

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760601
 研究課題名（和文） イメージング検出器の開発

研究課題名（英文） Development of Imaging Detector

研究代表者

山口 聡一郎 (YAMAGUCHI SOICHIRO)
 関西大学・システム理工学部・助教
 研究者番号：30413991

研究成果の概要：

マイクロ波イメージングは先進の画像計測法として近年注目を集めており、プラズマ乱流現象の3次元観測や非破壊検査・医療診断など産業応用への利用が期待される。本研究ではその重要なキーデバイスである高感度の2次元検出器アレイと位相計測モジュールを開発した。また、これらを組み合わせた新しいマイクロ波イメージング反射計を開発し、超高温プラズマにおける密度揺動を観測した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	0	2,400,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	300,000	3,700,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：マイクロ波イメージング

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波イメージングは先進の画像計測法として注目を集めており、プラズマ物理ではプラズマの乱流現象や磁気流体不安定性の3次元観測として、産業応用では自動車や航空機の高分解度レーダー、空港の所持品検査や建築構造物の非破壊検査として開発が進められている。しかし重要なキーデバイスである高感度の2次元検出器アレイが完成しておらず、その開発が研究課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、衛星通信用として近年発明さ

れた平面八木アンテナを改良して高感度の2次元検出器アレイと、携帯電話やGPS機器に内蔵される直交復調ICを転用した位相計測モジュールを開発し、これらを組み合わせた高感度のマイクロ波イメージング装置を開発することを目的とする。

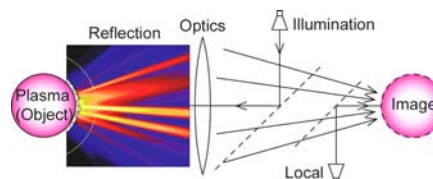


図1 マイクロ波イメージング装置

3. 研究の方法

(1) 高感度の2次元検出器アレイの開発

高周波回路用のプリント基板を用いて 18~26.5GHz 帯の高感度の平面八木アンテナ素子を開発する。微細電鍍技術を用いてアンテナ素子に数 mm 角のミキサダイオード、バラン回路、RF アンプを実装し、アンテナの周波数特性を改善する。最初の検出器アレイとして、図 2 に示すような 2 次元検出器アレイを開発する。平面八木アンテナ素子と受信回路をつないだ非常に小さな検出器を作る。この 4 個の検出器を 1 次元に並べた検出器アレイを 4 枚製作し、これを重ね合わせることで、4 個の検出器×4 枚=16 チャンネルの 2 次元検出器アレイとする。電磁場解析シミュレーターを用いて、安定動作に必要な回路パターンやイメージング検出器に最適なアンテナパターンの計算機シミュレーションを行い、慎重に回路設計をする。動作試験と電磁界シミュレーション解析を交互に繰り返してクロストークを低減しつつ検出器を高集積化できる最適な 2 次元検出器アレイを開発する。

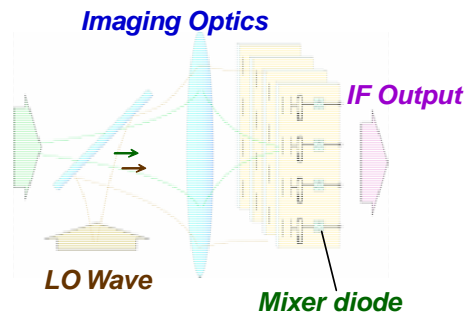


図 2 平面八木アンテナ素子で構成される 2 次元検出器アレイ (4 個×4 枚=16 素子)

