

中間周波の健康リスク評価の動向

牛山 明 (国立保健医療科学院)

内容

- ① 中間周波とは？
ガイドライン・防護指針
- ② これまでの知見
国際機関・各国機関などの見解
- ③ 総務省実施研究の概要
- ④ まとめ

中間周波とは

- WHO EMF project 情報シート(2005年)では「ELF とRF の間の領域である300Hz～10MHz」と定義。
- WHO環境保健クライテリア238においては、「300Hz～100kHz」と定義。
- 一方で、ICNIRPガイドライン2010は、「低周波ガイドライン」であるが、1Hz～100kHzを対象としている(中間周波という表現は使用されていない)。
- 総務省においては、「低周波領域(10kHz以上10MHz以下)における電波防護指針の在り方」(平成27年3月)で該当領域に対して指針を作成(ICNIRP2010に準拠)。

本資料では、電波防護指針の低周波領域の中でも熱作用が伴わない10kHz～100kHzを便宜上「中間周波(IF: Intermediate Frequencyの略)」として記述する

電磁界の種類	非電離放射線						電離放射線		
	静電磁界	超低周波電磁界	中間周波電磁界	高周波電磁界			光	放射線	
周波数	ゼロ	300Hz以下 (50/60Hz:電力設備) 超低周波	300Hz~ 10MHz (20~90kHz:IH調理器) 中間周波	10MHz~ 300MHz	300MHz~ 3GHz (2.45GHz:電子レンジ) マイクロ波	3GHz~ 3000GHz (3THz)	3THz~ 3000THz	3000THz以上	
波長	なし								
主な発生源 や 利用例	<ul style="list-style-type: none"> ・地磁気 ・磁石 ・鉄道 ・MRI 	<ul style="list-style-type: none"> ・電力設備 ・家電製品電源 ・鉄道 	<ul style="list-style-type: none"> ・IH調理器 ・テレビ、パソコンモニタ ・鉄道 	<ul style="list-style-type: none"> ・ラジオ放送 ・テレビ放送 	<ul style="list-style-type: none"> ・電子レンジ ・携帯電話 	<ul style="list-style-type: none"> ・BS(衛星放送) 	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽光 	<ul style="list-style-type: none"> ・レントゲン 	

注：周波数「Hz(ヘルツ)」は1秒間に振動する数で、電磁波の伝わる速さ「 3×10^8 m/秒」を波長で割った数です。
 k(キロ)= 10^3 、M(メガ)= 10^6 、G(ギガ)= 10^9 、T(テラ)= 10^{12}

中間周波の主な発生源(これまで)



ブラウン管式ディスプレイ
15~35kHzの磁界が発生



IHクッキングヒーター
20kHz 60~90kHz


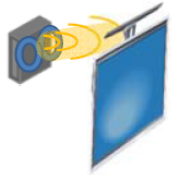


一方、近い将来には・・・

ワイヤレス電力伝送(WPT)等の先進的な無線システムの普及・実用化に向けた取組が急速に進展することが予想される。電波防護指針(平成2年電波技術審議会答申)や適合性評価方法に関して、新たな電波利用動向へ対応するための検討が必要。



本WGの設置趣旨

今後、利用が推進されるWPTシステム

対象WPT	家電機器用①	家電機器用②	家電機器用③	電気自動車用
給電対象・システムイメージ	スマートフォン、タブレットPC等 	オフィス機器、家電機器等 	ノートPC等 	電気自動車 
電力伝送方式	磁界結合方式		電界結合方式	磁界結合方式
伝送電力	～100W程度	～1.5kW程度	～100W程度	～3kW程度 (最大7.7kW)
使用周波数	6.765MHz～6.795MHz	20.05kHz～38kHz、 42kHz～58kHz、 62kHz～100kHz	425～524 kHz (アマチュア無線、海上無線、中波ラジオ放送に割り当てられた周波数帯は除く)	79kHz～90kHz
送受電距離	0～30cm程度	0～10cm程度	0～1cm程度	0～30cm程度

