

## 特集：電磁界と健康

### 電磁界の人体曝露に関する防護指針と規制

多氣昌生<sup>1)</sup>, 渡辺聡一<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 首都大学東京大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻

<sup>2)</sup> 独立行政法人 情報通信研究機構

### Review of Guidelines on Exposure Limits of Electromagnetic Fields and Regulations Based on the Guidelines

Masao TAKI<sup>1)</sup>, Soichi WATANABE<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Metropolitan University

<sup>2)</sup> National Institute of Information and Communications Technology

#### 抄録

電磁界の防護指針は、健康リスク評価に基づき、人体の健康に悪影響を及ぼす可能性のある曝露条件を同定し、必要な安全率を設定したものであり、人体を保護するために守るべき指針である。防護指針は、電磁界環境の安全性を評価、管理するための指針としてさまざまに活用されている。防護指針は、人体の健康を保護するために電磁界の利用を制限するだけでなく、生活に不可欠な電磁界をどの程度まで許容してよいか、というガイドラインでもある。米国では、1950年代からマイクロ波の生体影響を中心に多くの研究が行われてきた。この成果に基づいて、早くから安全規格が作られた。欧州では、放射線防護の拡張として電磁界などの非電離放射に対する防護が行われてきた。これらの防護指針は、確立された生体影響の閾値に基づき、適切な安全率を考慮して構成されている。このような科学的根拠に立つガイドラインを用いて、電磁界環境を管理することが推奨されている。一方で、短期的な曝露でも観察される確立された現象以外の、長期的な曝露による健康影響に対する探索は長い間行われてきた。しかし、そのような現象は確立されていない。予防的な対策として、現在のガイドラインに比べて非常に低い恣意的な制限値を用いた規制がなされる場合があるが、それが安全性の限度値であるかのような誤解を招く恐れがあるので、規制としてそのような制限値を用いることは望ましくない。

キーワード： 電磁界, 防護指針, 安全性, 規制, ICNIRP

#### Abstract

The guidelines on human exposure to electromagnetic fields have been developed to provide guidance to identify the safety of exposure to electromagnetic fields. They provide limits of exposure with a relevant safety factors as well as the acceptable levels of exposures to electromagnetic fields which are unavoidable in the daily lives with various technologies based on electromagnetic energy. Safety standards were first developed in the Unites States in 1950's through investigations for the safety of military use of high power microwaves. The recognition of thermal effect provided basis for the exposure limit of microwave exposure. In Europe the exposure guidelines have been developed as a part of radiation protection. These guidelines have been science based ones with rationale based on established health effects. The recent recommendation by WHO supported the use of these science-based guidelines. On the other hand, there has been discussion on possible chronic effects of electromagnetic fields with much lower or no threshold. The use of so-called "precautionary measures" are not recommended in regulation of electromagnetic fields as it can undermine the current science-based guidelines and mislead people to feel unsafe of the fields exceeding the levels arbitrarily set for this measure.

**Keywords:** electromagnetic fields, exposure, guidelines, ICNIRP

〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1

1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397, Japan.

## I はじめに

防護指針は、健康リスク評価に基づき、人体の健康に悪影響を及ぼす可能性のある曝露条件を同定し、必要な安全率を設定したものであり、人体を保護するために守るべき指針である。防護指針は、電磁界環境の安全性を評価、管理するための指針としてさまざまに活用されている。また、防護指針を守るように、強制力のある規制も行われている。

電磁界を利用した技術は我々の生活に欠かすことができない。防護指針は、人体の健康を保護するために電磁界の利用を制限するだけでなく、生活に不可欠な電磁界をどの程度まで許容してよいか、というガイドラインでもある。

本稿では、電磁界曝露に対する人体の防護指針と、それに基づく規制について述べる。この分野については、複雑な歴史がある。その経緯を振り返ることで、電磁界問題が現在もさまざまな論争の対象になっている事情が洞察される。ここでは、米国と欧州における防護指針への取り組みと規制の歴史を中心に、防護指針の辿ってきた経緯を振り返る。

防護指針の具体的内容については、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) のガイドラインを例に、その基本的な考え方を紹介する。なお、個々の防護指針の詳細については、必要に応じて原典を参照していただくようお願いしたい。

## II 米国での取り組み

### ①研究の発端と最初の防護規格

この問題に古くから関心をもっていた米国の取り組みから紹介する。電磁界の健康影響については、最初にマイクロ波が問題になった。第2次世界大戦で、無線通信技術が急激に発展し、重要な役割を果たした。軍用の無線機器の中でも、艦船に搭載された強力なレーダーや通信設備は、乗組員の接近する機会が多く、そこから放射される電波が乗組員の健康に及ぼす影響の有無を明らかにする必要があった。真偽は異論はあるものの、レーダーからの電波の直撃を受けた42歳の男性が死亡したという、マクローリン医師による報告はよく知られている。このような経緯を経て、米国の陸海空軍は、1950年代にマイクロ波の安全性についての系統的な研究を開始した<sup>1)</sup>。

