 140 W/kgの範囲であり、水晶体温度は41 - 43 になった (Guy et al. 1975)。同じような又はもっと高い強度のマイクロ波電磁界の曝露を受けたサルの眼に白内障は認められなかった。これは多分、サルの眼におけるエネルギー吸収パターンがウサギのそれと異なるためであろう。非常に高い周波数 (10 - 300GHz) では、電磁エネルギーの吸収は主として皮膚の表皮層、皮下組織及び眼球表面に限定される。この周波数範囲の上限に近づく程、吸収は急激に表面的なものとなる。これらの周波数での眼の損傷は、マイクロ波電力密度が50 W/m<sup>2</sup>以下であれば避けられるであろう (Silny and Wolbarsht 1980; UNEP/WHO/IRPA 1993)。

最近かなり関心をもたれている問題は、携帯電話及び基地局送信機など広く利用されている通信システムの周波数領域のマイクロ波の発がんへの影響可能性である。この問題に関連した研究結果はICNIRPによって取りまとめられた (1996)。要約すると、マイクロ波電磁界は突然変異誘発的でなく、したがってこの電磁界への曝露が発がんのイニシエーションを起こす可能性はないことを示唆する多くの報告が存在している (NRPB 1992; Cridland 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993)。これとは反対に、最近のいくつかの報告は、1 W/kgのオーダーのSAR値レベルのマイクロ波電磁界曝露で齧歯類の睾丸及び脳組織におけるDNA鎖切断が生じた可能性があることを示唆している (Sarkar et al. 1994; Lai and Singh 1995, 1996)。しかしICNIRP (1996) およびWilliams (1996) は、これらの研究には方法上の欠陥があり、それが結果に著しく影響した可能性がある指摘している。

25か月間のマイクロ波曝露を受けたラットについての大規模な研究で、対照グループのラットに比べて、曝露されたラットに原発性腫瘍がより多く見られたことが注目された (Chou et al. 1992)。しかし良性腫瘍の発生率には2つのグループ間で差がなく、実験と同じようなSPF (特定病原体のない環境) 条件下で飼育された同系統のラット (ストック用) に比べて、どの特定タイプの腫瘍も曝露ラットグループで多くはなかった。全体としてみれば、この研究結果はマイクロ波電磁界の腫瘍イニシエーション作用を示すものと解釈することはできない。

またいくつかの研究では、マイクロ波曝露があらかじめイニシエートされた腫瘍細胞の発育に及ぼす影響を調べた。Szmigielski et al. (1982) は、高い電力密度のマイクロ波曝露でラットの移植された肺肉腫細胞の増殖率が上昇したと述べている。この効果は、マイクロ波曝露からの熱ストレスの結果として宿主の免疫防御が弱まったために生じた可能性がある。非熱的レベルのマイクロ波照射を用いた最近の研究では、マウスのメラノーマまたはラットの脳グリオーマ腫瘍の発育には何の影響も見出されなかった (Santini et al. 1988; Salford et al. 1993)。

Repacholi 他(1997)の報告によると、メスのE $\mu$ -pim1トランスジェニックマウス100匹を18ヶ月にわたり、パルス幅0.6 ms、217Hzでパルス変調した900MHzに曝露した結果、コントロール群101匹に比べてリンパ腫の発生率が2倍であったとしている。マウスはケージ内で自由に動けたため、SARの分散は大きかった (0.01 - 4.2 W/kg)。マウスの安静時代謝率を7 - 15 W/kgとすると、SAR値の範囲の上限の部分のみが若干の加熱作用をしたであろう。従って、この研究は非熱的メカニズムが働いた可能性を示唆しており、さらなる研究を必要としている。しかしながら健康リスクについての仮説を立てる以前に、多くの問題点があることを強調する必要がある。SAR値の分散を小さくし、量反応関係の有無の決定するために、動物を拘束して追試を行う必要がある。またこの結果を人について一般化するためには、この結果が他の動物モデルにも見出されるか否かを調べる研究が必要である。またトランスジェニック動物での結果が人に適用可能かについて検討することも不可欠である。

## パルス及び振幅変調された波形に関する問題

組織における平均エネルギー蓄積率が同じ場合、パルス変調マイクロ波電磁界は連続波に比べて一般的に生物学的応答を生じるのにより効果的であり、とくに閾値のはっきりした影響においてそうである (ICNIRP 1996)。良く知られている例は、いわゆる“マイクロ波ヒアリング”効果である (Frey 1961; Frey and Messenger 1973; Lin 1978)。正常な聴力の人には、約200MHzから6.5GHzの間の周波数のパルス

ス変調電磁界を感知することができる。この聴覚感覚は電磁界の変調特性によって、ブーブー、ピチピチあるいはボンボンという音としていろいろに記述されている。マイクロ波ヒアリング効果は、脳の聴覚皮質における熱弾性的相互作用に起因するものとされており、パルス幅30  $\mu$  s 未満のパルスで変調された2.45GHzの場合では、感知閾値は約100 - 400  $\text{mJ/m}^2$  (4 から16  $\text{mJ/kg}$ のSARに相当する)である。マイクロ波聴覚効果にくり返し又は長時間曝露することはストレスになり、有害である可能性もある。

いくつかの報告は、霊長類の眼の網膜、虹彩及び角膜内皮が低レベルのパルス変調マイクロ波放射の影響を受けやすいことを示唆している (Kues et al.1985; UNEP/WHO/IRPA 1993)。26  $\text{mJ/kg}$ という低い吸収エネルギーレベルで、網膜の光感受性細胞の変性が報告された。緑内障治療薬チモロール・マレートの投与後、パルス変調電磁界による網膜損傷の閾値は2.6  $\text{mJ/kg}$ に低下した。しかし別の研究機関がこれらの結果を部分的に再現する目的で、(パルス波ではなく)連続波電磁界について行った最近の試みは成功しなかった (Kamimura et al.1994)。したがって、Kues他 (1985)の結果が健康にどのような意義をもち得るか、現時点では評価できない。

強いパルス変調マイクロ波電磁界への曝露は、意識のあるマウスの驚く反応を抑制し、体の動きを誘発すると報告された (NRPB 1991 b; Sienkiewicz 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993)。体の動きを誘発する効果の閾値は、中脳での比エネルギー吸収レベルで200 $\text{J/kg}$  (パルス幅10  $\mu$  s のとき)であった。パルス変調マイクロ波のこれらの効果のメカニズムはまだはっきり決定されていないが、マイクロ波ヒアリング現象に関連していると考えられている。齧歯類の聴覚閾値は人より約1桁低い、すなわち、パルス幅30  $\mu$  s 未満のパルス波で1 - 2  $\text{mJ/kg}$ である。この程度の強さのパルス波は、また、ラットの脳の様々な領域においてストレス及び不安反応に関与している神経レセプタの濃度及び神経伝達物質の代謝にも影響を及ぼすと報告されている。

高周波電磁界の非熱的相互作用についての中心的な問題は、生体組織に測定可能な加熱を生ずるレベルよりずっと低いSAR値の振幅変調電磁界による、インビトロ条件下での生物学的影響の報告を巡るものであった。発端となったのは、2つの別個の研究機関における研究で、6から20HzのELF周波数で振幅変調されたVHF電磁界によってニワトリ脳細胞の表面からCaイオンの小さな、しかし統計的に有意な放出が生じたという報告である (Bawin et al. 1975; Blackman et al. 1979)。その後、この結果を同様の振幅変調電磁界を用いて再現しようとした試みは成功しなかった (Albert et al. 1987)。振幅変調電磁界がCaイオン恒常性に及ぼす影響についての他の研究には、ポジティブな結果とネガティブな結果がある。たとえば、振幅変調電磁界が細胞表面のCaイオン結合に及ぼす影響は、神経芽細胞腫細胞、膵臓細胞、心筋組織、及びネコ脳細胞で観測されたが、培養ラット神経細胞、ニワトリ骨格筋、及びラット脳細胞では観測されなかった (Postow and Swicord 1996)。

振幅変調電磁界は、脳の電気的活動の変化 (Bawin et al.1974)、Tリンパ球の細胞攻撃因子活性の阻害 (Lyle et al.1983)、リンパ球におけるサイクリックAMP非依存キナーゼの活性低下 (Byus et al. 1984)、細胞増殖の必須酵素であるオルニチン・デカルボキシラーゼの細胞内活性の一時的増加 (Byus et al. 1988; Litovitz et al. 1992)などを起こすことも報告されている。また反対に、他のさまざまな細胞システムを用いて様々な細胞機能上の着目点、たとえばリンパ球キャッピング、腫瘍性形質転換、細胞膜の電気的、酵素的性質など、について行われた研究では、何も影響は見出されなかった (Postow and Swicord 1996)。パルス電磁界の発がんへの影響可能性に特に関係するものとしては、Balcer-KubiczekとHarison (1991)の研究がある。それは120Hzでパルス変調された2450MHzのマイクロ波曝露によりC3H/10 T 1/2細胞で腫瘍性形質転換が加速されたという観測である。この効果は電磁界強度に依存し、化学的プロモータであるTPAが細胞培養液中に存在するときのみ起きた。この研究結果は、パルス変調マイクロ波が、形質転換細胞の増殖速度を増加させる働きのある化学的物質と組合わされることによって、共同的な発がん作用を増強する可能性を示唆する。これまでのところ、この結果を再現する試みはなく、人の健康への影響に対するその意義は不明である。

これまでに観察された振幅変調電磁界の生物学的影響についての解釈をさらに複雑にしているのは、応答の“窓”が電力密度と周波数領域の両方に存在するように見えることである。この現象は、電磁界強度と生

物学的影響の大きさととの間の単調な関係を想定した従来からの考え方に異を唱えたものであるが、これを適切に説明するモデルとして承認されたものはない。

全体として、振幅変調電磁界の非熱的影響に関する文献はあまりに錯綜しており、また報告された影響の妥当性の確立も不十分であり、この影響と人の健康影響との関連も不明確であるので、このような情報を人の曝露限度設定の基礎として用いることは不可能である。

### 高周波電磁界の間接的影響

約100kHzから110MHzまでの周波数範囲では、電磁界中で帯電した非接地の金属物体に人が触れることにより、あるいは帯電した人体と接地された金属物体との接触によって、ショック及び熱傷が生ずることがある。接触電流の上限周波数（110MHz）は、これより上の周波数では影響が存在しないからではなく、それに関するデータがないために置かれたものであることに留意すべきである。しかし110MHzはFM放送周波数の上限である。感知から痛みまでの、様々な深刻度の生物学的影響の閾値電流は、ボランティアを用いてコントロール下での実験で測定された（Chatterjee et al.1986; Tenforde and Kaune 1987; Bernhardt 1988）。これらは表3にまとめられている。全般的には、感知及び痛みの閾値電流は100kHzから1MHzまでの周波数範囲でほとんど変化せず、さらに高い110MHzまでの周波数範囲でも著しい変化がなさそうなことが示された。前述の100kHzまでの周波数と同様に、それ以上の周波数での接触電流に関しても、男性、女性及び子供たちの感受性には著しい違いがある。表3のデータは、いろいろな身体の大きさおよび接触電流に対する感受性をもつ人の50%値の範囲を表している。

