

## 磁場の生体への影響

### ——特に変異原性, 発癌性について——

飯島 純夫, 山縣然太朗, 大間 敏美, 浅香 昭雄

近年関心が高まってきている磁場(電磁場)の変異原性と発癌性について現在までの研究を総説した。変異原性については遺伝子突然変異についても染色体変異(染色体異常, 姉妹染色分体交換)についても大部分の知見は陰性結果であった。しかし, 最近低周波パルス磁場を曝露させた場合に染色体異常頻度が有意に高くなるという報告がなされているので, 今後さらに検討していくことが必要である。発癌性については, 疫学的研究では陽性結果と陰性結果が相半ばしており, 動物実験では発癌性は証明されていない。従って, 今後周波数, 磁場強度, 波型等を変化させた種々の条件下での特に変動磁場での知見を集積していくことが必要であろう。

キーワード: 磁場, 電磁場, 変異原性, 発癌性

#### I. はじめに

近年, 磁場を応用した巨大な装置(シンクロトン, サイクロトン, 核融合炉, リニアモーターカーなど)が次々と開発され, また臨床医学の分野では核磁気共鳴断層撮影装置(MRI; Magnetic resonance imaging)が広く使用されるようになって, 電磁場(Electromagnetic fields)の生体への影響に関心もたれるようになってきた。さらに, 最近では一般の住居で使用されている交流電気(周波数50 Hz, 60 Hz)に由来する電磁場と癌(特に白血病)との関連が議論されている。50 Hzないし60 Hzの周波数の電磁場は極低周波(Extremely low frequency)ともいわれる。本論文では電磁場の生体への影響のうち, 特に変異原性, 発癌性について述べる。なお, 他の生体への影響については, 他の総説<sup>1-3)</sup>あるいは成書<sup>4-6)</sup>を参照されたい。

ここで磁場ないしは電磁場の分類について, 簡単にふれることにする。磁場は大きく, 直流磁場(定常磁場)と交流磁場(変動磁場)とに大別される。他にパルス磁場がある。そして, 磁場は電場と通常は切り離せないで電磁場として一括して述べられることが多い。その場合定常磁場は周波数がゼロの場合と考えら

れる。磁場強度の単位はT(テスラ; 1T=1000 G)である。

#### II. 変異原性

変異原性は発癌性と密接に関連していることが近年の研究で明らかになっている。したがって, 変異原性の検出は発癌性および遺伝毒性を予測するために有効である。変異原性とは広義には遺伝子突然変異と染色体変異を含んでいる。また染色体変異としては, ここでは特に染色体異常, 姉妹染色分体交換(Sister chromatid exchange; 以下SCEと略)を中心にして述べる。SCEとは, 染色体のそれぞれの染色分体(姉妹染色分体)が一見, 同一の部位で完全に入れ替わる現象である。染色体異常は電離放射線や種々の化学物質で誘発されるが, その生成は発癌にいたる可能性が示唆されているし, SCEも発癌性との関連が示されている<sup>7)</sup>。

##### 1. 遺伝子突然変異

Ames-testを用いた変異原性テストでは, 定常磁場と他の既知変異原との複合影響でみた報告<sup>8)</sup>では複合させた既知変異原の種類によって磁場はある場合には促進的であり, ある場合には抑制的であった。また, キイロショウジョウバエを用いた優性致死試験<sup>9)</sup>, 染色体連関劣性致死試験<sup>10)</sup>いずれも磁場曝露に対して

陰性の結果が報告されている。興味深い知見として、キイロショウジョウバエに既知変異原である EMS と磁場を複合させた場合に性染色体連関劣性致死突然変異が相乗的に増加したという報告<sup>11)</sup>がある。

