

機関番号：63902  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360132  
 研究課題名（和文） 核融合実験施設等統計的に変動する広帯域環境電磁界に対する  
 人体安全性評価法の研究  
 研究課題名（英文） Study of safety evaluation method for statistically varying wide  
 frequency range of electromagnetic fields.  
 研究代表者  
 宇田 達彦 (UDA TATSUHIKO)  
 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
 研究者番号：50280590

## 研究成果の概要（和文）：

大型ヘリカル装置(LHD)で代表される磁場閉じ込めプラズマ核融合実験施設における静磁場から高周波の超広帯域かつバースト的に発生する電磁界による人体曝露及び安全性評価法の確立を目的として研究した。この統計的に変動する電磁環境の特質を把握するため、リアルタイムスペクトル分析器により確率分布を測定し、連続的に環境電磁界を監視するシステムを構築した。更に人体への曝露強さ分布解析や影響評価を行い、安全管理の課題等を明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

Concerning occupational safety by burst like exposure to wide frequencies of static, low and high electromagnetic fields had been measured around a magnetic fusion plasma test facility like the Large Helical Device (LHD). The time-dependently and statistical varying electric and magnetic fields were analysed by spectrometer and continuous monitoring system by using some probes including the personal monitors were established. Also human exposure distribution was simulated in analysis, and health and safety issues were discussed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気・電磁環境、電磁界生体影響

## 1. 研究開始当初の背景

わが国では、「地上に太陽を」をスロガンに、核融合科学研究所や日本原子力開発研究機構を中心に、核融合エネルギーの早期実現を目指して研究が進められている。しかし、核融合実験施設においては、プラズマ閉じ込めに伴う強力な定常磁界に加えて、プラズマ加熱用に高周波電磁界も使用されている。代

表的な大型核融合実験施設—大型ヘリカル装置LHDを例に述べると、静磁界や低周波磁界のみならずプラズマ中の水素イオン加熱用の周波数25MHz～100MHzのイオンサイクロトロン加熱装置、2.45GHzの真空容器内部放電清浄用のマグネトロン装置など、数十MHzから数百GHzの広帯域にわたる高周波電磁界が存在し、低周波から高周波までの

電磁界の漏洩が想定される。

このような広帯域にわたる特殊な電磁界環境下における作業員に対しては、人体防護の観点から曝露量の測定や必要に応じた防護対策が要求される。国際的な防護指針としては、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) から出され、世界保健機関 (WHO) に推奨されている。わが国でも、「電波利用における人体の防護指針」を、電波技術審議会が平成 2 年に旧郵政省 (現総務省) に答申する形でまとめており、その適合性の確認も義務づけられるようになった。このとき、核融合施設での作業員は、電磁界を日常的に取り扱う環境、すなわち管理環境下であり、それ故に管理環境での防護指針が適用される。

ICNIRP やわが国の管理環境下における指針値との照合を行い、作業員の環境電磁界に対する安全性を確認するためには、核融合実験施設の作業員に対する電磁界曝露量の定量化測定及び常時モニタリングが不可欠である。本研究代表者及び研究協力者は、これまでに、核融合科学研究所の実験施設を対象に、イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱装置の高周波発振器 (38.5MHz)、直線型高密度プラズマ発生装置 (HYPER-I) のマイクロ波電源 (2.44GHz) 及びコンパクトヘリカルシステム (CHS) の放電洗浄装置 (2.45GHz) の三つの実験装置に対する環境電磁界測定を実施し、これらの電磁界は、パースト的に発生し、振幅が確率的に変動することを判明した。このような超広帯域にわたる統計的に変動する電磁界環境が非常に特殊であり、ICNIRP などの防護指針においても、安全性をどう評価すべきか明確に定義していないのが現状である。この背景から、核融合実験施設特有の電磁界環境に注目し、この種の電磁界環境下での作業員に対する曝露量及び安全性の評価法が話題に上り、核融合科学研究所での測定結果の公開と同時に、同分野の一線で活躍する全国の専門家との意見交換を実施した。核融合実験施設に限らず、最近の超広帯域 (UWB) 通信に代表される超広帯域化及び統計的に変動する特徴を有する環境電磁界が急激に増えており、これを対象とした人体曝露量及び安全性評価法の確立が急務となっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、核融合実験施設に代表されるような超広帯域及び統計的に変動する特徴を有する電磁界環境の人体曝露量及び安全性評価法の確立を目的とする。また、それを日本から世界に発信し、国際指針としての提案及び国際標準化を目指す。

