

健康文化

## 非電離放射線の防護指針と安全について

宇田 達彦

非電離放射線は原子・分子の電離を起こさない電磁波に分類される。これは低周波から高周波まで広帯域に亘り、静磁場と光まで広く扱うこともある。電磁波は電界と磁界を交互に発生させながら伝播し、導体に電流を生じる。こうした作用は生体組織にも生じ、過度な曝露は刺激や熱作用を引き起こす。非電離放射線の生体への影響は細胞遺伝子の損傷という観点からは起こり難い。従って、電離放射線のような曝露の蓄積性は無いと考えられている。ところが、送電線沿いでの小児白血病、携帯電話使用による脳腫瘍、電気工員で乳がんなどとの関連性が疑われた。小児白血病では疫学的な調査で有意差が見られたとの報告もあり、リスクを否定できないとしている。発がんとの関連で多くの生物学的研究がなされ、現状では有意な関連性は認められないが継続的な調査が必要とされている。他に、電磁過敏症による不定愁訴の例がある。このように電磁界の健康影響が社会的な関心事となる背景には、電気を使う文明社会になってから歴史的にそれほど時間が経っていないことや、近年の急激な普及などが考えられる。例えば、Maxwellによって電磁波の存在が予測され、Hertzの火花放電で実験的に確かめられたのは150年ほど前である。名古屋で初めて電灯が付いたのが明治22年というから、私たちが身近で電気と接してから100年程度しか経っていない。その後、電気は光源のみならずエネルギー源として社会に浸透し、今やIT情報、教育、医療、交通、電子金融取引など、いつでも、どこでも意識すること無く使っている世界規模のコンピューター・ネットワーク社会、ユビキタス社会を形成するに至っている。これは社会システムの大幅な変質をもたらし、電子機器トラブル、情報操作、犯罪など社会にもたらす負の影響も見られる。以下では、電磁環境の健康影響に鑑み国際的に検討されている防護指針と安全に関わる話題を述べる。なお筆者は、将来のエネルギー源として期待される高温プラズマ磁場閉じ込め方式による核融合開発実験施設において、時間的・統計的に変動する電磁環境の安全管理の立場から調査を行ってきた<sup>7,8)</sup>。

## 電磁波の防護指針

非電離放射線としての電磁波は図1に示すように周波数で表すとG( $10^9$ )HzからT( $10^{12}$ )Hzまで及ぶ。さらに周波数が高くなると光の領域となりHzよりはm単位の波長で表すことが多い。電離放射線はエネルギー単位であるeVで表し、それらの関係はほぼ $1\text{eV}=1.24 \cdot \text{m}=242\text{THz}$ となる。

健康影響を考えた場合、非電離放射線も過度な曝露は避けるべきである。非電離放射線防護の国際的な検討はWHO (World Health

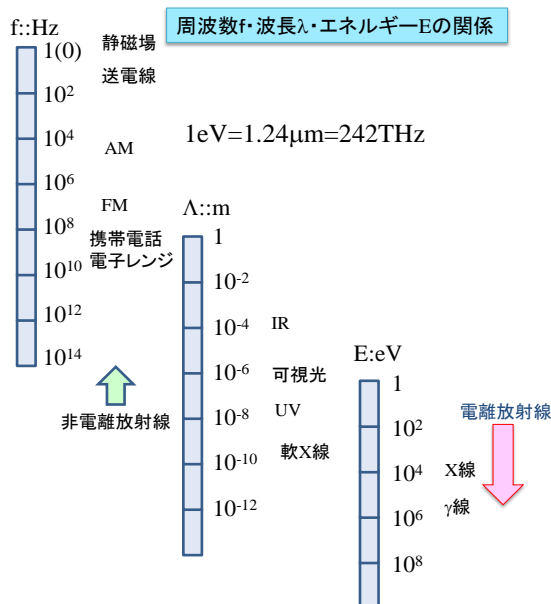


図1 電磁波の周波数、波長およびエネルギーの関係

Organization) 世界保健機関で健康影響についての情報の収集や国際基準の設定を、ICNIRP (International Commission on Non- Ionizing Radiation Protection) 国際非電離放射線防護委員会で健康影響に関する指導と助言及び規制指針の作成を<sup>1-3)</sup>、IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)のICES(International Committee on Electromagnetic Safety)では電磁安全に関する工業規格の策定が行われている。下表にICNIRPとICESの設立経緯を示す。なお国内では、総務省が電波管理や電波防護指針策定を<sup>4)</sup>、厚生労働省が医療用器具(MRI)や労働環境を、経済産業省が電気工業、電力(送電線)の規制検討を行っている。例えば1960年代の500kV送電線に伴う静電誘導が生体に及ぼす影響の研究、通産省の架空電線路の基準「電力設備に関する技術基準を定める省令」などがある。