## 2. 染色体への影響

### (1) 定常磁場

Wolff ら (1980)<sup>12)</sup>は CHO cell (chinese hamster ovary cell) に 0.352 T の定常磁場を曝露させた場合に染色体異常, SCE, DNA 合成能のいずれにも有意な影響が認められなかったことを報告している。また Wolff ら (1985)<sup>13)</sup>は別の論文でヒト末梢血リンパ球を用いて 2.35 T という強磁場に曝露させた場合にも染色体異常, SCE の有意な増加を認めなかったと報告している。Cooke and Morris (1981)<sup>14)</sup>はヒト末梢血リンパ球に最大 1 T の磁場に曝露させた場合に染色体異常, SCE は対照と比して有意な増加を認めなかったことを報告している。著者らの研究 (1988-1990)<sup>15-17)</sup>でも磁場の単独曝露の場合には 0.8 T までの磁場強度で染色体異常も SCE も有意な増加を認めておらず過去の知見と一致していた。Peteiro-Cartelle and Cabezas-Cerrato (1989)<sup>18)</sup>は、ヒトリンパ球に定常磁場を曝露させた場合、染色体異常でも SCE でもいずれも陰性であったと報告している。以上の知見から現在までのところ定常磁場によって *in vitro* で染色体異常および, SCE が誘発されたという報告はみられていない。最近、染色体異常の簡便な検出法である小核試験を用いて、マウスに 4.7 T の MRI 由来の高磁場を曝露させた場合に曝露時間が 24 時間以上になった時に小核の誘発頻度が有意に増加するという興味深い結果が報告されている<sup>19)</sup>。ストレスによって餌の摂取ができなかったためとも考えられると考察しており、因果関係については今後の研究の結果を待たねばならない。

### (2) 低周波変動磁場

低周波変動磁場の染色体への影響に関しては、マウスでもヒトリンパ球でも CHO 細胞でも染色体異常, SCE は誘発されなかったと報告されている<sup>20-25)</sup>。しかし、最近 Garcia-Sagredo and Monteagudo (1991)<sup>26)</sup>はヒトリンパ球に 40 G のパルス磁場を曝露させた場合に有意に高頻度の染色体異常が誘発されることを見出した。同様の結果はほぼ同時期に、Khalil and Qas-

sem (1991)<sup>27)</sup>によって報告されている。この報告では、やはりパルス磁場 (50 Hz, 1.05 mT) が用いられており、またすべての曝露時間 (24, 48, 72 時間) で有意な高頻度の染色体異常誘発が認められ、72 時間曝露では SCE 頻度も有意に増加していた。従って、低周波変動磁場の場合、パルス磁場として曝露させた場合、条件によっては染色体への影響が示唆された。また、磁場と既知変異原物質とを複合させた場合に SCE がやや増加したという報告もある<sup>28)</sup>。マウスの小核試験では 50 Hz の電場が有意に高頻度に小核を形成することが報告されている<sup>29)</sup>。低周波変動磁場と染色体変異に関しては多くの陰性の報告とともにこれらの陽性の報告があるので、今後さらに *in vitro*, *in vivo* 両方の知見を集積していくことが必要とされる。

## III. 発癌性

### (1) 小児癌

1979 年に Wertheimer and Leeper<sup>30)</sup>は強力な電力線 (従って磁場も発生する) の下に居住している子供は対照群の 1.6~2 倍の癌の罹患率であったと報告し大きな反響を呼んだ。しかしこの報告には多くの反論が寄せられた。その後、Fulton ら (1980)<sup>31)</sup>と Myers ら (1985)<sup>32)</sup>は子供の白血病と磁場曝露とは関連がないという疫学調査結果を報告した。しかし、1986 年になって Tomenius<sup>33)</sup>は癌の子供は対照群に比べ電気施設により近いところに住んでいたと報告しており、特に神経系の腫瘍については 3.7 倍であった。Savitz ら (1990)<sup>34)</sup>は、家庭用電気製品からの 60 Hz の電磁場と小児癌との関連を調査し特に出生前の電気毛布の使用が小児癌の発生と関連していること、癌の種類では特に白血病と脳腫瘍で関連が強かったことを報告し注目をあびた。London ら (1991)<sup>35)</sup>は、家庭での電磁場への曝露、電線の配置、電気製品の使用と白血病の risk の間の関連を 10 歳までの小児を対象として調査した。その結果、白血病の risk と測定された電磁場との間には関連は認められなかった。一方、電線の配置と小児白血病の risk との間には関連が認められた。Jauchem (1991)<sup>36)</sup>は、電磁場と小児癌との関連に関して、過去の論文では量反応関係がみられていない、曝露量を直接測定していない、他の交絡因子の存在の可能性、動物実験では発癌性が証明されていないなどを指摘し、