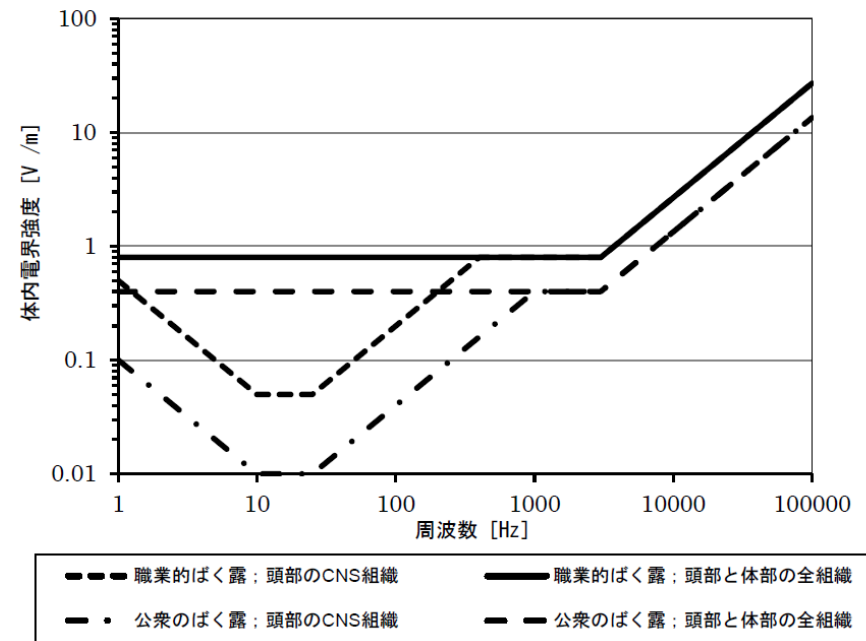
ICNIRPガイドライン2010

- 病理的な状態の発生、相当な苦痛や不快感を回避する
 - 神経刺激、筋組織の直接刺激、ならびに網膜閃光を根拠として採用
- 発がんの疫学結果については、「ガイドラインの根拠にするには科学的証拠が非常に薄い」
 - 同様に、その他長期的(慢性)影響、過敏症等についても採用しない
- 基本制限 (Basic Restriction) と参考レベル (Reference Level)
 - 基本制限は、神経系の一過性の反応から防護するための体内電界値 (V/m) で与えられる。刺激閾値からの低減係数 (Reduction Factor) の大きさによって、「職業的ばく露」と「公衆ばく露」に分けられる。
 - 参考レベルは、基本制限から数学的モデルで導出される測定可能な物理量。参考レベルを超えなければ基本制限は守られているが、参考レベルを超えた場合は基本制限を満たしているかの検討が必要。

ICNIRPガイドライン2010 【基本制限】

表2. 時間変化する電界および磁界への人体のばく露に対する基本制限

ばく露特性	周波数範囲	体内電界 (V m^{-1})
職業的ばく露		
頭部のCNS組織	1 Hz– 10 Hz	$0.5 / f$
	10 Hz – 25 Hz	0.05
	25 Hz – 400 Hz	$2 \times 10^{-3} f$
	400 Hz – 3 kHz	0.8
	3 kHz – 10 MHz	$2.7 \times 10^4 f$
頭部と体部の全組織	1 Hz – 3 kHz	0.8
	3 kHz – 10 MHz	$2.7 \times 10^4 f$
公衆ばく露		
頭部のCNS組織	1 Hz– 10 Hz	$0.1 / f$
	10 Hz – 25 Hz	0.01
	25 Hz – 1000 Hz	$4 \times 10^{-4} f$
	1000 Hz – 3 kHz	0.4
	3 kHz – 10 MHz	$1.35 \times 10^4 f$
頭部と体部の全組織	1 Hz – 3 kHz	0.4
	3 kHz – 10 MHz	$1.35 \times 10^4 f$



ICNIRPガイドライン2010 【参考レベル】

表3. 時間変化する電界および磁界への職業的ばく露に対する参考レベル (無擾乱、実効値)

周波数範囲	電界強度 E (kV m ⁻¹)	磁界強度 H (A m ⁻¹)	磁束密度 B (T)
1 Hz – 8 Hz	20	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$0.2 / f^2$
8 Hz – 25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^{-2} / f$
25 Hz – 300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2.4 \times 10^5 / f$	$0.3 / f$
3 kHz – 10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

表4. 時間変化する電界および磁界への公衆ばく露に対する参考レベル (無擾乱、実効値)

周波数範囲	電界強度 E (kV m ⁻¹)	磁界強度 H (A m ⁻¹)	磁束密度 B (T)
1 Hz – 8 Hz	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 Hz – 25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25 Hz – 50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz – 400 Hz	$2.5 \times 10^2 / f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz – 3 kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz – 10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

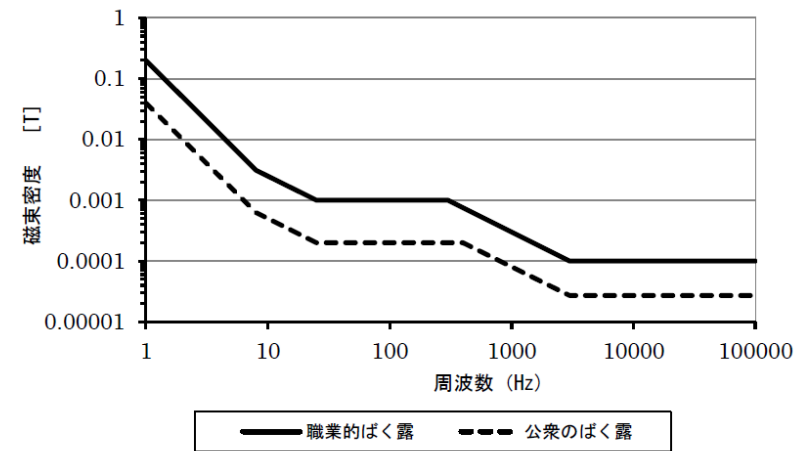


図2 時間変化する磁界へのばく露に対する参考レベル (表3、4を参照)