(2) 直交復調 IC による位相測定回路の開発

核融合科学研究所と共同開発中のマイクロ波イメージング反射計は、プラズマからの反射ビームの強度を測定し、異なるチャンネル間の相互相関を解析する。この方法は受信回路が簡単でコストも比較的安く、プラズマ観測を容易にするが、直交復調回路を用いて照射ビームと反射ビームの間における位相差の変化を測定した方がはるかに高感度になる。位相計測の場合、50-75GHz の反射ビームを 63GHz の局発ビームを用いて反射信号の周波数を 1-12GHz にダウンコンバートし、直交ミキサ回路を用いて位相変化の正弦信号と余弦信号を取り出して調べる。この方法は、携帯電話における復調回路と全く同じ原理であり、使用する周波数帯が異なるだけである。携帯電話の内部ではこれら一連の信号処理を 1 個の直交復調 IC で処理する。近年の携帯電話や GPS 端末の普及のおかげで、動作実績の

ある高性能の直交復調 IC が今では単価 1,500 円で入手可能である。これを転用して位相測定回路を開発すれば、極めて低コストの受信回路を開発できる、ということに気が付いた。そこで、直交復調 IC の製造元が提供する評価ボードを購入してその回路設計を踏襲し、マイクロ波回路シミュレーターを用いてマイクロストリップ導波路のインピーダンス整合を図る。位相測定回路は、狭帯域 ($\Delta f=1\text{MHz}$) の表面弾性波フィルター、RF アンプ、直交復調 IC、ダイオード検波器、増幅率自動制御 IC などの高周波電子部品で構成される (図 3)。個別にモジュールを購入するとコストが極めて高く、広い設置スペースが必要となる。そこで微細電鍍技術によって回路パターンを製作し、マイクロコンピュータを用いて電子部品を表面実装すれば、低コスト化と小スペース化を両立できる。プラズマ実験において DC オフセット補正回路が必須となるので必要となるチャンネル数分を製作する。

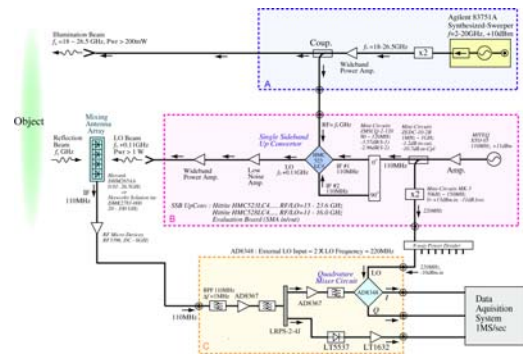


図 3 周波数変調回路と位相計測モジュール

2 次元検出器アレイと位相計測回路が完成すれば、図 3 に示す 20GHz のマイクロ波回路を組んで 2 次元検出器アレイによるマイクロ波イメージング反射計の動作試験を行う。20GHz, 200mW のガンダイオード発振器から照射ビームと参照信号を取り出す。参照信号はシングルサイドバンドの周波数変調器を用いて 0.11GHz に変調され、RF アンプによる 2 段階の増幅によって高出力の局発ビームを得る。このように、照射ビームと反射ビームを同一発振器から発振させることで位相計測を可能にする。通常このような回路を組む場合は、照射ビームの発振器においてフィードバックによる位相固定用の周波数制御回路を必要とするが、図 3 のようなシングルサイドバンドの周波数変調器を用いるとこれらが不要になり、製作コストを大幅に抑えることができる。マイクロ波回路もシンプルになるため、3 次元計測のシステムを構築するために照射ビームの周波数を増やす場合にも大変有効な仕組みである。

(3) プラズマ密度揺動の観測実験

産業技術総合研究所の逆磁場ピンチ装置 TPR-RX においてダイナモ効果の観測実験を行う。これらの観測実験は宇宙における様々なプラズマ現象の重要な解明に役立つ。誘電体レンズをうまく組み合わせたコンパクトな結像光学系を開発し、位相計測回路をこの実験において初めて利用する。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD のプラズマは反射面の形状がねじれているため強い反射信号を得るのが難しく、新しい計測システムの装置開発を行うのは大変不利である。また、LHD では安全確保のため、実験期間中における計測装置の大幅な改良が出来ないという弱点がある。そこで産業技術総合研究所 TPE-RX などの機動力の優れたプラズマ実験装置を利用してマイクロ波イメージング反射計の開発を行う。

