

ために実政策的な政策を実行することが必要であると認識する。それは0.5mT程度の十分に低い制限レベルになる可能性がある。

2.2 IEEE/ICES 安全基準

ICNIRP ガイドラインに対し、もうひとつの国際的な防護指針として、米国を中心に作成された IEEE/ICES (The Institute of Electrical and Electronics Engineers/International Committee on Electromagnetic Safety、米国電気電子学会/国際電磁場安全委員会) による電磁場ばく露の安全基準⁴⁾がある。

米国では、高周波領域 (3 kHz 以上) の防護指針については早くから防護指針が公表されていたのに対し、3 kHz 以下の低周波領域では、長らく防護指針は示されてこなかった。しかしながら、米国における低周波磁場の健康影響研究に関する大規模プロジェクト (Electric and Magnetic Fields Research and Public Information Dissemination Program : 通称 RAPID プログラム)¹⁰⁾が終了した 1999 年以降、3 kHz 以下の低周波領域においても IEEE において電磁場の安全基準の作成が進められ、2002 年に IEEE/ICES 安全基準 C95.6 として発行された⁴⁾。本基準を作成した組織は IEEE Standards Coordinating Committee 28 (IEEE/SCC28) のうちの低周波に関する分科会 SC3 であり、大学、産業界、軍関係、政府機関、コンサルタント等当事者を含むメンバーにより構成されている。IEEE/SCC 28 は、米国外からのメンバーの参加の増加を受けて、2001 年 3 月に設立された国際組織である ICES (International Committee on Electromagnetic Safety : 電磁気の安全性に関する国際委員会) の傘下に置かれ、国際規格としての位置付けとなっている。

IEEE/ICES 安全基準における磁場の限度値は、生体内電場で表される、これを超えてはならない基本制限 (basic restriction, 表 2.4) と、評価可能な量である磁束密度で表される最大許容ばく露レベル (MPE: maximum permissible exposure level、または参考レベル reference level、図 2.1) の 2 段階の構成となっている。最大許容ばく露は、頭部および胴体へのばく露と、四肢へのばく露とで異なる値が示されている。基本制限と最大許容ばく露レベルの関係については、「最大許容ばく露レベルに適合することは、基本制限に適合することを保証する。しかし、最大許容ばく露レベルに適合しないことは、必ずしも基本制限に適合しないことを意味せず、基本制限に適合しているかどうか評価を行う必要がある。基本制限を超えなくても、最大許容ばく露レベルを超えることはありうる」としている。また、基本制限または最大許容ばく露レベルのいずれかとの適合性を示せば良いとしている。

表 2.4 IEEE/ICES 安全基準における基本制限⁴⁾

(100 kHz までを示す。値は実効値)

ばく露される組織	F_e (Hz)	一般公衆	管理環境
		E_o (V/m·rms)	E_o (V/m·rms)
脳	20	5.89×10^{-3}	1.77×10^{-2}
心臓	3350	0.943	0.943
手, 手首, 脚, 足首	3350	2.10	2.10
他の組織	3350	0.701	2.10

表の解釈は次のとおり：

周波数 $f \leq f_c$ に対しては $E_i = E_o$ 、周波数 $f \geq f_c$ に対しては、 $E_i = E_o (f/f_c)$ 。

(E_o ：生体内電場、 f_c ：生体内電場の周波数パラメータ、 E_i ：生体内電場の最大許容値)

※本表の電場の制限に加えて、10 Hz 以下の磁場はピーク値 167 mT (一般公衆)、500 mT (管理環境) に制限される。

IEEE 規格では、防護を想定する対象について、一般公衆 (非管理環境) と管理環境の 2 種類に分類している。管理環境とは、「勤務に伴うばく露の可能性を認識している人や、ばく露および有害な影響の可能性を認識している人が進入可能なエリア、あるいは警告が示されているエリアを通過した結果生じるばく露や、一般公衆が立ち入ることができない場所」と定義されている。

提示された磁場ばく露の参考レベル (IEEE/ICES では MPE : Maximum Permissible Exposure=最大許容ばく露と呼ばれる) は、ICNIRP のそれとは大きく異なり、また限度値導出の根拠として、従来用いられてきた生体内誘導電流密度ではなく、生体内誘導電場が用いられていること、また指針値が部位ごとに異なるなど細部に差があり、いくつかの特徴的な点が見受けられる。

本規格において示されている基本制限は、各対象部位ごとに周波数特性を有することが示されている。すなわち、最小興奮閾値 (rheobase) と呼ばれる電場の平坦部と、周波数比例となる部分に分かれ、これらの接続部の周波数が f_0 として示されている。適合性評価にあたっては、電場の値は、組織内の各方向の 5mm の長さに亘って平均をとることとされている。パルス波形等、非正弦波形の電磁場については、実効値の限度値にしたがうとともに、最大ばく露限度値が、以下の 2 つの法則にしたがう。

(a) ピーク磁場に基づく制限：磁場のピーク値が最大許容ばく露レベル (MPE) を満たすこと。ただし、MPE の実効値の $\sqrt{2}$ 倍をピーク値の限度値とする。非正弦波における周

波数 f は、 $f=1/(2t_p)$ と換算する。ここに、 t_p ：生体内電場のピーク値の継続時間である。

(b) フーリエ成分に基づく制限：複数の周波数成分を含むばく露の場合、以下の法則式を満たすこと（最大 5 MHz）。

$$\sum_{i=0}^{5\text{MHz}} \frac{A_i}{MPE_i} \leq 1 \quad (2.1)$$

ここに、 A_i はばく露波形の i 番目のフーリエ成分の振幅、 MPE_i は、周波数 f の単一正弦波における最大許容ばく露レベル (MPE) である。ここでは、複数の周波数を加算的に扱うため、各周波数成分において限度値以内であっても、これらを加算したときに、(2.1) 式を満たさなくなる可能性がある。

また、非一様磁場へのばく露については、「頭部および胴体における最大磁場が MPE の限度値を超えないこと、あるいは、表 2.4 の基本制限を満たすことを示すこと」としている。