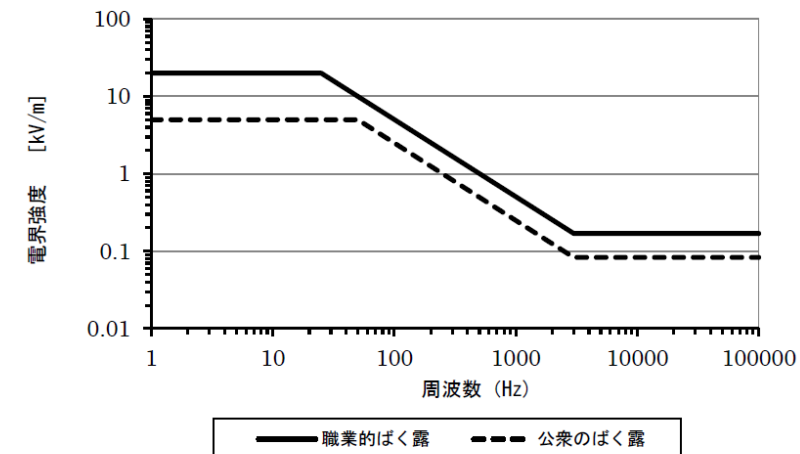


図3 時間変化する電界へのばく露に対する参考レベル (表3、4を参照)

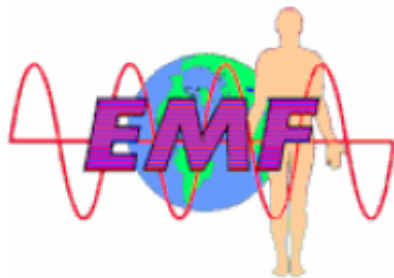
電波防護指針 低周波領域 (2015)

- 「電波防護指針の在り方に関する検討作業班」において改定案をとりまとめ、委員会で審議。最終的に情報通信審議会による答申(平成27年3月31日)
- ICNIRP2010との整合性
- 10kHz～100kHz: 刺激作用のみ考慮
- 100kHz～10MHz: 刺激作用と熱作用の双方を考慮
- 「基礎指針」に代えて「基本制限」の概念を導入
- 「強度指針」として、「参考レベル」の値を採用
- 検討作業班では、「長期的影響」や「過敏症」に関する文献調査も実施したが、防護指針に取り込むだけの根拠はなく、研究が必要と判断。

内容

- ① 中間周波とは？
ガイドライン・防護指針
- ② これまでの知見
国際機関・各国機関などの見解
- ③ 総務省実施研究の概要
- ④ まとめ

WHO国際電磁界プロジェクト情報シート 「電磁界と公衆衛生：中間周波」 2005



International EMF Project Information Sheet



February 2005

ELECTROMAGNETIC FIELDS AND PUBLIC HEALTH Intermediate Frequencies (IF)

Exposure to human-made electromagnetic fields (EMF) has increased over the past century. The widespread use of EMF sources has been accompanied by public debate about possible adverse effects on human health. As part of its charter to protect public health and in response to these concerns, the World Health Organization (WHO) established the International EMF Project to assess the scientific evidence of possible health effects of EMF in the frequency range from 0 to 300 GHz. The EMF Project encourages focused research to fill important gaps in knowledge and to facilitate the development of internationally acceptable standards limiting EMF exposure.

WHO国際電磁界プロジェクト情報シート 「電磁界と公衆衛生：中間周波」 2005

超低周波電磁界(ELF)および無線周波電磁界(RF)と比べ、IF電磁界の影響に関する研究はこれまでほとんど行われていませんでした。しかし、科学的証拠からは、生活環境および労働環境で普通に見られるIF電磁界へのばく露により健康への有害な影響が生じることの確信は得られていません。

今後の課題

科学的証拠によれば、ICNIRPのガイドラインを下回るばく露レベルのIF電磁界によるどのような健康リスクも示唆されていません。しかし現在の知見における不確かさに取り組むために、より一層質の高い研究が必要です。

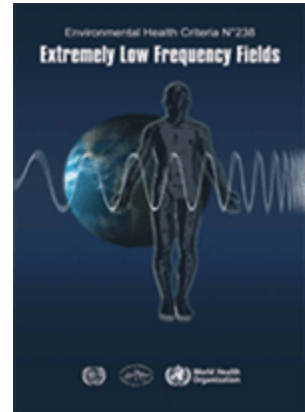
WHO環境保健クライテリア238 (2007)

「中間周波(IF)に関してはこの領域のデータが欠落している現状を考慮し、更なる研究が必要である。

研究データは健康リスク評価に必要なとされる量にはほど遠く、既存の研究の多くは結果が一貫していないので、更なる具体化が必要である。

なお、健康リスク評価のために必要となる研究には、ばく露評価、疫学研究、ヒト実験室研究、動物および細胞研究が含まれる。」

→ 具体的な研究論文を挙げていないが、さらなる研究が必要との見解



SCENIHRレポート

SCENIHR※¹とは？

- 欧州委員会(EC)の「新興及び新規に同定される健康リスクに関する科学委員会」の略で、DG SANTE※²に属する
- 委員会は、総合的に評価を必要とする新興及び新規に同定される健康と環境リスクのうち、他のリスク評価機関でカバーされていない問題に対して、情報を提供。
- SCENIHRはこれまでに2回(2009年と2015年)、電磁界と健康に関するオピニオンを公表。

