

平成21年 5月 8日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560051

研究課題名(和文) 大電力ミリ波の伝搬モードの In situ 分析に関する研究

研究課題名(英文) In-situ mode analysis of high power millimeter-waves propagating in the corrugated waveguide

研究代表者

下妻 隆 (SHIMOZUMA TAKASHI)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：80270487

研究成果の概要：

大電力長距離伝送用オーバーサイズ円形コルゲート導波管内の電磁波の伝搬モードの純度、モード比を知るために、測定可能である導波管端から放射された電磁波の強度分布のみを用いて、導波管内の伝搬モードの成分分析を行うことができる画期的方法を提案、実証した。データ解析においては放射パタンの強度分布より位相情報を再構成し、それを使って導波管内基底モード展開することによってモード成分構成を求めた。またそれらの展開係数を用いて本来測定不可能な導波管中の電界、位相分布再構成し、不要モードへのモード変換の原因を追究した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物理一般

キーワード：物理計測・制御

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロ波、ミリ波を用いた加熱は、火炎など従来の加熱法の単なる代替手段ではなく、微視的な強い非平衡下の反応系という物性学上の新しい領域にあることが明らかになってきた[1]。この学術的研究を基にして、マイクロ波、ミリ波の高度利用を推進、重工業では最も省エネルギー効果の大きい製鉄事業、ハイテク分野では金属ガラスの焼結などの機能材料等、21世紀を担う革新的製造技術の開発が進んでいる。この新しい現象を使ったマイクロ波、ミリ波加熱では、数百キロワット以上の大電力のミリ波を電磁波の電

界と磁界の位相を揃えて物質に照射することにより、高効率に非平衡を励起し、通常の加熱法では実現できない非平衡化学反応を実現することが出来る。大電力ミリ波は、核融合加熱技術などで培われたジャイロトロン管によって発生させることができる。この定常大電力ミリ波を工業的に応用するには高効率なミリ波伝送系が必要不可欠であるが、このようなシステムはまだ完成されていない。さらに伝送時の位相を揃え、必要な大きさのスポットに集光するミリ波帯の準光学系の開発も急務である。このような大電力ミリ波の伝送としては、現在主にオーバーサ

イズ（波長に比べて管径はるかに大きい）のコレクタ導波管を用いた伝送法[2]と、ミラー列を用いたビーム伝送法[3]が用いられている。このような伝送路においては、伝送モードを出来るだけ単一モードで且つ低損失で伝送することが必要不可欠である。例えば、コレクタ導波管では、 $HE_{11}$ モードでミリ波を伝送するが、このモードは壁面電流がほとんど流れず、長距離伝送でも減衰が小さく抑えられる。また、オーバーサイズ導波管を用いることにより、メガワット級の大電力でも伝送路内でのアーキングを防止できる利点がある。他方、オーバーサイズであるために、導波管のミスアラインメントにより容易に他モードへのモード変換が発生し、パワーの減衰、導波管内でのアーキング、伝搬位相の乱れを引き起こす可能性がある。同様にミラー列を使用するビーム伝送システムにおいても、ミラー系のミスアラインメントは、回折損失を増加させたり、伝搬モードであるガウスビームの純度低下を引き起こしたりする。

近年、パワー源から装置までの伝送距離は、装置の大電力化、大型化とともにますます長距離になってきている。また伝送路中には経路を曲げるためのバンドや偏波器、パワーモニター、導波管切替器など様々なコンポーネントが接続されており、不要モードを発生させる可能性のある構成要素が多数存在している。これにより伝送効率は一層低下してしまう可能性がある。これはパワーの有効利用という観点からだけではなく、定常運転時の発生熱の処理など多くの問題を引き起こす原因となる。

このような伝送中でのモード変換を定量的に評価するためには、伝送モード成分の分析が必要である。しかるにこのようなメガワット級の電磁波では、その位相を直接測定すること不可能である。我々は、これまで複数箇所における電磁波強度分布の測定から位相を再構成する方法を研究し、電磁波分布の補正ミラーの設計[4]や、導波管などのアラインメント法の可能性検討[5]を行ってきており、この分野の進展を推し進めてきた。

## 2. 研究の目的

### (1) 目的

本研究課題では以下の点を明らかにすることを目的としている。

①伝送中の大電力ミリ波のモード成分を分析するために、その位相情報をその伝送配位、パワーレベル(in situ)で得る。そのために、大電力ミリ波の測定可能な振幅情報のみから、高速で位相を再構成する最適な方法を確認する。

