

電界共鳴型ワイヤレス電力伝送システムのEMI特性

EMI Characteristics of Electric Field Resonance Wireless Power Transfer System

小原大輝*
Daiki Obara

山崎広行*
Hiroyuki Yamazaki

増田 満*
Mitsuru Masuda

〈概要〉

電気自動車やモバイル端末を非接触で充電する技術としてワイヤレス電力伝送(WPT: Wireless Power Transfer)が注目されている。WPTシステムは高周波電力を利用するため、不要放射などによる放送や無線通信への妨害が懸念されている。そのため、一部のシステムを除き無線設備規則第六十五条に則り高周波利用設備のEMI許容値を満足し設置許可を得る必要がある。

本稿では、高周波利用設備の定めるEMI許容値を満足する周波数13.56 MHz、出力電力1 kWの電界共鳴型WPTシステムを開発し、設置許可証を取得したのでその諸特性を報告する。

1. はじめに

電源ケーブルを接続せず非接触で電気自動車やモバイル機器を充電する技術としてワイヤレス電力伝送の研究が盛んに行われている。特に、世界的なエネルギー問題を背景とした自動車の電動化が進んでいるため、電気自動車へのワイヤレス電力伝送の期待も大きくなっている。日本においては世界に先駆けて電気自動車へのワイヤレス電力伝送の制度化を進めており、活発な開発が進められている。

本稿では、WPTシステムの制度化・標準化の状況、特に日本国内における電波法高周波利用設備について説明するとともに、開発した電界共鳴型WPTシステムの諸特性、EMI測定結果などを報告する。

2. WPTの制度化・標準化状況に関して

2.1 EMC規制の標準化の状況

無線障害の国際的な標準化組織であるCISPR(国際無線障害特別委員会。無線機器のEMCの測定法・許容値などの規格の国際標準化を目的として活動する組織)においてもWPTシステムの議論がなされている。CISPRではWPTシステムをISM(Industrial, Scientific and Medical)装置とみなし、ISM装置のEMI測定法、許容値を定める国際規格CISPR11の改定が進められている。

2.2 国内の制度化状況

2.2.1 WPTシステムの法的位置づけ

日本では電波法第100条に基づき、以下に該当する設備は高周波利用設備とみなされ、設備の設置にあたり総務大臣の許可

を受けるよう定められている。

- ①電線路に10 kHz以上の高周波電流を通ずる電信、電話、その他の通信設備
- ②10 kHz以上の高周波電流を利用する工業用加熱設備、医療用設備、各種設備(通信以外の設備)

これらの設備は高周波電流の利用により不要放射、伝導ノイズが生じ、放送や無線通信に妨害を与えるおそれがあるため設置許可が必要となっている。WPTシステムも例外ではなく、50 W以上の電波(10 kHz以上3 THz未満)を利用するWPTシステムは電波法施行規則45条に基づき高周波利用設備の設置許可が必要となる。モバイル機器など向けのWPTシステムも高周波利用設備とみなされるが、伝送電力が50 W以下であれば設置許可は不要である。

日本では世界に先駆けてWPTの制度化が進められている。平成28年3月15日総務省令第15号が公布・施行され、電波法施行規則第45条、46条などが省令改正された。高周波利用設備の型式指定可能な設備として、下記に示す一般用非接触電力伝送装置および電気自動車用非接触電力伝送装置が新たに追加された。

- ・「400 kHz帯電界結合型一般用非接触電力伝送装置」
- ・「6.7 MHz帯磁界結合型一般用非接触電力伝送装置」
- ・「電気自動車用非接触電力伝送装置」

ただし、これらの型式指定を受けるためには、平成28年総務省告示第六十九～七十一号に基づき、妨害波電圧・不要発射の測定法や電波強度に対する安全施設などの基準に適用する必要がある。これらWPTシステムの法的位置づけを図1に示す。これらの型式指定を受けることができれば、個別の設置申請が不要となるため、広く販売・利用され普及することが期待される。今後は、急速充電、電動バス向けの大電力化、無人搬送車(AGV)などの産業機器に適用されるWPTシステムについても制度化が進んでいくと考えられる。