4. 研究成果

平成 19 年度において、高感度の 2 次元検出器アレイが完成した(図 4)。この装置は、テフロン製の高周波プリント基板上に平面八木アンテナ素子を 4 個並べて成形し、その基板を垂直方向に 4 枚重ね合わせて、合計 $4 \times 4 = 16$ チャンネルとしたイメージング検出器である。受信周波数を 20GHz として設計し、同じ基板上にマイクロ波の受信回路を一体化した。極小ミキサダイオード(単価 500 円、受信周波数 20~100GHz)、GPS 機器用の RF アンプ(単価 284 円 \times 2 段増幅)、携帯電話(cdma0ne)用のセラミック製の狭帯域バンドパスフィルター(単価 100 円)などを組み合わせて面実装し、手のひらサイズで非常にコンパクトな低コストの 2 次元検出器アレイが完成した。平面八木アンテナを構成する各素子(導波器・反射器・放射器・バラン)は、電磁場解析シミュレーター Microwave Office によって最適化が行われた(図 5)。平面八木アンテナ素子にテー

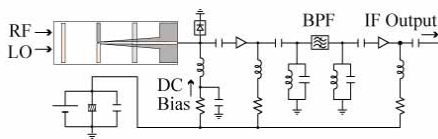
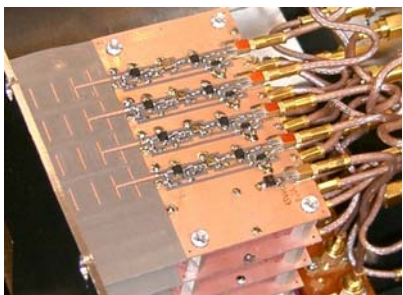


図 4 産総研 TPE-RX のプラズマ実験用に開発された 2 次元検出器アレイ(上)と回路図(下)

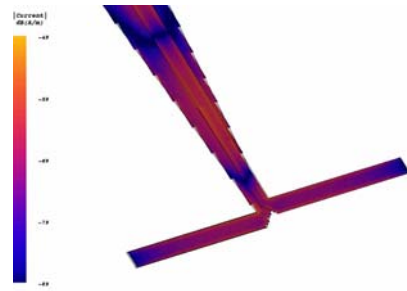


図 5 電磁場解析シミュレーターによる広帯域テーパバランの設計(平衡非平衡接続回路)

パー状バランを接続した場合、アンテナ指向性の中心方向をアンテナ素子正面に固定した状態で広帯域の周波数を受信可能になるということを発案し、平面八木アンテナ素子にテーパ状バランを初めて取り入れた。これにより、イメージング検出器に適した形状と指向性を持ち、優れた周波数特性が得られた。完成した 2 次元検出器アレイの写真とその回路図を図 5 に示す。およそ手のひらサイズのコンパクトな大きさながら、 $4 \times 4 = 16$ 個分のアンテナ素子・受信回路・信号の 2 段増幅回路・周波数フィルター回路が内蔵されている。これら全てを基板加工機と手作りによる内製によって開発したことにより、既製品と比べて 1/100 程度の低コストで製作できた。

また、最初の試作品として位相計測モジュールを 7 台開発した(図 6)。Analog Devices 社の直交復調 IC (GPS 機器用) を転用して、受信信号の 2 段増幅回路、3 段の周波数フィルター回路を経て、反射パワーと反射波の位相差の \sin, \cos 成分が出力される。ノイズ対策のため、各回路基板がジュラルミン製のシールドケース内に収められる。動作試験において図 7 に示すように、典型的な電子密度揺動の周波数 $1\text{kHz} \sim 500\text{kHz}$ と比べて、 $\Delta f = 3\text{MHz}$ の高い周波数変調に対しても正確なりサージュ図形を描く。異なるチャンネル間での相互相関によって、電子密度揺動の詳細なモード解析が可能になる。