表3．間接的影響の閾値電流の範囲（子供、成人女性、成人男性を含む）

間接的影響	各周波数における閾値電流（mA）	
	100kHz	1 MHz
接触感知	25 - 40	25 - 40
接触した指の痛み	33 - 55	28 - 50
痛みを伴うショック / 離脱電流閾値	112 - 224	決定されていない
重篤なショック / 呼吸困難	160 - 320	決定されていない

### 生物学的影響と疫学的研究のまとめ(100kHz - 300GHz)

現在利用可能な実験的証拠によれば、安静状態の人が約30分間、1から4W/kgの全身SARを生ずる電磁界に曝露すると、1未満の体温上昇を生ずることが示されている。動物データでは、同じ1から4W/kgまでの範囲に行動的応答の閾値が示されている。4W/kgのSAR値を生ずる強い電磁界への曝露は、体の熱調節能力を破たんさせ、生体組織に有害なレベルの加熱を生ずる可能性がある。齧歯類及び人間以外の霊長類についての多数の実験研究により、体の一部又は全身に1 - 2の温度上昇をもたらす加熱の結果、多様な組織損傷が生じることが示された。生体組織の種類によって熱損傷に対する感受性は大きく異なっているが、最も感受性の高い組織においても不可逆的影響の閾値は、通常的环境条件下で4W/kg以上である。これらのデータが、0.4W/kgという職業的曝露制限の根拠になるが、この値は、高い環境温度、湿度、あるいは身体活動レベルなどの限定条件に対して大きな安全係数をもったものである。

実験データ及び限られた範囲での人についての研究（Michaelson and Elson 1996）の両者から、熱ストレスのある環境及び葉又はアルコールの使用は、体の熱調節能力を低下させることは明らかである。このような条件下では、曝露される人を適切に保護するために安全係数が導入されるべきである。

検出可能な加熱を生じるような高周波電磁界に対する人の応答についてのデータは、ボランティアを用い

たコントロール下での曝露実験、及びレーダー、温熱療法装置、熱シーラーなどの発生源からのマイクロ波曝露を受けた労働者についての疫学的研究から得られている。これらの研究結果は、有害な生物学的影響は生体組織の1℃以上の温度上昇によって引き起こされるという実験研究の結論を完全に支持している。曝露された労働者及び公衆についての疫学的研究では、代表的な曝露環境に関連してみられる大きな健康影響は何も示されなかった。疫学的研究には、曝露評価の質が低いことなど多くの欠陥があるものの、これらの研究からは、典型的な曝露レベルが生殖への有害な結果やがんリスクの増加に関連することを確信させるような証拠は何も引き出されなかった。これは、細胞及び動物モデルについての実験研究の結果とも一致している。すなわち実験研究において、非熱的レベルの高周波電磁界への曝露では催奇形性も発がんへの影響も実証されなかった。

十分な強度のパルス電磁界への曝露は、マイクロ波ヒアリング現象やいろいろな行動的応答など、いくつかの予測可能な影響を生ずる。曝露された労働者及び公衆についての疫学的研究からは限られた情報しか得られておらず、健康影響の証明はできていない。網膜の重大な損傷についての報告は、その後の再現研究が成功しなかったため、正当性に疑問がもたれている。

振幅変調電磁界の生物学的影響についての多数の研究は、大部分は低レベル曝露で行われたが、ポジティブな結果とネガティブな結果が出されている。これらの研究を詳しく分析すると、振幅変調電磁界の影響は、曝露パラメータ、用いる細胞や生体組織の種類、生物学上の着目点によって様々であることがわかる。全般的には、非熱的レベルの振幅変調電磁界への曝露による生物システムへの影響は小さく、人の健康への影響可能性と関連づけることは非常に困難である。この電磁界に対する応答における周波数及び電力密度の窓については確証がない。

電撃及び熱傷は、電磁界中の金属物体と人との接触などにまつわる、高周波電磁界の間接的な悪影響である。100 kHzから110MHz（FM放送波帯の上限）までの周波数範囲において、感知から強い痛みまでの様々な影響を生ずる接触電流の閾値は周波数によって著しくは変化しない。接触電流の感知閾値は、人の身体の大きさによって25mAから40mAの範囲にある。痛みの閾値は約30mAから55mAの範囲であるが、50mAを超えると金属導体との接触部位の生体組織に重篤な熱傷が起こる可能性がある。

## EMF曝露制限のためのガイドライン

### 職業的曝露と公衆の曝露の制限

職業的曝露を受ける集団は、通常は既知の条件下で曝露を受けており、また潜在的リスクに注意を払いかつ適切な予防措置をとるための訓練を受けている成人から成っている。これとは対照的に公衆はあらゆる年齢層、健康状態の人から成り、特に影響を受けやすいグループや個人が含まれる可能性がある。また多くの場合、公衆は電磁界曝露に気付いていない。また当然ながら公衆が曝露を回避したり、最小とするための予防措置をとることは期待できない。これらの考慮に基づいて、職業的曝露を受ける集団よりも公衆に対してより厳しい曝露制限が適用される。

### 基本制限および参考レベル

曝露影響に対する制限は、確立された健康影響を根拠としたもので、これを基本制限と呼ぶ。電磁界曝露の基本制限の記述に用いられる物理量は、電流密度、SAR、電力密度である。これらの物理量のうち、どれが用いられるかは周波数によって異なる。有害な健康影響に対する防護のためには、基本制限を超えないことが必要である。

曝露参考レベルは物理量の計測値との比較のために設けられたもので、この指針に示す全ての参考レベルが満たされれば基本制限が満たされたことになる。また計測値が参考レベルより高い場合でも、これは必ずしも基本制限を超えていることにはならず、基本制限を満たしているかどうかを評価するためにより詳細な分析を必要と判断されるだけである。

## 安全係数についての見解

人口集団および実験動物の電磁界曝露による生物学的影響および健康影響に関する情報は、全ての周波数範囲とあらゆる周波数の変調に対する安全係数を定めるための厳密な根拠とするには不十分である。また適切な曝露尺度に関する知識が不足していることも、適切な安全係数を確実に決められない原因となっている（Repacholi 1998）。高周波電磁界に関する安全係数の開発では、以下の一般的な変動要因が考慮された：

- 苛酷な環境条件（高温など）下および/又は高度な身体活動時の電磁界曝露の影響。
- 虚弱者、高齢者、乳幼児、病人、熱耐性が低下するような投薬を受けている人などにおいては熱感受性が高い可能性があること。

高周波電磁界に対する参考レベルについては、次の要因も考慮に加えた：

- 身体の大きさおよび身体と電磁界の向きとの相対的位置関係の差異による電磁界エネルギー - 吸収の差異。
- 入射電磁界の反射、収束、散乱。これらは高周波エネルギー - の局所的吸収の増強をもたらす可能性がある。

## 基本制限

基本制限には、周波数範囲によって異なる科学的根拠が用いられた：

- 周波数 1 Hz-10MHzの範囲では、神経系機能への影響を防ぐために、電流密度に対する基本制限が設けられる。
- 周波数100kHz-10GHzの範囲では、全身的熱ストレスおよび過度な局所加熱を防ぐために、SARに対する基本制限が設けられる；周波数100kHz - 10MHzの範囲では、電流密度とSARの両者に対して制限が設けられる。
- 周波数10-300GHzの範囲では、体表面または体表面近くの加熱を防ぐために、電力密度に対する基本制限が設けられる。

数Hzから1 kHzの範囲では、100 mA $m^{-2}$ を超える誘導電流密度レベルは、中枢神経系興奮の急性変化および視覚誘発電位の反転などの急性影響の閾値を超えるものである。安全に対する上記の考慮から、4 Hz - 1 kHzの範囲において、職業的曝露は10 mA $m^{-2}$ 以下の電流密度を誘導する電磁界に制限されるべきであること、すなわち安全係数を10とすることが決められた。公衆に対してはこれの5倍の安全係数を適用して、2 mA $m^{-2}$ の基本制限が与えられた。4 Hz以下および1 kHz以上では、神経刺激閾値が上昇することに対応して、誘導電流密度に対する基本制限は漸次高くなる。

10MHzから数GHzの範囲での確立された生物学的影響および健康影響は、1 以上の体温上昇に対する反応と密接に結びついている。このレベルの体温上昇は、適度な環境条件下で約4 Wkg $^{-1}$ の全身SARに約30分間曝露した場合に生じる。従って職業的曝露に対する適切な防護のために、0.4 Wkg $^{-1}$ の全身平均SARが

基本制限として選択された。公衆の曝露に対しては、これの5倍の安全係数を採用して、 $0.08 \text{ Wkg}^{-1}$ の全身平均SARを基本制限とした。

公衆の基本制限を低く抑えたのは、公衆の年齢構成・健康状態は労働者のそれとは多分に異なるという事実を考慮したためである。

低周波では、過渡電流の健康影響に関するデータはほとんど存在していない。従ってICNIRPは、過渡的または非常に短いピークをもつ電磁界によって誘導された電流密度に対する基本制限は瞬時値とみなすべきであり、時間平均すべきではないと勧告している。

1 Hz - 10GHzの周波数範囲での電流密度、全身平均SAR、局所SARに対する基本制限を表4に示す。また10 - 300GHzの周波数での電力密度に対する基本制限を表5に示す。

表4 周波数10GHzまでの時間的に変化する電磁界に対する基本制限

曝露特性	周波数範囲	頭部および体幹の電流密度 ( $\text{mA}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (rms)	全身平均SAR ( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	局所SAR (頭部と体幹) ( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	局所SAR (四肢) ( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
職業的曝露	1 Hzまで	40	-	-	-
	1 - 4 Hz	40/ f	-	-	-
	4 Hz - 1 kHz	10	-	-	-
	1 - 100kHz	f /100	-	-	-
	100kHz - 10MHz	f /100	0.4	10	20
	10MHz - 10GHz	-	0.4	10	20
公衆の曝露	1 Hzまで	8	-	-	-
	1 - 4 Hz	8/ f	-	-	-
	4 Hz - 1 kHz	2	-	-	-
	1 - 100kHz	f/500	-	-	-
	100kHz - 10MHz	f/500	0.08	2	4
	10MHz - 10GHz	-	0.08	2	4