* 研究開発本部 自動車・エレクトロニクス研究所

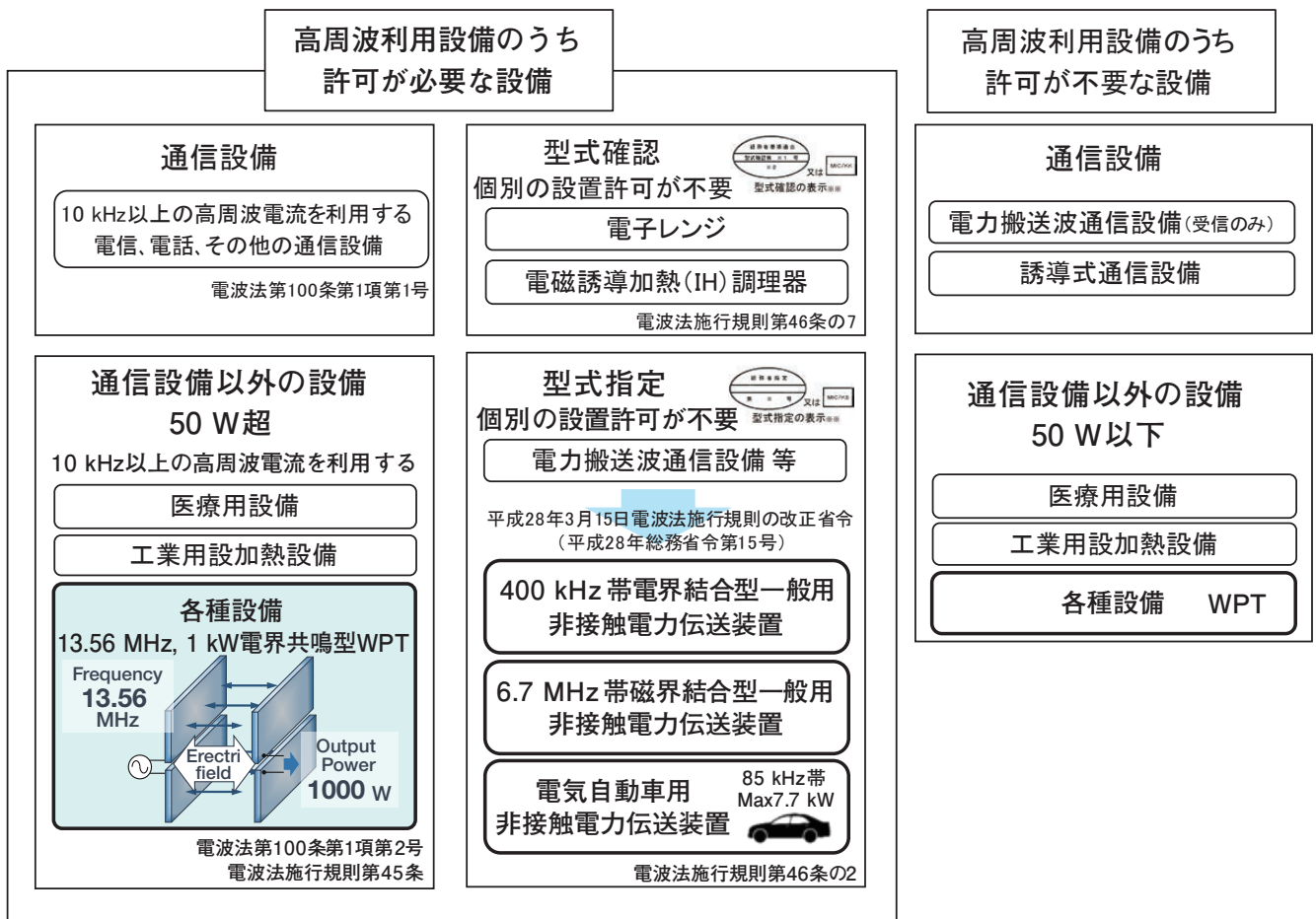


図1 WPTシステムの法的位置づけ
The legal position of the WPT system.

3. 電界共鳴型カプラの開発

3.1 電界結合型WPTの特長

電界結合型WPTのカプラ構造はミアンダライン形状¹⁾や平板電極板形状²⁾などが検討されている。ミアンダライン形状はパターン自身のインダクタンスとキャパシタンスによる共振を利用するため、インダクタンスの追加が不要となり平面構造をとることができる。しかし、伝送線路の長さ、パターン構造から高周波電流を流す際に表皮効果、近接効果の影響を受け高周波帯での損失が増大する。一方、平板電極を用いる場合、共振用コイルなどインダクタンスの追加が必要となるが、ミアンダラインのようなパターンが不要で高周波帯での損失を小さくできる。

また、特に共振を積極的に利用する電界結合型WPTでは、共振を利用し高電圧を発生させており、逆に電流を小さくできる。これにより、電極材料は銅よりも電気伝導率が低いアルミ、鉄などの安価な金属材料で構成することが可能である。

3.2 電界共鳴型カプラに関して^{3), 4)}

3.2.1 電界共鳴型カプラの構造

平板電極と共振用コイルを用いる電界共鳴型カプラの開発を進めている。カプラは平板電極と共振コイルを直列接続した直列共振構造としている。送電側カプラおよび受電側カプラは