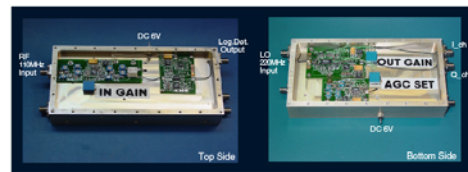
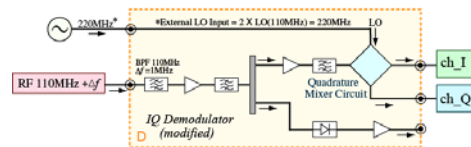


図 6 位相計測モジュールの回路図(上)と完成したモジュールの内部写真(下)

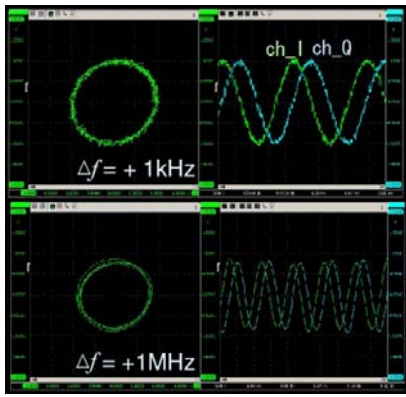


図7 周波数変調信号(110MHz+ Δf)を用いた位相計測モジュールの動作試験

これらの2次元検出器アレイと位相計測モジュールと共に、専用のマイクロ波結像光学系を新たに開発し、産業技術総合研究所の逆磁場ピンチプラズマ実験装置TPE-RXにおいて電子密度揺動の2次元観測を実施した。図8にTPE-RX用に開発されたマイクロ波イメージング反射計の装置図を示す。20GHzの照射波(RF)を平行ビームとしてプラズマに当て、反射波に20.11GHzの局発波(LO)を重ね合わせて、2次元検出器アレイで同時に受信する。検出器から出力される差周波数110MHzを位相計測モジュール(IQ demodulator)に送り、反射波の振幅A、位相差の $\cos \phi$ 成分(I)と $\sin \phi$ 成分(Q)の3信号×16チャンネルがデジタイザーに記録される。これらの照射波や局発波の周波数回路・結像光学系・2次元検出器アレイ・位相計測モジュールが、人の背丈程度の大きさをもつ1つの筐体内部に収まっており、逆磁場ピンチ装置TPE-RXの赤道面にある観測ポートに向けて設置された。

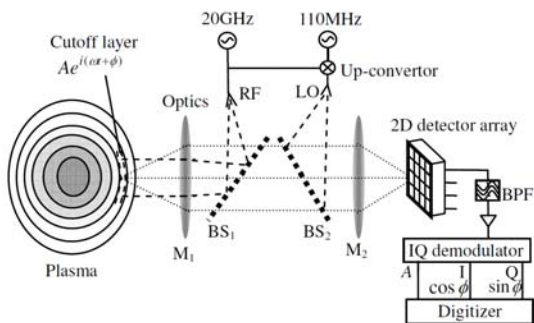


図8 産業技術総合研究所TPE-RXに設置されたマイクロ波イメージング反射計の装置図

図9に実際に観測された電子密度揺動の波形を示す。左側が逆磁場ピンチプラズマにおける典型的な放電波形であり、右側がPPCD(パルス状ポロイダル電流駆動方式)と呼ばれる