注：

1. f はHzを単位とした周波数
2. 人体は電氣的に不均一なため、電流密度の値は電流方向に垂直な1 cm<sup>2</sup>の断面内の平均値とする。
3. 100 kHzまでの周波数では、ピーク電流密度の値は、rms値に  $\sqrt{2}$  (~1.414)を乗じて得ることができる。パルス幅 $t_p$ のパルス波の場合は、基本制限の数値を適用すべき等価な周波数は  $f = 1/(2t_p)$ として計算する。
4. 100 kHzまでの周波数のパルス磁界については、パルスによって生じる最大の電流密度を、パルスの立ち上がり / 立ち下がり時間および磁束密度の最大変化率から計算できる。この誘導電流密度が基本制限と比較できる。
5. 全てのSAR値は、任意の6分間の平均値である。
6. 局所SARは、ひとかたまりの同質の組織10 gの質量で平均した値とする。この値を最大局所SARの評価に用いる。
7. パルス幅 $t_p$ のパルス波では、基本制限に適用するための等価周波数を $f = 1/(2t_p)$ として計算する。また、周波数0.3 - 10 GHzで頭部に局所曝露を与えるパルス波の場合は、熱弾性膨張によって生じる聴覚効果を制限・回避するために、基本制限の追加事項を勧告する。それは、10 gの組織で平均したSAが、職業的曝露で10 mJkg<sup>-1</sup>を超えないこと、また、公衆の曝露の場合は2 mJkg<sup>-1</sup>を超えないことである。

表5 10 - 300GHzの周波数に対する電力密度に関する基本制限

曝露特性	電力密度 (W m <sup>-2</sup> )
職業的曝露	50
公衆の曝露	10

注：

1. 電力密度は曝露部分の任意の20cm<sup>2</sup>の平均値とする。また周波数が高くなると侵入深さが次第に浅くなることを補正するために、任意の68/f<sup>1.05</sup>分間（fの単位はGHz）の平均値とする。
2. 1 cm<sup>2</sup>毎で平均した空間の最大電力密度は上記の数値の20倍を超えてはならない。

## 参考レベル

数学的モデルや特定周波数での実験研究の結果の外挿によって、基本制限から参考レベルが得られる。これらの値は、曝露される人と電磁界との結合が最大になる条件に対して得られたものであるため、最大限の防護となる。表6および7は、それぞれ職業的曝露と公衆の曝露に対する参考レベルをまとめたものであり、図1および2は参考レベルを図示したものである。参考レベルの値は、曝露された人の全身についての空間的平均値を意味している。ただし、局所曝露に対する基本制限を満たしていることが重要な前提条件となる。

低周波電磁界については、基本制限から電磁界強度を導き出すいくつかの計算および測定方法が開発されてきた。これまで使用されてきた簡略法は、導電率の不均一分布や異方性などの計算に重要な生体組織の要因を考慮に入れていなかった。

参考レベルは、生物学的影響に関するデータおよび電磁界との結合にみられるものと同様の周波数依存性をもつ。

磁界曝露のモデル計算では、人体の導電率を均質で等方性と仮定し、単純な円形の誘導電流ループモデルを適用して、ファラデーの誘導の法則から導き出した下記の式から、様々な臓器や頭などの身体各部の誘導電流を推定する：

$$J = \pi R f \sigma B \quad (4)$$

ここで、Bは磁束密度、Rは誘導電流ループの半径である。比較的複雑なモデルとしては、楕円体モデルを用いて胴体または全身を表わし、体表面の誘導電流密度を推定する（Reilly 1989, 1992）。

簡略化のために均質な導電率0.2 Sm<sup>-1</sup>を仮定すると、50Hz、100 μTの磁束密度は、人体の末梢部分に0.2 ~ 2 mA m<sup>-2</sup>の電流密度を発生させる（CRP 1997）。その他の解析（NAS 1996）によると、60Hz、100 μTの曝露レベルで、平均電流密度は0.28 mA m<sup>-2</sup>、最大電流密度は約2mA m<sup>-2</sup>になる。解剖学的、電氣的に精密なモデルに基づいた実際的な計算（Xi and Stuchly 1994）では、60Hz、100 μTの磁界で最大電流密度が2 mA m<sup>-2</sup>を超えた。しかし生物では細胞の存在が誘導電流および電界の空間分布に影響を与えるため、誘導電流の大きさ（2倍以上になる）および電流分布は、簡略解析で予測されたものとは大きく異なってくる（Stuchly and Xi 1994）。

電界曝露のモデル計算では、曝露条件および身体の大きさ、形、位置によって体表面電荷密度が大きく変

化し、その結果として体内電流分布は変動し易く、不均一になることを考慮に入れる必要がある。周波数が約10MHz未満の正弦波電界の場合、体内誘導電流密度は周波数と共に増加する。誘導電流密度分布は身体断面積に反比例し、首や踵において比較的高い。公衆の曝露についての $5 \text{ kVm}^{-1}$ の曝露レベルは、最悪条件下で、電界ベクトルが体軸に平行な場合に、首や胴体での誘導電流密度が約 $2 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ であることに相当する（ILO 1994; CRP 1997）。しかし實際上、最悪の曝露条件下においても、 $5 \text{ kVm}^{-1}$ によって誘導される電流密度は基本制限を満たすであろう。

基本制限が満たされているかどうか検証するとき、電界および磁界に対する参考レベルは別個に考えるべきであり、加算的に考えるべきではない。なぜならば、防護の目的からは、電界および磁界によって誘導される電流は加算すべきものではないからである。

周波数100kHzまでの職業的曝露の特例として、帯電した導体との接触による間接的有害影響を排除できる状況では、電界の参考レベルは2倍とすることができる。

周波数約10MHz以上の電界および磁界強度の参考レベルは、計算および実験データを利用して、全身SARの基本制限から得られた。最悪の場合、すなわちエネルギー結合が最大になるのは、20MHz～数100MHzの範囲においてである。したがってこの周波数範囲で参考レベルは最小値をとる。磁界強度は、遠方界でのEとHの関係（ $E/H = 377 \text{ オーム}$ ）を使って、電界強度から算出された。近傍界の場合には、SARの周波数特性曲線は妥当でなくなるし、また電界成分と磁界成分の寄与度は別個に考えなければならない。控えめに（安全を考慮して慎重に）見積る場合には、電磁界の曝露レベルを近傍界評価に用いることができる（電界または磁界とのエネルギー結合がSARの基本制限を超えることはあり得ないので）。それほど控えめに評価しない場合には、全身平均および局所SARの基本制限を使用すべきである。

公衆の曝露の参考レベルは、各周波数範囲についてそれぞれの安全係数を用いて、職業的曝露の参考レベルから求められた。これらの安全係数は、それぞれの周波数範囲における固有の適切な影響を基礎に選ばれた。一般的には、安全係数は、全ての周波数範囲において、基本制限で用いた安全係数に従う。以下に述べる参考レベルは、それら安全係数を基本制限の物理量との数学的関係に当てはめて導き出されたものである。

- 1kHzまでの周波数範囲では、電界に対する公衆の曝露の参考レベルは、職業的曝露についての値の1/2である。職業的曝露の参考レベルである50Hzにおける $10 \text{ kVm}^{-1}$ および60Hzにおける $8.3 \text{ kVm}^{-1}$ という値は、あらゆる状況についての接触電流による刺激を防ぐことができるように十分に大きな安全マージンをとっている。公衆の曝露の参考レベルには、曝露された人の90%以上の人に有害な間接的影響が及ぶのを防止するように、この値の1/2が選ばれた。すなわち、50Hzの場合には $5 \text{ kVm}^{-1}$ 、60Hzの場合には $4.2 \text{ kVm}^{-1}$ である。
- 100kHzまでの周波数範囲については、磁界に対する公衆の曝露の参考レベルは、職業的曝露についての値の1/5に設定している。
- 100kHz～10MHzの周波数範囲については、磁界に対する公衆の曝露の参考レベルは、1988年のIRPA指針に示された限界値に比べて高くなった。1988年のIRPA指針では、磁界強度参考レベルは、遠方界での電界と磁界の関係式を使って電界強度参考レベルから算定した。周波数10MHz以下では、感電、熱傷または体表面電荷の影響などのリスクを根拠として、電界に対する職業的曝露が制限されるが、磁界はこれらのリスクにあまり寄与しない。このため、IRPA指針の参考レベルは慎重でありすぎる。
- 10MHz～10GHzの周波数範囲については、電界および磁界に対する公衆の曝露の参考レベルは、職業的曝露についての値の1/2.2である。公衆曝露の基本制限は職業的曝露のその5倍の安全係数をとっているが、2.2はその5の平方根である。物理量が前者は界強度、後者は電力密度という関係で、平方根が使われる。

- 10～300GHzの周波数範囲については、公衆の曝露の参考レベルは、基本制限と同様に、電力密度によって定義され、その値は職業的曝露の値の1/5である。
- 生物学的影響とパルス電磁界のピーク値との関係に関する情報はほとんどないが、周波数が10MHzを超える場合、パルス幅の時間で平均した $S_{eq}$ が参考レベルの1,000倍を超えないこと、すなわち電界、磁界の強度が表6、7、あるいは図1、2に示した電界、磁界の強度の参考レベルの32倍を超えないことを勧める。周波数が約0.3GHz～数GHzで頭部に曝露される場合、熱弾性膨張による聴覚効果を制限または回避するために、パルスの比吸収量を制限しなければならない。この周波数範囲で30 $\mu$ sのパルス幅の場合、この影響の閾値のSA、4～16mJkg<sup>-1</sup>は脳でのSARのピーク値、130～520Wkg<sup>-1</sup>に相当する。図1、2において、100kHz～10MHzの周波数範囲の電界、磁界の強度のピーク値は、100kHzで1.5倍、10MHzで32倍となるように内挿して求められた。
- 表6、7、ならびに図1、2において、職業的曝露と公衆の曝露の参考レベルでは周波数範囲の分割点に違いがある。これは、職業的曝露と公衆の曝露での周波数依存性をほぼ同じにしなが、周波数によって異なる安全係数を用いて公衆の曝露の参考レベルを導き出したためである。

表6：時間的に変化する電界及び磁界への職業的曝露に関する参考レベル（無擾乱rms 値）

周波数範囲	電界強度 (V m <sup>-1</sup> )	磁界強度 (A m <sup>-1</sup> )	磁束密度 ( $\mu$ T)	等価平面波電力密度 $S_{eq}$ (W m <sup>-2</sup> )
1 Hzまで	-	$1.63 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	-
1-8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	-
8-25 Hz	20,000	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^4/f$	-
0.025-0.82 kHz	500/f	20/f	25/f	-
0.82-65 kHz	610	24.4	30.7	-
0.065-1 MHz	610	1.6/f	2.0/f	-
1-10 MHz	610/f	1.6/f	2.0/f	-
10-400 MHz	61	0.16	0.2	10
400-2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	f/40
2-300 GHz	137	0.36	0.45	50

注：

1. fは、周波数範囲の欄に示す単位で表す。
2. 基本制限が満たされ、間接的な結合による有害な影響が排除できれば、電磁界強度が表の値を超えてもよい。
3. 周波数が100 kHz - 10 GHzの場合、 $S_{eq}$ 、 $E^2$ 、 $H^2$ および $B^2$ は、任意の6分間の平均をとる。
4. 100 kHzまでの周波数でのピーク値については、表4の注3を参照。
5. 周波数が100 kHzを越える場合のピーク値については、図1および2を参照。100 kHz - 10 MHzのピーク値は、100 kHzで1.5倍、10 MHzで32倍となるように内挿する。周波数が10MHzを超える場合、パルス幅の時間で平均したピーク等価平面波電力密度が表の $S_{eq}$ の値の1,000倍を超えない、あるいは電界・磁界の強度が表に示したレベルの32倍を超えないようにすることを勧める。周波数が0.3～数GHzの場合、熱弾性膨張による聴覚効果がこの手順によって制限される。
6. 周波数が10GHz以上の場合、 $S_{eq}$ 、 $E^2$ 、 $H^2$ および $B^2$ は、 $68/f^{1.05}$ 分間の平均をとる（fの単位はGHz）。
7. 事実上静電界である1Hz未満の周波数については、電界値を示していない。低インピーダンス源による電撃は、その装置の電気安全手順を定めることで防止される。

