

小特集

電場・磁場環境の問題と磁場核融合実験施設

6. 電磁環境の防護指針

多 氣 昌 生

(東京都立大学大学院工学研究科)

Health Protection Guidelines for Electromagnetic Field Exposures

TAKI Masao

Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan University, Hachioji 192-0397, Japan

(Received 16 November 1998)

Abstract

In order to protect human health from excessive exposure to electromagnetic fields safety guidelines have been established by national and international organizations. The International Commission on Nonionization Radiation Protection is one of these organizations, whose guidelines are briefly regarded as typical. The activities on this issue in various countries are reviewed. Recent situations and the problems still unsolved are also discussed.

Keywords:

nonionizing radiation, electromagnetic field, safety, guideline

6.1 はじめに

人体が電磁場に強く曝露されると、健康に悪影響を及ぼす恐れがある。このため、電磁場の人体防護指針が各国で勧告されている。電磁場の生体作用については十分に理解されていない問題が残されているのは事実であるが、一方では50年以上にわたって電磁場の生体影響に関する研究が行われており、整理された知識も多い。防護指針は、これらの知識に基づいている。

本稿では、電磁場の防護指針の代表例として、1994年および1998年に公表された国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)による防護指針を概説して防護指針の基本的な考え方を紹介するとともに、防護指針についての各国の取り組み、および防護指針を巡る最近の動向について述べる。

6.2 ICNIRP 防護指針

6.2.1 ICNIRP

放射線防護関連学会の国際的な連合組織である国際放射線防護学会(IRPA)は、1974年に、静電磁場、ラジオ波、マイクロ波を含む紫外線より長波長の電磁放射、すなわち非電離放射線の防護問題を扱うための作業部会を設置した。この作業部会は1977年に国際非電離放射線委員会(INIRC/IRPA)となった。その後、1992年にINIRCは発展的に解消し、IRPAから独立した委員会として国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)が発足した。これは、防護指針の勧告を中立の立場で行うことができるようにするために、電離放射線における国際放射線防護委員会(ICRP)と同様の役割を非電離放射線防護において果たすことを意図したものであった。ICNIRPは世界保健機関(WHO)および国際労働機関(ILO)に対する非電離放射線分野での正式に承認された非政府機関であり、非電離放射線防護に携わるすべての国際組織と密接に連

author's e-mail: taki@eei.metro-u.ac.jp

携し、共同作業を行っている。また、母体である IRPA およびその構成組織である各国内学会と密接に協力して活動している。

ICNIRP は、1994年に静磁場の防護指針を公表し、1998年に 300 GHz 以下の変動電磁場に対する防護指針を公表した。これら2つの防護指針により、静電場を除き、300 GHz 以下のすべての電磁場スペクトルをカバーする防護指針が示されたことになる。ここで、静電場が除外された理由は、帯電現象により人体が静電場を日常的に経験しており、健康への影響として懸念されるようなデータがないこと、それより強い静電場は空気中の放電現象により実際にはほとんど遭遇することがないためである。

6.2.2 静磁場の防護指針[1]

静磁場のガイドラインは、公衆の曝露と職場の曝露のすべてを対象とする。ただし、医療目的の意図的な曝露は対象としない。指針値は2段階で構成され、公衆への曝露は職場の曝露より厳しく制限される。職場で曝露を受ける母集団は、成人であり、管理された環境で曝露され、曝露を承知して必要な安全対策をとることが期待できる。これに対し、公衆の曝露の母集団は、健康状態や年齢が様々であり、曝露に対する知識を期待できず、また終日、一生涯にわたって長期間曝露を受けることもあり得る。このような違いを考慮して2段階の指針値が設けられている。

防護指針値を Table 1 に示す。職場環境では、指針値は曝露時間により異なる。短時間の曝露の場合、天井値 2 T を超えてはならない。ただし、四肢に限り天井値は緩和され、5 T まで許容される。労働時間内（8時間）の時間平均値に対する指針値は 200 mT である。一方、公衆の場合は連続的な曝露についての指針値のみ規定されており、24時間平均値が 40 mT 以下でなければならない。ただし、一時的な曝露については、管理された条件の場合に限り、職場での指針値まで許容される。なお、心臓ペースメーカーなどの体内埋め込み補綴機器や、磁性体を体内に装着している人には、これらの指針値は適用されない。