②オーバーサイズコレクタ導波管開口部

において、このようにして得られた振幅と位相情報より、導波管内伝搬モードを基底モードとしてモード展開することにより、それらのモード成分に分解し、所望のモードとそれ以外の不要モードの成分分析を行い、導波管伝送理論よりそのような不要モードの発生機構を明らかにし、伝送効率の向上のための方策を検討する。

③現在パワー伝送に使用されている準光学ミラーとコレクタ導波管を用いる方法において、レーザーや別の低電力ミリ波源を用いる方法ではなく、実際使用する高パワーミリ波を用いて、ミリ波ビームの伝搬方向を知り、ミリ波のコレクタ導波管への結合効率を向上する。

以上の手法を通じて、大電力ミリ波の伝送中のモードのその場分析法を確立し、伝送路のアラインメントのための情報を得、伝送系のアラインメントをリアルタイムで行い、伝送効率を画期的に向上できる方法を実証、確立する。

(2) 学術的な特色、独創性、予想される結果と意義

ミリ波領域で、メガワット級の高パワー出力を用いてその強度分布のみから、そのミリ波の位相情報を再構成する方法は、これまで、核融合プラズマ加熱の分野で、ジャイロトロン出力をコレクタ導波管に結合するいわゆる準光学的結合ユニット(MOU)で用いられる位相補正鏡の設計に使用され、高結合効率の達成に貢献してきた[4]。このような位相再構成法は、電磁波だけでなく、光学、天文、X線回折、電子ビーム回折等で適用され、その精度向上と計算速度の向上のため、いくつかのアルゴリズムが考案されている[6]。本研究課題では、このような位相再構成法を、測定不可能な大電力ミリ波の位相情報を得るための手法として利用し、さらに得られた複素振幅情報から伝送路中の伝搬モードの成分を推定する方法を確立するところに特色があり、また独創性がある。この手法を用いることによって、伝搬モードの純度や、不要モードの識別が可能になるとともに、最終的には、実際に使用するパワーレベルでリアルタイムで伝送路のアラインメントが出来るシステムを構築でき、伝送効率の画期的な向上と、伝送システム設置の再現性を高めることができる。

大電力の定常的なミリ波の伝送においては、工業利用、医療分野応用、核融合応用などにおいて、その高効率化はトータルコストの低減とシステムの簡略化につながる重要な課題である。本研究はこの視点からも重要な意義があると考えられる。

参考文献

- [1] M.Sato, et al., Mat Res Innovation 10(2006).  
 [2] T. Shimozuma, et al., Proc. of the 31st I Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 14th TeraHertz Electronics, Sept. 2006, p388.  
 [3] H. P. Laqua, et al., Proc. 15th Int. Stellarator Workshop, Madrid, Spain, October 3-7, 2005, IT-20, p137.  
 [4] M. A. Shapiro, et al., Fusion Engineering and Design 53 (2001) 537-544.  
 [5] T. Shimozuma, et al, Journal of Plasma and Fusion Research 81 (2005) 191-196.  
 [6] J. R. Fienup, Applied Optics 32 (1993) 1737-1746.

### 3. 研究の方法

本研究課題で遂行しようとしているその場モード分析法について説明する。準光学的結合ユニット(MOU)内に設置された光軸調整鏡の不動点に入射された高パワーミリ波は、長距離伝送用のコルゲート導波管に導入され、伝送される。伝送路の途中を取り外し、ミリ波を導波管端面より放射させ、ミリ波用ターゲット板に照射する。ターゲットの温度上昇を赤外線カメラによって測定し、ミリ波の電力分布を求める。ターゲット板を移動させ、開口端からの距離を変え、同様な測定を繰り返す。このようにして得られた複数箇所でのミリ波電力分布をもとに、位相再構成法により導波管開口端での位相分布を求める。導波管出口において再構成された振幅及び位相情報を用いて、直交系をなす導波管モード系による展開係数を求めることにより、原理的には、各モード成分の含有比が求められることになる。実際には、予想される不要モードと基本伝送モードである  $HE_{11}$  とのビート波長の半波長程度離れた位置において、再度測定することにより、より確度の高いモード含有比が得られることになる。さらに、位相の傾きよりビームの伝搬方向を求め、ビームの伝搬方向を同定し、光軸調整鏡のあおり角を変更することにより、ビーム軸を導波管軸に一致させることで再アラインメントを行うことができる。

本システムの重要なコンポーネントとして、小型非冷却赤外線カメラ（強磁場環境下で用いる可能性があるためモーター等の駆動を用いないのもの、また伝送経路の途中で測定するため小型であることが重要）、ミリ波照射用ターゲット、ターゲット移動ステージ、光軸調整鏡、駆動システム、データ解析およびミラー駆動制御用計算機が挙げられる。