表7：時間的に変化する電界及び磁界への公衆の曝露に関する参考レベル（無擾乱rms 値）

周波数範囲	電界強度 ( $V\ m^{-1}$ )	磁界強度 ( $A\ m^{-1}$ )	磁束密度 ( $\mu T$ )	等価平面波電力密度 $S_{eq}$ ( $W\ m^{-2}$ )
1 Hzまで	-	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	
1-8Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	-
0.025-0.8kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0.8-3kHz	$250/f$	5	6.25	-
3-150kHz	87	5	6.25	
0.15-1MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	-
1-10MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	-
10-400MHz	27.5	0.073	0.092	2
400-2000MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2-300GHz	61	0.16	0.20	10

注：

1.  $f$ は、周波数範囲の欄に示す単位で表される。
2. 基本制限が満たされ、間接的な結合による有害な影響が排除できれば、電磁界強度が表の値を超えてもよい。
3. 周波数が100 kHz - 10 GHzの場合、 $S_{eq}$ 、 $E^2$ 、 $H^2$ および $B^2$ は、任意の6分間の平均をとる。
4. 100 kHzまでの周波数でのピーク値については、表4の注3を参照。
5. 周波数が100 kHzを越える場合のピーク値については、図1および2を参照。100 kHz - 10 MHzのピーク値は、100 kHzで1.5倍、10 MHzで32倍となるように内挿する。周波数が10MHzを超える場合、パルス幅の時間で平均したピーク等価平面波電力密度が表の $S_{eq}$ の値の1,000倍を超えない、あるいは電界・磁界の強度が表に示したレベルの32倍を超えないようにすることを勧める。周波数が0.3～数GHzの場合、熱弾性膨張による聴覚効果がこの手順によって制限される。
6. 周波数が10GHz以上の場合、 $S_{eq}$ 、 $E^2$ 、 $H^2$ および $B^2$ は、 $68/f^{1.05}$ 分間の平均をとる（ $f$ の単位はGHz）。事実上静電界である1Hz未満の周波数については、電界値を示していない。電界強度が $25kV\ m^{-1}$ 未満だと、表面電荷を感知して不快感を覚えることはほとんどない。ストレスや不快感を招く火花放電は回避しなければならない。

## 接触電流および誘導電流の参考レベル

FM無線通信周波数帯を含む110MHzまでの周波数について、接触電流に対する参考レベルが示されている。このレベルを超える場合には、感電や熱傷を回避するために注意が喚起されなければならない。点接触についての参考レベルを表8に示す。接触電流による生物学的反応の閾値は、子供と成人女性の場合、成人男性のそれぞれのそれぞれ1/2および2/3であるため、接触電流に対する公衆の曝露の参考レベルは、職業的曝露の値の1/2に設定される。

10～110MHzの周波数範囲について、四肢での誘導電流に関する参考レベルが設けられている（表9参照）。これらは局所SARの基本制限を下回るものである。

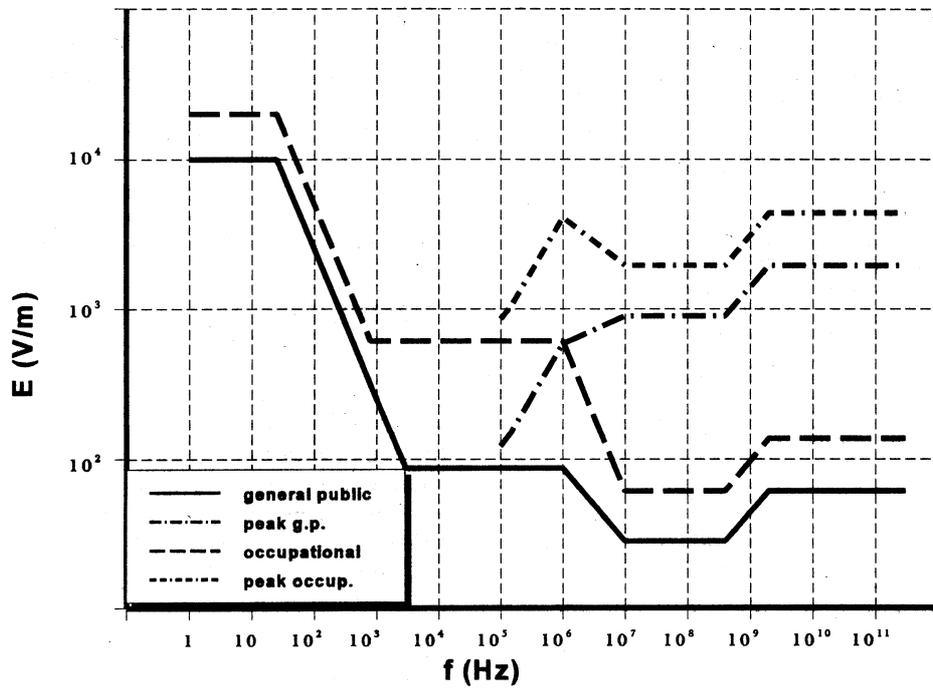


図1 時間的に変動する電界への曝露に対する参考レベル (表6、表7参照)

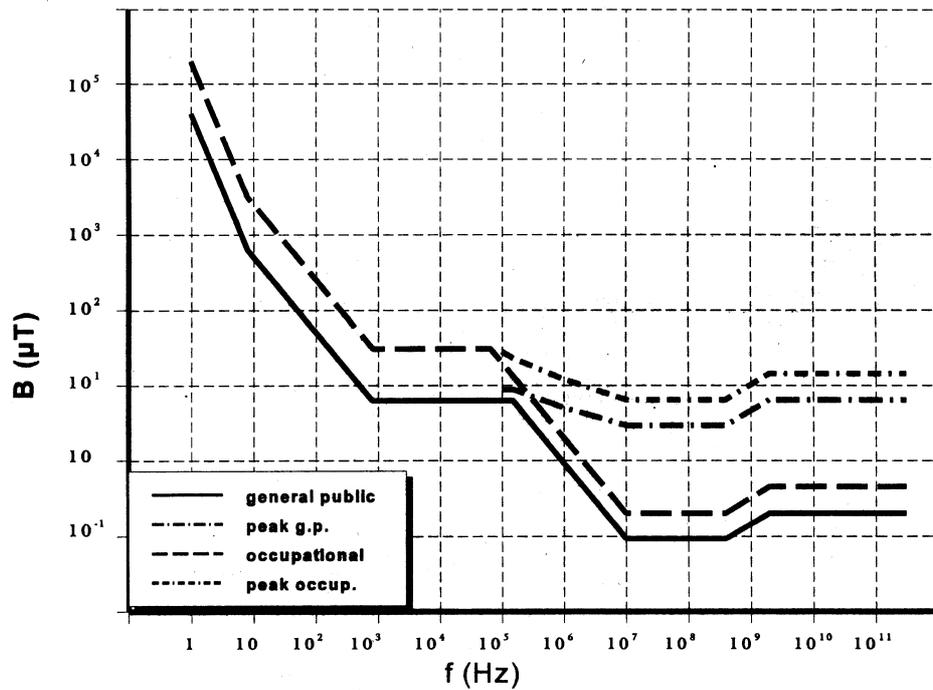


図2 時間的に変動する磁界への曝露に対する参考レベル (表6、表7参照)

表 8 : 導電性の物体からの時間的に変化する接触電流に関する参考レベル

曝露特性	周波数範囲	最大接触電流 ( mA )
職業的曝露	2.5kHzまで	1.0
	2.5kHz-100kHz	0.4f
	100kHz-110MHz	40
公衆の曝露	2.5kHzまで	0.5
	2.5kHz-100kHz	0.2f
	100kHz-110MHz	20

注 : f は周波数 , 単位kHz .

表 9 : 10から110MHzまでの間の周波数で四肢に誘導される電流に関する参考レベル

曝露特性	電流 ( mA )
職業的曝露	100
公衆の曝露	45

注 :

1. 公衆に対する参考レベルは、職業的曝露に対する参考レベルを $\sqrt{5}$ で割ったものに等しい。
2. 四肢において局所SARの基本制限が満たされるようにするため、誘導電流の平方の6分間にわたる時間平均値の平方根が根拠になっている。

## 複数の周波数の電磁界への同時曝露

異なる周波数の電磁界の同時曝露を受ける状況において、これらの影響を考える上で、各曝露は加算的であるかどうか決定することは重要である。加算性は熱的影響と電氣的刺激のそれぞれに分けて調べられ、下記の基本制限を満たさなければならない。下記の式は、実際の曝露状況で、関連した複数の周波数に適用できる。

10MHzまでの周波数が関連する電氣的刺激については、誘導電流密度は次式によって加算される。

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (5)$$

100kHzを超える周波数が関連する熱的影響については、SARおよび電力密度は次式によって加算される。

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{10\text{GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_L} + \sum_{i>10\text{GHz}}^{300\text{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad (6)$$

ここで、

$J_i$ は、周波数*i*で誘導される電流密度。

$J_{L,i}$ は、表4に示した周波数*i*での誘導電流密度の基本制限。

$\text{SAR}_i$ は、周波数 *i* の曝露によって生じるSAR。

SAR<sub>L</sub>は、表4に示したSARの基本制限。  
 S<sub>L</sub>は、表5に示した電力密度の基本制限。  
 S<sub>i</sub>は、周波数iでの電力密度。

この基本制限を実際的に適用するための、電界、磁界の強度の参考レベルに関しては、以下の判断基準に適合しなければならない。

10MHzまでの周波数が関連する誘導電流密度および電氣的刺激の影響については、電界、磁界の強度は次の2つの要件に適合する必要がある。

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{MHz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (7)$$

および

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad (8)$$

ここで、

- E<sub>i</sub>は、周波数iでの電界強度。
- E<sub>L,i</sub>は、表6、7の電界強度の参考レベル。
- H<sub>j</sub>は、周波数jでの磁界強度。
- H<sub>L,j</sub>は、表6、7の磁界強度の参考レベル。
- aは、職業的曝露については610 Vm<sup>-1</sup>、公衆の曝露については87 Vm<sup>-1</sup>。
- bは、職業的曝露については24.4 Am<sup>-1</sup> (30.7 μT)、公衆の曝露については5 Am<sup>-1</sup> (6.25 μT)

定数aおよびbは、電界については1MHz以上、磁界については65kHz以上において用いられる。ここでの加算は誘導電流密度に基づいており、熱的影響を混合してはならない。表6、7に示した、1MHz以上でのE<sub>L,i</sub>および65kHz以上でのH<sub>L,j</sub>を用いると、熱的影響が混合されてしまう。