本当に電磁場と小児癌との間には関連があるのかと疑問を投げかけている。同様なことは、Michaelson (1991)<sup>37)</sup>も述べている。すなわち、電線の配置を家庭での電磁場の曝露の指標とするにはあまりにも粗すぎると指摘している。さらに発癌性の基礎に存在するはずのDNA、染色体への影響について、現在までの知見では50Hzないし60Hzの電磁場はDNAに影響を及ぼさないこと、染色体の切断やSCEの頻度も上昇させないこと（この点については前述のようにある一定の条件下では染色体異常もSCEも誘発される可能性が最近の報告<sup>26-27)</sup>で示唆された）、DNAの修復過程にも影響を及ぼさないことを指摘しており、実験室での検討では電磁場と癌の発生との間の関連を支持するものはないと述べている。しかし電磁場は他のagentによってすでにinitiateされた癌をpromoteする可能性はあり、電磁場は発癌性に対してinitiatorとしてよりもpromoterとして働く可能性が示唆されている<sup>6)</sup>。このことを支持する報告がいくつかなされている<sup>38-39)</sup>が、陰性結果の報告もある<sup>40-41)</sup>。さらに、電磁場と癌との関連を支持する知見として、電磁場がTリンパ球が癌の細胞を適切に殺すことを妨げる、すなわち電磁場が免疫システムを阻害して癌を増殖させる可能性が報告されている<sup>42)</sup>。

また、磁場の強さは線源からの距離が遠ざかるにつれて指数関数的に減衰するので、電気毛布からは電磁場の曝露を大量に受ける可能性があるが、空气中50 feet (約15 m) に設置された電力線からの曝露はほとんどないと考えられている<sup>43)</sup>。Woolfら<sup>44)</sup>は1つの可能性として、ある種の電気系統では反応性が極めて高い化学物質が産生される可能性があることを指摘している。また、Kavet<sup>45)</sup> (1991) は別の仮説として水道管の中の地電流が電線の配置と関連していて、それが水道水中に腐食物を放出し、その腐食物が癌のリスクファクターとなっている可能性を指摘している。一方では、Pool<sup>46)</sup> (1991) は電線の配置と白血病のriskとの相関が単なるartifactである可能性を指摘している。

## (2) 成人の癌

Wertheimer and Leeper (1982)<sup>47)</sup> は電磁場と成人の癌との関連を初めて報告した。かれらは高圧線下に住んでいる人達に癌の発生率が高かったことを報告した。なかでも神経系の癌、子宮がん、乳がんが高かっ

た。白血病との関連は認められなかった。その後、McDowall (1983)<sup>48)</sup> は白血病の発生とは関連がみられなかったと報告している。

電磁場への職業的曝露と癌との関連では、Milham (1982)<sup>49)</sup> は電磁場職場で働いている人の間で白血病の発生率が有意に高かったことを報告し、その後骨髄性白血病がアマチュア無線を行なっているものの中で有意な増加を示したことも報告している<sup>50)</sup>。Colemanら (1989)<sup>51)</sup>、Bastuji-Garinら (1990)<sup>52)</sup> も電磁場に曝露した作業場で白血病のriskが高いことを示した。

Linら (1985)<sup>53)</sup> は電磁場に曝露されている職場では脳腫瘍が期待値よりも有意に高く発生したと報告している。このことはThomasら (1987)<sup>54)</sup>、Tornqvistら (1991)<sup>55)</sup> の調査からも認められている。

また、最近の話題としては、Tynes and Andersen (1990)<sup>56)</sup>、Demersら (1991)<sup>57)</sup>、Matanoskiら (1991)<sup>58)</sup>、Stevensら (1992)<sup>59)</sup> は、電磁場への職業的曝露が男性の乳がんのriskを高める可能性を示している。またVenaら (1991)<sup>60)</sup> は女性の乳がんと電気毛布の使用との関連を調べ、その結果、電気毛布の使用が乳がんのriskを増加させるという仮説を支持する結果は得られなかった。しかし、最も頻繁に使用する者では、riskがやや高い傾向にあるので、さらに調査する必要性が示唆された。実際、電磁場は動物実験でメラトニン産生を抑制するという報告があり<sup>61)</sup>、一方メラトニン産生の抑制と乳がんの発生との間には関連があることが動物実験で確かめられている<sup>61)</sup>。また、Verreaultら (1990)<sup>62)</sup> は電気毛布からの電磁場は白人成人男性の睾丸腫瘍のriskを増加させなかったことを報告している。