ばく露限度値の根拠としては、電磁場の人体ばく露に関するガイドラインでは、電磁場の生体作用に関する研究データから得られた閾値を基礎に導出されている。本規格では、確立されたメカニズムの 1 つは、膜の分極に関連し、すなわち生体内電場による、細胞膜における自発静止電位 (natural resting potential) の変化 (alternation) であるとしている。これに伴う興奮性組織への影響は、いわゆる電気刺激 (electrostimulation) であり、1 Hz～3 kHz (本規格の上限) の周波数において最小となる閾値が存在するため、これが 1 Hz から 3 kHz の電場・磁場の限度値制定の根拠とされている。このメカニズムは急性の効果を生じさせるものであり、ばく露開始後、数秒のうちに効果が生じるものである。

本規格の特徴的な点として、「電気刺激効果の主たる作用源 (force) は、生体内電場 (*in situ electric field*) であって、生体内電流密度ではない」としていることが挙げられる。ICNIRP や IEEE の以前の高周波ガイドライン等、過去において共通した慣例であった生体内電流密度よりも、生体内電場の関数によって電気刺激効果のより正確な限度値が導出されるとの主張である。

考慮すべき刺激としては、(1) 神経興奮、(2) 心臓の興奮、(3) シナプス性の活動の変化 (alternation) の 3 通りの反応が取り上げられ、興奮閾値の算出の原理として、電場強度—継続時間ならびに電場強度—周波数の法則が示されている。この法則は、主として Reilly の研究成果¹⁰⁾に基づくものであり、本規格全体にわたり、主要な根拠として用いられている。特に、シナプス性の活動の変化は、電流あるいは磁場が頭部に加わった際の視覚効果である眼内閃光現象であり、低周波における限度値制定における主要な根拠となっている。磁気閃光の実験データより、磁気閃光が生じる最も感度が高い周波数 (20 Hz) における網膜での誘導電場の閾値は、 $E_{\sigma}=0.053 \text{ V/m}$ (実効値。ピーク値は $E_{\sigma}=0.075 \text{ V/m}$) と計算され、電気閃光において求められる網膜誘導電流密度の閾値の 8 mA/m^2 と一致する (導電率

は 0.15 S/m を仮定)。最適な周波数における閃光感知に対応する内部電場は、神経刺激の興奮最小閾値の 1/100 またはそれ以下であり、かなり低いため、これが低周波における限度値制定における主要な根拠となっている。

次に、基本制限から磁場の最大許容ばく露レベルを導出する際のモデルが重要であるが、詳細な人体モデルの数値計算結果については、「いくつかの報告における数値計算結果のばらつきが大きい」、「数値計算結果の妥当性の検証ができていない」との理由で規格には適さないとし、単純な楕円断面モデルが採用されている。着目する部位に対応した形状・大きさの楕円断面が仮定され、生体内電場から外部磁場の算出は、次式の関係により換算される。

$$E = \omega B \frac{\sqrt{a^4 u^2 + b^4 v^2}}{a^2 + b^2} \quad (2.2)$$

ここに、 E : 誘導電場、 ω : 角周波数、 B : 磁場、 b : 楕円断面の半短径、 a : 楕円断面の半長径、 (u, v) : 計算位置 (u は短軸上の位置、 v は長軸上の位置) である。

高周波電磁場に対する人体防護については、米国では古くから取り組んできた。発端は、第 2 次世界大戦中に発達した軍用の無線通信機器に関する職業安全であった。陸海空軍の研究に基づき、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¹⁷⁾。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/cm² と定めた。これは、推定された熱作用の閾値 100mW/cm² に対して安全係数を 10 としたものである。この規格は、その後改定を繰り返して、最新の規格である IEEE/ICES C95.1-2005 に引き継がれている。当初は職業ばく露を主に想定して、1 段階の指針値であったが、1990 年の改定以降は、職業ばく露を想定した管理環境に加えて、一般公衆のばく露を想定した非管理環境の指針値を規定した 2 段階の規格になった。これは、一般環境での電磁環境に対する関心が高まったことが背景にある。低周波領域では ICNIRP ガイドラインと IEEE/ICES 規格の違いは大きいですが、高周波のガイドラインでは、両者の違いはそれほど大きくない。特に、IEEE/ICES の 2005 年に改定された高周波安全規格の最新版⁵⁾では、ICNIRP ガイドラインとの調和を考慮する傾向が強まり、それまで以上に ICNIRP ガイドラインとの相違点が解消されている。

IEEE/ICES 安全基準は、現在低周波と高周波が異なる規格となっているが、現在これらの統合の検討が進められている。なお、IEEE/ICES では静電磁場についてはガイドラインを示していない。

2.3 低周波領域における防護指針間の比較

表 2.1、表 2.4 にそれぞれの防護指針の低周波領域における基本制限を示し、図 2.1、表

2.5に磁場の参考レベル（IEEE/ICES 安全基準ではMPE）の比較を示す。特に磁場参考レベルの違いが際立っているが（例えば 50 Hz の磁場の職業ばく露の参考レベルでは、ICNIRP ガイドラインが 0.5 mT であるのに対し、IEEE/ICES 安全基準では、2.71 mT）、この理由として、基本制限から磁場参考レベルを導出する際の換算方法を挙げることができる。すなわち、職業ばく露で 50 Hz の磁場を考えたとき、ICNIRP ガイドラインにおいては、10 mA/m²に対して、0.5 mT を等価な磁場としているのに対し、IEEE/ICES 安全基準では、 $f=20$ Hz において生体内電場の最大ばく露限度値が 18 mV/m であり、50 Hz では、45 mV/m となり、導電率 0.2 S/m を仮定（ICNIRP に示された値）すれば、基本制限の誘導電流密度は 9 mA/m² となり（ICNIRP の基本制限 10 mA/m² とほぼ等しい）、これに対応する等価な磁場は 2.71 mT となる。すなわち磁場の限度値の大きな差異は、換算時のモデルの違いに起因すると考えることができる。また、一般公衆に対しては、安全係数の違いから（ICNIRP では 5、IEEE/ICES 安全基準では 3）、両者の磁場参考レベルの違いはさらに拡大している。