研究の結果、マイクロ波の照射が、1℃程度の深部体温上昇を生じるレベルになると、健康への悪影響が現れること、その照射レベルがおおよそ100mW/cm<sup>2</sup>であることがわかった。この成果に基づき、1966年に、最初のアメリカ合衆国規格協会 (USA Standards Institute) 安全規格 USA Std C95.1-1966が刊行された<sup>2)</sup>。この規格は、10MHz から100GHz の電波を対象とし、曝露の制限値を10mW/cm<sup>2</sup>と定めた<sup>3)</sup>。これは、推定された閾値100mW/cm<sup>2</sup>に対して安全係数を10としたものである。この規格は、軍人の防護を想定しており、職業者のみを対象としたものであっ

た。

### ②非熱作用

この規格値の根拠は、マイクロ波の影響が熱によるものだという理解にあった。しかし、マイクロ波による熱作用の閾値以下の曝露でも、「非熱作用」による影響が存在するのではないか、という議論があった。

1957年に、モスクワの米国大使館に向かって、意図的と見られる微弱なマイクロ波が照射されていること、また当時のソビエト連邦では、マイクロ波が人体にさまざまな影響を及ぼすことを示す研究が多数あって、安全基準が10μW/cm<sup>2</sup>という、米国の安全規格の1000分の1の低いレベルに設定されていることがわかった。このため、米国でもチンパンジーを用いて、マイクロ波による非熱作用の研究が実施された。結局、熱作用の閾値レベル以下の曝露では影響が見られず、上記の安全規格の制限値が妥当であると結論された<sup>1)</sup>。

### ③分析的アプローチと観察的アプローチ

熱作用によるメカニズムは、分析的アプローチと呼ばれる研究方法により確立された。このアプローチでは、まず再現性のある影響が見られる強い曝露で実験を行い、閾値を明らかにする。さらに、実験条件を考察して、影響が生じるメカニズムを推定し、その閾値に対して適切な安全率を考慮して制限値を定める。制限値は、急性の、しかし可逆的な（曝露を停止すれば健康には支障のない）影響の閾値から、安全率を考慮して導かれる。ここでは、可逆的な変化を生じる曝露が長期間に及ぶと非可逆的に健康を害する可能性があり、一方、可逆的な変化が生じない曝露レベルであれば、曝露が長期間にわたり継続しても、悪影響は生じないであろう、と仮定されている。

分析的アプローチと対比されるのが、観察的アプローチと呼ばれる方法である。このアプローチでは、曝露を受ける集団と曝露を受けない集団の健康調査のデータに基づき、何らかの影響の可能性のある曝露レベルの下限を指定し、それに基づいて指針値を定める。しかし、このような調査では、実際の曝露の大きさが正確に評価されないこと、また曝露と疾病の因果関係が明らかでないという問題点がある。すなわち、電磁界の曝露と疾病に相関があったとしても、真に電磁界の曝露が原因であるかどうかは確かでない。また、必要以上に厳しい制限が導かれるという問題がある。旧ソビエト連邦の規制値はこのようなアプローチによって導かれたといわれている。

### ④電磁界ドシメトリ

米国規格協会の規格である C95.1は、5年経過後に見直しが行われ、その後3年程度で改訂される。1974年に、C95.1-1966の最初の改訂が行われた。この改訂で、周波数範囲が300kHz以上100GHz以下に拡張されたが、制限値は10mW/cm<sup>2</sup>のままであった。しかし、同じ頃に、電波の散乱についての理論的研究が進歩し、長径が波長の0.4倍程度の偏長な物体に電波が照射されると、大きな電力が吸収される共振現象がみられることが明らかになった。人体

は70MHz付近で共振する。このため、共振周波数付近では他の周波数より低い入射電力密度でも吸収電力が大きく、熱による影響が生じやすい。すなわち、熱による作用の閾値は入射電力密度だけで決まるのではなく、人体での吸収電力を用いて評価しなければならないことがわかった<sup>3)</sup>。

吸収エネルギーによる評価を、放射線防護の分野でドシメトリ(線量評価)と呼ぶ。放射線防護では、単位質量の組織に吸収されたエネルギー(単位はJ/kg = Gy)が基本となる評価量の一つである。これに対し電波の場合、吸収されたエネルギーは熱になるが、ある程度の時間が経過して定常状態になれば熱放散と釣り合っており、それ以上は蓄積的に体温上昇に寄与しない。このため、吸収エネルギーではなく、その時間率(すなわち電力)がより適切な評価量であるとされ、単位質量当たりの吸収電力で定義される比エネルギー吸収率(Specific Absorption Rate, SAR, 単位はW/kg)を用いて評価する考えが提案された。定常状態になるまでの時間は6分間とされ、任意の6分間で平均したSARが電波の曝露に関する評価量として用いられるようになった。