※¹ Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk
新興及び新規に同定される健康リスクに関する科学委員会

※² DG SANTE (欧州委員会の保健衛生・食の安全総局)
2015年に健康消費者保護総局(DG SANCO)から改名
DG SANTEは組織説明の中で、「ゼロリスク社会は不可能ではあるが、消費者のリスクを低減かつ管理するために最大限のことをする」を標榜している。

SCENIHRレポート(2009)

特段の研究論文は引用されていないが、中間周波においては以下のように結論されている。

「これまで中間周波磁界については、健康リスクに関する疫学研究はほとんどなく、また動物実験や細胞実験も非常に少ない。

急性影響に関しては、低周波の刺激作用ならびに高周波の熱作用のメカニズムを外挿することで説明することが可能と考えられるが、長期的な影響に関しては何もわかっていないし説明も出来る状況ではない。

職業的なばく露としては、ある特定の職業でばく露を受けることが知られているが、疫学研究は報告されていない。

以上よりリスク評価を行うにはデータが不十分であり、研究が必要である。」

SCENIHRレポート(2015)

「IF-EMFの周波数帯は幅広いにもかかわらず、未だにIF-MFに関する健康影響に関する研究は限られている。
また、疫学研究についても報告がない。
動物、細胞を用いた研究がいくつか報告されている。」

研究の進捗が乏しいとはいえ、
いくつかの研究論文を分析



動物研究 in SCENIHR(2015)

Author	エンドポイント	ばく露条件	結論	備考
Leeら (2005)	マウス催奇形性試験	20kHzの三角波, 30 μ T, 8時間/日	影響なし	VDTユニットからのばく露を想定
Nishimuraら (2009)	鶏卵胚発生	20kHz, 1.1mT	影響なし	IH調理器を想定
Nishimuraら (2011)	ラット催奇形性試験	20kHz or 60kHz 0.2mT 22 時間/日	影響なし	IH調理器を想定
Nishimuraら (2012)	ラット生殖能	20kHz or 60kHz 0.2mT 22 時間/日	影響なし	IH調理器を想定

細胞研究 in SCENIHR(2015)

Author	エンドポイント	ばく露条件	結論	備考
Sakuraiら (2009)	1)遺伝毒性 2)熱ショック蛋白質	23kHz, 6.05mT	影響なし	
Sakuraiら (2009)	遺伝子発現の 網羅的検索 (ヒトアストログ リア細胞)	23kHz, 100 μ T	影響なし	

SCENIHR(2015) 中間周波のまとめ

- 現時点では、データが限定的であり、また疫学的な研究が皆無であることからまだリスク評価を行うには不十分である。しかしながら、動物実験においては20～60kHzで0.2mTまでの磁界に対しては影響がないと考えられるデータがみられる。
- 今後IF-EMFに対する職業的なばく露も増加することが予想されるため、労働者のバイオマーカーと健康指標についての研究が、適切な人数集団を対象に、適切なばく露評価を伴い実施されるようであれば非常に有用であるとともに、得られる結果は、実験的な研究結果を補足する可能性がある。

最新の研究動向について

- 一般社団法人電気学会では「電磁界の健康リスク分析調査専門委員会(H25～H28:大久保千代次委員長)」において、低周波及び中間周波領域の「健康リスク評価研究およびリスク管理政策に関する動向調査を実施。
- SCENIHR報告までを総括するとともに、2014年7月以降に発表された論文を調査した。
- 以下、同委員会で検討・評価された論文についてまとめる。

対象となった論文

2014年7月～2015年10月に出版され、PubMedデータベースに収録された論文について専門委員会に属する3名が論文の質を精査した。

動物実験 4 (採択4 不採択0)

モデル動物研究、血管石灰化に対する研究、免疫毒性評価、神経毒性評価

細胞実験 5 (採択2 不採択3)

ヒトを対象にした実験 なし

疫学研究 なし

- 不採択の理由: 「磁界ばく露評価が不十分」「ヒトの健康リスクとの関連性が不明」といった理由で不採択

がん・遺伝毒性影響

Author	使用動物・細胞種	エンドポイント	ばく露条件	結論	備考
Shiら (2014)	細胞 ヒト水晶体 上皮細胞 株 (SRA01/ 04)	遺伝毒性 (細胞増殖、 アポトーシス、 コメットアッセ イ、 γ H2AX 焦点形成)	1対のソレノイドコイルにより、 無線電力伝送を実施； 周波数：90 kHz ばく露強度：93.36 μ T 波形：正弦波 ばく露時間：2, 4 h	90kHzのIF-MFを ICNIRPのガイドラ インより約3.5倍高 い磁束密度で細 胞に照射したが、 細胞活性、アポ トーシス、DNAダ メージのいずれで も生体への影響 は確認できなかつ た	WPTを 想定