なお IEEE/ICES 安全基準において、ICNIRP と考え方や扱いが同等のものは以下の点である。

- ・ 確立された急性の反応のみに基づき（低周波領域では、神経系機能の影響）、低レベル磁場への慢性ばく露の影響は考慮しないこと。また、短時間のばく露での限度値の緩和を行わないこと
- ・ 一般公衆へのばく露と管理環境の 2 段階構成
- ・ 基本制限と参考レベル(最大許容ばく露レベル)の 2 段階構成
- ・ パルス磁場の周波数の換算方法
- ・ 複数の周波数の電磁場への同時ばく露時の評価の方法
- ・ ペースメーカー装着者等は防護の対象から除外すること

表 2.5 商用周波数における参考レベル(最大許容ばく露レベル)の比較 (単位 mT)

	一般公衆				管理環境（職業的ばく露）			
	IEEE 規格		ICNIRP		IEEE 規格		ICNIRP	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
全身	0.904		0.1	0.083	2.71		0.5	0.417
四肢	75.8	63.2	区分なし		75.8	63.2	区分なし	

これに対し、ICNIRP ガイドラインと IEEE/ICES 安全基準の考え方や扱いが異なる点もあ

る。ICNIRP と異なる IEEE/ICES の考え方は次の点である。

- ・ 基本制限は生体内誘導電流密度ではなく、生体内電場（誘導電場）で表されること。
また四肢に基本制限の値が別に示されていること
- ・ 眼内閃光現象を有害な影響とみなすこと
- ・ 公衆に対する安全係数の値（磁場では、ICNIRP では 5 であるのに対し、IEEE 規格では 3 を採用）
- ・ 基本制限導出の根拠の多くが Reilly 氏の理論モデルに基づいていること
- ・ 磁場の参考レベル(最大許容ばく露レベル)の導出過程において、ICNIRP とは異なる誘導モデルを仮定していること

2.4 職業ばく露の適用条件について

職場における電磁場環境の人体防護指針への適合性評価を行う際、職業ばく露（IEEE/ICES 安全基準では、「管理環境」）区分の適用の条件は重要となる。ICNIRP ガイドラインでは、職業ばく露の適用条件として、「通常は既知の条件下でばく露を受けており、また潜在的に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」としている。また、IEEE/ICES 安全基準では、「管理環境」区分の適用条件として、「職業に伴うものとしてばく露の可能性を認識している人や、ばく露と有害な影響を認識している個人が立ち入ることが可能なエリア、あるいは、ばく露の警告が掲げられたエリアの通過に付随して生じる場所、一般公衆が立ち入ることができない環境、および立ち入り可能なこれらの個人が有害な影響の可能性を認識している場所」と定義している。

参考文献

- 1) WHO: "Electromagnetic fields and public health", Fact sheet No. 322 (2007)
- 2) WHO: "Extremely Low Frequency Fields", Environmental Health Criteria Monograph No. 238 (2007)
- 3) ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", Health Physics, vol. 74, no. 4, pp.494-522 (1998)
- 4) IEEE: "IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz", IEEE Std C95.6 (2002)
- 5) IEEE: "IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz-300 GHz", IEEE Std C95.1 (2005)

- 6) "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 (1999)
- 7) 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)" 18th individual directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC (2004)
- 8) IRPA/INIRC: "Interim guidelines on limits of exposure to 50/60-Hz electric and magnetic fields", Health Physics, 58, 113-122 (1990)
- 9) 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.
- 10) CRP: "Recommendation of the Commission on Radiological Protection: Protection against low-frequency electric and magnetic fields in energy supply and use" (1997)
- 11) National Research Council: "Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields", National Academy Press (1997)
- 12) W. Xi, and M.A Stuchly: "High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields", Appl. Comput. Electromagn. Soc. J. 9: 127-134 (1994)
- 13) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. Health Phys. 1994;66(1):100-106.
- 14) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. GUIDELINES ON LIMITS OF EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELDS. Health Physics, Volume 96, Issue 4, April 2009.
- 15) NIEHS: "NIEHS report of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields", NIH Pub No. 99-4493 (1999)
- 16) J.P. Reilly: "Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology", Springer, New York (1998)
- 17) USA Standards Institute. Safety level of electromagnetic radiation with respect to personnel. USA Standard C95.1-1966. 1966.

3. 職場における電磁場環境の実態

3.1 わが国の労働現場における電磁場ばく露実態調査結果

平成9年から平成14年度まで、厚生労働省の委託を受け産業医学総合研究所および中央労働災害防止協会が電磁場ばく露調査を行った¹⁾。これは労働現場における超低周波領域の電磁場ばく露に関する我が国で初めての大規模調査であった。以下その概要を示す。

測定方法および測定結果のまとめ

発生する磁場が比較的強いと思われる電力設備、溶接機器、加熱溶解設備、病院設備、鉄道、家電製造ライン、自動車製造ラインで働く作業員および作業場について、磁場測定を行った。これらの測定は、基本的には作業員のばく露レベルを把握するために行われた（個人ばく露測定）ものであるが、磁場の発生源を特定する目的、および磁場の強度分布を知る目的、さらに測定機器の制約（周波数によっては個人ばく露測定に適した機器が無い）等の理由から作業空間での測定（定点測定：ある場所での比較的長時間にわたる磁場測定で EMDEXII により測定した、スポット測定：ある場所でのある瞬間における磁場測定で、測定器の数値を読み取る方法で行った）も行った。個人ばく露測定は作業員が携行できる EMDEXII（40Hz～800Hz が測定可能）を腰の位置に装着してもらうことで行い、測定値は3秒ごとに自動的に記録されるように設定した。作業空間での磁場測定は必要に応じて他の測定機器も使用した。

表3.1に各種作業従事者の個人ばく露測定結果のまとめを示す。測定周波数を40～100Hz および40～800Hzに分けて示したが、これは設備および機器が使用する（すなわち機器から発生する基本的な）周波数（例えば50Hzあるいは60Hz）と、基本周波数から発生する高調波（基本周波数の整数倍）成分の大きさを知る目的で行った（個人ばく露測定に用いた測定器 EMDEXII にこのような周波数帯による磁束密度を表示する機能がついている）。

国際機関等から出ている防護参考レベルは周波数により異なるので、磁場の周波数成分を把握することは重要である。これら二つの周波数範囲でばく露レベルがほぼ同じ場合は、基本周波数の測定値によりばく露評価をしても良いと考えられるが、差が大きい場合には高調波成分の値も考慮した評価が必要になるとと思われる。また、加熱溶解設備で周波数帯によるばく露レベルが大きく異なるのは、これらの基本周波数が、例えば300Hz等と、もともと異なるからである。