各々単体で特定の周波数で共振するように設計されている。共振周波数が同一であるカプラを対で用いるため電界共鳴型カプラと呼称している。図2および図3にカプラの模式図、等価回路図を示す。カプラの構造自体は非常にシンプルな構造となっている。

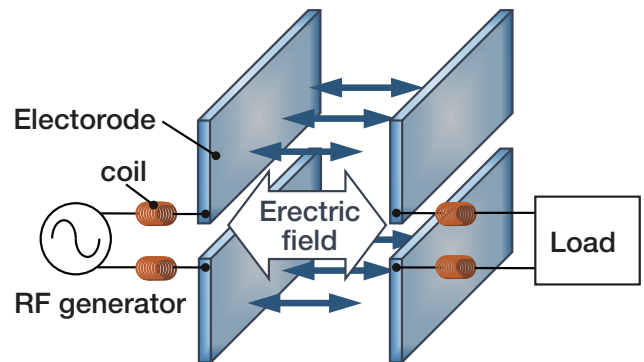


図2 電界共鳴型カプラ模式図
The schematic view of the electric field resonance type coupler.

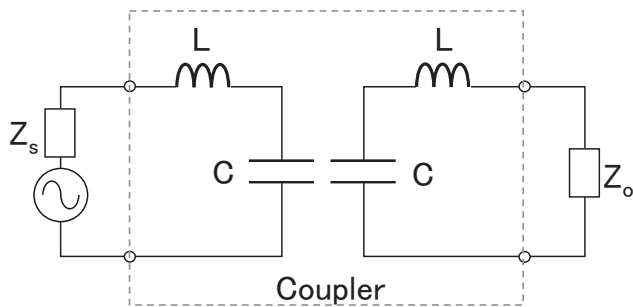


図3 電界共鳴型カプラの等価回路図
The equivalent circuit diagram of the electric field resonance type coupler.

電界共鳴型カプラ WPT の課題の 1 つに放射ノイズが挙げられる。図4に電磁界解析の 1 例として電界共鳴型カプラの周囲に伸びる電気力線の様子を示す。このように、電界は発散場であるため周囲に電気力線が伸び、カプラ周囲の構造やグランドと結合し漏洩電界を生じやすい。そのため、大地を介する共通モードループが生まれ意図せぬ放射ノイズの発生が課題となる。

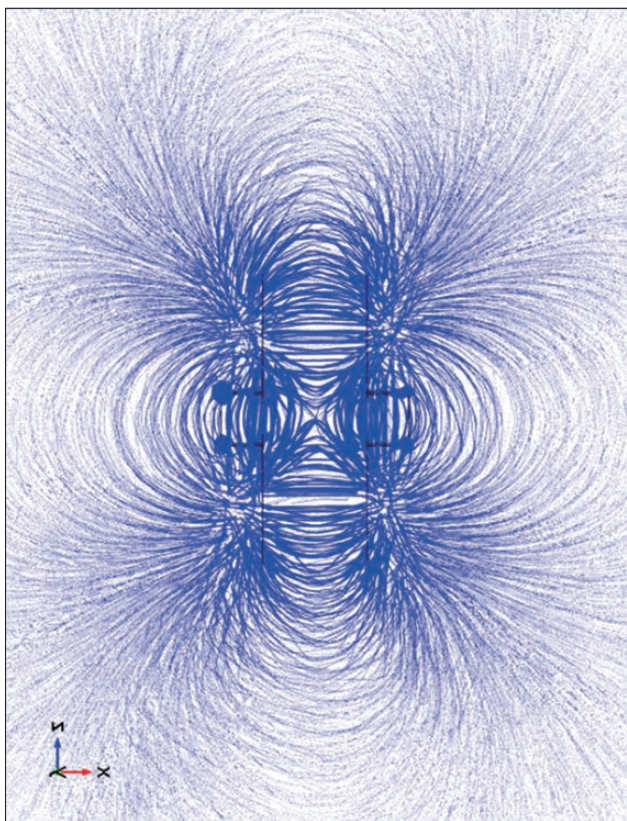


図4 電界共鳴型カプラの周囲に生じる電気力線の様子
The state of the electric lines of force occurring around the electric field resonance type coupler.