以上のように電磁場と発癌との関連については陽性の報告と陰性の報告とが相半ばしており、結論的なことはいえない。この点について、Savitzら (1989)<sup>63)</sup> は電磁場と癌の発生に関する疫学的研究を総説し、居住地や職場で長期に電磁場に曝露した場合、白血病と脳腫瘍の危険性が増す可能性があることを示唆している。しかし、現在までの研究では因果関係については結論的なことはいえない、としている。特に、従来の報告では磁場への曝露評価がはっきりとしていないこと、磁場ではなく他の要因が関与している可能性をあげている。最近、電磁場と癌との関連については医学専門雑誌誌上で多くの論議がなされているが<sup>64-83)</sup>、い

ずれも結論は出ておらず、最終的結論は今後の研究に待たねばならない。

#### IV. おわりに

すでに述べたように、定常磁場については数テスラといった強力磁場でも染色体に影響が認められないことが明らかになっている。しかし、低周波の変動磁場については条件によっては染色体に影響を及ぼす可能性が示唆されており、今後さらに検討していく必要性が認められた。これらの報告はいずれも50Hzまたは60Hzという極低周波を用いたものであり、それ以外の周波数で行なった研究はほとんどみられていない。これはひとつにはこの周波数は通常の家庭で用いられているものに由来するためである。電磁場の発癌性に関しては、陽性の報告は疫学的研究のみであり、動物実験、臨床的観察からは認められていない。これらのことから、今後周波数、磁場強度、波型等を変えた様々な条件下で低周波変動磁場による *in vivo*, *in vitro* の研究についてさらに知見を集積していくことが必要と考えられる。

#### 文 献

- 1) 中川正祥 (1991) 電磁場の生物学的効果とその防護をめぐって。産業医学, 33: 359-371.
- 2) 中川正祥 (1985) 物理的環境因子による健康障害, 磁場。新版産業保健, 第1巻 (日本産業衛生学会教育資料委員会編)。篠原出版, 東京, 616-626.
- 3) 志賀 健, 宮本博司, 上野照剛著 (1991) 磁場の生体への影響。てらべいあ, 東京。
- 4) Environmental Health Criteria 35 (1984) Extremely Low Frequency (ELF) Fields, WHO.
- 5) Environmental Health Criteria 69 (1987) Magnetic Fields, WHO.
- 6) U. S. Congress, Office of Technology Assessment (1989) Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields. Background Paper.
- 7) Wolff S (1979) Sister chromatid exchange: The most sensitive mammalian system for determining the effects of mutagenic carcinogens. In: Berg K, ed. Genetic Damage in Man Caused by Environmental Agents. Academic Press, New York, pp 229-246.
- 8) 清水英佑, 鈴木勇司, 益頭尚典, 林 和夫, 橋田ちせ, 安藤皓章 (1989) 変異原性に与える磁場の影響について。産業医学, 31: 669.
- 9) Hamnerius Y, Rasmuson A, Rasmuson B (1985) Biological effects of high frequency electromagnetic fields on *Salmonella typhimurium* and *Drosophila melanogaster*. Bioelectromagnetics, 6: 405-414.
- 10) Otaka Y, Kitamura S, Furuta M, Shinohara A (1992) Sex-linked recessive lethal test of *Drosophila melanogaster* after exposure to 50-Hz magnetic fields. Bioelectromagnetics, 13 (1): 67-74.
- 11) 小穴孝夫 (1982) 磁場の変異原性・催奇性の検出。日本遺伝学会第54回大会, 福岡。
- 12) Wolff S, Crooks LE, Brown P, Howard R, Painter RB (1980) Tests for DNA and chromosomal damage induced by nuclear magnetic resonance imaging. Radiology, 136: 707-710.
- 13) Wolff S, James TL, Young GB, Margulis AR, Bodycote J, Afzal V (1985) Magnetic Resonance Imaging: Absence of *in vitro* cytogenetic damage. Radiology, 55: 163-165.
- 14) Cooke P, Morris PG (1981) The effects of NMR exposure on living organisms. II. A genetic study of human lymphocytes. Br J Radiol, 54: 622-625.
- 15) 飯島純夫, 竹下達也, 日暮 眞 (1988) 磁場曝露によるヒト末梢血リンパ球での姉妹染色分体交換の誘発について。日本衛生学雑誌, 43: 243.
- 16) 飯島純夫, 山縣然太郎, 竹下達也, 日暮 眞 (1989) 磁場曝露によるヒト末梢血リンパ球での染色体変異について。日本衛生学雑誌, 44: 472.
- 17) 飯島純夫, 竹下達也, 山縣然太郎, 星野齊之, 浅香昭雄, 日暮 眞 (1990) 磁場曝露によるヒト末梢血リンパ球での染色体変異について (第2報)。日本衛生学雑誌, 45: 551.
- 18) Peteiro-Cartelle FJ, Cabezas-Cerrato J (1989)