表 3.1 各種対象作業従事者の個人ばく露測定結果

対象作業	測定周波数	n 数	平均ばく露量 (μT)			最大ばく露量 (μT)		
			平均値	標準偏差	最大値	平均値	標準偏差	最大値
電力	40~100Hz	43	0.94	1.35	6.19	46.0	96.5	423
	40~800Hz	43	0.99	1.33	6.19	46.0	96.5	423
鉄道	40~100Hz	23	0.70	0.82	3.39	17.3	17.7	80.8
	40~800Hz	23	0.73	0.82	3.43	18.1	18.0	80.8
誘導加熱 設備	40~100Hz	32	4.50	4.86	15.6	171	118	403
	40~800Hz	31	7.53	8.58	45.1	219	156	564
	40~3000Hz	1	0.51		0.51	31.3		31.3
	30~2000Hz	1	0.33		0.33	10.2		10.2
電気炉	40~100Hz	11	14.1	10.6	32.7	251	129	463
	40~800Hz	11	14.0	10.6	32.6	252	129	464
溶接	40~100Hz	29	5.71	16.4	90.0	248	321	1410
	40~800Hz	28	3.46	2.87	10.0	219	263	1410
	40~3000Hz	1	90.0		90.0	1240		1240
医療関係	40~100Hz	23	0.19	0.25	1.02	5.43	6.66	26.9
	40~800Hz	23	0.19	0.25	1.02	5.52	6.71	27.0
家電製造	40~100Hz	13	0.09	0.10	0.31	3.41	7.92	29.7
	40~800Hz	13	0.10	0.11	0.32	3.52	8.08	30.2
自動車製造	40~100Hz	15	2.18	5.37	17.4	305	892	3490
	40~800Hz	15	2.20	5.40	17.7	306	892	3490

この調査においては、100Hz 以上の高調波成分も考慮して、ばく露評価を行わなければならないような測定結果は、見られなかった。なお、異なる周波数成分を含む電磁場のばく露レベル評価についての詳細は ICNIRP のガイドラインを参照していただきたい。

以下の各論における作業従事者のばく露レベルでは EMDEXII で得られた値のうち、40~800Hz のものを示した。これは 40~800Hz の方が 40~100Hz より多少大きな値となっており、安全サイドに評価出来ると考えたからである。

評価をする際の基準となる周波数は機器あるいは配線から発生している基本周波数である。すなわち、50Hzの機器から発生する磁場は、EMDEXIIで測定した40Hz～800Hz範囲の測定結果を用い、これを防護参考レベルと比較し評価した。図3.1に各対象作業での平均ばく露量を、図3.2に各対象作業での最大ばく露量を示した。

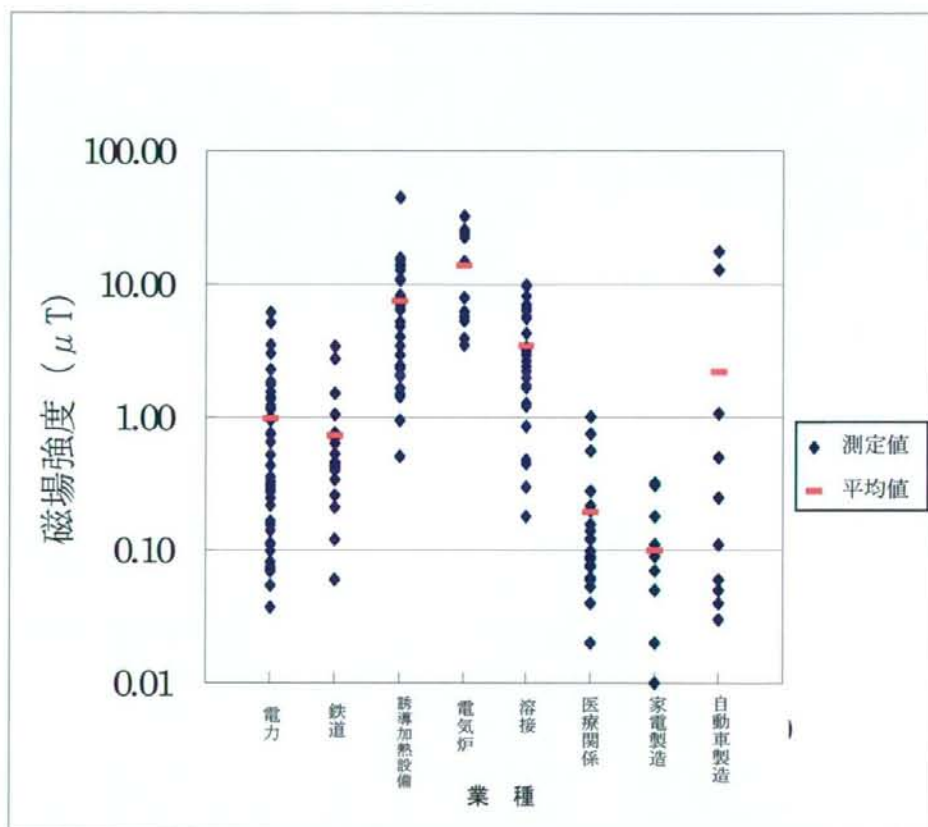


図 3.1 各種対象作業での平均ばく露量 (40～800Hz)