100kHzを超える周波数が関連する熱的影響については、電界、磁界の強度は次の2つの要件に適合する必要がある。

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left( \frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{j>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (9)$$

および

$$\sum_{j=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left( \frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{j>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \quad (10)$$

ここで、

- E<sub>i</sub>は、周波数iでの電界強度。
- E<sub>L,i</sub>は、表6、7の電界強度の参考レベル。
- H<sub>j</sub>は、周波数jでの磁界強度。
- H<sub>L,j</sub>は、表6、7の磁界強度の参考レベル。
- cは、職業的曝露については610/f Vm<sup>-1</sup>、公衆曝露については87/f Vm<sup>-1</sup> (fの単位はMHz)。
- dは、職業的曝露については1.6/f Am<sup>-1</sup>、公衆曝露については0.73/f (fの単位はMHz)。

四肢に誘導される電流および接触電流については、それぞれ次の要件が適用される。

$$\sum_{k=10MHz}^{110MHz} \left( \frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1, \quad \sum_{n=1Hz}^{110MHz} \frac{I_n}{I_{C,n}} \leq 1 \quad (11)$$

ここで、

$I_k$ は、周波数 $k$ での四肢誘導電流。

$I_{L,k}$ は、四肢誘導電流の参考レベル（表9参照）。

$I_n$ は、周波数 $n$ での接触電流。

$I_{C,n}$ は、周波数 $n$ での接触電流の参考レベル（表8参照）。

上記の加算式は、複数の発生源からの電磁界について、最悪の条件を仮定している。その結果、代表的な曝露状況では、上記の式によって示された曝露レベルより緩やかな制限が、実際には必要かもしれない。

## 防護対策

ICNIRPは、電界および磁界への曝露をもたらしている産業は、本指針を全ての面において確実に満たす責任があることを指摘する。

労働者の防護対策には、工学技術的コントロール、職場管理的コントロール、個人用防護対策、医学的調査などがある（ILO 1994）。職場での曝露が基本制限を超える場合、適切な防護対策を実行しなければならない。第一歩として、可能なかぎり、機器からの電磁界放射を許容レベルまで低減する工学技術的コントロールを実施すべきである。それには、優れた安全設計、また必要に応じて、インターロックなど健康防護の機械的仕組みの使用などがある。

立入りの制限、可聴および可視警報の使用などの職場管理的コントロールが、工学技術的なものと合わせて用いられるべきである。防護衣などの個人用防護対策は、特定の状況では有効であるが、労働者の安全を確保する最後の手段とみなすべきであり、可能な限り、工学技術的コントロールと職場管理的コントロールを優先すべきである。また、高周波数による電撃および熱傷防止の目的で絶縁手袋のような物を使用する場合でも、絶縁材は間接的影響を防止するのみであるので、基本制限を超えてはならない。

公衆の曝露の参考レベルを超える可能性がある場合、防護衣やその他の個人用防護対策を除いて、同様の対策を公衆に適用することができる。また、次のことを防止する規則を設け、実施することも重要である。

- 医用電子設備および機器（心臓ペースメーカーを含む）との電磁氣的干渉
- 電気式爆発装置（起爆装置）の爆発
- 誘導電磁界、接触電流または火花放電によって生じた火花による引火性物質の発火による火災および爆発

**謝辞** 国際放射線防護学会、世界保健機関、国連環境計画、国際労働機関、欧州委員会、ドイツ政府のICNIRPに対するご支援に深く感謝する。

## 文 献

- Adair, E. R.; Adams, B. V.; Akel, G. M. Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior- *Bioelectromagnetics*; 5:13-30; 1984
- Adair, E. R.; Adams, B. W. Microwaves modify thermoregulatory behaviour In squirrel monkey. *Bioelectromagnetics*; 1, 1-20; 1980
- Albert, E. N.; Slaby, F.; Roche, J.; Loftus, J. Effect of amplitude modulated 147 MHz radiofrequency radiation on calcium ion efflux from avian brain tissue. *Rad Res*; 109, 19-27; 1987
- Allen, S. G.; Bernhardt, J. H.; Driscoll, C. M. H.; Grandolfo, M.; Mariutti, G. F.; Matthes, R.; McKinlay, A. F.; Steinmetz, M.; Vecchia, P.; Whillock, M. Proposals for basic restrictions for protection against occupational exposure to electromagnetic non-ionizing radiations. Recommendations of an International Working Group set up under the auspices of the Commission of the European Communities. *Phys. Med.*; VII(2), 77-89; 1991
- American Conference of Government Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH; American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 1996
- Astumian, R. D. Weaver, J. C.; Adair, R. K. Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *PNAS*; 92(9), 3740-3743; 1995
- Balcer-Kubiczek, E. K.; Harrison, G. H. Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120 Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiation Res.*; 126, 65-72; 1991
- Baris, D.; Armstrong, B. G.; Deadman, J.; The riault, G. A mortality study of electrical utility workers in Quebec. *Occ. Environ. Med.*; 53, 25-31 ; 1996
- Barron, C. I.; Baraff, A. A. Medical considerations of exposure to microwaves (radar). *J. Am. Med. Assoc.*; 168(9), 1194-1199; 1958
- Baum A. Mevissen M. Kamino K.; Mohr, U.; Loeschner, W. A. histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 T magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 16, 119-125; 1995
- Bawin, S. M.; Gavalas-Medici, R. J.; Adey, W. R. Reinforcement of transient brain rhythms by amplitude modulated VHF fields. In: *Biological and clinical effects of low frequency magnetic and electric fields* (Llaurado, J. G.; Sances, A.; Battocletti, J. H., eds.). Springfield, IL, Charles C. Thomas, 172-186; 1974
- Bawin, S. M.; Kaczmarek, L. K.; Adey, W. R. Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann. NY Acad. Sci.*; 274, 74-81; 1975
- Beall, C.; Delzell, E.; Cole, P.; Brill, I. Brain tumors among electronics industry workers. *Epidemiology*; 7, 125-130; 1996
- Beniashvili, D. S.; Bilanishvili, V. G.; Menabde, M. Z. The effect of low-frequency electromagnetic fields on the development of experimental mammary tumors. *Vopr. Onkol.*; 37(9-10), 937-941; 1991
- Bergqvist, U. Pregnancy outcome and VDU work - a review. In: *Work with Display Units '92 - Selected Proceedings of the 3rd International Conference WWDO '92*. Berlin Germany 1-4 Sept. 1992 (Luczak, H.; Cakir, A.; An Cakir, G., eds.). Amsterdam. Elsevier, 70-76; 1993
- Bernhardt, J. H. The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 Hz. *Radiat. Environ. Biophys.*; 16, 309-323; 1979
- Bernhardt, J. H. The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effect. *Radiat. Environ. Biophys.*; 27, 1-27; 1988
- Bernhardt, J. H. Basic criteria of ELF-standards worldwide achievement in public and occupational health protection against radiation. *Proceedings of the Eighth International Congress of the International Radiation Protection Association*, 933-936; 1992
- Blackman, C. F.; Elder, J. A.; Weil, C. M.; Benane, S. G.; Eichinger, D. C.; House, D. E. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: effects of modulation frequency and field strength. *Radio Sci.*; 14(65), 93-98; 1979
- Blank, M., ed. *Electromagnetic fields: biological interactions and mechanisms*. Washington, DC; American Chemical Society Press; 1995
- Bracken, M. B.; Belanger, K.; Hellenbrand, K.; Dlugosz, L.; Holford, T. R.; McSharry, J. E.; Adesso, K.; Leaderer, B. Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on

- electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth. *Epidemiology*; 6, 263-270; 1995
- Brent, R. L.; Beckman, D. A.; Landel, C. P. Clinical teratology. *Curr. Opin. Pediatr.*; 5(2), 201-211; 1993
- Byus, C. V.; Lundak, R. L.; Fletcher, R. M.; Adey, W. R. Alterations in protein kinase activity following exposure of cultured human lymphocytes to modulated microwave fields. *Bioelectromagnetics*; 5, 341-351; 1984
- Byus, C. V.; Pieper, S. E.; Adey, W. R. The effects of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis*; 8(10), 1385-1389; 1987
- Byus, C. V.; Kartun, K.; Pieper, S.; Adey, W. R. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res.*; 48(15), 4222-4226; 1988
- Chatterjee, I.; Wu, D.; Gandhi, O. P. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-33, 486-494; 1986
- Chen J. Y.; Gandhi, O. P. Thermal implications of high SAR's in the body extremities at the ANSI-recommended MF-VHF safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-35(6), 435-441; 1988
- Chernoff, N.; Rogers, J. M.; Kavet, R. A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology*; 74(2-3), 91-126; 1992
- Chou, C.-K.; Guy, A. W.; Kunz, L. I.; Johnson, R. B.; Crowley, J. J.; Krupp, J. H. Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics*; 13, 469-496; 1992
- Cohen, B. H.; Lillienfeld, A. M.; Kramer, A. M.; Hyman, L. C. C. Parental factors in Down's syndrome: results of the second Baltimore case control study. In: *Population cytogenetics studies in humans* (Hook, E. B; Porter, I. H., eds.). New York, Academic Press; 301-352; 1977
- Coleman, M. P.; Bell, C. M. J.; Taylor, H. L.; Primic-Zakelj, M. Leukemia and residence near electricity transmission equipment: a case-control study. *Br. J. Cancer*; 60, 793-798; 1989
- Commission on Radiological Protection. Protection against low-frequency electric and magnetic fields in energy supply and use. Recommendation, approved on 16th/17th February 1995. In: *Berichte der Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*, Heft 7. Stuttgart, Fischer; 1997
- Cook, M. R.; Graham, C.; Cohen, H. D.; Gerkovich, M. M. A replication study of human exposure to 60-Hz fields: effects on neurobehavioral measures. *Bioelectromagnetics*; 13(4), 261-285; 1992
- Cridland, N. A. Electromagnetic fields and cancer: a review of relevant cellular studies. Chilton, UK; National Radiological Protection Board; 1993 (report NRPB-R256)
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *Obstet. Gynecol.*; 42(1), 76-79; 1973
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *J. Microwave Power*; 11(2), 166-167; 1976
- D'Andrea, J. A.; DeWitt, J. R.; Gandhi, O. P.; Stensaas, S.; Lords, J. L.; Neilson, H. C. Behavioral and physiological effects of chronic 2450-MHz microwave irradiation of the rat at 0.5 mW/cm<sup>2</sup>. *Bioelectromagnetics*; 7, 45-56; 1986
- De Lorge, J. O.; Ezell, C. S. Observing responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-GHz microwaves. *Bioelectromagnetics*; 1, 183-198; 1980
- Demers, P. A.; Thomas, D. B.; Sternhagen, A.; Thompson, W. D.; Curnen, M. G. M.; Satariano, W.; Austin, D. F.; Issacson, P.; Greenberg, R. S.; Key, C.; Kolonel, L. K.; West, D. W. Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am. J. Epidemiol.*; 132, 775-776; 1991
- Dimbylow, P. J. FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 42, 479-490; 1997
- Dimbylow, P. J.; Mann, S. M. SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 39, 1537-1553; 1994
- DIN VDE 0848, Teil 1, Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Mess- und Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin; 1995
- Dolk, H.; Shaddick, H.; Walls, P.; Grundy, C.; Thakrar, B.; Kleinschmidt, I.; Elliot, P. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part I. Sutton Coldfield Transmitter. *Am. J. Epidemiol.*; 145, 1-9, 1997a
- Dolk, H.; Elliot, P.; Shaddick, G.; Walls, P.; Thakrar, B. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters. *Am. J. Epidemiol.*; 145, 10-