1982年に、C95.1規格の2度目の改訂が行われた。このときに、C95.1規格は、電磁界ドシメトリの考えを導入して人体の共振を考慮し、米国規格協会(American National Standards Institute, ANSI)の規格ANSI C95.1-1982として大幅に改訂された<sup>4)</sup>。この規格では、任意の6分間で平均したSARの全身平均値が、0.4 W/kg以下となることを条件とし、それに対応した電界強度および磁界強度を算出した。人体の共振周波数は、自由空間に孤立した状態では約70MHzであるが、地面に立って接地されると30~40MHzとなる。また、身長の高い子供や、座位では、共振周波数が高くなる。これらを考慮して、30~300MHzでの制限値を従来の10分の1の1mW/cm<sup>2</sup>に変更し、この範囲外の周波数では周波数に依存した制限値とした<sup>3), 4)</sup>。

#### ⑤人体防護のための規制

1970年代に、電子レンジからの漏洩電波の安全性が問題となり、1968年に制定された米国放射線衛生安全管理法(Radiation Control for Health and Safety Act)のもとで製品安全に責任を負う食品医薬品局(FDA)が、電子レンジからの漏洩電波をドアから5cmの距離で5mW/cm<sup>2</sup>以下とするように義務づける規制を実施した。

1985年に、米国連邦通信委員会(FCC)は、通信放送施設に無線局免許を与える際に、無線設備が放射する電波が人体曝露の点で基準を満たすことを自己認証により証明することを義務づける規制を導入した。これは、1969年に制定された米国環境政策法(National Environmental Policy Act)を根拠として、政府機関の意志決定においては、環境へのインパクトに責任を負うことを考慮した措置であった。

FCCがこの規制の導入を検討した当時、米国の人体防護のガイドラインは、米国規格協会のANSI C95.1-1982が唯一であった。FCCはこの規格に基づく規制を提案し

た。しかし、この規格が民間規格であり、軍と電気電子学会(IEEE)が中心になって作られたものであったため、連邦機関であるFCCが、この規格に基づいて規制を行うことには反対意見があった。

このような動きに応じて、連邦政府機関である環境保護庁(EPA)は電磁界の健康影響問題への取り組みを開始し、1984年にはレビュー調査の文書を取りまとめ、ANSIとほぼ同等であるが、やや厳しい制限を示唆する提言を行った<sup>5)</sup>。また、1986年に、議会の諮問機関である米国放射線防護審議会(NCRP)は、後述のINIRC/IRPAの暫定指針に近い内容の指針を勧告した<sup>6)</sup>。しかし、連邦政府機関の取り組みは完了せず、反対意見はあったものの、他に選択肢がないという理由で、結局FCCはANSI C95.1-1982を規制の根拠に用いることになった。

1991年にC95.1規格は再び大きく改訂された。それまでのC95.1規格は、職業曝露にも公衆の曝露にも、一律の制限値を適用する、1段階の指針であった。この改訂で、初めて公衆の曝露をより厳しく制限する、2段階の数値が採用された。また、周波数範囲が3kHzから300GHzに拡大された<sup>7)</sup>。

C95.1規格は、米国電気電子学会(IEEE)と米軍の協力によって運営される委員会では審議されていた。しかし、1988年以降、学会組織であるIEEEが単独で運営することになり、C95.1規格を含む電磁界安全規格であるC95シリーズを審議する委員会として、第28規格調整委員会(SCC28)がIEEEに設置された。このため、改訂された規格は、IEEE C95.1-1991規格と呼ばれる。

FCCはC95.1-1982規格が更新されたため、新しいC95.1-1991規格に規制の根拠を変更する必要があった。しかし、その手続きは非常に時間のかかるもので、また、民間規格による規制に対する反対意見が再燃するなどの問題があった。C95.1規格の審議体制の変更には、この問題を少しでも軽減する意図があったと見られるが、結局承認が得られる見通しが立たず、1997年にFCC自身で、規制に用いるための防護指針を作ることになった<sup>8)</sup>。この防護指針は、連邦政府の機関であるNCRPが1986年に勧告したガイドラインを基礎として、古さ故の不十分な点はIEEE C95.1-1991を引用することによって作られた。C95.1規格は1999年に軽微な修正だけで更新された。

#### ⑥IEEE規格の現在

IEEE/SCC-28は、2001年にIEEE/SCC39に改組された。組織的にはSCC39はIEEEに属するが、医学生物学者など、IEEEの外部からの専門家、また海外からのメンバーが多数参加する国際的な組織として活動することが意図されている。このような国際的な性格を明確にするために、SCC39は国際電磁界安全委員会(International Committee on Electromagnetic Safety) IEEE/ICESという名称を与えられた。2005年には、携帯電話などのSAR測定方法などを扱っていたIEEE/SCC34がICESに統合された。その結果、ICESには2つの技術委員会(TC)が含まれること

になり、C95シリーズの審議はTC95が行い、SCC34の役割はTC34が担うことになった。C95.1規格は2005年にICESによって大きな改訂がなされ、国際ガイドラインとして広く使われているICNIRPガイドライン（後述）により整合した内容になった<sup>9)</sup>。