これを防ぐ方法の 1 つとして、開口部を設けた金属製のシールドボックスなどでカプラを囲う方法が挙げられる。シールドボックスにより周囲との不要な結合を防ぐことができる。一方で、カプラとシールドとの結合が強くなるため、送受電間の結合が弱くなり伝送距離が短くなるという課題も生じる。

3.2.2 電界共鳴型カプラの伝送特性

開発した電界共鳴型カプラの外観図を図5に示す。周囲との不要な結合を抑制するため開口部を設けた金属のシールドボックス内にカプラを配置している。表1に電界共鳴型カプラの仕様を示す。周波数 13.56 MHz で共振するように電極サイズ、コイルの巻数を調整している。

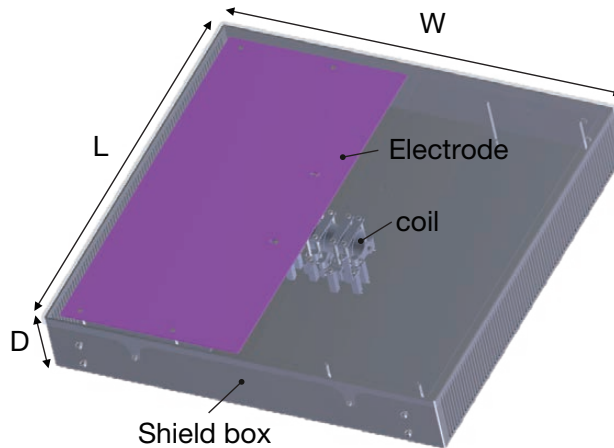


図5 シールドボックス付電界共鳴型カプラの外観図
The external view of the electric field resonance type coupler with a shield box.

表1 電界共鳴型カプラ仕様
The specifications for the electric field resonance type coupler.

項目	仕様値
周波数	13.56 MHz
特性インピーダンス	50 Ω
カプラ間距離	77 mm
外形寸法	L480 × W480 × D80 mm
体積	18.4 ℓ

図6にネットワークアナライザ (Agilent Technologies, E5061B) を用いて測定した電界共鳴型カプラの伝送効率 η_{21} ($=|S_{21}|^2$) および反射損失 η_{11} ($=|S_{11}|^2$) の周波数特性を示す。これより、カプラ間距離 77 mm、13.56 MHz において伝送効率 92.6% と高い伝送効率を示すことが判る。同周波数において整合もとれており反射損失がほぼないことから、挿入損失が 7.4% 生じていることになる。この損失の大部分はコイルに発生する熱として現れる。コイルは空芯のソレノイドコイルを用いておりフェライト材料などの鉄損はないため、コイル自身の銅損、高周波損失が主要因であると考えられる。電界共鳴型カプラの更なる高効率化のためには、コイル部分の損失低減を図る必要がある。

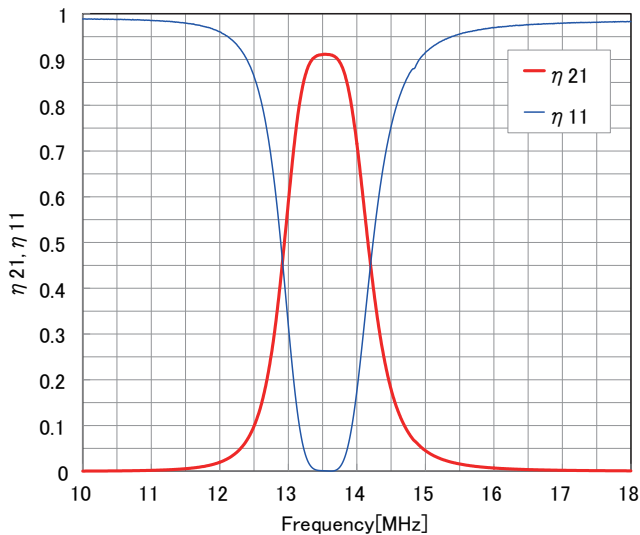


図6 電界共鳴型カプラの伝送効率および反射損失の周波数特性
The transmission efficiency and the reflection loss of the electric field resonance type coupler.

4. 電界共鳴型WPTシステムの高周波利用設備の設置許可取得

4.1 電界共鳴型WPTシステムの仕様

周波数13.56 MHz、出力電力1 kWで動作する電界共鳴型WPTシステムの高周波利用設備の設置許可を受けることを目的として、図7に示すWPTシステムを構成した。図8および表2に構成したWPTシステムの外観写真と仕様を示す。

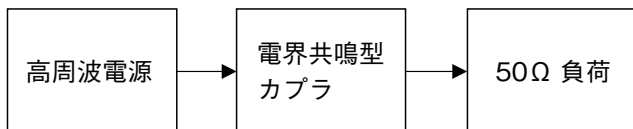


図7 電界共鳴型WPTシステムのブロック
The block of the electric field resonance type WPT system.