(1) 核融合実験施設において、静磁界・低周波電磁界から GHz 帯高周波電磁界まで亘

る超広帯域のリアルタイム電磁環境測定システムを構築する。測定データより変動する電磁界の統計特性を抽出し、その特徴を明らかにするとともに、それを表す統計電磁界モデルを確立する。

(2) 上述特異な電磁界環境に対して、工学的側面及び生物的側面の両方から、人体への電磁曝露量の算出・評価法を人体安全性との関係をもとに提案・検証し、その妥当性を明らかにする。これを現有の電波防護指針への補完として、国際標準化組織への提案を目指す。

(3) 上述人体曝露量に対する安全性評価法に適した信頼性の高い電磁界モニタリングシステムを開発し、24時間の作業員及び周辺住民の電磁環境に対する安全管理を可能とした評価・管理システムを確立する。

## 3. 研究の方法

主に、大型ヘリカル装置 (LHD) の施設周辺の電磁環境を対象にし研究を進めた。

### 【2008 年度】

(1) 核融合実験施設の静磁界・低周波電磁界から GHz 帯高周波電磁界まで亘る超広帯域の電磁環境の特徴を抽出するために、施設電磁環境測定ならびにリアルタイムの電磁環境測定システムを構築する。

低周波帯においては、高感度 3 軸磁界ないしは電界プローブをオシロスコープと組み合わせ、同時測定する。高周波帯においては、広帯域測定が可能な電界プローブを採用し、振幅確率密度 (APD) 測定も可能とする測定器を導入する。また、測定装置を核融合科学研究所の実験施設に設置し、測定データをリアルタイムでパーソナルコンピュータに記録し、ネットワークを通して研究室に送る。

(2) 核融合実験施設では、強力な電磁界が存在し、これらの電磁界が互いに干渉し合い、上述測定器に誤差を与え、誤動作を生じさせる恐れがある。これに対処するために、電磁界と電子回路との相互結合の観点から、電磁界測定器の誤作動の可能性の解明を試み、それに応じて対策を施す。

構築した測定システムにより環境電磁界データを収集し、それに対して統計解析し、その特徴の解明、特性の抽出を通して、それを表す統計電磁界モデルを導出する。

### 【2009 年度】

(3) 広帯域環境電磁界の測定・解析結果をもとに、人体への電磁曝露量の評価法を人体安全性の立場から検討する。装置の近傍作業員は、不均一な漏洩電磁界に曝露される。わが国の人体防護の安全指針は、電磁放射源から 10kHz~300MHz までは 20cm 以上、300MHz~300GHz までは 10cm 以上離れた人体の占める空間に適用され、その空間での電磁界強度の 6 分間における時間的・空間的平均値を補助指針として規定されている。

しかし、核融合実験環境での電磁界は、上述周波数を同時に広範囲に亘り、バースト的に発生するものと考えられるので、現有の防護指針が想定される範囲から離脱している。そこで、人体組織の周波数応答性を考慮し、広帯域のパルス信号に照射された場合の体内電流、吸収エネルギーの算出を行い、生物影響との関係とリンクさせる。このアプローチの体内電流、吸収エネルギー計算自身は本研究の工学分野の研究者が分担する。また、その生体の周波数応答特性の理論根拠、生物による実験的検証は医学分野の研究者が協力し、超広帯域及び統計的に変動する電磁環境の曝露量及び人体安全性の評価法を導く。

【2010年度】

(4) 信頼性の高い電磁界モニタリングシステムを開発し、作業員等の電磁環境に対する安全管理を可能とした評価・管理システムを確立する。また、最近のユビキタス社会の実現に向けて、UWB通信に代表されるように超広帯域の電磁環境が、周波数スペクトル及び統計的性質から見ると類似性がある核融合実験施設での評価法の適用性を検討する。

4. 研究成果

大型ヘリカル装置LHD施設環境の静電界・低周波電磁界からGHz帯高周波電磁界まで亘る超広帯域の電磁環境の特徴を抽出するために、リアルタイム電磁環境測定システムの構築を進めた。