- Absence of kinetic and cytogenetic effects on human lymphocytes exposed to static magnetic fields. *J Bioelectricity*, 8 : 11-19.
- 19) 鈴木勇司, 福本正勝, 小此木英男, 清水恵一郎, 清水英佑 (1992) 高磁場の染色体異常誘発能(2)マウス小核試験による白血病誘発物質の検討. 第65回日本産業衛生学会講演集, 238.
- 20) Bauchinger M, Hauf R, Schmid E, Drisp J (1981) Analysis of structural chromosome changes and SCE after occupational long-term exposure to electric and magnetic fields from 380 kV systems. *Radiat Environ Biophys*, 19 : 235-238.
- 21) Nordenson I, Hansson-Mild K, Nordstrom S, Sweins A, Birke E (1984) Clastogenic effects in human lymphocytes of power frequency electric fields: In vivo and in vitro studies. *Radiat Environ Biophys*, 23 : 191-201.
- 22) Cohen MM, Kunska A, Astemborski JA, McCulloch D, Paskewitz DA (1986) Effect of low-level 60-Hz electromagnetic fields on human lymphoid cells, I. Mitotic rate and chromosome breakage in human peripheral lymphocytes. *Bioelectromagnetics*, 7 : 415-423.
- 23) Cohen MM, Kunska A, Astemborski JA, McCulloch D, Paskewitz DA (1986) The effect of low-level 60-Hz electromagnetic fields on human lymphoid cells, II. Sister-chromatid-exchanges in peripheral lymphocytes and lymphoblastoid cell lines. *Mutat Res*, 172 : 177-184.
- 24) Takahashi K, Kaneko I, Date M, Fukada E (1987) Influence of pulsing electromagnetic field on the frequency of sister-chromatid exchanges in cultured mammalian cells. *Experientia*, 43 : 331-332.
- 25) Garcia-Sagredo JM, Parada LA, Monteagudo JL (1990) Effect on SCE in human chromosomes in vitro of low-level pulsed magnetic field. *Environ Mol Mut*, 16 : 185-188.
- 26) Garcia-Sagredo JM, Monteagudo JL (1991) Effect of low-level pulsed electromagnetic fields on human chromosomes in vitro : analysis of chromosomal aberrations. *Hereditas*, 115 : 9-11.
- 27) Khalil AM, Qassem W (1991) Cytogenetic effects of pulsing electromagnetic field on human lymphocytes in vitro : chromosome aberrations, sister-chromatid exchanges and cell kinetics. *Mutat Res*, 247 : 141-146.
- 28) Rosenthal M, Obe G (1989) Effects of 50-hertz electromagnetic fields on proliferation and on chromosomal alterations in human peripheral lymphocytes untreated or pretreated with chemical mutagens. *Mutat Res*, 210 (2) : 329-335.
- 29) EL Nahas SM, Oraby HA (1989) Micronuclei formation in somatic cells of mice exposed to 50 Hz electric fields. *Environ Mol Mut*, 13 : 107-111.
- 30) Wertheimer N, Leeper E (1979) Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol*, 109 : 273-284.
- 31) Fulton JP, Cobb S, Preble L, Leone L, Forman E (1980) Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am J Epidemiol*, 111 : 292-296.
- 32) Myers A, Cartwright RA, Bonnell JA, Male JC, Cartwright SC (1985) Overhead power lines and childhood cancer. Technical Report, Proceedings of the International Conference on Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology, 1985.
- 33) Tomenius L (1986) 50-Hz electromagnetic environments and the incidence of childhood tumors in Stockholm County. *Bioelectromagnetics*, 7 : 191-207.
- 34) Savitz DA, John EM, Kleckner RC (1990) Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am J Epidemiol*, 131 : 763-773.
- 35) London SJ, Thomas DC, Bowman JD, Sobel E, Cheng TC, Peters JM (1991) Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol*, 134 : 923-937.