プラズマの閉じ込め特性に優れた運転モードの放電波形である。右図の時刻 $t=0.018\text{sec}$ よりPPCDが有効に働くと、プラズマの閉じ込めが良くなって中心温度や密度が高まる。プラズマから放射されるX線強度が上昇し(図10(b))、電子密度揺動(図10(c))の振幅も増大する。2次元検出器アレイと位相計測モジュールを用いて電子密度揺動を観測することにより、密度揺動の空間分布や詳細なモード解析が初めて可能となった(図10)。小半径方向の電子揺動分布や閉じ込め磁場配位の自発的緩和現象、ダイナモの抑制による閉じ込め改善の運転モードにおけるプラズマの擾乱など、逆磁場ピンチプラズマ内部における密度揺動について新しい観測データが得られた。こうしたプラズマのダイナモ現象を左右する乱流モードについて研究成果を近日公表する。

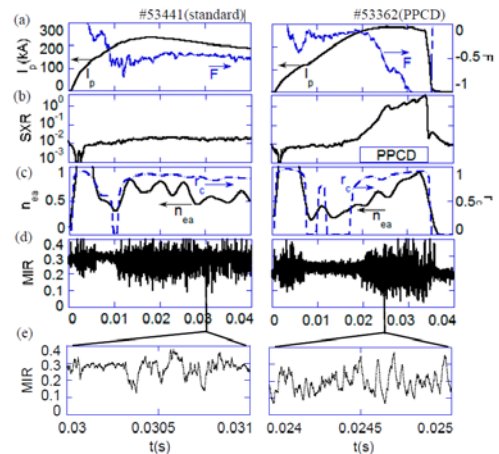


図9 TPE-RXにおいて観測された電子密度揺動の観測波形

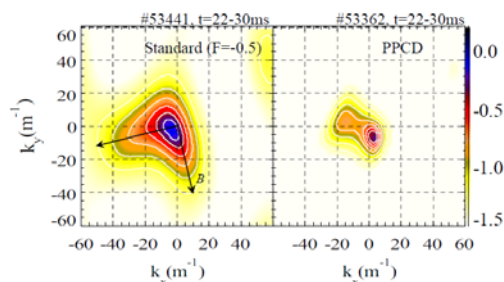


図10 電子密度揺動のトロイダルモードとポロイダルモードの解析結果

平成20年度は、これまで開発された高感度の2次元検出器アレイをさらに発展させて、2つの異なるタイプのイメージング検出器を新たに開発した。1つは用途の幅広い産業応用に合わせて低い受信周波数(7~14GHz帯)用に設計された検出器アレイである。数ミリサイズの小さながん組織(肺ガン・乳ガン)を検出

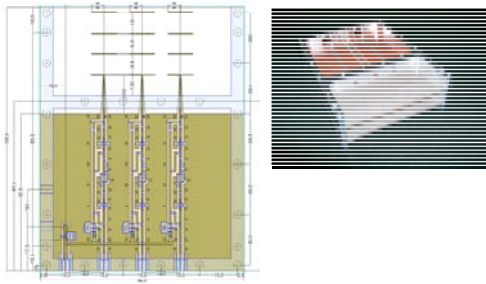


図 11 産業応用向け 2次元検出器アレイのプリント基板設計図と半割型の反射鏡フレーム

する新しい画像診断装置、トンネル内壁や超高層ビル等のコンクリート構造物を安全かつ高速に非破壊検査できる装置に利用する。産業技術総合研究所 TPE-RX のプラズマ実験において開発された平面八木アンテナ素子のサイズをスケールアップし、受信波の中心周波数を 20GHz から 14GHz へ下げた最初の試作装置を製作した(図 11)。ベクトルネットワークアナライザを用いて、受信周波数帯を調べたところ、図 12 に示すように広帯域テーパーバラと相性が良く、7~19GHz(-10dB)という幅広い周波数帯域を持つことが示された。周波数変調やパルス波を用いたレーダー探査法などの産業応用に適した周波数特性が得られた。本年度さらに改良を加え、図 11 右写真のように、アンテナ素子のプリント基板に半割型の反射鏡を挟み込む方法を考案した。これにより、図 13 に示すように受信感度と指向性を共に改善した。このイメージング検出器は、次年度より研究開発が始まるマイクロ波計算機トモグラフィ(マイクロ波 CT)という次世代の医療用画像診断装置の研究開発に応用される。