まず、小型赤外線カメラを用いたミリ波放射パターン計測システムを確立する。それを用

いて伝送路の複数箇所での放射パターンを測定し、電磁界強度測定の精度を向上する。具体的には、種々のターゲット材を試験し、より精度の高いデータの取得を目指す。ターゲット材のミリ波強度と温度上昇の線形性の問題があるが、これに対しては実際に入射パワーを変化させパワー依存性を測定することによって解決する。また、放射パターンデータ処理法の開発、すなわち、赤外線カメラの視野角を考慮した座標変換のためのコード開発、位相再構成法の高速度改良を行い、含有モードの構成比を求めるためのデータ処理方法を検討、確立する。

試験のための伝送経路としては、核融合科学研究所所有の電子サイクロトロン共鳴加熱用 168GHz, 84GHz ジャイロトロンシステムを用いる。ジャイロトロンは最大出力 500kW、パルス幅 1 - 2 秒のものを用いる。実際の放射パターン測定には、数ミリ秒の短パルス発振で実施する。伝送路は、直径 88.9mm のコルゲート導波管より構成され、経路長は約 100m である。コルゲート導波管は、1 単位として 1m または 2m の長さのものを用いている。この 1 セクションを取り外すことにより、本測定系を、導波路において複数の箇所に設置しデータを取得する。

研究協力者である MIT の Dr. M.A.Shapiro と Dr. R.J.Temkin は、電界の強度分布からその位相を再構成する位相再構成法の研究を行っており、長年日米協力事業のもと我々と共同研究を進めている。本課題においても位相再構成の技術は必須である。データのやり取りは、主にインターネットを用いて行う。

### 4. 研究成果

(1) コルゲート導波管中の伝搬波のモード成分解析の方法と解析結果

これまで、位相補正鏡の設計や導波管のアラインメントを行う際に、複数箇所での測定された放射パターンの強度分布より位相情報を再構成する位相再構成法を利用するアイデアが我々より提案され、うまく利用できると示されてきた。さらに一歩進めてこの位相再構成法を用いて、導波管の放射端から放射される電磁波の複素振幅、すなわち振幅と位相を求めることができる。その複素振幅を導波管内の直交系をなす固有モードで展開することによって、それぞれの固有モードに対応する成分を求めることができる。すなわちそれぞれの固有関数の展開係数が、そのモード成分を与えることになる。

具体的には、導波管の出口 ( $z = 0$ ) での位相分布を位相再構成法により求め、求められた振幅  $A(x,y,0)$  と位相  $\varphi(x,y,0)$  を導波管中の直交固有関数  $\phi_n$  で展開する。逆にその展開係数を用いることによってモード  $n$  の成分

$p_n$  は次の式で与えられる。

$$p_n = \frac{|C_n|^2 \cdot \int_S |\phi_n|^2 ds}{\int_S |A|^2 ds} = \frac{|\int_S A(x, y, 0) e^{j\varphi(x, y, 0)} \cdot \phi_n^* ds|^2}{\int_S |\phi_n|^2 ds \cdot \int_S |A|^2 ds}$$

ここで  $C_n$  はモード  $n$  の振幅である。半径  $a$  を持つオーバーサイズのコルゲート導波管では、これらの固有関数は近似的に以下の式で表される。

$$\phi_{n,m}^{even} = J_{n-1}(X_{n-1,m} \frac{r}{a}) \cdot \cos(n-1)\phi$$

$$\phi_{n,m}^{odd} = J_{n-1}(X_{n-1,m} \frac{r}{a}) \cdot \sin(n-1)\phi$$

ここで、 $X_{n-1,m}$  はベッセル関数  $J_{n-1}(X_{n-1,m})=0$  の  $m$  番目の解であり、 $r^2=x^2+y^2$ 、 $\phi = \tan^{-1}(y/x)$  である。

この方法を、我々の LHD 装置の 168GHz ECH システムに適用した。

図 1 は、円形コルゲート導波管の放射端における測定された振幅分布 a) と再構成された位相分布 b) を示している。振幅分布はほぼガウス分布的な形をしており、位相分布はほぼ一様であることがわかる。このデータを用いて、上述した方法によって伝搬波のモード成分分析を行った。表 1 はその成分を示したものである。主伝搬モードである HE<sub>11</sub> モードが約 89% を占め、励起された他の不要モードは HE<sub>21</sub> モード (偶関数モード) が 1.1%、HE<sub>12</sub> モード (偶関数モード) が 0.9%、奇関数モードでは HE<sub>21</sub> モードが 5.4% であることがわかった。一番大きな割合を占める不要モード HE<sub>21</sub> 奇関数モードは、図 1a) にみられる