- がん・遺伝毒性影響に関しては、疫学研究、ヒト研究、動物研究の発表論文はなかった。

生殖発生影響

Author	使用動物・細胞種	エンドポイント	ばく露条件	結論	備考
Leeら (2014)	動物 (受精直後のミナミメダカ胚)	発達・ 行動影響	3.2kHz 0.12、15、25、 60μT 受精から孵 化までばく露	3つのばく露群全てにおいて、発育が有意に早い。体節数、眼の幅と長さ、眼の色素濃度、中脳の幅、頭部の発達、孵化までの日数に影響が見られた。60 μTの磁界ばく露群では、他群と比べて不安様行動のレベルが有意に高かった。	

- 生殖発生影響に関しては、疫学研究、ヒト研究、細胞研究の発表論文はなかった。

その他(動物実験)

Author	使用動物	エンドポイント	ばく露条件	結論	備考
Ushiyamaら (2014)	ラット SD	免疫学的パラメータに対する中間周波磁界の影響	周波数 : 21 kHz ばく露強度 : 3.8 mT ばく露時間 : 14 days (1h/day)	生化学的、血液学的、免疫学的な影響はなかった	IH調理器を想定
Win-Shweら (2012)	マウス C57B L/6J	海馬の神経学的および免疫学的マーカーへの影響	周波数 : 21 kHz 磁界強度 : 3.8 mT ばく露時間 : 1 h/day 妊娠7-17日(妊娠マウス)、出生後27-48日(新生仔マウス)にばく露	若齢マウスの海馬において、NMDA受容体に可逆的な影響を及ぼすことが示された。また、これらの変化は一過性で、組織病理学的変化を伴わず、ばく露の停止により元に戻ることが示された。	IH調理器を想定
Nishimuraら (2015)	ラット SD	臓器重量、血液性状、組織病理学的変化	20kHzで、0.2mT(実効値) 60kHzで、0.1mT(実効値) 1日22時間のばく露を14日間または13週間	一部に有意な差が見られたが、繰り返し実験による再現性はなく、ばく露による影響はなかった。	IH調理器を想定

その他(細胞実験)

Author	細胞種	エンドポイント	ばく露条件	結論	備考
Koyamaら (2014)	ヒト白血病細胞株 HL-60 細胞から分化誘導した好中球様細胞	免疫毒性(好中球様細胞の走化性と食作用)	周波数 : 23 kHz 波形 : 正弦波 磁界強度 : 2 mT ばく露時間 : 2, 3, 4 h	磁界ばく露は走化性、食作用のどちらへも影響を示さなかった。	IH調理器を想定

「その他」に分類される疫学研究とヒト実験はなかった。

研究動向のまとめ

- 中間周波電磁界に関しては、健康影響に関する研究論文の数自体が依然として不十分である。
- 専門委員会としても、SCENIHRの判断と同様、今後さらなる検討と研究が必要と判断する。とくに報告がほとんどない疫学およびヒトボランティア研究の進展に期待する。
- WPTによる中間周波磁界のばく露機会が増大する可能性があるため、今後の研究結果に注目が必要。