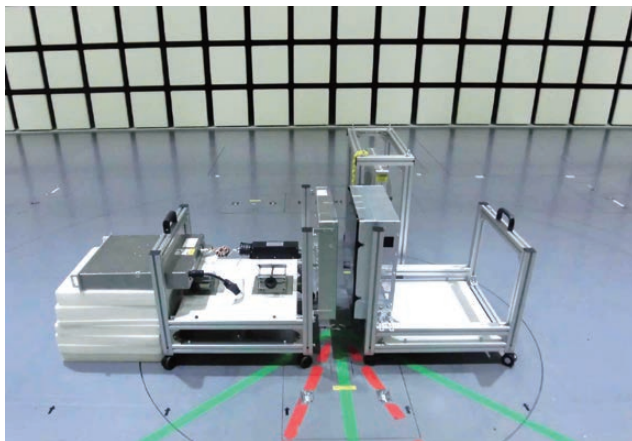


図8 電界共鳴型WPTシステムの外観写真
The external view of the electric field resonance type WPT system.

表2 電界共鳴型WPTシステムの仕様
The specifications of the electric field resonance type WPT system.

項目	仕様値
周波数	13.56 MHz
伝送電力	1 kW
カプラ間距離	77 mm

4.2 13.56 MHz、1 kWの電界共鳴型WPTシステムの法的位置づけに関して

平成27年6月11日 総務省告示第207号より、無線設備規則第六十五条第一項に基づく通信設備以外の高周波利用設備に関しては、EMIの許容値の特例が規定されている。下記の周波数帯内では、電源端子における妨害波電圧並びに利用周波数による発射および不要発射による磁界強度または電界強度の最大許容値が定められていない。

- ・13.56 MHz ± 6.78 kHz
- ・27.12 MHz ± 126.72 kHz
- ・40.68 MHz ± 20.34 kHz
- ・2450 MHz ± 50 MHz
- ・5.8 GHz ± 75 MHz
- ・24.125 GHz ± 125 MHz

これらの周波数は日本でのISMバンドにあたり、産業・科学・医療分野で汎用的に使うために割り当てられた周波数バンドで、電波障害や電磁両立性などに対する規制が緩和されている。

図1に示したとおり、13.56 MHz、1 kWの電界共鳴型WPTシステムは高周波利用設備に該当するため、無線設備規則第六十五条第一項第四号に基づいたEMIの許容値を満足する必要がある。ただし、基本周波数13.56 MHzとその高調波である27.12 MHz、40.68 MHzはISMバンドに含まれ最大許容値が定められていないため、これらの周波数を除いて上記EMIの許容値を満足する必要がある。

4.3 電界共鳴型WPTシステムのEMI測定

高周波利用設備の設置許可を得るためには、EMI試験の認定サイトにおいてEMI測定を実施し許容値を満足することを示さなければならない。高周波利用設備規則の実力確認試験として放射ノイズと伝導ノイズのEMI測定を実施する必要がある。

認定サイトにおいて国際規格CISPR 11第5.1版に準拠した国内規格⁵⁾に基づきEMI測定を実施した。表3に高周波利用設備規則の実力確認試験のEMI測定条件を示す。これらの測定結果を図9～16に示す。各測定結果には無線設備規則第六十五条第一項第四号に基づく許容値と、参考としてCISPR11の規定するISM帯装置クラスAグループ2の許容値を併記した。クラスAグループ2の装置とは工業環境での使用を意図し無線周波数エネルギーを意図的に発生・使用するISM RF装置である。

図9にループアンテナを用いた磁界強度測定の様子を示す。アンテナと被試験装置(EUT: Equipment Under Test)との離間距離10 m、周波数150 k-30 MHzにおいて磁界強度測定を実施した。図10に磁界強度測定結果のチャートデータおよびQP値(準尖頭値検波)の許容値を示す。チャートデータはループアンテナの回転角度ごと(0,45,90,135 deg、データ表示の都合

表3 EMI測定条件
The conditions for the EMI measurement.

	測定対象	単位	測定器	下限周波数	上限周波数	検波モード	測定環境
伝導ノイズ	妨害波電圧	dBuV	LISN	150 kHz	30 MHz	AV	シールドルーム
	妨害波電圧	dBuV	LISN	150 kHz	30 MHz	QP	シールドルーム
放射ノイズ	磁界強度	dBuA/m	ループアンテナ	150 kHz	30 MHz	QP	電波暗室 10 m 離間
	電界強度	dBuV/m	バイコンカルアンテナ	30 MHz	300 MHz	QP	電波暗室 10 m 離間
	電界強度	dBuV/m	ログペリアンテナ	300 MHz	1000 MHz	QP	電波暗室 10 m 離間

上 135 deg のデータはここには未記載)のQP 値およびPK 値(尖頭値検波)の測定結果を示している。基本周波数である 13.56 MHz, 2 倍波 27.12 MHz においてピークが見られるが, これらは ISM バンドに含まれるため除外される。許容値に対し磁界強度が充分低く抑えられていることが分かる。なお厳密には, 磁界強度測定ではループアンテナの回転角度ごとに被試験装置を載せたターンテーブルを回転させ磁界強度が最大となる条件を探し, ポイントデータを取得し許容値を超えていないことを示す必要がある。本測定ではポイントデータにおいても許容値を超えていないことを確認している。