17, 1997b

- Durney, C. H.; Massoudi, H.; Iskander, M. F. Radiofrequency radiation dosimetry handbook, Reg. No. SAM-TR-85-73. U.S. Air Force School of Aerospace, Medical Division, Brooks Air Force Base, Texas; 1985
- Feychting, M.; Ahlbom, A. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 138, 467-481; 1993
- Feychting, M.; Ahlbom, A. Magnetic fields, leukemia, and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology*; 5(5), 501-509; 1994
- Feychting M., Kaune, T.W.; Savitz, D.A.; Ahlbom, A. Estimating exposure in studies on residential magnetic fields and cancer. *Epidemiology*; 7, 220-224; 1996
- Floderus B Persson T Stenlund, C.; Wennberg, A.; Ost, A.; Knave, B. Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. *Cancer Causes and Control*; 4(5), 465-476; 1993
- Frey, A. M. Auditory system response to radiofrequency energy. *Aerospace Med.*; 32, 1140-1142; 1961
- Frey, A. M.; Messenger, R. Human perception of illumination with pulsed ultra-high frequency electromagnetic radiation. *Science*; 181, 356-358; 1973
- Fulton, J. P.; Cobb, S.; Preble, L.; Leone, L.; Forman, E. Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am. J. Epidemiol.*; 111(3), 292-295; 1980
- Gandhi O P Chen, J. Y.; Riazi, A. Current induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-33(8), 757-767; 1986
- Gandhi, O. P. Some numerical methods for dosimetry: extremely low frequencies to microwave frequencies. *Radio Science*; 30(1), 161-177; 1995
- Goodman, R.; Bassett, C. A.; Henderson A S. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science*; 220, 1283-1285; 1983
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Exposure of salivary gland cells to low-frequency electromagnetic fields alters polypeptide synthesis. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 85, 3928-3232; 1988
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 25, 335-355; 1991
- Graham, C.; Cook, M. R.; Cohen, H. D.; Gerkovich, M. M. Dose response study of human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 15(5), 447-463; 1994
- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W.; Gerkovich, M. M.; Cohen, H. D. Nocturnal melatonin levels in human volunteers exposed to intermittent 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 17(4), 263-273; 1996
- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W. Human melatonin during continuous magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*; 18(2), 166-171; 1997
- Grayson, J. K. Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested case-control study. *Am. J. Epidemiol.*; 143(5), 480-486; 1996
- Greene, J. J.; Skowronski, W. J.; Mullins, J. M.; Nardone, R. M. Delineation of electric and magnetic field effects of extremely low frequency electromagnetic radiation on transcription. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 174(2), 742-749; 1991
- Gue'nel, P.; Nicolau, J.; Imbernon, E.; Chevalier, A.; Goldberg, M. Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancers among French electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144(12), 1107-21; 1996
- Gurney, J. G.; Mueller, B. A.; Davis, S.; Schwartz, S. M.; Stevens, R. G.; Kopecky, K. J. Childhood brain tumor occurrence in relation to residential power line configuration, electric heating sources, and electric appliance use. *Am. J. Epidemiol.*; 143, 120-128; 1996
- Guy, A. W.; Lin, J. C.; Kramar, P. O.; Emery, A. Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique, MTT-23*, 492-498; 1975
- Heath, C. W. Jr. Electromagnetic field exposure and cancer: a review of epidemiologic evidence. *Ca. Cancer J. Clin.*; 46(1), 29-44; 1996
- Hocking, B.; Gordon, I. R.; Grain, M. L.; Hatfield, G. E. Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med. J. Australia*; 165, 601-605; 1996
- Hoque, M.; Gandhi, O. P. Temperature distributions in the human leg for VLF-VHF exposures at the ANSI-recommended safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; 35(6), 442-449; 1988
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.*; 66(1), 100-106; 1994

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.*; 70(4), 587-593; 1996
- ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 66, Table B.6, p 189, Oxford; Pergamon; 1994
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York, Institute of Electrical and Electronic Engineers; 1992 (IEEE C95. 1 - 1991)
- International Labour Organisation. Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva, International Labour Office; 1994 (Occupational Safety and Health Series, No. 69)
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Phys.*; 54(1), 115-123; 1988
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. *Health Phys.*; 58(1). 113-121; 1990
- Jokela, K.; Puranen, L.; Gandhi, O. P. Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Phys.*; 66(3), 237-244; 1994
- Kailen, B.; Malmquist, G.; Moritz, U. Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: Is non-ionizing radiation a fetal hazard? *Arch. Environ. Health*; 37, 8 1-85; 1982
- Kamimura, Y.; Sato, K.; Saiga, T.; Amemiya, Y. Effects of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Communications*, E77-B(6), 762-765, 1994
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Diaz Ricci, J. C.; Kirschvink, S. J. Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; Suppl. I , 101-113; 1992a
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Woodford, B. J. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 89, 7683-7687; 1992b
- Kues, H. A.; Hirst, L. W.; Luty, G. A.; D'Anna, S. A.; Dunkelberger, G. R. Effects of 2.45GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics*; 6, 177- 188; 1985
- Kuster, N.; Balzano, Q. Energy absorption mechanisms by biological bodies in the near-field of dipole antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VT-42, 17-23; 1992
- Lacy-Hulbert, A.; Wilkins, R. C.; Hesketh, T. R.; Metcalfe, J. C. No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Rad Res.*; 144(1), 9-17; 1995
- Lai, H.; Singh, N. P. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*; 16(3), 207-210; 1995
- Lai, H.; Singh, N. P. Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiation Biol.*; 69(4). 513-521; 1996
- Larsen, A. I.; Olsen, J.; Svane, O. Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists. *Scand. J. Work Environ. Health*; 17, 324-329; 1991
- Li. D.; Ceckoway, H.; Mueller, B. A. Electric blanket use during pregnancy in relation to the risk of congenital urinary tract anomalies among women with a history of subfertility. *Epidemiology*; 6, 485-489, 1995
- Li, C. Y.; Thériault, G.; Lin, R. S. Epidemiological appraisal of studies of residential exposure to power frequency magnetic fields and adult cancers. *Occup. Environ. Med.*; 53(8). 505-510; 1996
- Liburdy, R. P. Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649, 74-95; 1992
- Lillienfeld, A. M.; Tonascia, J.; Tonascia, S.; Libauer, C. A.; Cauthen, G. M. Foreign service health status study evaluation of health status of foreign service and other employees from selected eastern European posts. Final report. Washington, DC, Department of State; 1978 (Contract No. 6025-619073, NTIS PB-288163)
- Lin, J. C. Microwave auditory effects and applications. Springfield, IL, Charles C. Thomas; 1978
- Lindbohm, M. L.; Hietanen, M.; Kyyroenen, P.; Sallmen, M.; van Nandelstadh, P.; Taskinen, H.; Pekkarinen, M.; Ylikoski, M.; Hemminki, K. Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion. *Am. J. Epidemiol.*; 136(9), 1041-1051; 1992
- Linnet, M. S.; Hatch, E. E.; Kleinerman, R. A.; Robinson, L. L.; Kaune, W. T.; Friedman, D. R.; Severson R.K.; Haines, C. M.; Hartsock, C. T.; Niwa, S.; Wacholder, S.; Tarone, R.E. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng. J. Med.*;

- 337(1), 1-7; 1997
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Mullins, J. M. Effect of coherence time of the applied magnetic field on ornithine decarboxylase activity. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 178(3), 862-865; 1991
- Litovitz, T. A.; Montrose, C. J.; Wang, W. Dose-response implications of the transient nature of electromagnetic-field-induced bioeffects: theoretical hypotheses and predictions. *Bioelectromagnetics*; Suppl. I, 237-246; 1992
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Penafiel, M.; Elson, E. C.; Mullins, J. M. The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*; 14, 395-403; 1993
- Loescher, W.; Mevissen, M.; Lehmacher, W.; Stamm, A. Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. *Cancer Letters*; 71 (1-3), 75-81 ; 1993
- Loescher, W.; Mevissen, M. Linear relationship between flux density and tumor co-promoting effect of prolonging magnetic exposure in a breast cancer model. *Cancer Letters*; 96; 1995
- Loevsund, P.; Oberg, P.; Nilsson, S. E. G. Magneto- and electrophosphenes: a comparative study. *Med. Biol. Eng. Computing*; 18. 758-764; 1980
- London S J Thomas D C Bowman, J. D.; Sobel E Cheng T C Peters J M Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.*; 134(9); 923-937; 1991
- Loomis, D. P.; Savitz, D. A.; Ananth, C. V. Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J. Nat. Cancer Inst.*; 86(12). 921-925; 1994
- Lyle, D. B.; Schechter, P.; Adey, W. R.; Lundak, R. L. Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude-modulated fields. *Bioelectromagnetics*; 4, 281-292; 1983
- Magin, R. L.; Liburdy, R. P.; Persson, B. Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649; 1992
- Matanoski, G. M.; Breyse, P. N.; Elliott, E. A. Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet*; 337, 737; 1991
- McCann, J.; Dietrich, F.; Rafferty, C.; Martin, A. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Res.*; 297, 61-95; 1993
- McDowall, M. Mortality in persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Br. J. Cancer*; 53; 271-279; 1985
- McKinlay, A. F.; Andersen, J. B.; Bernhardt, J. H.; Grandolfo, M.; Hossmann, K.-A.; Mild, K. H.; Swerdlow, A. J.; Van Leeuwen, .; Verschaeve, L.; Veyret, B. Radiotelephones and human health proposal for a European research programme. Report of a European Commission Expert Group. Brussels, European Commission Directorate General XIII; September 1996
- McLean, J.; Stuchly, M. A.; Mitchel, R. E.; Wilkinson, D.; Yang, H.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Schunk, M.; Callary, E.; Morrison, D. Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field: II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics*; 12(5), 273-287; 1991
- Mevissen, M.; Stamm, A.; Buntenkotter, S.; Zwingelberg, R.; Wahnschaffe, U.; Loescher, W. Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7, 12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics*; 14(2). 131-143; 1993
- Mevissen, M.; Kietzmann, M.; Loescher, W. In vivo exposure of rats to weak alternating magnetic field increases ornithine decarboxylase activity in the mammary gland by a similar extent as the carcinogen DMBA. *Cancer Letters*; 90, 207-214; 1995
- Michaelis, J.; Schuez, J.; Meinert, R.; Menger, M.; Grigat, J.-P.; Kaatsch, P.; Kaletsch, U.; Miesner, A.; Stamm, A.; Brinkmann, K.; Karner, H.. Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes and Control*; 8(2), 167-174; 1997
- Michaelson S. M. Biological effects and health hazard of RF and MW energy; fundamentals and overall phenomenology. In: *Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation* (Grandolfo, M.; Michaelson, S. M.; Rindi, A., eds.) New York, Plenum Press; 337-357; 1983
- Michaelson, S. M.; Elson, E. C. Modulated fields and 'window' effects. In: *Biological effects of electromagnetic fields* (Polk, C.; Postow, E., eds.) Boca Raton, FL, CRC Press; 435-533; 1996
- Milham, S., Jr. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New Engl. J. Med.*; 307, 249; 1982
- Miller, A. B.; To, T.; Agnew, D. A; Wall, C.; Green, L. M. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144, 150-160; 1996
- Murphy, J. C.; Kaden, D. A.; Warren, J.; Sivak, A. Power frequency electric and magnetic fields: a