### 国際機関における検討の経緯と実状

周波数帯域0~300GHzを対象とした安全指針が1998年にICNIRPから公表された。その後検討が進み、2009年には静磁場に対する指針を、2010年には1Hz~100kHzの低周波に対する新たな指針が公表された。以下にICNIRPの防護指針に基づいて静磁場および時間的に変動する電磁界の概要を述べる。

表1 ICNIRP と ICES の活動経緯

ICNIRP	
1973	国際放射線防護学会 IRPA 会議で非電離セッション会議開催
1977	IRPA 会議で INIRC (International Non-Ionizing Radiation Committee) を設立
1992	IRPA から独立
1996	4つの常設委員会 (疫学、生物学、物理・工学、光放射) で活動開始
ICES	
1960	米国で放射線安全規格策定プロジェクト承認
2001	ICES の名称
2005	新 SCC39 (Standards Coordinating Committee) 改称 TC34 製品規格 TC95 安全規格 5つの小委員会 技術・手順・測定器・計算, 用語・単位, 安全レベル:0-3kHz 安全レベル:3kHz-300GHz, 電気爆発装置審議

### 静磁場について

静磁場の生体影響に関わる多くの研究があつて、例えば地磁気 (30-50・T, T: テスラ) レベルの弱い磁場で魚類、鳥類などの生体内に存在する強磁性物質が作用する回遊や帰巢行動がいわれているが割り切れないことも多いようである<sup>5)</sup>。中程度の磁場では、静脈血流中の脱酸素化赤血球の常磁性物質として牽引作用がある。1 T 以上の強い磁場では反磁性物質の赤血球など非球形細胞の配向が知られている。心臓や脳の極弱い磁場は超伝導量子干渉素子 SQUID による計測で検知できる。一方、8 T 程の高磁場では反磁性物質である水に凹みができるモーゼ効果が見られる。近年の超伝導技術の進展により、20 T を超える磁場強度の核磁気共鳴装置 MRI があり、高磁場下での研究が進んでいる。高磁場下での研究が進めば、生体影響も更に明確になるであろう。2009 年改訂の静磁場に対する指針レベルを旧指針値と併せて表 2 に示す。この値は心臓ペースメーカー使用者等には適用されず、0.5mT を超える恐れのある区域では立ち入り規制すべきであろう。人体への直接的な作用ではないが、磁気カード、計算機ディスクなどは 1mT から障害を受ける恐れがあり、磁束密度が 3 mT を超える場合は飛行体に対する注意が必要である。

		旧基準	ICNIRP(2009)
従事者	1日就労時間平均値	200 mT	---
	全身曝露の上限値	2 T	頭部胴体 2 T
	手足曝露の上限値	5 T	8 T
公衆	1日平均値	40 mT	全ての部位の 上限 400 mT

ただし、この指針値は磁場勾配や繰り返しパルス磁場環境には適用され

ない。神経刺激を受ける磁場勾配に対する上限値はパルス磁場によって誘起される電界ピーク値と磁束密度変化について30V/mまたは400T/sとする報告がある。

### 時間的に変動する電磁界について

時間的に変化する電磁界に対する生体作用は、図2に示すように10-100kHzより低い周波数では体内誘導電界による刺激作用が、さらに高い周波数では熱作用が支配的となる。うち、刺激作用の閾値は周波数に依存するが、熱作用

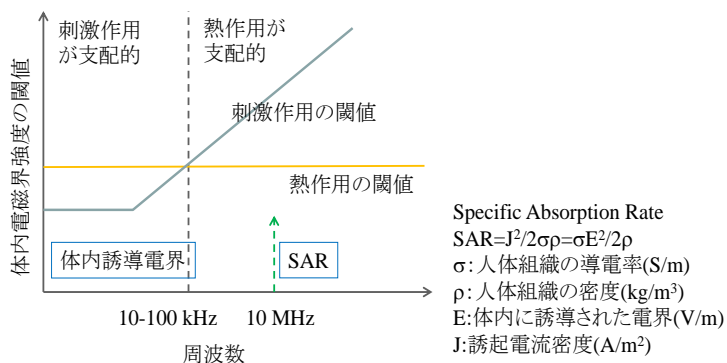


図2 電磁界の生体作用閾値

の閾値は周波数に依存せず一定である。周波数10MHz以下の低周波電磁界の生体作用に基づく指針値は、低周波電磁界では神経や組織に変化をおよぼす刺激作用が、高周波電磁界では熱的な作用に根拠がおかれている。そして、低周波電磁界では組織に誘導される電流密度(mA/m<sup>2</sup>)を、高周波電磁界では熱的な作用