(1) LHD 施設周辺電磁環境

図1に大型ヘリカル装置LHDに関わる主要な装置と周波数を示す。LHDの主な仕様は、主半径3.9m、プラズマ半径0.5-0.65m、プラズマ容積30m<sup>3</sup>、プラズマ磁場強度3Tである。超伝導コイル電源室はLHD本体棟の地下室に備わっている。プラズマ加熱用に25-100MHzのイオンサイクロトロン共鳴加熱装置ICRH、77-168GHzの電子サイクロトロン共鳴加熱装置ECHおよび中性粒子入射加熱装置NBIがある。NBI稼動用に電動発電機(Motor Generator)を別棟に備えており、ここでの周波数はELFに分類される。他に、真空容器内

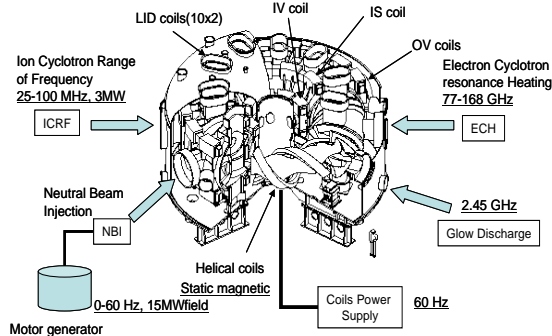


図. 1 大型ヘリカル装置 LHD と電磁環境.

の放電洗浄用に 2.45 GHz 高周波発振装置がある。加熱装置は必ずしも全てが同時に稼動するわけではない。

(2) 静磁場

静磁場測定用の検出プローブは、LHD 本体室南側 2 m のコンクリート壁の外側にあつて、LHD 中心から 23 m の位置に 3 軸プローブ ZOA99-3208 を固定し、磁場測定装置 Gauss Meter 9900 (F.W.Bell) により、実験サイクル期間中連続して計測監視を行った。Gauss Meter の測定出力は GP-IB を介して 2 秒毎に計算機に取り込み、X, Y, Z 値および 3 軸合成値を求めた。これらのデータは研究所内の LAN を介して遠隔で監視可能とした。

毎年 3~6 ヶ月間行われるプラズマ実験サイクルの期間中、毎日超伝導コイルに通電し、3T 未満のプラズマ磁場を発生させ、3 分毎にプラズマショット実験が行われている。これと同時に漏洩静磁場の変化を観測し、磁場強度 2.75 T のとき、監視地点で 0.04 mT 上昇が見られた。これは自然の地磁気より僅かに高い。なお、観測場周辺機材等の磁化によってバックグラウンドの上昇は 0.06 mT 程度となっている。LHD 実験時の磁場強度にほぼ比例して漏洩磁場が観測されている。一方、コイル保護動作のため急速に磁場を下げる試験 (1M モード、5 分減磁) を実験サイクル始めに実施しており、そのときは最大 1 mT 程度の上昇が見られた。また、非計画的に急速減磁した場合もあり、そのときも同様であった。この漏洩磁場強度は極めて低いが、急激な変動には対処が必要である。特に心臓ペースメ

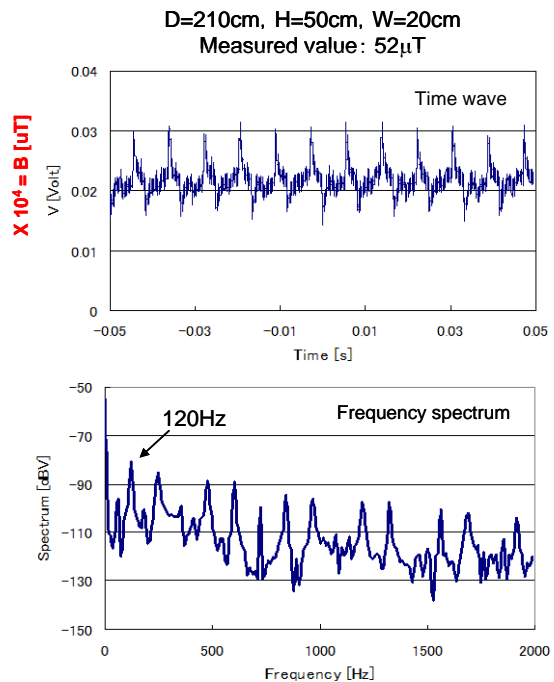


図 2 超伝導コイル電源室の電源盤周辺の E L F スペクトル測定結果.