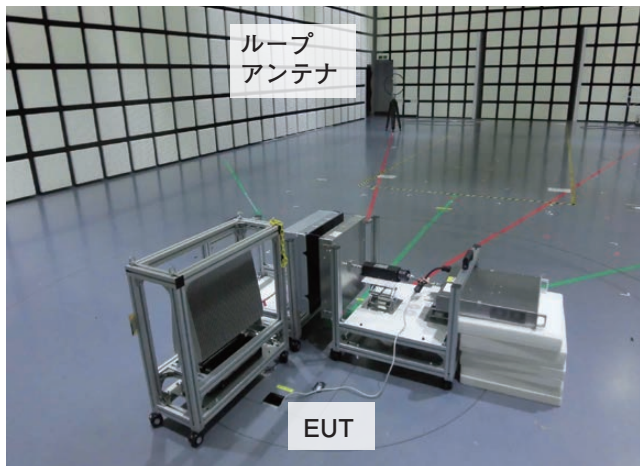


図9 ループアンテナを用いた磁界強度測定の様子(測定距離 10 m)
The state of the magnetic field intensity measurement using a loop antenna (measurement distance; 10 m).

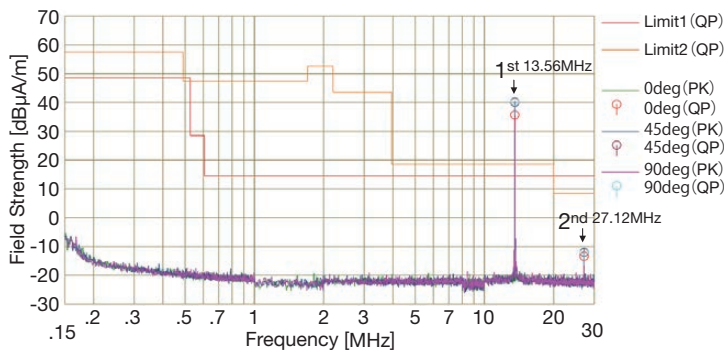


図10 放射ノイズ測定結果
磁界強度測定 (150 k-30 MHz)
Limit1: 無線設備規則第六十五条第1項第四号(2)イ 10 m
Limit2: CISPR11 Group2 Class A 10 m
The result of the radiation noise.
Magnetic field intensity measurement (150 k-30 MHz)
Limit 1: Radio Equipment Regulations Article 65, Paragraph 1, Item 4 (2) I 10 m
Limit 2: CISPR 11 Group 2 Class A 10 m

図11にバイコンカルアンテナおよびログペリオディックアンテナを用いた電界強度測定の様子を示す。アンテナと被試験装置との離間距離 10 m, 周波数 30 M-1000 MHz において電界強度測定を実施した。3.2.1 で説明したとおり電界型 WPT は周囲の構造と結合し易く, 意図せぬ周波数でもアンテナとなってしまうため放射ノイズが課題となる。図12に放射ノイズ対策が不十分な場合の電界強度測定結果のチャートデータおよびQP 値の許容値を示す。チャートデータはアンテナの回転方向ごと(水平方向 Horizon, 垂直方向 Vertical)のQP 値およびPK 値の測定結果を示している。基本周波数である 13.56 MHz の奇数次倍の高調波のピークが多く見られる。また, 200 MHz 以上の帯域では高調波成分以外の周波数でのピークが多数存在していることが分かる。これは意図せぬ結合により生じる共通モード電流に起因するノイズである。電界型 WPT ではこのような不要放射に対する対策を充分講じる必要がある。図13にノイズ対策後の電界強度測定結果を示す。基本周波数である 13.56 MHz の奇数次倍の高調波のピークが見られるが, 許容値を超えていないことが分かる(3 倍波 40.68 MHz は ISM バンドに含まれるため除外される)。また, 200 MHz 以上の帯域においても多数存在したピークが消えており不要放射が抑えられていることが分かる。なお厳密には, 電界強度測定ではアンテナの高さ, ターンテーブル回転角度などを変え電界強度が最大となる条件を探し, ポイントデータを取得し許容値を超えていないことを示す必要がある。本測定結果ではポイントデータにおいても許容値を超えていないことを確認している。