として比吸収率(SAR)を曝露指標に用いている。

基本制限レベル(閾値)は人体に感じるレベルの刺激作用と生命維持に必要なエネルギー(W/kg)である基礎代謝量から決め

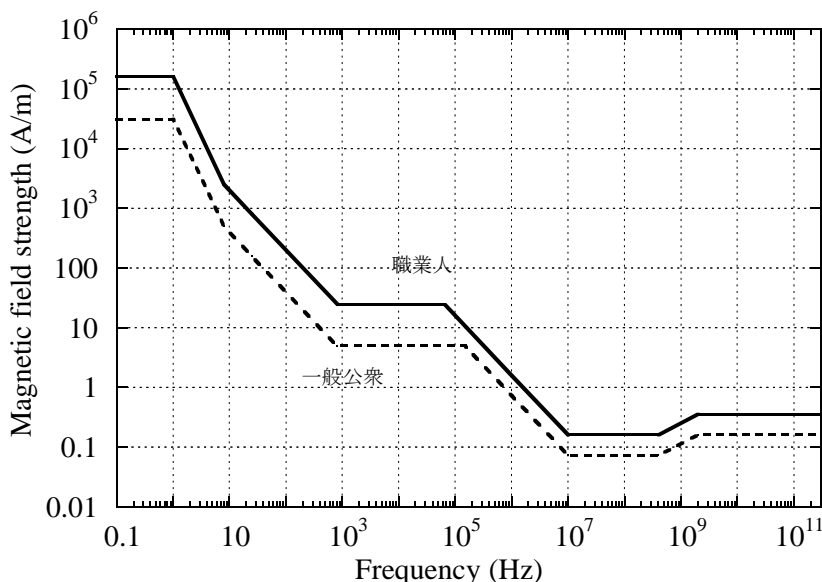


図3 電磁波の周波数と磁界強度指針レベル ICNIRP1998

る熱作用からなる。管理環境レベルは上記基本制限値の1/10とし、一般環境レベルは管理環境レベルの1/5と規定している。なお、実用的な曝露量評価レベルとして参考レベルを定めていて、これが基本制限レベルを超えることはない。

表3 極低周波電磁環境に対するICNIRP2010参考レベル(rms)

	周波数(kHz)	電界V/m	磁界	
			A/m	μT
職業人	0.025-0.3	500/f	800 (20/f)	1000 (25/f)
公衆	0.050-0.4	250/f	160 (4/f)	200 (5/f)
()内はICNIRP1998指針で周波数0.025-0.8 kHz				

図3にICNIRP1998指針に基づく従事者と公衆に対する磁界強度参考レベルを示す。電界強度についても同様に周波数に依存した指針値が出されている。電磁界に対する新指針ICNIRP2010では1Hz-100kHzの低周波領域について改定されている。社会的関心の高い極低周波の新参考レベルを1998年版と併せて表3に示す。商用電源で扱われる極低周波領域の磁界強度は1998年の指針では周波数に反比例していたが、新指針では50Hzも60Hzも同じ値で、この周波数帯域では旧基準より高く、緩和されている。新基準では基本制限レベルを与える上で根拠とした現象の変更を行い、電界曝露が与える可能性のある生物学的作用、表面電荷作用による知覚から受ける不快感としたが、健康に有害な影響を指すものではない。磁気閃光(視野周辺部に点滅する微弱な光)を重要視し、中枢神経系(Central Nervous System)組織(含む網膜)に及ぼす作用や、頭部および胴体の全組織の末梢神経系(Peripheral Nervous System)への刺激を適用するようになっている。

高周波については、発熱作用が支配的であることは先に述べた通りである。一般的に基礎代謝量は体重とは逆比例の関係が調べられており、人間では1-3 W/kgとされている<sup>6)</sup>。非電離放射線には電離放射線被ばくのような晩発影響はないとの前提で、曝露による人体影響の閾値は全身平均SARで評価機関により1-8 W/kgと見積もられているので、安全側にとって0.4 W/kgが電波安全基準の指針値に採用されている。低周波数磁界の長期的な健康影響については科学的に証拠が不十分なため、指針の根拠として採用していない。低周波数電磁界によるがん等へのリスクについては、主な国際機関によって次のように評価されている。

[1] IARC (国際がん研究機関)