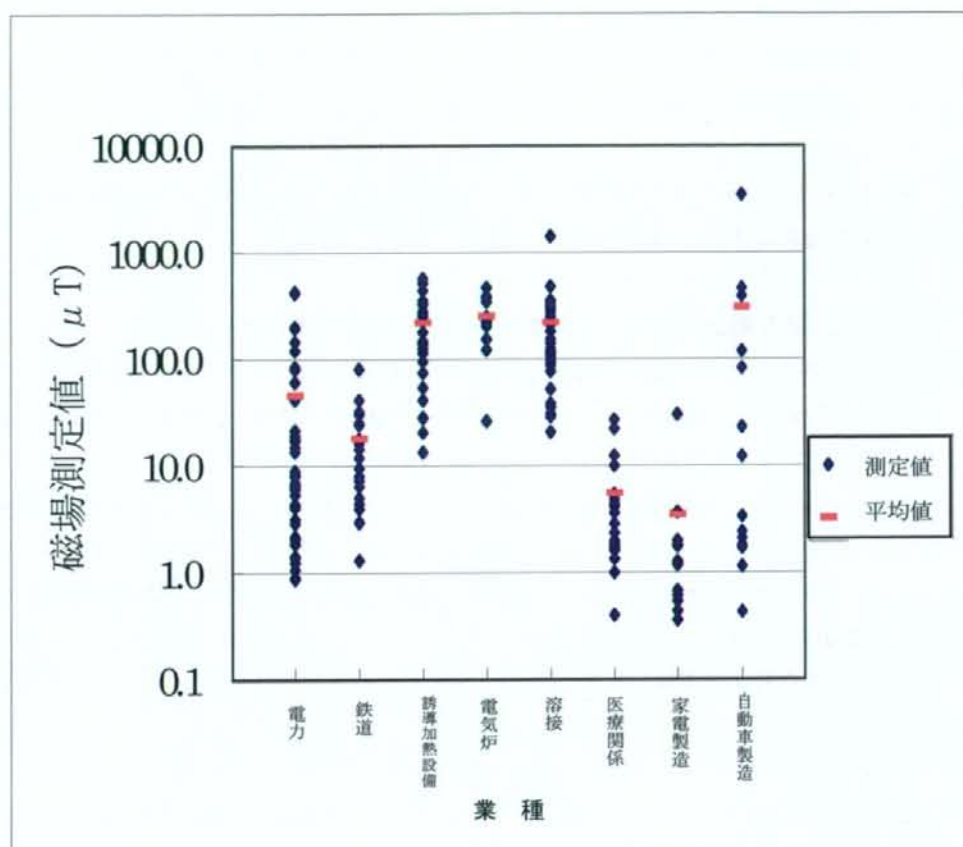


図 3.2 各対象作業での最大ばく露量 (40~800Hz)

以上の測定結果を踏まえ、今後の課題として以下のような事が提言されている。

- (1) ICNIRP の参考レベルを越える磁場ばく露が、溶接作業、加熱溶解設備作業に観察された。また、医療従事者が局所的に参考レベルを越える電磁場にばく露する可能性も示唆された。しかし、これらの設備や機器から発生する電磁場のばく露レベルを参考値以下にすることは、発生している電磁場の特性等を考慮することにより、回避行動などで可能であることも判明した。我が国では 10kHz 以上の周波数の電磁場に対しては総務省から指針が出されているが、10kHz 未満の電磁場についてはガイドラインがない。注意を喚起するためにも何らかの対策が必要であろう。
- (2) 医療用機器や電磁調理器など電磁場のエネルギーを直接的に利用する機器では、人が近づく可能性のある場所でも、ICNIRP の参考レベルを超える電場や磁場が観測

されることが少なくない。しかしこれらの機器を使用しているながら、この事実を知らないあるいは知らされていない作業者が多いものと思われる。今後これらの機器から発生する電磁場に関する情報の伝達と、不要なばく露を避けるための啓蒙活動が必要と思われる。

(詳細は「電磁ばく露に関する調査研究結果報告書(平成9年度～平成14年度総括報告書) 中央労働災害防止協会 労働衛生調査分析センター」を参照)

3.2 NRPBによる電磁場職業ばく露の実態についての報告(資料A)

イギリス NRPB (National Radiological Protection Board, 英国放射線防護庁, 当時。現 Health Protection Agency, 英国健康保護局) の Cooper らにより、2002年に電磁場職業ばく露の実態に関する報告がなされている²⁾。これは、当時、ICNIRP ガイドラインの公表を受け、電磁場への職業的ばく露の測定評価を行ったものであり、主として5つの調査対象が選ばれた。これらは、発電設備、抵抗溶接機、誘導加熱装置、プラズマ放電機器、セキュリティ管理装置である。これらの機器から発生する電磁場へのばく露評価を行い、結果が ICNIRP の参考レベルと比較されている。以下にこれらの調査の概要を示す。なお、全文の和訳を資料Aに添付した。

(1) 発電設備

電場ばく露については、測定結果の多くが ICNIRP の職業的ばく露の参考レベル (50Hz の周波数において 10kV/m) を満たすものであった。一部、変電所母線の近傍や 400kV 導体下において参考レベルを超える例があった。

一方、磁場ばく露については、機器の近傍で参考レベルを超える場合でも、四肢以外の部位が強い磁場にばく露される状況はほとんどなく、頭部と胴体における誘導電流の基本制限を超えることは考えにくい。一部、励磁機、交流機ピット、変圧器、整流器、母線および導体の近傍などに頭部が近接する状況があり、この場合には基本制限を超える可能性もある。

(2) 抵抗溶接機

いくつかの抵抗溶接機 (スポット溶接機、ステッチ溶接機など) から発生する変動磁場へのばく露により、参考レベルを超える可能性があることが示唆された。また、参考レベルを超える大きさの磁場に、作業者の頭部や胴体がばく露されるような状況では、基本制限を超える可能性がある。

(3) 誘導加熱装置

対象とした誘導加熱装置は、工具機器の製造などで用いられている誘導加熱装置(10 kW)、金属部品の加工に用いる小出力誘導加熱装置(1~1.5 kW, 2 MHz~4.5 MHz)、真空炉(1.5 MW, 150 Hz)、大気溶解誘導炉(750 kW, 1 kHz)、および圧延用誘導加熱装置(7.5MW, 436 kHz)である。

電場については、ICNIRPの職業的ばく露に対する参考レベルを満たすものであったが、一例のみ、一般的な作業者の作業位置より誘導加熱装置に近づいて測定が行われたものについては、超えるものがあった。