内容

- ① 中間周波とは？
ガイドライン・防護指針
- ② これまでの知見
国際機関・各国機関などの見解
- ③ 総務省実施研究の概要
- ④ まとめ

中間周波数帯の電磁界(特に100kHz帯の磁界)における非熱的生体作用の検討

生体電磁環境委託研究

受託機関 明治薬科大学
首都大学東京

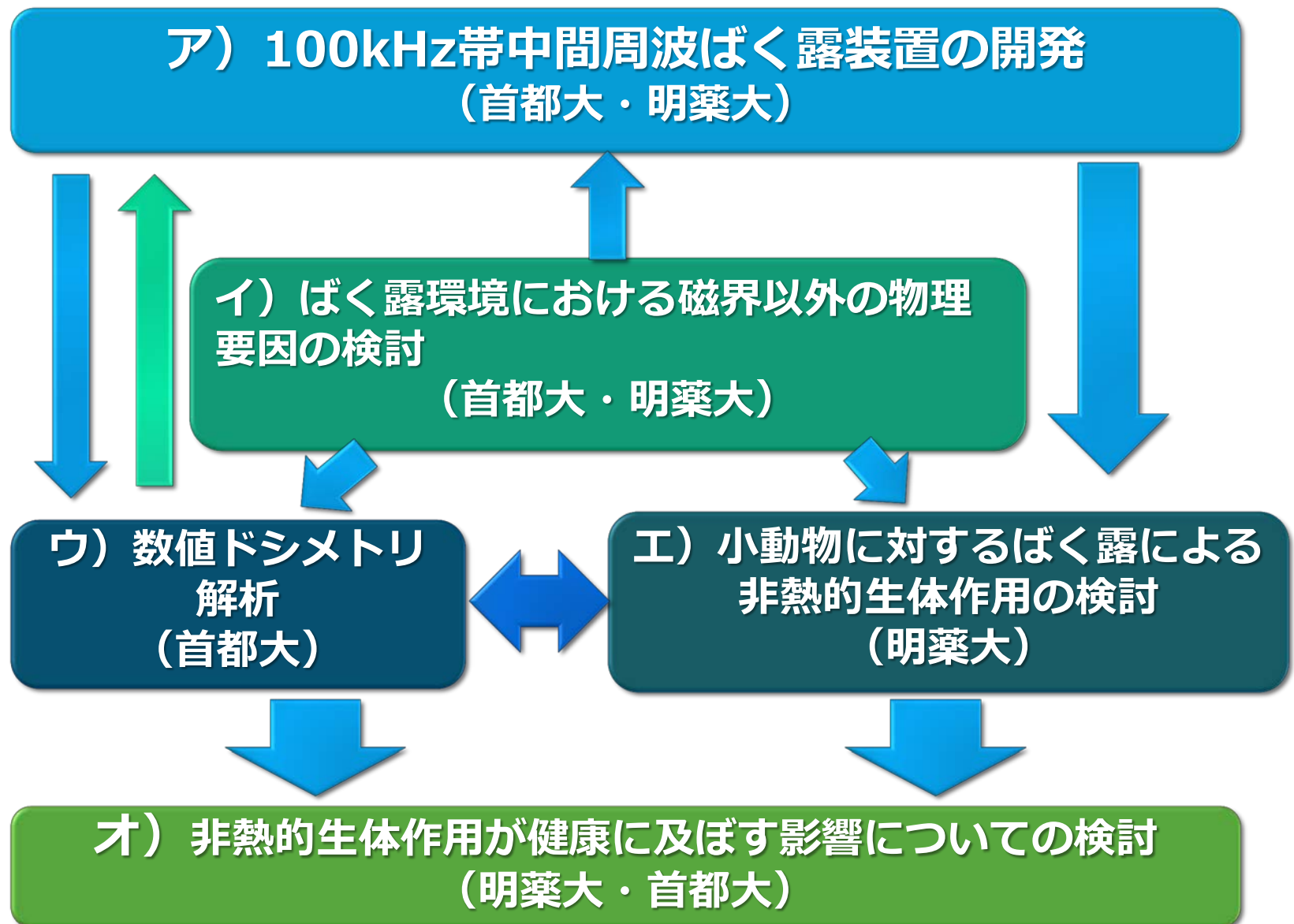
目的 (基本計画書より要約)

- 中間周波数帯においては、刺激作用は既知であるが、それ以外の生体作用(非熱的生体作用)の可能性について研究は少ない。
- 本研究は、**中間周波数帯における非熱的生体作用に関する調査研究を実施し、当該周波数帯のリスク評価に資することを目的とする。**
- 特に、EV用WPTの利用周波数100kHz帯において、電波防護指針に提起される刺激作用に基づく基本制限値相当の磁界による**非熱的生体作用の有無と健康影響を及ぼす可能性の有無を明らかにする。**

到達目標 (基本計画書より要約)

- ① 100kHz帯の中間周波磁界のばく露に関する動物実験を実施し、**中間周波磁界の非熱的生体作用**の可能性の有無に関するデータを取得する。
- ② 動物体内にICNIRPガイドライン基本制限値相当の誘導電界を発生させる**100kHz帯の磁界ばく露装置**を開発すること。その際に、ばく露群と対照群が磁界以外について同様な環境となるようにする。
- ③ 実験動物の**数値モデルによるばく露評価**を行い、動物実験におけるばく露量・誘導量を定量的に示す。
- ④ 100kHz帯において、ICNIRPガイドライン基本制限値相当の誘導電界を発生させる磁界にばく露された場合の非熱的生体作用による**健康影響の可能性の有無に関して検討**する。