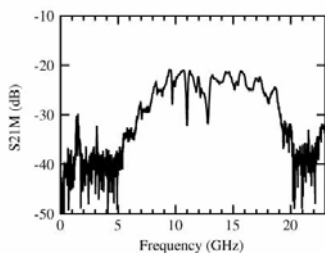


図 12 平面八木アンテナの受信周波数特性。

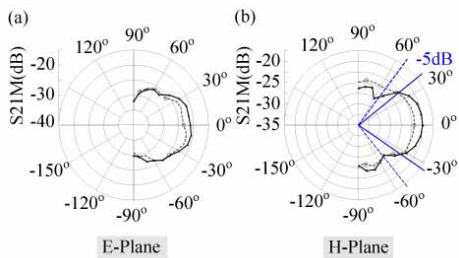


図 13 半割型の反射鏡による指向性の向上。

もう1つのイメージング検出器は、超高温の核融合プラズマを3次元観測をするために高い受信周波数(50~75GHz帯)用に設計された2次元検出器アレイである。産業技術総合研究所TPE-RX用の平面八木アンテナ素子のサイズをスケールダウンし、受信波の中心周波数を20GHzから63GHzへ上げた設計である。2次元検出器アレイに内蔵されるアンテナ素子数は8×8=64個ある(図14)。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置LHDのマイクロ波イメージング反射計にこのイメージング検出器を組み込む。プラズマ(測定対象物)に対して4周波数のマイクロ波を同時に照射するので、プラズマの深さ方向に対して4層の反射面の画像が得られる。よって超高温プラズマ内部を64個×4周波数=256チャンネルという前例のない大規模な3次元計測が可能となり、前述の位相計測モジュールも合わせて導入することにより、微細なプラズマ乱流構造を3次的に可視化させることを可能にする。本研究において開発されたイメージング検出器は現在、特許申請中である。

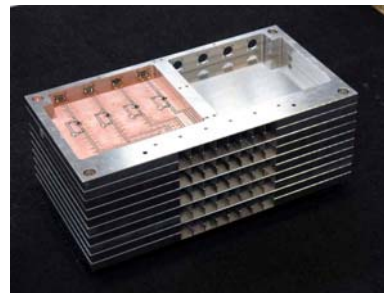


図 14 現在開発中の核融合プラズマ観測用の 2次元イメージング検出器(8×8=64ch, 50-75GHz)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

① “Development of microwave imaging reflectometry in large helical device”
Review of Scientific Instruments, vol.79, Issue 10, pp. 10F111-1 ~ 10F111-4 (2008).
査読あり

S. Yamaguchi, Y. Nagayama, D. Kuwahara, T. Yoshinaga, Z.B. Shi, Y. Kogi, and A. Mase

② “Microwave Imaging Reflectometry “Experiment in TPE-RX”

Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 3, pp. 052-1 ~ 052-7 (2008) 査読あり

Yoshio NAGAYAMA, Soichiro YAMAGUCHI, Zhongbing SHI, Yuichiro KOGI, Atsushi MASE, Shoji SUGITO, Yoichi HIRANO, Satoru KIYAMA,

Haruhisa KOGUCHI, Hajime SAKAKITA,
Kiyoyuki YAMBE, and Nobuyoshi
OHYABU

③“Data Analysis Techniques for Microwave
Imaging Reflectometry”
Journal of Plasma and Fusion Research
vol.3 (2007) pp.S1045-1 ~ S1045-7 査読あり
Z.B. Shi, Y. Nagayama, S. Yamaguchi, Y.
Hamada and Y. Hirano

④ “Microwave Imaging Reflectometry in
LHD”
Journal of Plasma and Fusion Research
vol.2 (2007) pp.S1038-1 ~ S1038-4 査読あり
S. Yamaguchi, Y. Nagayama, Z. Shi, R.
Pavlichenko, S. Inagaki, Y. Kogi and A.
Mase