一カー所所有者に対し、立ち入り規制措置を執るレベルであった。なお、本体室内は 200 mT を越すため立ち入り規制される。

### (3) 極低周波 ELF 磁界

LHD 用の各種電源設備のうち電動発電機周辺と超伝導コイル電源室において ELF 測定を試みた。測定器として EFA3 (Wandel & Goltermann) と、3 軸磁界プローブ ELT400 (narda S. T. S.) を用い、TDS3034 (Tektronix) による波形の時間観測を行った。

中性粒子入射装置 NBI 用の電動発電機周辺の測定結果は周波数 60 Hz 以下で、0.015 mT、最大となる床面で最大 0.1 mT 程であった。これは ICNIRP の作業者参考レベル 25/f (f=周波数 kHz 単位) の 1/4 程度であり、一般の入室は、規制されている。超伝導コイル電源室では、電源室電源盤の周辺で詳細に測定した。ここでは図 2 に示すように商用周波数 60 Hz の倍長波が観測された。特に電源盤の周辺で職業人の基準を最大値で 200% を超えるケースがあった。こうしたエリアへの一般の立ち入りは規制されているが、100  $\mu$ T を超える場合の神経や筋肉への刺激に関するメカニズムが知られているので、防護の点からもこうした措置は必要である。

### (4) 高周波電磁界

加熱電源室には、ICRF 発振器が設置されている。ICRF 発信器の構成は、主に電源装置と DPA (Driving Power Amplifier) と後段の FPA (Final Power Amplifier) をセットとして複数基設置されている。この加熱電源室内に 3 軸の電界及び磁界測定プローブ Type18 及び Type10 と EMC-300EP (narda S. T. S. 製) を設置して、プローブからの計測信号の値を光ケーブルとシリアル-USB 変換器、および USB ケーブルを介して 5 Hz で計算機に取り込んだ。計測監視はプラズマ実験期間中 24 時間継続して行った。ICRF の運転はプラズマ加熱実験時以外の時間にも調整運転している。高周波の発生は実験および調整時間によって一定

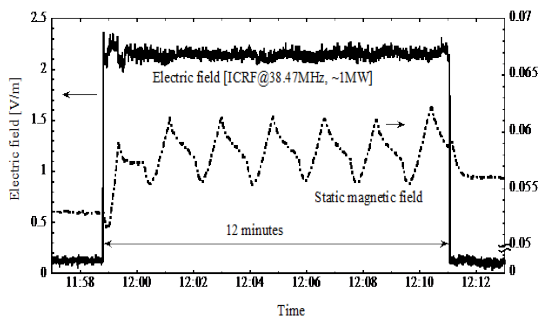


図 3 LHD と ICRF からの漏洩電磁界同時測定結果

しておらず確率過程とみなしえる。そのため、振幅確率分布 (APD) による計測および人体電磁吸収 (SAR: 比吸収率) の定量的評価が有効である。電磁界の発生を事前に予測することが困難なため、データの取り込みを 24 時間連続して行える測定システムを完成させた。

次に ICRF 加熱電源室における連続監視システムの概要と測定結果を述べる。プラズマ加熱は 3 分毎になされショット実験に対応して 5 V/m ほどの電界値を示した。そのショットの時間は通常 1 秒程度と短い、長時間ショット実験も試みられており、図 3 に、約 12 分の連続加熱時の例を示す。漏洩電界強さは 2.5 V/m 未満と低いが 12 分間定期的に出ていることが分かる同時に測定した静磁界の強さが鋸歯状に変化している理由は、プラズマ閉じ込め磁場半径位置を局部加熱防止のため振っているためである。このように、プラズマ磁場強さ以外に磁場配位変化の影響も読み取れる。更に 50 分に渡る長時間加熱実験もされており、RF 加熱時の周辺環境の電界変化を測定できた。電磁環境はバースト的であったが、定常プラズマ実験を目指すにつれて、長時間の電磁環境への配慮が重要になっている。これまでの値は、いずれも ICNIRP の