- review of genetic toxicology. *Mutation Res.*; 296, 221-240; 1993
- Myers, A.; Cartwright, R. A.; Bonnell, J. A.; Male, J. C.; Cartwright, S. C. Overhead power lines and childhood cancer. *International Conference of Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology*, London, December 4-5, 126;1985 (IEEE Conf. Publ. No.257)
- National Academy of Science/National Research Council. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields, Washington, DC, National Academy Press; 314; 1996
- National Council on Radiation Protection. Radiofrequency electromagnetic fields. Properties, quantities and units, biophysical interaction, and measurement, Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; 1981 (NCRP Report 67)
- National Council on Radiation Protection. A practical guide to the determination of human exposure to radiofrequency fields. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; 1993 (NCRP Report 119)
- National Radiological Protection Board. Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: m: Radiofrequency and microwave radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; 1991 (Report R-240)
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; 1992 (NRPB Documents 3(1))
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Summary of the views of the Advisory Group on Non-ionising Radiation on epidemiological studies published since its 1992 report. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; 1993 (NRPB Documents 4(5))
- National Radiological Protection Board. Health effects related to the use of visual display units. Report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; 1994a (NRPB Documents 5(2))
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Supplementary report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation of 12 April 1994. *Radiol. Prot. Bull.*; 154, 10-12; 1994b
- Olsen, J. H.; Nielsen, A.; Schulgen, G. Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children. *Danish Cancer Registry, AG-NIR*, 1-26; 1993
- Oak Ridge Associated Universities. Health effects of low-frequency electric and magnetic fields. Oak Ridge, Oak Ridge Associated Universities, TE; 1992 (ORAU 92/F9)
- Oueewart, W. F. Miscarriages among female physical therapists, who report using radio-and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am. J. Epidemiol.*; 138(10), 775-786; 1993
- Phillips, J. L.; Haggren, W.; Thomas, W. J.; Ishida-Jones, T.; Adey, W. R. Magnetic field-induced changes in specific gene transcription. *Biochim. Biophys. Acta*; 1132, 140-144; 1992
- Polk, C.; Postow, E. Biological effects of electromagnetic fields, 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press; 1996
- Polson, M. J. R.; Barker, A. T.; Freeston, I. L. Stimulation of nerve trunks with time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 20, 243-244; 1982
- Postow, E.; Swicord, M. L. Modulated fields and 'window' effects. In: *Handbook of biological effects of electromagnetic fields* (Polk, C.; Postow, E., eds.). Boca Raton, FL, CRC Press; 535-580; 1996
- Preston-Martin, S.; Peters, J. M.; Yu, M. C.; Garabrant: D. H.; Bowman, J. D. Myelogenous leukemia and electric blanket use. *Bioelectromagnetics*; 9, 207-213; 1988
- Preston Martin S Navidi W Thomas D Lee P J Bowman J Pogoda J. Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am. J. Epidemiol.*; 143, 105-119; 1996a
- Preston-Martin, S.; Gurney, J. G.; Pogoda, J. M.; Holly, E. A.; Mueller, B. A. Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters: results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study. *Am. J. Epidemiol.*; 143, 1116-1122; 1996b
- Ramsey, J. D.; Kwon, Y. C. Simplified decision rules for predicting performance loss in the heat. In: *Proceedings Seminar on heat stress indices*. Luxembourg, CEC 337; 1988
- Rannug, A.; Ekstroem, T.; Mild, K. H.; Holmberg, B.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. A study on skin tumour formation in mice with 50 Hz magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 14(4), 573-578; 1993a
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekstroem, T.; Mild, K. H. Rat liver foci study on coexposure with 50 Hz magnetic fields and known carcinogens. *Bioelectromagnetics*; 14(1), 17-27; 1993b
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Mild, K. H. A rat liver foci promotion study with 50-Hz magnetic fields. *Environ. Res.*; 62, 223-229; 1993c
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekstroem, T.; Mild, K. H.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. Intermittent 50 Hz

- magnetic field and skin tumour promotion in Sencar mice. *Carcinogenesis*; 15(2), 153-157; 1994
- Reilly, J. P. Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 3, 101-109; 1989
- Reilly, J. P. *Electrical stimulation and electropathology*. Cambridge, Cambridge University Press; 1992
- Repacholi, M. H. Low-level exposure to radiofrequency fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*; 19: 1-19; 1998.
- Repacholi, M. H.; Stolwijk, J. A. J. Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Austral.*; 9(3), 79-84; 1991
- Repacholi, M. H.; Cardis, E. Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosimetry*; 72: 305-312; 1997.
- Repacholi, M. H.; Basten, A.; Gebiski, V.; Noonan, D.; Finnie, J.; Harris, A. W. Lymphomas in Eu-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Rad. Res.*; 147, 631-640; 1997
- Robinette, C. D.; Silverman, C.; Jablon, S. Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). *Am. J. Epidemiol.*; 112(1), 39-53; 1980
- Rothman, K. J.; Chou, C. K.; Morgan, R.; Balzano, Q.; Guy, A. W.; Funch, D. P.; Preston-Martin, S.; Mandel, J.; Steffens, R.; Carlo, G. Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research\_ *Epidemiology*; 7(3), 291-298; 1996a
- Rothman, K. J.; Loughlin, J. E.; Funch, D. P.; Dreyer, N. A. Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology*; 7(3), 303-305; 1996b
- Ruppe, I.; Hentschel, K.; Eggert, S.; Goltz, S. Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von 50 Hz Magnetfeldern. *Schriftenteihe der Bundesanstalt fuer Arbeitsmedizin. Fb 11.003*; 1995
- Saffer J. D.; Thurston, S. J. Cancer risk and electromagnetic fields. *Nature*; 375, 22-23 1995
- Salford, L. G.; Brun, A.; Eberhardt, J. L. Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 30, 313-318; 1993
- Sander, R.; Brinkmann, J.; Kuehne, B. Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50 Hz electric and magnetic fields. *CIGRE. International Congress on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 1-9 September, CIGRE Paper 36-01* ; 1982
- Santini, R.; Hosni, M.; Deschaux, P.; Packeco, H. B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 9, 105-107; 1988
- Sarkar, S.; Ali, S.; Behari, J. Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutation Res.*; 320, 141-147; 1994
- Savitz, D. A. Overview of epidemiological research on electric and magnetic fields and cancer. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*; 54, 197-204; 1993
- Savitz, D. A.; Ahlbom, A. Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure. In: *Biologic effects of electric and magnetic fields, Vol. 2*. New York, Academic Press; 233-262; 1994
- Savitz, D. A.; Loomis, D. P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 141, 123-134; 1995
- Savitz, D. A.; Wachtel, H.; Barnes, F. A.; John, E. M.; Tvrdik, J. G. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 128, 21-38; 1988
- Savitz, D. A.; John, E. M.; Kleckner, R. C. Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131, 763-773; 1990
- Schnorr, T. M.; Grajewski, B. A.; Hornung, R. W.; Thun, M. J.; Egeland, G. M.; Murray, W. E.; Conover, D. L.; Halperin, W. E. Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. *New Eng. J. Med.*; 324, 727-733; 1991
- Schreiber, G. H.; Swaen, G. M.; Meijers, J. M.; Slangen, J. J.; Sturmans, F. Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study. *Int. J. Epidemiol.*; 22, 9-15; 1993
- Selmaoui, B.; Lambrozo, J.; Touitou, Y. Magnetic fields and pineal function in humans: evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life Sci.*; 58, 1539-1549; 1996
- Selvin, S.; Schulman, J.; Merrill, D. W. Distance and risk measures for the analysis of spatial data: a study of childhood cancers. *Soc. Sci. Med.*; 34, 769-777; 1992
- Severson R. K.; Stevens, R. G.; Kaune, W. T.; Thomas, D. B.; Houser, L.; Davis, S.; Sever L. E. Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am. J.*

- Epidemiol.; 128, 10-20; 1988
- Shaw, G. W.; Croen, L. A. Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic fields exposures: review of epidemiologic studies. *Environ. Health Persp.*; 101, 107-119; 1993
- Shellock, F. G.; Crues, J. V. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T. *Radiology*; 163, 259-262; 1987
- Sienkiewicz, Z. J.; Saunders, R. D.; Kowalczyk, C. I. The biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: II Extremely low frequency electric and magnetic fields. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; 1991 (NRPB R239)
- Sienkiewicz, Z. J.; Cridland, N. A.; Kowalczyk, C. I.; Saunders, R. D. Biological effects of electromagnetic fields and radiations. In: *The review of radio science: 1990-1992* (Stone, W. R.; Hyde, G., eds.); Oxford, Oxford University Press; 737-770; 1993
- Silny, J. The influence threshold of a time-varying magnetic field in the human organism. In: *Biological effects of static and extremely-low-frequency magnetic fields* (Bernhardt, J. H., ed.). Munich, MMV Medizin Verlag; 105-112; 1986
- Sliney, D.; Wolbarsht, M. Safety with laser and other optical sources. London, Plenum Press; 1980
- Sobel, E.; Davanipour, Z. EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. *Neurology*; 47, 1594-1600; 1996
- Stern, S.; Margolin, L.; Weiss, B.; Lu, S. T.; Michaelson, S. M. Microwaves: effects on thermoregulatory behavior in rats. *Science*; 206, 1198-1201; 1979
- Stevens, R. G. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. *Am. J. Epidemiol.*; 125, 556-561; 1987
- Stevens, R. G.; Davis, S.; Thomas, D. B.; Anderson, L. E.; Wilson, B. W. Electric power, pineal function and the risk of breast cancer. *The FASEB Journal*; 6, 853-860; 1992
- Stevens, R. G.; Davis, S. The melatonin hypothesis: electric power and breast cancer. *Environ. Health Persp.*; 104(Suppl. 1), 135-140; 1996
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills. *Br. J. Ind. Med.*; 43, 339-349; 1986
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on vigilance and concentration. *Br. J. Ind. Med.*; 44, 111-118; 1987
- Stuchly, M. A.; McLean, J. R. N.; Burnett, R.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Mitchel, R. E. J. Modification of tumor promotion in the mouse skin by exposure to an alternating magnetic field. *Cancer Letters*; 65, 1-7; 1992
- Stuchly, M. A.; Xi, W. Modelling induced currents in biological cells exposed to low frequency magnetic fields. *Phys. Med. Biol.*; 39, 1319-1330; 1994
- Szmigielski, S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Science of the Total Environment*; 180, 9-17; 1996
- Szmigielski, S.; Szudinski, A.; Pietraszek, A.; Bielec, M.; Wrembel, J. K. Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 3, 179-191; 1982
- Szmigielski, S.; Bielec, M.; Lipski, S.; Sokolska, G. Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. In: *Modern bioelectricity* (Marino, A. A., ed.). New York, Marcel Dekker; 861-925; 1988
- Tenforde, T. S. Biological interactions and human health effects of extremely-low-frequency magnetic fields. In: *Extremely low-frequency electromagnetic fields: the question of cancer*. (Anderson, L. E.; Stevens, R. G.; Wilson, B. W. eds.). Columbia, OH, Battelle Press; 291-315; 1990
- Tenforde, T. S. Biological interactions of extremely-low-frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 25, 1-17; 1991
- Tenforde, T. S. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Ann. Rev. Public Health*; 13, 173-196; 1992
- Tenforde, T. S. Cellular and molecular pathways of extremely-low-frequency electromagnetic field interactions with living systems. In: *Electricity and magnetism in biology and medicine* (Blank, M., ed.). San Francisco, San Francisco Press; 1-8; 1993
- Tenforde, T. S. Interaction of ELF magnetic fields with living systems. In: *Biological effects of electromagnetic fields*, (Polk, C.; Postow, E., eds.). Boca Raton, FL, CRC Press; 185-230; 1996
- Tenforde, T. S.; Kaune, W. T. Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.*; 53(6), 585-606; 1987
- Theriault, G.; Goldberg, M.; Miller, A. B.; Armstrong, B.; Guenel, P.; Deadman, J.; Imbernon, E.; To, T.; Chevalier, A.; Cyr, D.; Wall, C. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic

- fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France 1970-1989. *Am. J. Epidemiol.*; 139, 550-572; 1994
- Tofani, S.; d'Amore, G.; Fiandino, G.; Benedetto, A.; Gandhi, O. P.; Chen, J. Y. Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, EC-37*, 96; 1995
- Tomenius, L. 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county. *Bioelectromagnetics*; 7, 191-207; 1986
- Tynes, T.; Andersen, A.; Langmark, F. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 136, 81-88; 1992
- Tynes, T.; Haldorsen, T. Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 145, 219-226; 1997
- Ueno, S. (ed.). *Biological effects of magnetic and electromagnetic fields*. New York, Plenum Press; 1996
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/ International Radiation Protection Association. *Extremely low frequency (ELF) fields*. Geneva, World Health Organization; *Environmental Health Criteria 35*; 1984
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/ International Radiation Protection Association. *Magnetic fields*. Geneva, World Health Organization; *Environmental Health Criteria 69*; 1987
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/ International Radiation Protection Association. *Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)*. Geneva, World Health Organization; *Environmental Health Criteria 137*; 1993
- Vena, J. E.; Graham, S.; Hellman, R.; Swanson, M.; Brasure, J. Use of electric blankets and risk of postmenopausal breast cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 134, 180-185; 1991
- Vena, J. E.; Freudenheim, J. L.; Marshall, J. R.; Laughlin, R.; Swanson, M.; Graham, S. Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets. *Am. J. Epidemiol.*; 140, 974-979; 1994
- Verkasalo, P. K. Magnetic fields and leukemia: risk for adults living next to power lines. *Scand. J. Work Environ. Health*; 22 (Suppl. 2), 7-55; 1996
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Hongisto, M. Y.; Valjus, J. E.; Jorvinen, P. J.; Heikkilo, K. V.; Koskenvuo, M. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br. Med. J.*; 307, 895-899; 1993
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Kaprio, J.; Heikkila, K. V.; Koskenvuo, M. Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: nationwide cohort study. *Br. Med. J.*; 313, 1047-1051; 1996
- Verreault, R.; Weiss, N. S.; Hollenbach, K. A.; Strader, C. H.; Daling, J. R. Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131, 759-762; 1990
- Walleczek, J. Electromagnetic field effects on cells of the immune system: the role of calcium signalling. *The FASEB Journal*; 6, 3177-3185; 1992
- Walleczek, J.; Liburdy, R. P. Nonthermal 60 Hz sinusoidal magnetic-field exposure enhances  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  uptake in rat thymocytes: dependence on mitogen activation. *FEBS Letters*; 271(1-2), 157-160; 1990
- Wertheimer, N.; Leeper, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 109(3), 273-284; 1979
- Williams, G. M. Comment on "Acute low intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells" by Henry Lai and Narendra P. Singh. *Bioelectromagnetics*; 17, 165; 1996
- Xi, W.; Stuchly, M. A. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*; 9, 127-134; 1994

## 付 録

### 用語解説

吸収	電波の伝搬における、そのエネルギーの散逸、すなわそのエネルギーの他の形態（熱など）への変換による電波の減衰。
非熱的影響	電磁エネルギーが人体に与える影響のうち、熱が関与しない全ての影響。
血液脳関門	血液によって運ばれる物質が他の組織へは容易に浸透するのに、なぜ脳には浸透しないのかを説明するために考案された機能概念。この「関門」は、あたかも脳血管内壁を覆う連続する膜であるかのように機能する。実際には、脳の毛細血管内皮細胞が血管から脳組織への物質の浸透に対してほぼ連続的な関門を形成している。
コンダクタンス	抵抗の逆数。単位はジーメンズ（S）。
導電率	電界強度を掛けると伝導電流密度が得られるスカラーまたはベクトル量。抵抗率の逆数である。単位はジーメンズ/メートル（ $\text{Sm}^{-1}$ ）。
連続波	その連続する振動が定常状態において同一である波。
電流密度	面積分値が、その表面を通過する総電流量に等しくなるようなベクトル。線状の導体における平均電流密度は、導体の断面積で割った電流に等しい。単位はアンペア/平方メートル（ $\text{Am}^{-2}$ ）。
侵入深度	良導体の境界面に入射した平面波電磁界の場合、電磁波の強度が入射面での値の $1/e$ 、すなわち約37%に減少する深さを、波の侵入深度という。
誘電定数	誘電率を参照。
ドシメトリ	電磁界に曝露した人または動物における体内電界強度または誘導電流密度、エネルギー吸収量、または比エネルギー吸収率分布を測定、または計算によって決定すること。
電界強度	電界中のある点で、静止した正の単位電荷に働く力（E）。単位はボルト/メートル（ $\text{Vm}^{-1}$ ）。
電磁エネルギー	電磁界がもつエネルギー。単位はジュール（J）。
ELF	超低周波。300Hz以下の周波数。
EMF	電界、磁界、および電磁界。
遠方界	放射アンテナからの距離が放射されたEMFの波長より遠方の領域の電磁界。遠方界では、電界E、磁界H、および電磁界の伝搬方向の3者が互いに垂直に交わり、電磁界のパターンの形は発生源からの距離によらず一定となる。
周波数	1秒間に電磁波が作る正弦波のサイクル数。通常、単位はヘルツ（Hz）。
電波インピーダンス	ある点での、進行方向に垂直な磁界を表す複素数（ベクトル）に対する進行方向に垂直な電界を表す複素数（ベクトル）の比。単位はオーム（ $\Omega$ ）。
磁界強度	磁束密度と共に用いて、空間内の各点の磁界を表わす軸方向ベクトル量、Hで表す。単位はアンペア/メートル（ $\text{Am}^{-1}$ ）。
磁束密度	磁界中で運動する電荷に働く力をもたらず磁界のベクトル量B。単位はテスラ（T）。
透磁率	これに磁界強度を掛けると磁束密度になる。単位はヘンリー/メートル（ $\text{Hm}^{-1}$ ）。等方性媒質の場合はスカラー量、異方性媒質の場合はベクトル量である。
マイクロ波	送受信に導波管および関連する空洞技術を利用することが可能な程度に短い波長の電磁放射。注記：この用語は300MHz～300GHzの周波数を持つ放射線または電磁界を示す。
近傍界	放射アンテナからの距離が放射されるEMFの波長より短い領域。注記：磁界強度に空間のインピーダンスを掛けたものが電界強度に等しくならない。またアンテナからの距離が波長の1/10以内の所では、アンテナがこの距離に比べて小さければ、磁界強度は距離の二乗または三乗に反比例する。

非電離放射線(NIR)	電磁波スペクトルの中で、物質中にイオンを生成させるのに十分なエネルギーを持たない放射線および電磁界の総称。光子当たりのエネルギーが約12eV以下、波長が100nm以上、周波数が $3 \times 10^{15}$ Hz以下であることで特徴づけられる。
職業的曝露	就労中に個人が経験する全てのEMF曝露。
誘電率	等方性媒質が電荷間の引力または反発力に与える影響を定義する媒質の定数。単位はファラッド/メートル ( $Fm^{-1}$ )。比誘電率は、物質または媒体の誘電率を真空の誘電率で割ったものである。
平面波	電界および磁界ベクトルが波の伝搬方向に対して垂直な平面内にある電磁波で、磁界強度に空間のインピーダンスを掛けたものは電界強度と等しい。
電力密度	電波の伝搬において、伝搬方向に対して垂直な単位面積を通過する電力。単位はワット/平方メートル ( $Wm^{-2}$ )。
ポインティングベクトル	ある表面を通過するこのベクトルの束は、この面を通過して運ばれる瞬間電力を表わす。電力密度とも呼ばれる。
公衆曝露	職業的曝露、医療行為上の曝露を除く、公衆が経験する全てのEMFの曝露。
無線周波数 (RF)	遠隔通信に使用できる電磁波の周波数。(注記：本書では、無線周波数は、300Hz ~ 300GHzの範囲の周波数を指す。)
共振	波の周波数が媒質の固有周波数に近づく、あるいは一致したとき起こる振幅の変化。周波数 (MHz) が約 $114/L$ 、(Lは身長 (m)) の時に共振が起こり、その時に電磁波の全身吸収は、値が最も高くなる。
実効値 (rms)	特定の電氣的効果は、その周期関数の2乗平均(1周期以上についての)の平方根に比例する。この値は実効値として知られている。またこの値は、先ず関数を2乗し(square)、得られた2乗値を平均し(mean)、その平均値の平方根を求める(root)ことによって得られるために、root-mean-square値と呼ぶ。
比エネルギー吸収量 (SA)	生物組織の単位質量当たりの吸収エネルギーで、ジュール/キログラム ( $Jkg^{-1}$ ) で表される。比エネルギー吸収量は、比エネルギー吸収率の時間積分値である。
比エネルギー吸収率 (SAR)	エネルギーが生体組織に吸収される時間率で、ワット/キログラム ( $Wkg^{-1}$ ) で表す。SARは、周波数が約100kHz以上の場合に広く用いられる曝露量測定尺度である
波長	周期的な波において、伝搬方向で連続する、同じ位相の2点の距離。