### ⑦低周波電磁界に関する取り組み

米国における取り組みは高周波電磁界に関するものが中心であった。IEEE/SCC28には商用周波の防護指針を担当する第3分科会（SC-3）が設置されていたが、ほとんど活動がなかった。しかし、商用周波の磁界が小児白血病の発症と関連があるのではないかと、という1979年のWertheimer<sup>10)</sup>らによる問題提起に始まり、低周波磁界の健康影響にも関心が向けられるようになった。公衆の懸念は大きくなり、送電線からの磁界に対する訴訟問題も懸念されるようになった。このため、1992年に商用周波磁界の健康影響に関する国家プロジェクトEMF—RAPID計画が開始された。このプロジェクトの成果は1998年に米国科学アカデミーによって取りまとめられた<sup>11)</sup>。結論は、不確かさはあるものの、低周波磁界の曝露が、小児白血病を含む健康への悪影響を与える証拠はないとした。この結論は権威ある識者による見解であり、この報告によって米国内では送電線による健康影響を争点とした裁判が成立する見通しはなくなったと考えられている。

ICESの低周波電磁界に関する分科会であるSC-3は、RAPID計画の成果を受けて防護指針の本格的な検討に着手し、2002年に0—3kHzの防護規格IEEE C95.6-2002を示した<sup>12)</sup>。数値的には開きがあるが、基本的な考え方は後述のICNIRPガイドラインと共通である。

### ⑧米国の取り組みの特徴

米国におけるこの分野の歴史をやや詳しく述べた。電磁界の安全問題の大きな流れとして、米国が世界各国に与えた影響は大きい。すなわち、電磁界の安全問題は、米国でまず問題となり、それが各国に波及する、という傾向がある。その理由の一つに、米国が訴訟のリスクに常にさらされている社会だということが挙げられる。送電線の磁界問題に関しては、多くの訴訟があり、連邦政府としての明確な態度をとることが求められた。EMF-RAPID計画はそのために行われた。携帯電話の問題も、脳腫瘍の原因が携帯電話の使用によることとした、フロリダ州の男性が1993年に起こした訴訟があり、これが世界中に問題が広がるきっかけとなった。

米国では、コンセンサスを基礎にした議論の進め方を原則としている。このために、あらゆる利害関係者が意見表明を行う中で制限値が決められる。このことは、旧共産圏の政府による通達としての規制や、欧州のように利害関係者を排除した中立の専門家による提言による制限値とは性格が異なる。また、欧州に比べて連邦政府の関与は少なく、RAPID計画は特別な例といえる。

## III 国際機関および欧州の取り組み

### ① INIRC/IRPA

欧州での取り組みのスタートは米国よりやや遅く1970年代に始まった。米国では、軍人の職業安全を担当する研究者と電気電子技術者が中心となってこの問題に取り組んだのに対し、欧州では放射線防護の一分野として検討が始まった。

放射線防護に関する学協会（わが国では日本保健物理学会）の国際連合組織である国際放射線防護学会（IRPA）は、電離放射（X線などのいわゆる放射線）に対する人体防護に加えて、電波や電磁界などの非電離放射に対する人体防護にも着手することを決定し、1974年に非電離放射線防護のワーキンググループを組織した。1977年に開催されたIRPAパリ総会で、このワーキンググループが母体となった国際非電離放射線委員会（INIRC/IRPA）が設置された。INIRC/IRPAは、波長100nm以上の、可視光を除くすべての電磁界（紫外線、赤外線、マイクロ波、ラジオ波、低周波電磁界、静電磁界）、および可聴音を除く音波（超音波、超低周波音）の曝露に対する人体防護を扱う。INIRC/IRPAは、世界保健機関（WHO）との強いパートナーシップのもとで活動し、WHOの刊行する環境保健クライテリア文書の非電離放射に関する文書作成を担当した。その成果は、高周波（1981年、1992年）、超低周波（1984年）、磁界（1986年）の環境保健クライテリア文書として刊行されている。

INIRC/IRPAは、これらの環境保健クライテリア文書に基づき、1984年に高周波電磁界（100MHz—300GHz）の暫定防護指針、続いて1988年に防護指針<sup>13)</sup>を公表した。また、1990年には商用周波電磁界の暫定防護指針<sup>14)</sup>を公表した。

### ② ICNIRP

INIRC/IRPAは1992年にIRPAから独立した国際委員会に移行し、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）となった。ICNIRPは1994年に静磁界の防護指針<sup>15)</sup>、1998年に0—300GHzの時間変化する電磁界に対する防護指針<sup>16)</sup>を公表した。ICNIRPによる防護指針は、国際的に最も広く活用されている防護指針である。これらのガイドラインは、ICNIRPのホームページ<sup>17)</sup>からダウンロード可能である。時間変化する電磁界に対する防護指針は、日本保健物理学会に置かれている和訳にもリンクされている。

ICNIRPのガイドラインについては後で詳述するが、ICNIRPおよびその前身のINIRC/IRPAのガイドラインの考え方は、ANSIおよびその後のIEEE/ICESによる規格と基本的には同等の考えに立つものであり、制限値に大きな相違点は見られない。初期のANSI/IEEE規格が曝露を受ける集団の属性に依存しない一律の値を制限値としたのに対し、INIRC/IRPAは職業的曝露に対して公衆の曝露により大きな安全率を設け、2段階の指針値を勧告した点が相違点であったが、前述のように、米国IEEEの規格も、