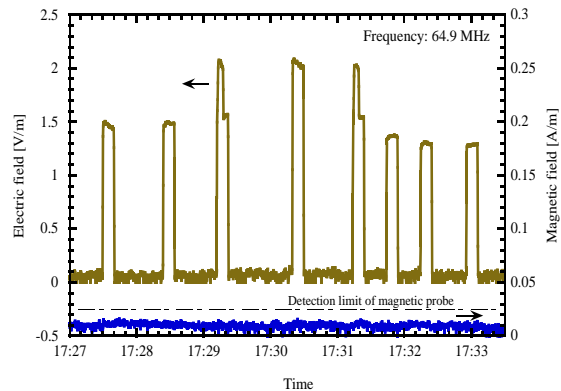


図 4 ICRF 発信器設置室における漏洩高周波電界(上)と磁界(下)の監視測定例。

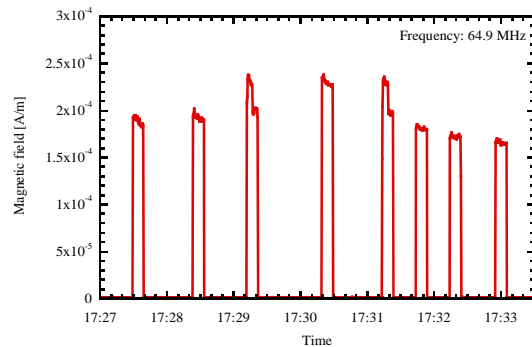


図 5 高感度な SRM-3000 による図 4 の磁界のピーク周波数に着目した測定例。

電界強度の参考レベル(職業的曝露: 61 V/m)の10分の1以下であった。磁界についても同様の測定を行ったが、図4の下段に示すように検出限界 0.025 A/mないしは僅かに有意な値を観測する程度であった。このため ICNIRPの電界強度の参考レベル(職業的曝露: 0.16 A/m)を上回る例は計測されなかった。これに対処するため、更に感度の高い測定器 SRM-3000(narda S. T. S.)を採用して磁界の周波数スペクトルピーク値に着目した測定を試みた。その結果図5に示すように十分な感度で磁界を検出し、指針レベルより十分低い値であることも確認できた。なお、高周波電磁界の曝露量の電界Eや磁界Hについての防護指針の値は、 $E^2$ や $H^2$ で評価することになっているので、時間的に変化する電磁界指示値と防護の値とを比較する場合は、例えば電界Eの平均値の場合は以下のように計測処理する必要がある。

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (1)$$

ここで、nは時間tの間の離散的な計測データ数を表す。

さらに詳細な測定を行うため、プラズマ加熱用の高周波発信装置の近傍にバイコンカルアンテナを設置し、バースト的に発生する電磁界をリアルタイムスペクトル分析器により確率分布測定した。並行して、広帯域測定が可能な磁界プローブならびにスペクトル表示できる高感度磁界測定プローブによる連続的データ収集システムを構築した。

一方、安全管理の観点から複数の地点で監視測定する試みとして、より安価な携帯型電磁界モニター(Radman)の適用性を検討した。そのため基準電波場で携帯型の電磁界モニターの曝露試験を行い、感度の周波数依存性や入射方向依存性を明確にした。これによりリアルタイムで連続監視計測が可能なシステムを構築した。

強力な電磁界が存在すると電磁界が互いに干渉し合い、各種電子機器に誤動作や精度に影響を与えたりする可能性がある。また、心臓ペースメーカーへの影響に対処する必要がある。そのため、電磁界と電子回路との相互結合の視点から影響の可能性を評価した。人体への健康影響に関しては、研究協力者でWHO国際電磁界プロジェクト日本政府代表でもある大久保千代次氏((財)電気安全環境研究所・電磁界情報センター所長、明治薬科大学客員教授)の協力を得てWHOの最新情報を得ると共に安全評価と管理上の課題抽出に反映させた。

#### (5) まとめ

核融合開発を目指す大型プラズマ実験施設

の電磁環境は、大電力設備からの静磁場、ELFから高周波帯域が存在し、施設の電磁環境は幅広い周波数帯域にあって、その発生も確率的である。またプラズマ加熱装置の増強と長時間定常実験も予想される。そこで従事者等の安全管理に対応できる施設内の電磁環境レベルを連続的に測定するシステムを構築し、安全管理の考え方を検討した。

漏洩静磁場は地磁気の3倍程度と低いが、超伝導磁場発生装置保護のため急速に減磁を行った場合は1mTまで上昇するので、磁性体の器具を体内に所持している人の立ち入り規制される。

低周波ELFについては、コイル電源室の電源盤周辺や電動発電機室など大電力機器室周辺は従事者に対する基準を超えるおそれがあるので、立ち入り制限が求められる。

高周波について、高感度でスペクトル測定できる検出器の採用を含め、連続測定可能なシステムを構築した。測定の結果、ICRF高周波発生装置の周辺において従事者に対する基準を越す値は観測されなかった。しかし今後は、複数の測定点で分布測定することが望まれる。そのため比較的簡便な携帯型測定器の感度と適用性を詳細に調べ、これを用いた連続監視システムを開発した。