この防護指針値の根拠は必ずしも健康影響のしきい値に基づくものではない。2 T 以下の静磁場が健康に悪影響及ぼす可能性を示す証拠が存在しないことが職場環境での天井値の根拠になっている。また、磁場中で人体が動いたときや血流によって生じる誘導電流密度の粗い推定値に基づき、労働時間内の時間平均値 200 mT が導かれている。なお、公衆に対する数値は、200 mT に対し

Table 1: 静磁場に関する ICNIRP 指針(1994)

曝露条件		磁束密度
職業的曝露	労働時間帯（時間加重平均）	200 mT
公衆の曝露	天井値（四肢以外）	2 T
	天井値（四肢のみ）	5 T
	連続曝露	40 mT

て、さらに付加的な安全率5を用いて導かれている。

6.2.3 300 GHz 以下の変動電磁場の防護指針[2]

この防護指針は、基本制限 (Basic Restrictions) と参考レベル (Reference Levels) から構成され、職業的曝露と公衆の曝露について、それぞれ2段階の指針値が与えられている。

基本制限は、低周波では刺激作用に関係する誘導電流密度、高周波では熱作用に関係する比吸収率 (Specific Absorption Rate, SAR) などの、生体影響と密接に関係する曝露評価量で表現された指針値である。これらの評価量に関して、健康に影響する可能性のある現象のしきい値を推定し、そのしきい値を基礎に適切な安全率を設けて基本制限値が定められる。基本制限は、電磁場の人体への曝露による健康影響を防ぐために守るべき制限条件である。しかし、誘導電流密度や SAR は人体の組織内部での電磁気量であり、計測器を用いて測定できない。このため、基本制限そのものを評価することは実用的には困難である。

参考レベルは実測可能な評価量である電場強度や磁場強度、または電力密度などで表され、電磁環境の管理に容易に適用できる指針値である。すなわち基本制限に示された条件を、人体に入射する電磁場強度に換算したものである。ただし、人体内部に生じる誘導電流や SAR は入射電磁場の大きさだけでは決まらず、電磁場の空間的な分布や身体に対する電磁場ベクトルの向きなどの様々な曝露条件に依存する。したがって、この換算を行うためには曝露条件を仮定する必要がある。参考レベルの導出では、最悪となる曝露条件を想定するので、一般には過剰に安全側の数値となる。曝露条件として想定されるのは、全身が均一に最も人体と結合の強い偏波面で電磁場に曝される条件である。したがって、近傍の電磁波源によって不均一な曝露を受ける場合など、この条件と異なる場合は、局所的に参考レベルを超えても必ずしも基本制限を超えるとはいえないことに注意が必要である。参考レベルを超える電磁場に曝露される場合には、基本制限に基づき、詳細に評価を行わなければならない。ICNIRP 指針の基本制限を Tables 2, 3 に示す。また、

Table 2 ICNIRP 指針 (1998) の 10 GHz 以下の周波数における基本制限

曝露特性	周波数範囲	頭部および体幹の電流密度 (mA m ⁻²) (rms)	全身平均 SAR (W kg ⁻¹)	局所 SAR (頭部と体幹) (W kg ⁻¹)	局所 SAR (四肢) (W kg ⁻¹)
職業的曝露	1 Hz まで	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/100	0.4	10	20
	100 MHz-10 GHz	-	0.4	10	20
公衆の曝露	1 Hz まで	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/500	0.08	2	4
	100 MHz-10 GHz	-	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 cm² 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周波数は $f = 1/(2 t_p)$ として計算する。
4. 100 kHz までの周波数のパルス磁場については、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、ひとつ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は $f = 1/(2 t_p)$ 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⁻¹ を超えないこと、また、公衆の曝露の場合は 2 mJkg⁻¹ を超えないことである。

Table 3 ICNIRP 指針 (1998) の 10-300 GHz の周波数の電力密度に関する基本制限

曝露特性	電力密度 (W m ⁻²)
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 20 cm² 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 $68/f^{1.05}$ 分間 (f の単位は GHz) の平均値とする。
2. 1 cm² 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。