磁場については、通常作業者が位置するような場所では、通常、磁場の参考レベルを超えないが、装置の近傍では、参考レベルを超える可能性があることも示唆している。

(4) プラズマ放電機器

半導体の製造工程などで用いられるプラズマエッチャー(主として13.56 MHz)、RFスパッタ(13.56 MHz)、および質量分光分析装置で用いられプラズマトーチ(27 MHz)を対象に電磁場ばく露評価が行われた。プラズマエッチャーについては、一部、反応容器から数センチ離れた位置で磁場参考レベルを超える場合があった。RFスパッタについては、いくつかのスパッタ装置の近くで磁場参考レベルを超えるものがあったが、通常、頭部や胴体がばく露される場所以外での結果であった。プラズマトーチについては、シールドを外した条件において、磁場参考レベルを超える可能性があることを示すものであった。

(5) セキュリティ管理装置

セキュリティ管理装置として、金属探知機(ゲート型および携帯型)、無線周波識別装置(RFID)、および盗難防止装置(電波式商品監視装置、EAS)から発生する電磁場のばく露評価が行われた。

ゲート型金属探知機については、ばく露限度値との比較のため体内誘導電流評価が行われ、この結果、探知機のゲート内で誘導電流密度の基本制限を超える場所はなかった。また、携帯型金属探知機(20 kHzおよび94 kHz)についても、参考レベルを超えるものはなかった。

無線周波識別装置(RFID)については、調査対象のいくつかの機器で、装置近傍において磁場参考レベルを超えた。参考レベルを超えた箇所は局所集中しており、機器からの距離が離れるにしたがい磁場レベルが急速に低下するものであった。

EAS装置は、検出器とタグ解除装置で構成される。検出器のうち1つの装置の近傍において、磁場の参考レベルを超過するものがあった。タグ解除装置の場合、解除装置から10 cm以内の区域において、ピーク磁場強度の参考レベルを超える例があった。

(6) その他

このほかの発生源として、永久磁石着磁装置、アーク炉、亀裂検出装置、テープ記録除去

装置、ファイバー用硬化装置などの調査も行われ、テープ記録除去装置および亀裂検出装置において磁場参考レベルを超える例があった。

以上、ばく露量測定の大部分においては、各参考レベルに適合している結果が得られたが、いくつかの機器では、特定の条件において参考レベルや基本制限に近い値に到達するもしくは上回る可能性を示唆していることが確認された。多くの場合、四肢におけるばく露においてのみ参考レベルを超える結果であった。職業ばく露が参考レベルを上回るものが ICNIRP ガイドラインの基本制限を超えることを意味するか判断するため、いくつかの分野において詳細な分析が必要となっている。

3.3 磁気共鳴画像(MRI)装置による医療従事者の電磁場曝露

MRI は、強い静磁場中に置かれた原子核が、照射された無線周波 (RF) 電磁場からエネルギーを吸収し、そのエネルギーを再放出する過程で、核同士の相互作用、水分子の動き、その他生体組織環境の物理的・化学的性質についての情報を含む信号を検出することにより、これらの性質についてマッピングする。静磁場の強さと無線周波の共鳴周波数が一定の関係を持つため、静磁場の強さに空間的な勾配を与えて位置情報を得る。勾配磁場は、高速で ON/OFF 切替される。したがって、MRI は①強い静磁場 (典型的には 1.5-3T)、②RF 電磁場 (数 10-数 100MHz)、勾配磁場 (撮影中の ON/OFF 周波数は約 1kHz)、の 3 種類の磁場を用いており、人体はこれらの磁場にさらされる。患者の電磁場曝露によるリスクは、医療目的の利益とのトレードオフを考慮して、明らかに医療上の利益が優先されるため、ICNIRP の防護指針などの適用範囲に含まれない。しかし、医療従事者のばく露は、職業ばく露の制限を受けるべきものである。

欧州委員会による「物理的要因 (電磁場) に起因するリスクへの労働者の曝露についての健康および安全の最低要求事項に関する 2004 年 4 月 29 日付 欧州議会・理事会指令 2004/40/EC」(電磁場リスク指令)³⁾の公表後、この指令が MRI に対し研究及び臨床現場で重大な影響を及ぼすことが予想され、さまざまな調査が行われた。指令では、ICNIRP ガイドライン⁴⁾の基本制限に対応するばく露限度値 (ELV) と、参考レベルに相当するアクション値 (AV) によるばく露管理が義務づけられる。AV を超える電磁場環境では、ELV との比較を行う詳細な評価が必要である。

英国保健安全執行部 (HSE) の委託による調査や、欧州委員会の研究費による研究により、誘導電流密度で表される ELV との比較を含む詳細な曝露評価が行われた。その結果を、表 3.2 に示す。その結果、「スキャナ横に位置する人は、中枢神経系での誘導電流に関する ELV を最大 10 倍上回り、人が磁場中で動くと誘導電流はさらに大きくなる」、「介入的 MRI の場合は、誘導電流は ELV を 50 倍上回る可能性がある」とされた。

表 3.2 : 曝露限度値 (ELV) と MRI の職業的曝露推定値

電磁場	周波数	ELV	MRI の職業的曝露推定値
定常磁場 (常にスキャナ のほぼ全域 にある)	0Hz	なし (アクション値 200mT)	3T (臨床) 9.4T (研究)
	<1Hz (典型値) (被験者の動きで 発生)	電流密度 40mA ^m - ² (頭部・躯幹)	200-400mA ^m - ² (CNS) 1ms ⁻¹ で動いた場合、磁石から 0.5-1.0m の領域は限度を 超える。
切替勾配磁場 (撮影中のみ)	1kHz (典型値)	電流密度 10mA ^m - ² (頭部・躯幹)	>200mA ^m - ² (CNS) スキャナのボア端から約 1.0m の領域は限度を超える。
RF (撮影中のみ)	10-数 100 MHz	SAR 0.4Wkg ⁻¹ (全身) 10Wkg ⁻¹ (頭部・躯幹) 0.4Wkg ⁻¹ (四肢) 全ての SAR は 6 分間平均。 局所 SAR は生体組織 10g 平均。	通常環境では超えない ¹⁾

このように、MRI 周辺での医療業務では、ICNIRP ガイドラインの範囲内のばく露とすることは、通常の作業状況では困難であり、何らかの防護手段を採用せざるを得ない。しかし、それによって、医療の質が低下したり、作業員や患者にとって電磁場以外のリスクがむしろ増大してしまう危険が否定できない。MRI 医療関係者は、このような状況において電磁場リスク指令に関する法律制定が行われることに大きな危機感を抱いた。このことが、法律制定期限の 4 年間の延期という決定に結びついた。本稿で述べた、MRI による電磁場ばく露と、電磁場リスク指令に関する経緯については、英国物理学会がとりまとめた報告書⁹⁾に詳細に記載されている。この資料は全文和訳して添付している (資料 E)。