商用周波数の磁界による小児白血病の疫学研究の評価では、リスクが2倍ほど増加しているが、動物実験から居住環境レベルで生物学的な影響はない。総合的評価から、商用周波数磁界は「グループ2B」発ガンの疑いがある(Possibly

carcinogenic to human)に分類される。商用周波数電界は小児白血病との間に疫学研究では関連性が見られる限定的な証拠が見られ、動物実験結果では十分な証拠ではないが、「グループ3」ヒトに対する発がん性について分類できない。

#### [2] WHO (世界保健機関)

商用周波数 50/60Hz から 100kHz までの磁界曝露を含む急性影響については、健康に対して悪影響を生じうる生物学的影響が認められる。それ故に、ばく露限度が必要だが、ガイドラインを守ることで適切な防護が図れるとしている。慢性影響について、低強度 (0.3~0.4  $\mu$ T 以上) の商用周波数磁界への曝露が健康リスクを生じることが示唆する科学的根拠は、小児白血病のリスク上昇についての疫学研究に基づいている。ただし、実験的証拠やメカニズムに関する証拠は支持するものでない。故に、因果関係があると考えられる程の強い証拠はないが、関心を残すほどには強いとし、曝露ガイドラインレベルを下げることは推奨されない。

#### 電磁環境の測定例

筆者は磁場閉じ込め核融合実験施設の特異な電磁環境を監視測定し、そこでの課題を安全管理の視点から検討してきた。すなわち、磁場核融合実験施設では大型の超伝導磁場発生装置によるプラズマ閉じ込めと、プラズマ加熱のために水素イオンおよび電子共鳴周波数の電磁波を用いている。この様な高温プラズマ加熱実験に際してバースト的な電磁環境が生じるため、そうした統計的に変動する電磁環境の計測監視手法および従事者の安全管理対策について検討した。これに関する詳細は学術誌に特集として2回発行されているので参考にしたい<sup>7,8)</sup>。こうした施設では併せて低周波数電磁界も存在するが、これに関連して通常時の人体曝露レベルを知るため、協力者に携帯型磁界モニター (EMDEX-II) を1日携帯してもらって調査した例を紹介する。このとき電源装置近くで職務したときを除き、職場を含み一般生活環境で規制レベルを超える例は見られていない。日常生活では、通勤で交通機関を利用した時、家庭電化製品を使用した場合にレベルの上昇が見られた。特異な例として、家庭で電気カーペットの上にモニターを置いた場合に比較的高い磁界を示した。これらは単に傾向を述べたに過ぎないので、周波数や測定位置などを系統的に評価して防護基準と比較する必要がある。

#### おわりに

現代社会において電気と無縁ではあり得ず、様々な電子機器に囲われて生活

している。強度の差はあれ広範囲な周波数帯域の電磁界に曝されている。ここでは言及していないが、送電線のみならず工業・商業施設では大小様々な電力設備を有する。また、そこから発生する電磁界の強度、頻度、形態も統計的に変動することが考えられる。発生源を特定しやすい事業所などでは電磁環境を念頭に置いた防護規制や安全管理を行うことが可能であろう。しかし、一般公衆は通常そうしたことを意識しないし、情報にも疎い。唐突に、生活の中でも電磁場発生源があり健康影響があるかも知れないと言われたら戸惑うばかりであるのも想像に難くない。通常の社会生活の中では発生者または製品を提供する事業者が防護基準値以下であることを調査し、公衆の不安感を除くことが求められるであろう。一方新しい技術開発がなされた場合、その技術に内在する不確定さが引き起こす異常事象がないこと、将来に向けても健康影響が全くないことを証明することは容易でないと思われる。利害関係者が共にリスク社会を生きていること、リスクを上回る便益ならびに公平性に対する共通認識を持つことが大切なのではないだろうか。

#### 参考文献

- [1] ICNIRP Guidelines, “Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz),” Health Physics 74, 494 (1998)
- [2] ICNIRP Guidelines, “Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields,” Health Physics 96, 504 (2009)
- [3] ICNIRP Guidelines, “Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (1Hz to 100kHz)” , Health Physics 99, 818 (2010)
- [4] 電気通信技術審議会答申第38号, 電波利用における人体の防護指針 (総務省, 1990)
- [5] 志賀健: 磁場の生体への影響・その後 (てらぺいあ, 2004)
- [6] 藤原修: 電磁波のバイオエフェクト, 電子情報通信学会誌, 75, 519 (1992)
- [7] 小特集: 電場磁場の問題と磁場核融合実験施設, プラズマ・核融合学会誌, 75, 17 (1999)
- [8] 小特集: 磁場閉じ込め核融合施設における電磁環境と安全指針, プラズマ・核融合学会誌, 88, 418 (2012)

(核融合科学研究所及び総合研究大学院大学 名誉教授)