研究体系



ア) 中間周波磁界ばく露装置の開発

- 100kHz帯でマウス内に総務省防護指針**基本制限値相当**の誘導電界が得られる装置を開発

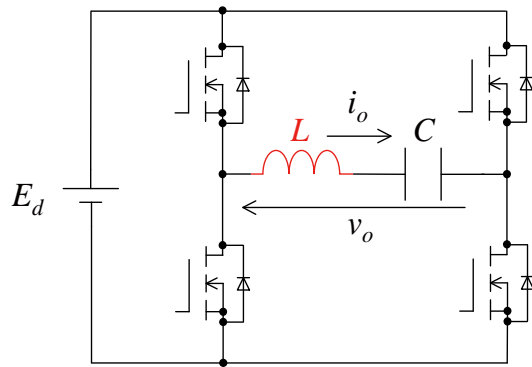
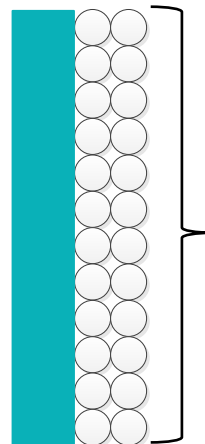
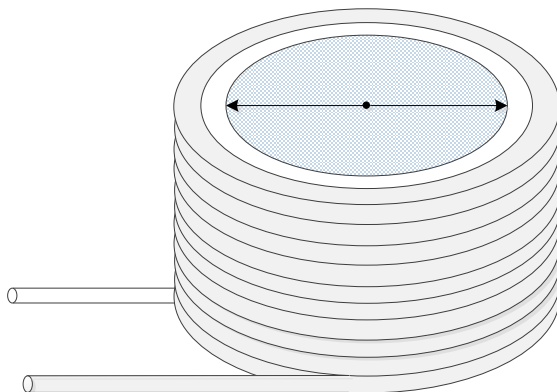
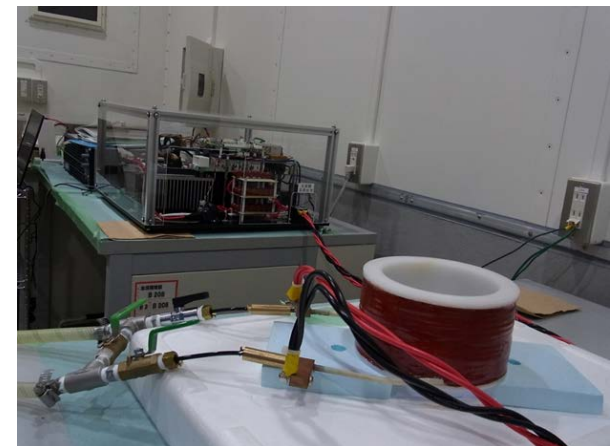