1991年以降は2段階の指針となった。

ICNIRPは国際組織であり、欧州固有の組織ではない。米国では電磁界の生体影響については電気電子分野が主体になってこの問題に取り組んでおり、放射線防護の関係者は、NCRPが1986年に勧告を公表したことを除き、ほとんど関心を示さなかった。このため、ICNIRPの米国への影響力は小さかった。一方、WHOやILOなどの国際機関と関係が深いICNIRPの活動は欧州で尊重されており、欧州でのICNIRPの影響力は大きい。

### ③欧州連合の規制

1999年に、欧州連合(EU)は、欧州理事会勧告として、公衆に対する電磁界曝露からの人体防護について、ICNIRPガイドラインの数値を採用するよう勧告した<sup>18)</sup>。EUはその後2004年に、職場での人体曝露がICNIRPのガイドラインを満たすよう義務づけることを欧州指令として命じた<sup>19)</sup>。欧州指令はメンバー国に対して強制力があり、指令から4年後に法規制を施行しなければならない。職場環境の曝露については指令であり、公衆の曝露が勧告であった理由は、職業安全は欧州政府による規制の対象であるのに対して、公衆の環境に関する規制は、メンバー国の国内問題と位置づけられるので、欧州政府の権限が及ばないためである。予定では、2008年から法規制が始まることになっていたが、さまざまな問題が未解決のため、規制の施行が4年間延期されることが2007年10月に決定された。

### ④その他の防護指針

現在では、欧州を始め各国の防護指針はほぼICNIRPガイドラインあるいはほぼ同等の防護指針に統一されているといえるが、EUに加盟していない旧ソビエト連邦や旧東欧諸国の一部では、前述の観察的アプローチで導かれた規制値の影響が今でも一部に残っている。このアプローチによる規制値の特徴は、曝露時間が長いほど指針値を厳しく制限する点である<sup>3)</sup>。すなわち、電磁界強度と1日あたりの曝露時間の積が制限され、慢性的な曝露には非常に厳しい制限が課される。これは生体影響の閾値以下であれば、影響が人体に蓄積されることはないというICNIRPや米国IEEE/ICESによる防護指針の考え方と対照的である。曝露が長時間であればそれだけ影響が大きい、という蓄積的な影響の存在を実証した信頼できる研究はなく、曝露時間が長いほど健康影響の可能性が高くなると仮定しているにすぎない。また、その制限値の導出に定量的な根拠は示されていない。ICNIRPやICESの分析的アプローチが、少なくとも再現性や定量性の点で「科学的」な根拠に基づくといえるのに対し、観察的なアプローチでは、何らかの調査データが背景にあるといっても、恣意的に規制値が決定されている傾向が否定できない。

WHOによる国際電磁界プロジェクトの防護指針調和会議の過程で、ロシア、中国、旧共産圏の中欧・東欧諸国も、ICNIRP指針やICES規格などの国際的なガイドラインに調和した防護指針を採用する方向に向かっており、国

際的に調和が進む傾向である。しかし、一方では、欧州の一部の国で「予防的アプローチ」と称して、国際的なガイドラインより厳しい、恣意的に決定した数値で規制がなされる例がある。これについては、後ほど論じる。

### ⑤わが国の防護指針

低周波電界に関しては、1976年にわが国では世界に先駆けて、送電線下の電界強度を3 kV/m以下とする技術基準が作られた。この基準は、電気設備に関する技術基準を定める省令(通商産業省令第52号)第27条に規定されており、架空電線路からの静電誘導又は、電磁誘導による感電の防止に関して、「特別高圧の架空電線路は、常時静電誘導作用により人による感知のおそれがないよう、地表上1 mにおける電界強度が3 kV/m以下になるように施設しなければならない。」と法的に規制されている<sup>20)</sup>。人体への危害を防止することが目的であることが明記されているものの、この規制は電磁界と人体の直接の結合ではなく、導体(送電線下で傘を持った状況を想定)を介して人体が電界を感知することを防止するためのものである。

1985年に米国FCCが無線設備に対して人体防護の規制を開始したことを契機に、わが国でも通信放送施設からの電波の生体安全性への関心が高まった。その結果、郵政省電気通信技術審議会に対し、郵政大臣による諮問第38号「人体に対する電波防護指針」が諮問され、1990年に防護指針が答申された<sup>21)</sup>。郵政省の電波防護指針は、政府機関が公式に示した防護指針としては世界に先駆けるものであった。防護指針の考え方は、米国IEEEで審議されていたC95.1-1991<sup>7)</sup>や、1988年のINIRC/IRPAガイドライン<sup>13)</sup>と共通する。わが国の防護指針は、その後、1997年に一部追加修正が加えられ、携帯電話端末など、人体に近接して使用する機器にも適用できるように、局所吸収指針が導入された<sup>22)</sup>。この結果、現在はICNIRPの指針の内容にかなり近い内容となっている。