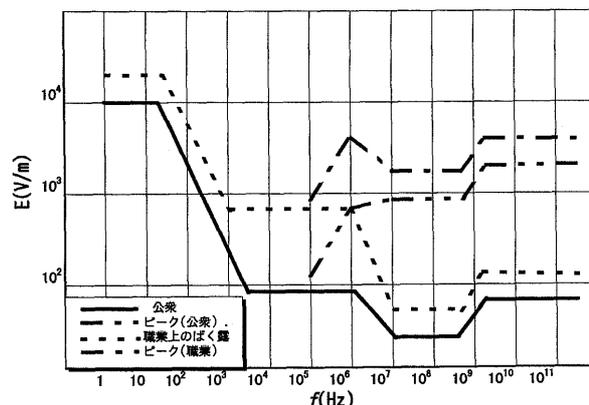


Fig. 1 ICNIRP 指針 (1998) の電場についての参考レベル

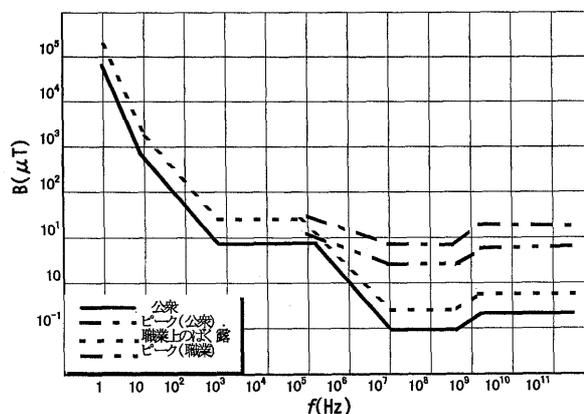


Fig. 2 ICNIRP 指針 (1998) の磁場についての参考レベル

電場強度および磁場強度に関する参考レベルを Figs. 1, 2 に示す。

電磁場と人体の直接的な結合のほかに、金属物体を介して電磁場と人体が間接的に結合して、接触電流による電撃や熱傷が生じることがある。このような作用は金属物体が介在する作用であるために、電磁場の間接的作用と呼ぶ。間接的作用は、電磁場の大きさだけでなく、金属物体の大きさや形状、接地条件に依存する。また、人体との接触面積にも依存する。間接的作用は条件の特定ができず、また影響も主に電撃の感知が中心なので、基本制限のように必要条件として守ることを義務づける性格ではない。そこで、電撃の感知を避けるための参考レベルが与えられている。

6.3 各国の取り組み

我が国を含む世界各国で電磁場防護問題への取り組みが行われている。欧州ではICNIRP指針を欧州勧告として採用する方向で動いており、細部の違いは残るにしても、ICNIRP指針に沿った防護指針が用いられる見通しである。しかし、ICNIRP指針の考え方に異論がないわけではない。英国では英国放射線防護評議会(National Radiological Protection Board, NRPB)が1993年に防護指針を示しており[3]、法的な強制力はないものの、この防護指針に基づいた電磁環境の管理が広く実施されている。この防護指針では、ICNIRP指針のように曝露母集団を公衆と職業的曝露の2段階に区別せず、両者に同一の指針値を適用している。

我が国には、10 kHz以上の高周波領域の防護指針として、郵政省電気通信技術審議会の答申の防護指針[4,5]がある。この防護指針に基づく電磁環境の評価が通信放送施設の免許時に義務づけられることが法制化され、1999年10月から施行される。この防護指針は我が国独自のものである。しかし、基本的にはICNIRP指針と同等の内容であり、また1997年の答申で、ICNIRP指針に整合する方向に一部改訂されている[5]。

商用周波数(50/60 Hz)を含む低周波領域については、我が国では通商産業省令の中に送電線下の電場強度に関する電気設備技術基準として、「特別高圧の架空電線路は、地表上1 mでの電場強度が3 kV/m以下となるように施設しなければならない」という基準[6]がある。この基準は、電撃の防止を目的としたもので、曝露を制限するための人体防護指針とは性格が異なる。また、この基準には磁場についての規定はない。

最近、産業衛生学会が、職業的曝露を対象に、300 GHz以下のすべての電磁場についての防護指針を示した[7]。この防護指針は、高周波領域では郵政省の答申の指針、低周波領域ではICNIRP指針にほぼ整合している。

米国では、米国電気電子学会(IEEE)が3 kHz-300 GHzの周波数範囲の電波防護指針を1991年にIEEE規格として示し、翌年米国規格協会(ANSI)がANSI規格として承認した防護指針ANSI/IEEE C95.1-1992 [8]が米軍および民間で広く使われている。このANSI規格は任意規格である。