- 36) Jauchem JR (1991) Electromagnetic fields and cancer in children—A scientific fact? *West J Med*, 154 : 228.
- 37) Michaelson SM (1991) Household magnetic fields and childhood leukemia : A critical analysis. *Pediatrics*, 88 : 630-635.
- 38) Balcer Kubiczek EK, Harrison GH (1991) Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120-Hz modulated 2.45-GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiat Res*, 126 (1) : 65-72.
- 39) Beniashvili DS, Bilanishvili VG, Menabde MZ (1991) Low-frequency electromagnetic radiation enhances the induction of rat mammary tumors by nitrosomethyl urea. *Cancer Lett*, 61 (1) : 75-79.
- 40) McLean JR, Stuchly MA, Mitchel RE, Wilkinson D, Yang H, Goddard M, Lecuyer DW, Schunk M, Callary E, Morrison D (1991) Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field : II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics*, 12 (5) : 273-287.
- 41) Stuchly MA, Lecuyer DW, McLean J (1991) Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field : I. Experimental design and exposure system. *Bioelectromagnetics*, 12 (5) : 261-271.
- 42) Adey WR (1990) Joint actions of environmental nonionizing electromagnetic fields and chemical pollution in cancer promotion. *Environ Health Perspect*, 86 : 297-305.
- 43) Krause M, Westneat D (1991) Possible link to cancer fuels debate regarding effects of magnetic fields. *Occup Health Saf*, 60 (9) : 28-30.
- 44) Woolf NJ (1991) Cancer—EMF connection. *Nature*, 351 (6321) : 10.
- 45) Kavet R (1991) An alternate hypothesis for the association between electrical wiring configurations and cancer. *Epidemiology*, 2 : 224-229.
- 46) Pool R (1991) EMF-Cancer link still murky. *Nature*, 349 : 554.
- 47) Wertheimer N, Leeper E (1982) Adult cancer related to electrical wires near the home. *Int J Epidemiol*, 11 : 345-355.
- 48) McDowall ME (1983) Mortality of resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Lancet*, 77 : 246.
- 49) Milham S (1982) Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New England J Med*, 307 : 249.
- 50) Milham S (1985) Silent keys : Leukemia mortality in amateur radio operators. *Lancet* 1 : 812.
- 51) Coleman MP, Bell CMJ, Taylor HL, Primic-Zakeji (1989) Leukemia and residence near electricity transmission equipment : a case-control study. *Br J Cancer*, 60 : 793-798.
- 52) Bastuji-Garin S, Richardson S, Zittoun R (1990) Acute leukemia in workers exposed to electromagnetic fields. *Eur J Cancer*, 26 : 1119-1120.
- 53) Lin RS, Dischinger PC, Conde J, Farrell KP (1985) Occupational exposure to electromagnetic fields and the occurrence of brain tumors. *J Occup Med*, 27 : 413-419.
- 54) Thomas TL, Stolley PD, Stemhagen A, Fontham ET, Bleeker ML, Stewart PA, Hoover RN (1987) Brain tumor mortality risk among men with electrical and electronics jobs : A case-control study. *J Natl Cancer Inst*, 79 : 233-236.
- 55) Tornqvist S, Knave B, Ahlbom A, Persson T (1991) Incidence of leukaemia and brain tumours in some “electrical occupations”. *Br J Ind Med*, 48 (9) : 597-603.
- 56) Tynes T, Andersen A (1990) Electromagnetic fields and male breast cancer. *Lancet*, 336 : 1596.
- 57) Demers PA, Thomas DB, Rosenblatt KA, Jimenez LM, Tierman AM, Stalsberg H, Stemhagen A, Thompson WD, Curnen MGM, Satariano W, Austin DF, Isacson P, Greenberg RS, Key C, Kolonel LN, West DW (1991) Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in man. *Am J Epidemiol*, 134 : 340-347.