2007年にWHOによる超低周波電磁界に関する新しい環境保健クライテリア文書とファクトシートが公表され、ICNIRPなどの国際的なガイドラインによる電磁界環境の管理が推奨された。これを受けて、経済産業省は電力安全小委員会のもとにワーキンググループを設置して、磁界の規制のあり方の検討を開始した。新聞報道によれば、ICNIRPガイドラインに準拠した規制が検討されているが、最終決定はされていない。

## IV ICNIRPのガイドライン

電磁界曝露からの人体防護指針は、これまでの経緯からもわかるように、その考え方はほぼ確立されている。すなわち、生体影響のとらえ方、科学的なデータの評価、防護指針の構成のあり方などは、概ね共通である。ICNIRPでは非電離放射線防護に対する一般的なアプローチについての文書を2002年に公表し、その考え方を示している<sup>23)</sup>。

ICNIRPを始め、さまざまな防護指針の詳細については、それぞれ原典で確認いただくことにして、変動電磁界につ

いての ICNIRP 防護指針を中心に、その基本的な考え方と注意すべき点を紹介する。

### ①基本的な考え方

ICNIRP が1998年に公表した、「時間変化する電磁界の防護指針0-300GHz」<sup>16)</sup>は、商用周波(50/60Hz)からマイクロ波、ミリ波までの全周波数をカバーしている。周波数帯によって制限値の根拠は異なり、低周波電磁界(<10MHz)では、神経や筋の興奮現象に変化を及ぼす刺激作用、高周波電磁界(>100kHz)では熱作用が支配的な作用として制限値の根拠を与えている。これらの作用は物理学および生理学的に十分に理解され、確立されている。これらの作用は、曝露の大きさと反応の重篤度に、量-反応関係が認められる。具体的には、刺激作用については組織内の誘導電流密度 [J/m<sup>2</sup>]、熱作用については SAR [W/kg] がそのような曝露指標である。10GHz 程度以上では、電磁界のエネルギーは体表でほとんどが吸収され、赤外線と性質に近づく。この領域では、曝露指標として入射電力密度が用いられる。

人体防護のための制限値は、電磁界の生体作用と密接に関係するこれらの曝露指標で表現するのが適切である。これらの量で与えられた制限値を「基本制限」と呼ぶ。しかし、SAR や誘導電流密度は人体の組織内部での電磁気量であり、直接に測定することができない。このため、基本制限だけでは人体に入射する電磁界が防護指針に適合しているかどうかの判断が容易にはできない。そこで、適当な人体モデルと曝露条件を仮定して、人体内の SAR や誘導電流密度と入射電界および磁界強度などの測定可能な物理量との関係を推定し、その測定可能な量を用いて、基本制限への適合性の判断の参考にする。この値を「参考レベル」呼ぶ。

電磁界強度に関する参考レベルは電磁界と人体が最大の結合をする場合を想定して導かれている。このため、電磁界の測定値が参考レベル以下であれば防護指針を満たすが、参考レベルを超える電磁界強度が測定されても、それだけでは防護指針を超えないとはいえない。この場合は、基本制限を満たしているかどうかをより詳細に評価する必要がある。

### ②基本制限と安全率

低周波(<10MHz)における基本制限は電流密度で与えられる。1 kHz 以下で生体作用として観察されている現象の閾値を100mA/m<sup>2</sup>と推定し、この数値に低減係数(ICNIRP では指針値と閾値の係数を安全係数と呼ばずに低減係数<sup>23)</sup>とよぶ)10を考慮して、基本制限値10mA/m<sup>2</sup>が導かれる。およそ1 kHz より高い周波数では、刺激作用の閾値は周波数に比例して高くなるので、基本制限値にも同様の周波数依存性を持たせている。この基本制限値は、職業的曝露に適用される。公衆の曝露に対しては、さらに5倍の付加的な低減係数を考慮している。

高周波での主な根拠は熱作用である。100 kHz - 10GHz では、SAR が曝露指標であり、影響が無視できな

い1°C程度の深部体温の上昇がみられる閾値を、全身平均 SAR で4 W/kg と推定している。これに低減係数10を考慮し、職業曝露の全身平均 SAR に関する基本制限値を0.4 W/kg としている。公衆の曝露ではさらに5倍の付加的な低減係数をとり、0.08 W/kg としている。局所に集中した曝露に対しては、全身平均 SAR が上記の値を満たすことに加えて、局所での SAR が10 W/kg (公衆では2 W/kg) を超えないことを基本制限として要求している。局所的な加熱による障害を防ぐためである。但し、熱の拡散を考慮し、連続した組織・器官では、任意の10g での SAR の平均値に対してこの制限が適用される。10GHz 以上では、基本制限は入射電力密度で与えられ、基本制限は職業曝露で50W/m<sup>2</sup>、公衆では5倍の付加的な安全率を設けて10W/m<sup>2</sup>である。