3.4 鉄道

鉄道作業員の電磁場ばく露について、英国鉄道安全標準化委員会 (RSSB) が 2006 年に報告書をまとめている¹⁰⁾。RSSB は、英国の鉄道産業界が鉄道の安全衛生を継続的に改善し、不必要な経費を省き、営業成績を向上させることを指導し援助することを目的とした、民

間の組織である。報告書は、後述の電磁場リスク指令が欧州指令として公示されたことを受けて、鉄道業務にともなう電磁場ばく露の実態を調査し、そのインパクトを評価することを意図したものである。

報告書の目的は指令によって鉄道産業が受ける影響を評価し、指令を遵守するために必要な管理手段を特定することである。この検討の中に、鉄道業務で受ける電磁場ばく露の種類を特定すること、そのレベルを評価することが含まれている。但し、実測ではなく、モデルを用いた計算によっている。報告書は196頁あり、全文のPDF文書が公開されている http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research/T515_rpt_final.pdf。また、その概要版が、http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/Research/T515_rb_final.pdf に公開されている。以下では、ばく露実態に関する要点を記す。

発生源として、交流き電設備（25kV 架線、動力帰路導体、動力帰路レール、動力ボンド、25kV 給電ケーブル、変圧器給電ケーブル、中間接合部、など）、直流き電設備（導体レール、帰路レール、給電および帰路ケーブル、など）、無線周波波源、その他が挙げられている。低周波および直流電磁場についての結論は以下の通りである。

鉄道作業員の電磁場への接近は、業務によらずあまり差がない。但し、交流き電システムの高電圧／大電流設備に接近する保守作業員は例外的である。

25kV の 50Hz 交流き電システムの電場については、いずれのシナリオでも規制値を超えない。但し、25kV の送電線下の遮蔽されていない跨線橋では、11.8kV になる場合があり、アクション値 10kV/m を超える可能性がある。鉄道変電所での屋内の閉閉装置やシールドされていない給電線に 0.4m 程度まで近づく場合も、アクション値を超える可能性がある。架空線の電圧が 25kV のときのプラットフォーム上での最悪値は 4.09kV/m であり、電圧の最大値 31.9kV でも 5.2kV/m である。

25kV の 50Hz 交流き電システムによる磁場については、ほとんどのシナリオで規制値を超えない。しかし、遮蔽されていない跨線橋のデッキから 1m 程度の高さまで、あるいは変圧器給電ケーブルに 0.5m 程度に接近した場合には、アクション値を超える可能性がある。

直流き電システムからの電場に関しては、リスクは見いだされなかった。磁場については、埋め込みペースメーカー装着者に勧告される 0.5mT がプラットフォームの端などの公衆の立ち入る場所や、鉄道作業員の立ち入る多くの場所で生じる可能性がある。これを除いて、直流磁場のリスクは見いだされない。

3.5 わが国の職場環境についての追加調査について

本研究では、実態調査の一環として、平成9年度から14年度に厚生労働省が中央労働災害防止協会に委託して実施した実態調査を踏まえて、必要な補完のための調査を実施する

ことを視野に入れていた。しかし、上述の大規模調査の再検討および今回の文献調査および聞き取り調査の結果を踏まえて検討した結果、多くの測定調査が欧州で行われており、それらが過去のが国の測定データと一貫していることから、単年度の研究計画内で職場の実態調査を行う必要はないと判断した。

平成 9-14 年度の調査時には、人体ばく露に関する電磁場の測定方法が未確立で、標準化が進んでいなかった。現在では、IEC TC106 において測定方法の国際標準化がかなり整備されており（本報告の 5.1 を参照）、また欧州電気標準会議では、職場における電磁場の測定方法の欧州規格 EN50499 が 2008 年 12 月に発行されている。しかし、次節でみるように、欧州指令の今後についてはまだ不透明な情勢である。そこで、測定方法についての準備体制を整えるが現時点では大切であり、1998 年の ICNIRP ガイドラインに基づくばく露限度値も、変更の可能性がある。ばく露限度値が変更されれば、測定方法も変更しなければならないと思われる。

このような状況を考慮して、本研究では、IEC における国際規格を踏まえた測定システムの整備と予備的な測定を実施した。これについては、別紙 2 に添付する。

参考文献

- 1) 「電磁ばく露に関する調査研究結果報告書（平成 9 年度～平成 14 年度総括報告書）」
中央労働災害防止協会 労働衛生調査分析センター
- 2) T.G. Cooper: "Occupational exposure to electric and magnetic fields in the context of the ICNIRP guidelines", NRPB-W24 (2002)
- 3) 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)" 18th individual directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC (2004)
- 4) ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", Health Physics, vol. 74, no. 4, pp.494-522 (1998)
- 5) Institute of Physics Report: MRI and the Physical Agents (EMF) Directive, Institute of Physics, November 2008
(http://iopublishing.com/activity/policy/Publications/file_32151.pdf)
- 6) Rail Safety and Standards Board (RSSB). Investigation into the Effects of the Electromagnetic Fields Directive on Railway Operations (T515), 2006.