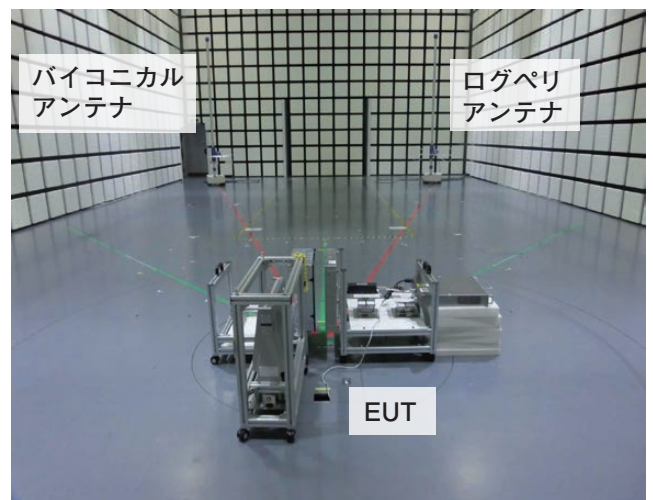


図11 バイコンカルアンテナ, ログペリオディックアンテナを用いた電界強度測定の様子(測定距離 10 m)
The state of the electric field intensity measurement using a biconical antenna and a log-periodic antenna (measurement distance 10 m).

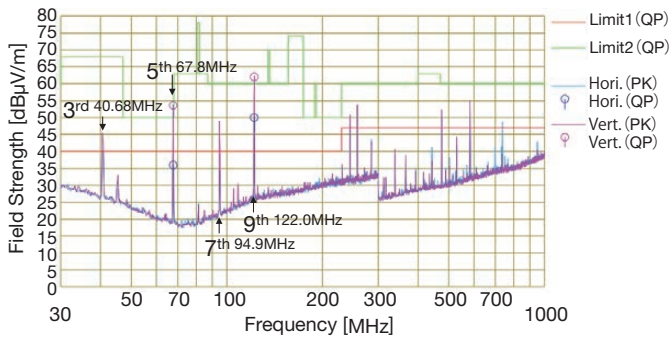


図12 放射ノイズ対策前の放射ノイズ測定結果
電界強度測定 (30 M-1000 MHz)
Limit1: 無線設備規則第六十五条第1項第四号 (3) 10 m
Limit2: CISPR11 Group2 Class A 10 m
The radiation noise measurement result before the measures for the radiation noise.
Electric field intensity measurement (30 M-1000 MHz)
Limit 1: Radio Equipment Regulations Article 65, Paragraph 1, Item 4 (3) 10 m
Limit 2: CISPR 11 Group 2 Class A 10 m

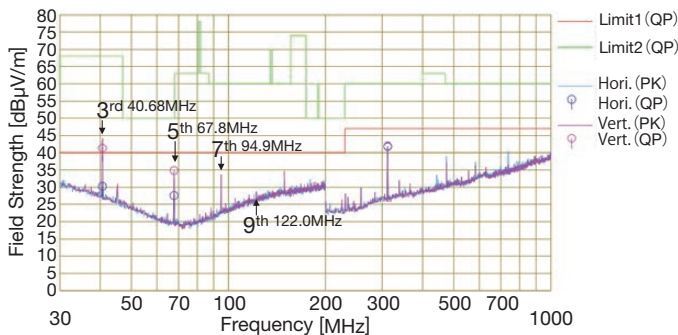


図13 放射ノイズ対策後の放射ノイズ測定結果
電界強度測定 (30 M-1000 MHz)
Limit1: 無線設備規則第六十五条第1項第四号 (3) 10 m
Limit2: CISPR11 Group2 Class A 10 m
The radiation noise measurement result after the measures for the radiation noise.
The electric field intensity measurement (30 M-1000 MHz)
Limit 1: Radio Equipment Regulation Article 65 (1) Item (iv) (3) 10 m
Limit 2: CISPR 11 Group 2 Class A 10 m

図14にLISNを用いた妨害波電圧測定の様子を示す。周波数150 k-30 MHzにおいて電源端子における妨害波電圧測定を実施した。本測定では単相の電源を用いているためL相 (Live非接地側) とN相 (Neutral接地側) の測定を行っている。図15, 16に伝導ノイズの妨害波 (RFI) 電圧測定結果のチャートデータ, QP値およびAV値 (平均値検波) の許容値を示す。チャートデータはQP値およびAV値の測定結果を示している。基本周波数である13.56 MHz, 2倍波27.12 MHzにおいてピークが見られるが, これらはISMバンドに含まれるため除外される。許容値に対し妨害波電圧が充分低く抑えられていることが分かる。本測定でもポイントデータにおいて許容値を超えていないことを確認している。

以上の結果からISMバンドを除き無線設備規則第六十五条第1項第四号に基づく各ノイズ値がEMI許容値を下回っていることが分かる。開発した13.56 MHz, 1 kWの電界共鳴型WPTシステムが高周波利用設備規則を満足する実力を確認することができた。