連邦政府関連機関では、連邦通信委員会(FCC)が、放送・通信施設の免許時に人体への影響を考慮した電磁場影響評価を義務づける法規制を行っている。1985年にこの制度を開始した当初FCCは、1982年制定のANSI規格を利用していた。しかし、1997年にFCCはANSI規格に

代えて、議会に対する助言機関で連邦政府関連機関である米国放射線防護計測審議会(NCRP)の答申を基礎にした独自の防護指針[9]を採用した。NCRPの防護指針は内容的にやや古いために、現在ワーキンググループを作り、新たな防護指針の検討が始まっている。

米国では、高周波領域の防護指針については世界に先駆け1950年代から取り組んできた。一方、低周波領域では、現在も連邦レベルの防護指針は示されていない。IEEE、NCRPのいずれにも低周波領域を担当する部がある。しかし、米国では低周波領域の指針値の科学的な根拠についての合意が得られていない。このため、低周波領域の指針値が示される見通しが立っていない。

米国では電磁場防護の問題に早くから独自に取り組んできた歴史がある。このためICNIRP指針を受け入れる動きもない。

6.4 防護指針を巡る動向

防護指針は科学的な根拠に基づいて構築されており、人体防護の目的で積極的に活用されるべきものである。しかしながら、ICNIRP指針にも述べられているように、電磁場の生体影響に関しては確立されていない問題が残されていることも事実である。

特に関心が持たれているのは、低周波磁場への曝露による非刺激作用の可能性である。疫学研究は居住環境レベルの弱い商用周波数磁場曝露により小児白血病のリスクが高くなる可能性を示唆している。一方、生物学的な実験ではこれを裏付ける結果が得られていない。

また、高周波電磁場に関しても、振幅変調波やパルス変調波が非熱的な作用を及ぼす可能性を示唆する研究があり、変調波を使用する携帯電話などの機器の人体安全性について一層の研究が必要とされている。

これらの問題を解決するために、世界保健機関(WHO)では、1996年から10ヶ年計画で静電磁場、低周波から高周波までの全電磁場スペクトルについて、科学的データの集大成を行う国際EMF計画を実施している。このプロジェクトにおいて、電磁場の発がん性の評価をはじめ、生体影響の解明をめざしたさまざまな活動が行われている。

このプロジェクトにより電磁場防護問題に格段の進歩が期待されるが、それでも生体影響に関する不確実性が完全になくなることは期待できない。しかし、仮にあったとしても環境レベルの電磁場が大きなりスクではないことは確かである。国際EMF計画では電磁場リスク問題に関する文書の刊行も予定しており、電磁場防護問題

のような不確実な環境因子に対する防護の考え方の議論が深められることが期待される。弱い電磁場のように、影響の存在自体の不確かな因子を対象とする場合に、確立された生体影響のしきい値を基礎にした方式以外の防護方式、例えば「慎重な回避」などによる人体防護を採用する必要があるかどうかは今後十分に議論されるべき問題である。

6.5 むすび

電磁場に対する人体防護指針では、公衆による環境レベルの電磁場に対する不安に回答を与えることが優先され、弱い曝露の影響に重点が置かれてきた。しかし、曝露を受ける絶対数が少ないとはいえ、職場環境での強い曝露についての科学的なデータの蓄積が今後の重要な課題である。特に、静磁場についての ICNIRP 指針での根拠は十分とはいえず、科学的根拠をより明確にするための検討が必要である。職場環境で今後生じるかもしれない、強い電磁場曝露のリスク評価が今後の課題である。

参考文献

- [1] ICNIRP, Health Physics **66**, 100 (1994).
- [2] ICNIRP, Health Physics **74**, 494 (1998).
- [3] NRPB, Documents of the NRPB **4** (5) 1 (1993).
- [4] 電気通信技術審議会答申：諮問第38号「電波利用における人体の防護指針」(1990).
- [5] 電気通信技術審議会答申：諮問第89号「電波利用における人体防護の在り方」(1997).
- [6] 電気書院編, 平成9年改正版 電気設備技術基準とその解釈 (1997).
- [7] 許容濃度等の勧告, 電場, 磁場および電磁場 (300 GHz 以下) の許容基準の提案理由, 産業衛生学雑誌, 第40巻第4号 (1998).
- [8] IEEE Standards Coordinating Committee, IEEE C95.1-1991(1992).
- [9] FCC, Report and Order, ET Docket 93-62, FCC 96-326, 61 Federal Register 41006 (1996).