- 58) Matanoski GM, Breyse PN, Elliott EA (1991) Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet*, 337 : 737.
- 59) Stevens RG, Davis S, Thomas DB, Anderson LE, Wilson BW (1992) Electric power, pineal function, and the risk of breast cancer. *FASEB J*, 6 (3) : 853-860.
- 60) Vana JE, Graham S, Hellmann R, Swanson M, Brasure J (1991) Use of electric blankets and risk of postmenopausal breast cancer. *Am J Epidemiol*, 134 : 180-185.
- 61) Stevens RG (1987) Electric power use and breast cancer : A hypothesis. *Am J Epidemiol*, 125 : 556-561.
- 62) Verreault R, Weiss NS, Hollenbach KA, Strader CH, Daling JR (1990) Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am J Epidemiol*, 131 : 759-762.
- 63) Savitz DA, Pearce NE, Poole C (1989) Methodological issues in the epidemiology of electromagnetic fields and cancer. *Epidemiologic Reviews*, 11 : 59-78.
- 64) Cartwright RA (1989) Low frequency alternating electromagnetic fields and leukaemia : the saga so far. *Br J Cancer*, 60 (5) : 649-651.
- 65) Newman ME (1989) The search for the missing link - electromagnetic fields and cancer. *J Natl Cancer Inst*, 81 (22) : 1686-1689.
- 66) Jauchem JR (1990) Electromagnetic fields and cancer. *Science*, 250 (4982) : 739.
- 67) Theriault G (1990) Cancer risks due to exposure to electromagnetic fields. Recent results. *Cancer Res*, 50 : 166-180.
- 68) Weisburger JH (1990) Cancer and electromagnetic fields. *Lancet*, 336 (8725) : 1259.
- 69) Trappier A, Lorio P, Johnson LP (1990) Evolving perspectives on the exposure risks from magnetic fields. *J Natl Med Assoc*, 82 (9) : 621-624.
- 70) Archer VE (1990) The authors reply to "Re: 'Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power-frequency magnetic fields' ". *Am J Epidemiol*, 132 (3) : 584-585.
- 71) Repacholi MH (1990) Cancer from exposure to 50/60 Hz electric magnetic fields—a major scientific debate. *Australas Phys Eng Sci Med*, 13 (1) : 4-17.
- 72) Moore GE (1991) The emperor's magnetic clothes. *Cancer*, 68 (3) : 455-457.
- 73) Kavet R (1991) An alternate hypothesis for the association between electrical wiring configurations and cancer. *Epidemiology*, 2 (3) : 224-229.
- 74) Bethwaite P, Pearce N (1991) Electromagnetic fields and cancer : an ongoing debate. *N Z Med J*, 104 (913) : 225-226.
- 75) Lin JC (1991) Perspectives on health effects of electric and magnetic fields. *Percept Mot Skills*, 72 (1) : 249-250.
- 76) Savitz DA (1991) Power lines and cancer risk. *JAMA*, 265 (11) : 1458.
- 77) Nawman ME (1991) Electromagnetic fields and cancer—media and public attention affect research. *J Natl Cancer Inst*, 83 (3) : 164-166.
- 78) Jauchem J (1991) Alleged health effects of electromagnetic fields : misconceptions in the scientific literature. *J Microw Power Electromagn Energy*, 26 (4) : 189-195.
- 79) Taylor H (1991) EMF primer. *NEHW Health Watch*, 11 (4) : 5-6.
- 80) Goldberg RB, Creasey WA (1991) A review of cancer induction by extremely low frequency electromagnetic fields. Is there a plausible mechanism? *Med Hypotheses*, 35 (3) : 265-274.
- 81) Foster KR (1992) Health effects of low-level electromagnetic fields : phantom or not-so-phantom risk? *Health Phys*, 62 (5) : 429-435.
- 82) Stevens RG, Savitz DA (1992) Is electromagnetic fields and cancer an issue worthy of study? *Cancer* 69 (2) : 603-607.
- 83) Jackson JD (1992) Are the stray 60-Hz electromagnetic fields associated with the distribution and use of electric power a significant cause of cancer? *Proc Natl Acad Sci USA*, 89 (8) : 3508-3510.

**Abstract****Biological Effects of Electromagnetic Fields  
with Special Reference to Their Mutagenicity and Carcinogenicity**

Sumio IJIMA, Zentaro YAMAGATA, Toshimi OOMA and Akio ASAKA

Recently public concern about the biological effects of electromagnetic fields (EMF) has been increasing. We reviewed studies on biological effects of EMF with respect to their mutagenicity and carcinogenicity.

As for the mutagenicity, few reports demonstrated positive results either in mutation or in chromosomal aberration. However, recently some reports have demonstrated significant effects of pulsed EMF on chromosome breakages.

The results of epidemiological studies on EMFs and cancer have been controversial. There has been no report which demonstrated carcinogenicity of EMF in animal experiments. Further studies including improved epidemiological studies and biological experiments using various frequencies, intensities and waveforms will be clearly needed.

---

Department of Health Sciences