### ③ ICNIRP ガイドラインの評価方法

防護指針を実際に適用するときには、基本制限ではなく、電界強度や磁界強度で与えられる参考レベルと、実際の測定値を比較して評価を行う。しかし、参考レベルを基本制限から導出する際に、人体が正弦波の電磁界と最大に結合する条件が仮定されており、実際の条件とは異なる場合がある。このため、曝露条件や波形の性質に応じて、次のような注意が必要である。なお、防護指針への適合性の評価を一定の手順で行うため、国際電気標準会議(IEC)の第106技術委員会(TC106)では測定評価方法の国際標準化の作業が行われている。

#### a) 不均一曝露(空間平均値)

発生源の付近で電磁界が強く、機器から離れると急激に電磁界が弱くなる不均一電磁界の場合、機器周辺の電磁界強度が参考レベルを超えても、基本制限を超えない場合が多い。不均一電磁界では、人体が占める空間での平均値を参考レベルと比べようガイドラインに記述されている。場合によっては、基本制限に立ち戻って評価しなければならない場合もある。IEC TC106では結合するという概念を用いて不均一電磁界を等価な均一電磁界に換算する方法を標準規格として示している。

#### b) 非定常曝露(時間平均値)

高周波電磁界の指針値は、熱作用に基づいて導かれている。人体組織の温度上昇には時間遅れがある。このため、高周波電磁界の場合は、任意の6分間の時間平均値と指針値を比較する。すなわち、時定数に比べて短時間の曝露では、参考レベルを超える電磁界強度でも許容される場合がある。例えば、曝露時間が1分間であれば、防護指針値の6倍(電力についてであり、電界強度や磁界強度については√6倍)の曝露が許容される。また、1秒間通電して5秒間休止する動作を繰り返す機器(デューティ比1/6)による間歇曝露でも、任意の6分間の電力の平均値が1/6になるため、時間的なピーク値としては指針値の6倍(電界強度や磁界強度については√6倍)の曝露が許容さ

れる。時間平均は参考レベルにも基本制限にも適用される。

低周波電磁界の場合は、熱作用でなく刺激作用が根拠であり、その時定数は非常に短い。このため、時間平均値は考慮されない。

#### c) 非正弦波電磁界

防護指針は、基本制限、参考レベルともに正弦波電磁界を前提にした数値で与えられる。指針値は実効値 (rms 値) で与えられ、正弦波の振幅の最大値ではなくその  $1/\sqrt{2}$  である。このため、低周波ではピーク値を参考レベルの  $\sqrt{2}$  倍以下としなければならない。

防護指針値は周波数に依存するので、非正弦波の場合は、指針値の異なる多数の周波数成分を含む。この場合は、各周波数成分の寄与を考慮する必要がある。指針値と測定値の比を各周波数成分について加算した結果が 1 より小さいことを示す方法がガイドラインに示されている。低周波電磁界については、評価が必要以上に安全側になるという問題があるため、実用的で精度の高い方法として、非正弦波に対してフィルタを用いて評価する方法が ICNIRP によって示されている<sup>24)</sup>。

高周波では、電界および磁界の各周波数成分の実効値の 2 乗をそれぞれの周波数での指針値で除した値の和が 1 を超えないことを示せばよい。

#### d) 複数の波源からの曝露

周波数の異なる複数の波源がある場合、非正弦波電磁界の場合と同様に、それぞれの波源からの寄与を指針との相対値で表し、その和が 1 を超えないことを示すことが必要である。

## V 予防措置に基づく規制

電磁環境の規制に予防措置を盛り込む試みがいくつかの国々で行われている。ここではスイスの例を紹介する。スイスでは 1999 年に非電離放射に対する防護の法令を制定し、0 Hz から 300 GHz の電磁界による人体曝露の規制を開始した。この法令では、人体曝露 (イミッション) の規制と電磁界源からの放射 (エミッション) を規制する。人体曝露の規制値は、ICNIRP 指針と同じであり、したがって、欧州理事会勧告と等しい。この法令では、曝露の制限に加えて、設備から発生する電磁界の強さ (エミッション) も規制する点に特徴がある。

エミッションの規制は、架空送電線およびケーブル、変電所、開閉所、家庭用電気施設、鉄道および路面電車、移動電話基地局および中継局、放送局およびその他の無線通信局、レーダー施設が対象で、それぞれの施設について制限値と条件が示されている。たとえば、送電線では、新規施設に対しては人の往来の多い場所で、所定の運転モードにおいて磁束密度の実効値が  $1 \mu\text{T}$  以下に制限される。この数値は、50 Hz における ICNIRP 指針値 (すなわちイミッション制限値) の 100 分の 1 である。但し、既存施設