今後はこれらの監視システムや時間解析測定装置を活用して、核融合実験施設特有の環境電磁界を詳細に調査し、個々の周波数帯域でのレベルのみならず複数の周波数帯域が重なる場合、時間的に変動する場合の安全基準の考え方などを大学や他の研究機関との共同研究を通して検討し、国際的にも情報発信していく。これらの成果は、超広帯域化及び確率的に変動する特徴を有する環境電磁界を対象とした人体曝露量及び安全性評価にも役立つと期待される。

以上の成果は国内学会や国際学会で発表し、国内外の学術雑誌にも投稿した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- (1) Tanaka, Masahiro; Uda, Tatsuhiro; Wang, Jianqing; Fujiwara, Osamu, "Performance Test of Personal RF Monitor for Area Monitoring at Magnetic Confinement Fusion Facility", Radiation Protection Dosimetry, Access published, March 25, 2011
- (2) K. Sato, N. Miyata, Y. Kamimura, Y. Yamada, "A Freehand Scanning Method for Measuring EMF Distributions Using Magnetic Tracker", IEICE Trans. Commun., Vol. E93-B, 2010, pp 1865-1868
- (3) M. Tanaka, S. Takami, T. Uda, J. Wang and O. Fujiwara, "A Remote Monitoring System of Environmental Electromagnetic Field in

Magnetic Confinement Fusion Test Facilities”  
IEEJ Trans. FM. (電気学会論文誌 A) Vol. 130,  
5, (2010) pp.451-456.

- (4) A. Hirata, N. Ito, O. Fujiwara, “Influence of electromagnetic polarization on the whole-body averaged SAR in children for plane-wave exposures”, Physics in Medicine and Biology, 54, 2009, pp N59-N65
- (5) Q. Wang, J. Wang, “SA and SAR analysis for wearable UWB body area applications”, IEICE Trans. Communications, E92-B 2009, pp 425-430

[学会発表] (計 14 件)

- (1) T. Uda, “Monitoring system considering time varying electromagnetic fields in magnetic fusion test facilities”, 20<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Disturbances, 22-24 September 2010, Kaunas University of Technology, Lithuania.
- (2) 王 建青, “無線信号による心臓ペースメーカー回路への電磁干渉機構の検討”, 超高速高周波エレクトロニクス実装研究会, 2010. 7. 30, 神奈川マホロバマイズ三浦
- (3) 王 建青, “デジタル回路に対する電界結合と磁界結合の特性” 電子情報通信学会技術研究報告, 2010. 7. 16, 東京機械振興会館
- (4) 宇田達彦, “核融合実験施設における電磁環境監視測定, 第8回核融合エネルギー連合講演会, 2010.6.10, 高山市市民文化会館
- (5) 宇田達彦, “磁場核融合実験施設における電磁環境と安全管理” 環境電磁工学(EMCJ) 研究会 2009.12.18 核融合科学研究所
- (6) 宇田達彦, “携帯型電磁界測定器の特性と核融合実験施設の安全管理への適用性” 放射線安全管理学会 2009.12.3. 長崎大学
- (7) M. Tanaka, “A remote monitoring system of high frequency electromagnetic field in a magnetic confinement fusion test facility”, 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto, July 20-24, 2009, Kyoto International Conference Center, Japan
- (8) T. Uda, “Monitoring of static magnetic field and variable electromagnetic fields in a large magnetic fusion plasma experimental facility” The 20<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, January 12-16, 2009, Zurich, Switzerland, ETH

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 電磁界分布測定装置

発明者: 上村佳嗣, 佐藤, 川田, 樫村

権利者: 宇都宮大学

種類: 特願

番号: 2011-021255

出願年月日: 2011. 2. 2

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇田 達彦 (UDA TATSUHIKO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号: 50280590

(2) 研究分担者

藤原 修 (FUJIWARA OSAMU)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 70250694

王 建青 (WAN JIANQING)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 60135316

上村 佳嗣 (KAMIMURA YOSHITUGU)

宇都宮大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 20233950

西澤 邦秀 (NISHIZAWA KUNIHIDE)

名古屋大学・アイソトープ総合センター・

名誉教授

研究者番号: 30022809

河野 孝央 (KAWANO TAKAO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・

准教授

研究者番号: 20300733

田中 将裕 (TANAKA MASAHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号: 00435520