⑤ “Development of ECE Imaging System on
LHD”
Journal of Plasma and Fusion Research
vol.2 (2007) pp.S1032-1 ~ S1032-4 査読あり
Yuichiro KOGI, Takuya SAKODA, Atsushi
MASE, Naoki ITO, Soichiro YAMAGUCHI,
Yoshio NAGAYAMA and Kazuo Kawahata

⑥ “Observation of Novel Instability by
using Microwave Imaging Reflectometry in
LHD”
NIFS Proc Series, vol.69, pp.472 ~ 475
(2007) 査読なし
S. Yamaguchi, Y. Nagayama, Z. Shi, Y. Kogi
and A. Mase

⑦ “Development of Microwave Imaging
Reflectometry in LHD” 査読なし
NIFS Proc Series, vol.68, pp.42 ~ 45 (2007)
S. Yamaguchi, Y. Nagayama, Z. Shi, Y. Kogi
and A. Mase

〔学会発表〕 (計 5 件)

① Microwave Imaging Reflectometry in
LHD
S. Yamaguchi, Y. Nagayama, D. Kuwahara,
T. Yoshinaga, Z.B. Shi, Y. Kogi and A. Mase
会 議 名 : 17th Topical Conference on
High-Temperature Plasma Diagnostics
開 催 場 所 : アメリカ ニューメキシコ州 アル
バカーキ
発 表 日 : 2008 年 5 月 14 日

② Observation of Novel Instability by using
Microwave Imaging Reflectometry in LHD
山口 聡一朗, 長山 好夫, 石 中兵, 近木 祐
一郎, 間瀬 淳

会 議 名 : プラズマ・核融合学会 第 24 回年会
開 催 場 所 : 兵庫県姫路市 イーグレひめじ
発 表 日 時 : 2007 年 11 月 28 日(水)

③ Observation of Novel Instability by using
Microwave Imaging Reflectometry in LHD
S. Yamaguchi, Y. Nagayama, Z.B. Shi, Y.
Kogi and A. Mase
会 議 名 : 49th Annual Meeting of the APS
Division of Plasma Physics.
開 催 場 所 : アメリカ フロリダ州 オーランド
発 表 日 : 2007 年 11 月 12 日

④ Observation of Novel Instability by using
Microwave Imaging Reflectometry in LHD
S. Yamaguchi, Y. Nagayama, Z.B. Shi, Y.
Kogi and A. Mase
会 議 名 : 17th International Toki Conference
on Physics of Flows and Turbulence in
Plasmas
開 催 場 所 : 岐阜県 土岐市
発 表 日 : 2007 年 10 月 15 日

⑤ Microwave Imaging Reflectometry in
LHD
S. Yamaguchi, Y. Nagayama, Z.B. Shi, Y.
Kogi and A. Mase
会 議 名 : 13th International Symposium on
Laser-Aided Plasma Diagnostics
開 催 場 所 : 岐阜県 高山市
発 表 日 : 2007 年 9 月 18 日
講 演 番 号 : PI-03

〔産業財産権〕
○出願状況 (計 1 件)

名称 : 平面マイクロ波アンテナ、一次元マイ
クロ波アンテナ及び二次元マイクロ波アン
テナアレイ
発 明 者 : 長山 好夫, 山口 聡一朗, 間瀬 淳,
近木 祐一郎
権 利 者 : 長山 好夫, 山口 聡一朗, 間瀬 淳,
近木 祐一郎
種 類 : 特許
番 号 : 特願 2008-039009
出 願 年 月 日 : 2008 年 2 月 20 日
国 内 外 の 別 : 国内

6. 研究組織
(1) 研究代表者

山口 聡一朗 (YAMAGUCHI SOICHIRO)
関西大学・システム理工学部・助教
研究者番号 : 30413991