Fig.1 Circuit of diagram of the inverter



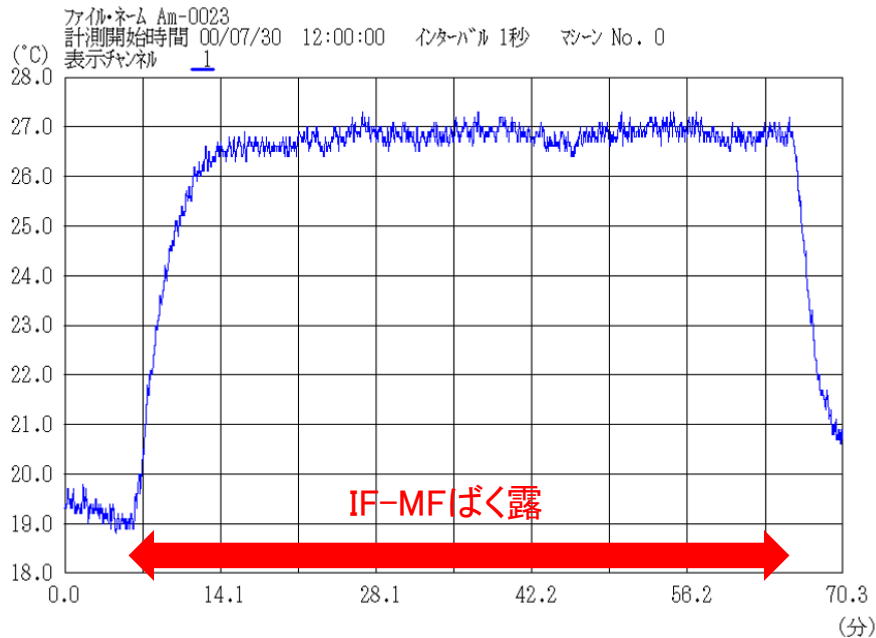
Turn
Number



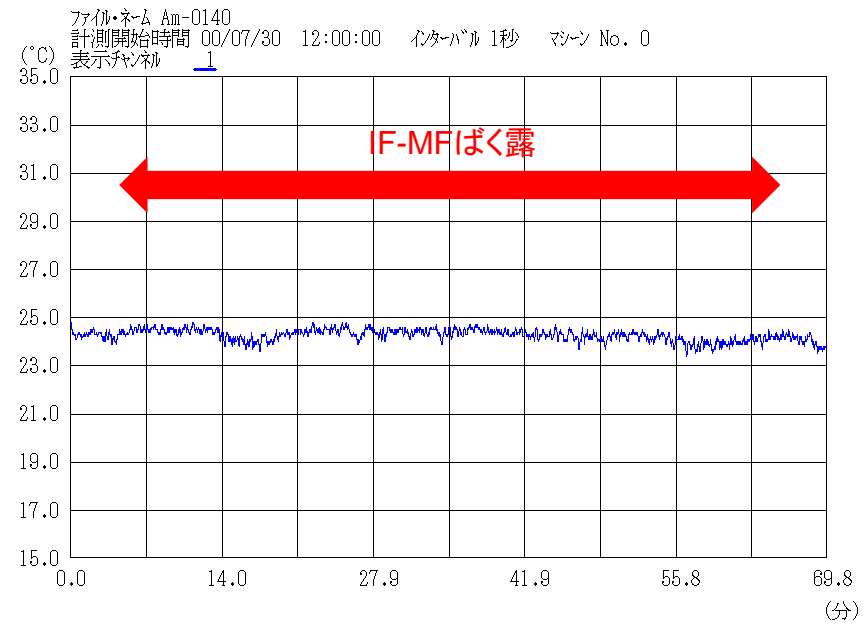
イ) ばく露環境における磁界以外の物理要因(アーチファクト)の検討

- ・ばく露中、コイルから著しい発熱があるため、ばく露する空間での温度を一定に保持する必要。

改善前



改善後



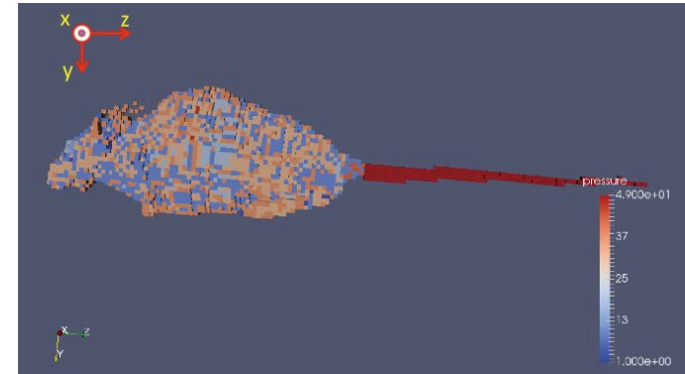
その他に音環境なども計測し、アーチファクトの原因になるかどうかを検討。

ウ) 数値ドシメトリ解析

動物の体内で生じる誘導電界計算値

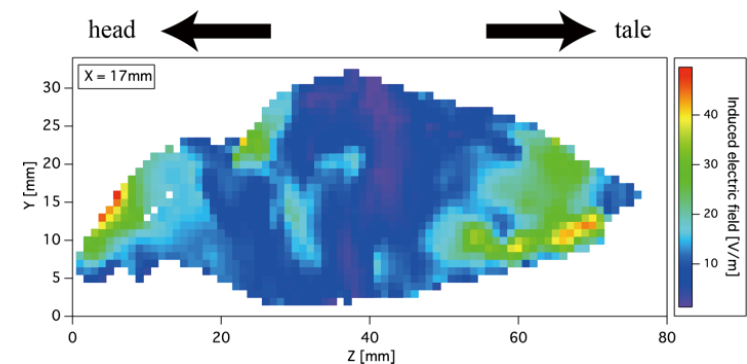
平均 29 V/m (全身)

最大 108 V/m (脳)



基本制限値との比較

計算推定値	電波防護指針の基本制限値@85kHz	
	一般環境	管理環境
29 V/m	11.5 V/m	22.9 V/m



- 新たにCT画像を取得し、精細ボクセルモデルの構築を目指す。

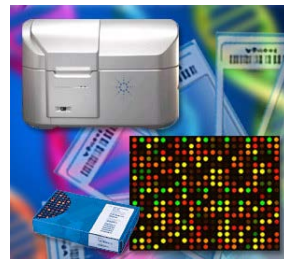
エ) 小動物に対するばく露による非熱的生体作用の検討

マウスへのばく露後のエンドポイントとして以下の項目について影響の有無を調査

- ① 一般毒性、血液毒性
- ② マイクロアレイによる網羅的遺伝子発現解析と、発現が変動した遺伝子に関してRT-PCRによる検証
- ③ 酸化ストレスマーカーの変化
- ④ 酸化ストレスの可視化による定性・定量的評価
- ⑤ 記憶に関する行動実験の定量的評価



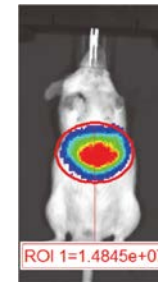
体重、臓器重量
血球成分
生化学検査



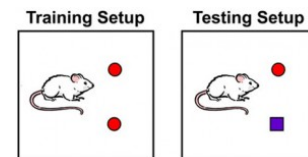
マイクロアレイ
による遺伝子
発現解析



LC/MS/MS装置を用
いた8-OHdG等酸化ス
トレスマーカーの定量



ルシフェラーゼ
アッセイを応用
した酸化ストレ
ス可視化マウス



物体認識試験
によるマウスの
学習(行動)の
評価

オ) 非熱的生体作用が健康に及ぼす影響についての検討

- 生体影響が認められた場合に、その影響が及ぼす健康リスクについて検討を行う



まとめ

- 中間周波においては、ICNIRPガイドラインと電波防護指針のハーモナイズがされている。
- 現行の電波防護指針を遵守することで、刺激による影響からは防護されると考えられる。
- 一方で、現行の指針値について、その妥当性、特に痛みとの関連について引き続き検討が必要である。
- 長期的影響（非熱的影響）に関しては、疫学データも、動物・細胞データも、報告自体が皆無あるいは稀少な状況である。
- これらの研究を進展させ、適切なリスク評価および防護策を実施することで、次世代の中間周波帯を使用する技術に対して、安全・安心を担保する必要がある。



ご静聴 ありがとうございました。