の場合は、人の往来の多い場所でこの制限値を超える場合でも容認されており、相配列を磁束密度が小さくなるように最適化しなければならない、とだけ規定されている。

エミッション規制の背景には、健康影響に対する住民の不安がある。健康の防護に必要であるという根拠は確立していないが、妥当なコストで技術的に可能と判断された範囲内で曝露を制限し、不確実なリスクを低減する効果を期待するものである。電磁界利用施設が可能な範囲で不要な漏洩電磁界を抑制することは、他の電磁界利用施設との電磁両立性の点で望ましい場合もある。しかし、この規制が、 $1 \mu\text{T}$  以上の磁界への曝露が危険である、あるいは ICNIRP などの 50 Hz における参考レベルである  $100 \mu\text{T}$  が不適切である、という誤解を招きやすいという重大な問題点をもつ点に注意しなければならない。

WHO によるファクトシートでは、このような恣意的に決めた規制値を採用すべきではないとしている。

## VI むすび

電磁界に対する防護指針と規制について、歴史的な経緯を辿りながら述べた。高周波電磁界については、熱作用による明らかな影響があり、それを防ぐための条件も十分に明らかにされている。低周波電磁界についても、非常に強い電磁界にさらされれば、刺激作用による影響を受け、それが長期に及ぶことがあれば、健康に影響が及ぶ可能性が明らかである。これらが防護指針の根拠となり、十分な安全率のもとで信頼できる防護指針が作られている。これらの防護指針に従えば、熱作用や刺激作用による悪影響を防ぐことができる。

これらの防護指針で考慮されている作用以外の作用が絶対に存在しないということを証明することはできない。だからといって、恣意的に決めた根拠の不十分な制限値を用いることは正当化されない。科学的に根拠の示された防護指針を用いて電磁環境を管理しつつ、未確立の影響の可能性にも注意を払い、予期されない健康被害を防止できるように備えることが大切である。

電磁界の健康影響については、これまで十分に研究が行われており、大きなリスクがないことは確かめられているといつてよい。また、微弱な電磁界が生体の機能に影響を及ぼす可能性は、低周波では人体内にさまざまな内因性の電流があり、それに比較して外界からの作用が有意な大きさにはならないこと、高周波でも生体の機能に影響を及ぼすメカニズムが考えにくいという科学的な洞察を踏まえれば、未知の悪影響によるリスクの可能性は小さい。未知の現象の可能性を過大に評価することは、人々の生活に過剰な不安を招き、生活の質を低下させる恐れがある。科学的に適切な用心の程度が誤解されないように、現在の防護指針を尊重することが大切である。

## VII 文献

- 1) Steneck NH. The microwave debate. MIT Press, 1984.

- 2) USA Standards Institute. Safety level of electromagnetic radiation with respect to personnel. USA Standard C95.1-1966. 1966.
- 3) J.M. Osepchuk JM, Petersen RC. Historical Review of RF Exposure Standards and the International Committee on Electromagnetic Safety (ICES). *Bioelectromagnetics* 2003;6 (Suppl) :S7– S16.
- 4) American National Standards Institute. Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 300 GHz. ANSI Standard C95.1-1982. 1982.
- 5) Elder JA, Cahill (eds.) *Biological Effects of Radiofrequency Radiation*, 1984; EPA-600/8-83-026F. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park. North Carolina.
- 6) National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). *Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields*. NCRP Report 1986;(86). Copyright NCRP, Bethesda, MD, 20814, USA.
- 7) Institute of Electronics and Electrical Engineers. IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz (ANSI/IEEE C95.1-1991). New York: IEEE; 1991.
- 8) Federal Communications Commission. *Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields* Office of Engineering & Technology. OET Bulletin 65, Edition 97-01, August 1997.
- 9) IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (SCC39). *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, IEEE Std C95.1-2005. 2005.
- 10) N Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1979;109:273-284.
- 11) National Research Council. *Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields*. Washington (DC): National Academy Press; 1996.
- 12) IEEE Standards Coordinating Committee 28. *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 -3 kHz*, IEEE C95.6-2002. 2002.
- 13) International Non-Ionizing Radiation Committee/ International Radiation Protection Association. *Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz*. *Health Phys.* 1988;54 (1):15-123.
- 14) International Non-Ionizing Radiation Committee/ International Radiation Protection Association. *Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields*. *Health Phys.* 1990;58 (1):113-122.
- 15) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields*. *Health Phys.* 1994;66(1):100-106.
- 16) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields*. *Health Phys.* 1998;74:494-522.
- 17) <http://www.incirp.de/>
- 18) The Council of the European Union. *Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC)*, *Official Journal of the European Communities* 1999;30(7).
- 19) *Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)*. *Official Journal of the European Union*, L184 of 24 May 2004.
- 20) 電気設備に関する技術基準を定める省令（平成9年3月27日通商産業省令第52号）。
- 21) 電気通信技術審議会。諮問第38号答申「人体に対する電波防護指針」。1990年。
- 22) 電気通信技術審議会。諮問第89号答申「電波利用における人体防護の在り方」。1997年。
- 23) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *General approach to protection against non-ionizing radiation*. *Health Physics* 2002;82 (4):540-548.
- 24) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Guidance on determining compliance of exposure to pulsed fields and complex non-sinusoidal waveforms below 100 KHz with ICNIRP guidelines*. *Health Physics* 2003;84(3):383-387.