4. 諸外国の規制と安全管理の状況

4.1 職場における電磁場ばく露に関する欧州理事会指令

(1) 欧州指令 2004/40/EC (資料 B)

労働における健康と安全に関する枠組み指令 89/391/EEC(1989年6月12日)¹⁾ (国際安全衛生センターが和訳を公開 http://www.jniosh.go.jp/icpro/jicosh-old/japanese/country/eu/law/directive/89_391_EEC/index.html) の第16条に規定された個別指令のうち、物理的因子としては振動 2002/44/EC、騒音 2003/10/EC に続く台18番目の個別指令として、電磁場 2004/40/EC²⁾ が2004年に制定された。この指令は、「物理的要因(電磁場)に起因するリスクへの労働者の曝露についての健康および安全の最低要求事項に関する2004年4月29日付 欧州議会・理事会指令 2004/40/EC」と題されるが、本報告書では「電磁場リスク指令」と略称する。この指令の内容は、労働者の健康と安全に関する電磁場への業務上の曝露の短期的有害性を扱う最低要求事項であり、加盟各国は、これより厳格な規則を定めることもできる。法律制定の期限は、2008年4月1日までと義務づけられた。

指令は、周波数0から300GHzの時間変動する電場、磁場および電磁場に関して、ICNIRPガイドラインの基本制限に基づく曝露限度値(ELV)を定めている。労働者は、健康への影響と生物学的考慮にもとづいて定められたこの限度値を超えて曝露してはならない。また、同指令は、ICNIRPガイドライン³⁾の参考レベルを基礎にしたアクション値も定めている。このアクション値は、直接測定可能な電場強度や磁束密度で表現されており、測定値がそれらを超えた時点で雇用者が同指令に定められた活動をひとつ以上行わなければならない値である。このアクション値の順守により、関連する曝露限度値を確実に順守することができる。電磁場リスク指令については、資料Bに全文訳出して添付する。

(2) 欧州指令に対する反応

前項の電磁場リスク指令の公示にともない、そのインパクトについての検討がさまざまな業界で行われた。その過程で多くの問題点の指摘がなされた。中でもMRIの周辺での医療従事者のばく露が、指令のばく露限度値を超えることが明らかであり、しかも、そのリスクが必ずしも明確なものでないことから、医療に無用の制約となることを懸念して、指令の法律制定に反対する運動が展開された(資料E参照)。

その一方で、いくつかの国では、速やかに法律制定が実施された。EU官報(2008年9月8日)によれば、イタリア、オーストリア、チェコ、スロバキア、リトアニア、ラトビア、エストニアの7カ国が国内法に転換済みである。

(3) 法律制定期限の延期（資料 C）

MRI 関係者の強い働きかけの結果、指令の法律制定期限を当初案より 4 年間延期して、2012 年 4 月 30 日までとする提案が 2007 年 10 月 26 日付けでなされた⁴⁾。

提案の根拠として 3 つの理由を挙げている。

- 指令で定める曝露限度値が MRI の医療応用に与えるマイナスの影響について、欧州委員会が開始した調査も含む各種調査の分析が完了するまでの時間的猶予のため
- 指令が定めるばく露限度値の根拠となっている ICNIRP の勧告するガイドラインが、指令が採択された以降の研究成果を含む最新の科学的調査に基づいた WHO による電磁場に関する環境保健クライテリアを考慮した、最新の検証を踏まえたものとなるのを待つため
- 同指令による影響を徹底的に分析し、労働者の健康・安全の保護と、電磁場を利用した医療および産業活動の継続・発展の両方を高レベルで保障することを目的とした指令の改正を提案するため

この提案は採択され、2008 年 4 月 23 日付けで欧州理事会指令 2008/46/EC⁵⁾として発行された。2004/40/EC に対する変更点は、法律制定の実施期限のみである。提案の全文訳を資料 C に示す。

(4) 電磁場リスク指令の今後の選択肢

2008 年 7 月、欧州委員会は 2004/40/EC 指令の今後のありかたの評価に関する委託研究を公募した。2012 年の移行に向けて、その方向性を検討することを目的としている。2008 年 12 月に契約し、2009 年 9 月に終了する予定である。

選択肢のたたき台として、欧州委員会は 5 つの選択肢を示した。これらについて、さまざまな利害関係者による分析を行い、その結果に基づいて今後の電磁場リスク指令の取り扱いを決定することになっている。欧州委員会の提示した選択肢は、表 4.1 に示す(A)～(E)の 5 項目である。

表 4.1 欧州委員会が示した 5 つの選択肢

(A)	現在の ELV の維持	当初の内容のまま、内容を変えずに法律制定期限を 2008 年 4 月 30 日から 2012 年 4 月 30 日に延期する
(B)	最新の国際的勧告に基づく	ICNIRP は WHO の国際電磁場プロジェクトの結果を受けて、ガイドラインの改訂している。静磁場のガイドラインが 2009 年に公表さ

	新たな曝露限界値 (ELV) の採用	れ、低周波電磁場についても、作業中で、2012年には改定の完了が期待されている（高周波は、2012年4月に間に合うのが困難と思われる）。ICNIRP のガイドライン改訂あるいは、IEEE/ICES の規格など、現在の ICNIRP ガイドラインより更新された曝露限度値を用いるというのが第2の選択肢である。
(C)	特定事例に対して指令の免除規定	指令の規制範囲から特定の機器や作業環境を除外するものである。ガイドラインに示される曝露限度値は、特定の機器や環境を前提としたものでなく、一般的に適用される。このため、ある程度の安全側の判断がなされている。一方、機器や環境が特定され、その個別の状況に応じたリスク評価がなされるならば、それらは一般的なガイドラインの適用を免れる、という考え方である。
(D)	最新の国際的勧告に基づく法的拘束力のないアクション	この選択肢は、ICNIRP ガイドラインを、法的規制ではなく慎重な勧告として位置づけ（本来のガイドラインの地位）、欧州規模で共通の安全ガイダンスを導入することである。実施ガイド・広報活動・訓練プログラム・欧州レベルまたはセクターレベルでの社会的パートナー間の自発的合意などを伴う。
(E)	指令の撤回	2004/40/EC 指令を撤回する

(5) 利害関係者ワークショップ

EU 指令 2004/40/EC の影響について、前項の5つの選択肢に対し、利害関係者が評価するためのワークショップが、2009年2月18-19日にスロベニアのリュブリャナで開催された(<http://www.inis.si/emf2009/programme/>)。欧州委員会の雇用・社会問題・機会均等総局 (DG EMPL) が、FICETTIC コンソーシアムに委託した研究プロジェクト

「2004/40/EC 指令を修正した場合の健康、社会経済、環境への影響についての分析」のもとで開催された。FICETTIC コンソーシアムは、次の機関で構成されている。

- 労働衛生研究所 (フィンランド)
- EMField Ltd. (英国)
- 労働防護中央研究所 (ポーランド)
- 国立職業安全予防研究所 (ISPESL) (イタリア)
- モデナ・レッジョエミリア大学 (イタリア)
- TRaC-KTL Ltd. (英国)
- ウメア大学 (スウェーデン)