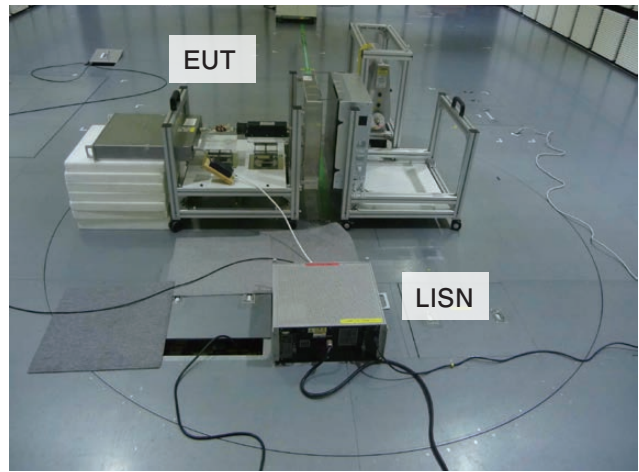


図14 ラインインピーダンス安定化回路網 (LISN) を用いた妨害波電圧測定の様子
The status of the interference wave voltage measurement using a line impedance stabilization network (LISN).

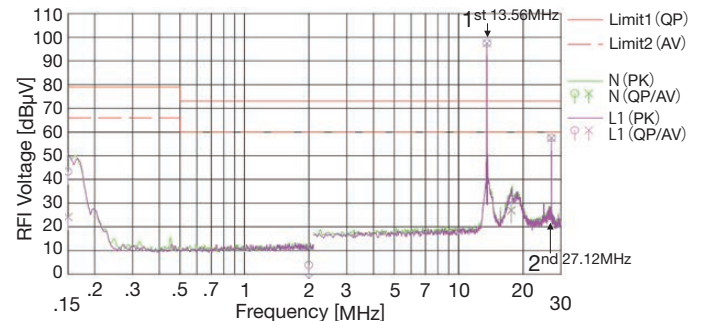


図15 伝導ノイズ測定結果
電源端子における妨害波電圧測定 (150 k-30 MHz)
Limit1: 無線設備規則第六十五条第1項第四号 (1) QP (20 kVA 以下)
Limit2: 無線設備規則第六十五条第1項第四号 (1) AV
The measurement result of the conduction noise.
Interference wave voltage measurement at the power supply terminal (150 k-30 MHz)
Limit 1: Radio Equipment Regulation Article 65, Paragraph 1, Item 4 (1) QP (20 kVA or less)
Limit 2: Radio Equipment Regulations Article 65 (1) (iv) (1) AV

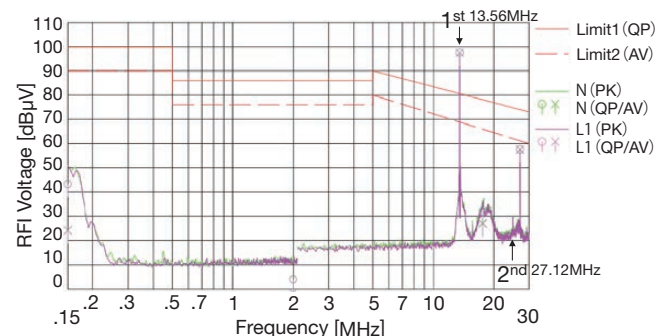


図16 伝導ノイズ測定結果
電源端子における妨害波電圧測定 (150 k-30 MHz)
Limit1: CISPR11 Group2 Class A QP
Limit2: CISPR11 Group2 Class A AV
The measurement result of the conduction noise.
Limit 1: CISPR 11 Group2 Class A QP
Limit 2: CISPR 11 Group2 Class A AV

4. おわりに

周波数13.56 MHz, 出力電力1kWの電界共鳴型WPTシステムのEMI測定を実施した。高周波利用設備の定めるEMI許容値を満足する実力を確認することができた。高周波利用設備許可申請書と併せて本測定結果を提出し高周波利用設備の設置許可証を取得することができた。

参考文献

- 1) 居村岳広:「等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究 共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送」, 電気学会論文誌D, Vol.130, No.1, (2010), pp. 84-92.
- 2) 原川健一:「電界結合／共振型ワイヤレス電力伝送技術-並列共振型電力伝送解析」, 電子情報通信学会技法, WPT2011-24, (2011)
- 3) 増田満:「電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム」, 電子情報通信学会技法, WPT2013-20, (2013)
- 4) 増田満:古河電工時報, 137, (2018), p 20-27
- 5) 諮問第3号 「国際無線障害特別委員会(CISPR)の諸規格について」[工業、科学および医療用装置からの妨害波の許容値および測定法]答申