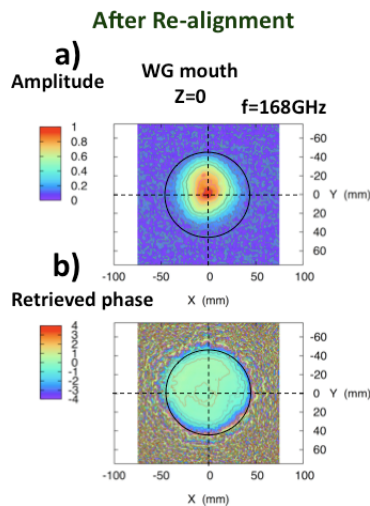


図 1 測定された振幅分布と再構成された位相分布

ピーク中心の  $y$  軸方向のわずかな軸ずれによるものである。

## (2) 導波管中の電界分布の再構成

上述のモード展開係数  $C_n \exp(j\varphi_n)$  と伝搬位相項  $\exp(-j\beta_n z)$  を用いると、導波管中の任意の点  $z$  での電界分布を再構成することができる。

Mode	Even (%)	Odd (%)
HE11	88.841	-
HE12	0.910	-
HE13	0.158	-
HE14	0.118	-
HE15	0.161	-
HE21	1.149	5.357
HE22	0.140	0.684
HE23	0.079	0.131
HE24	0.012	0.086
HE25	0.036	0.177
HE31	0.432	0.048
HE41	0.147	0.021

表 1 モード分析結果

コルゲート導波管中の任意の位置  $z$  での電界は振幅と位相を使って以下のように記述される。

$$A(x, y, z) e^{j\varphi(x, y, z)} = A_r(x, y, z) + jA_i(x, y, z) = \sum_{n=1}^N C_n e^{j\varphi_n} \phi_n(x, y) \exp(-j\beta_n z)$$

適用したのは 168GHz のジャイロトロンから  $z=-3.2\text{m}$  の位置でコルゲート導波管に結合された高パワーの電磁波である。 $z=0$  から放射された電磁波の強度分布のみより位相情報を再構成し、特に  $z=0$  の位置での位相と振幅情報より導波管内の固有モードの展開係数を求める。その展開係数を使って電界を再構成するのである。

図 2 はこのようにして再構成された導波管入口部 ( $z=-3.2\text{m}$ ) での電界の振幅と位相の等高線プロットを示したものである。振幅分布はほぼ導波管軸付近にピークを持っているが、位相分布には  $y$  軸方向にわずかな位相面の傾きが認められる。これが不要モードの HE<sub>21</sub> 奇関数モードの発生につながったものと考えられる。このように高パワーレベルでは測定不可能な位相情報を求めることができ、さらにその情報よりミスアラインメントによる不要モードの発生原因を追究できることがわかった。

## (3) 測定システムの小型化

ミリ波伝送系は、複雑な経路をとり長距離に渡る。また複数系統が同居するため非常に狭い場所に敷設されることが多い。そこで、本測定システムを小型化した。主要構成要素は、非冷却小型赤外線カメラ、電磁波を反射し赤外線を透過するマルチホールフィルタ、電磁波を処理する小型ダミーロードである。図 3 に構成された放射モードパターン測定

システムの写真を示す。カメラはRS232Cにより遠隔で制御できるシステムになっている。

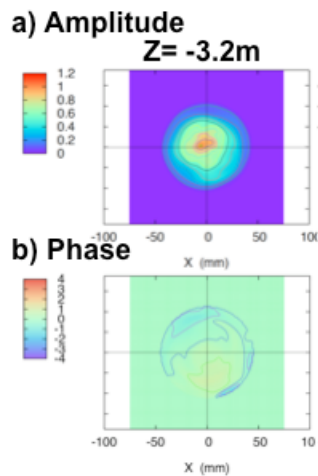


図2 導波管入口部で再構成された電界強度分布

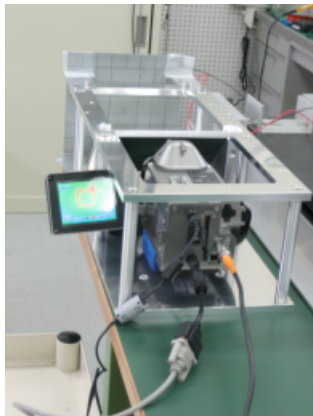


図3 放射パターン測定システム

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

① T. Shimozuma, H. Idei, M. A. Shapiro, R. J. Temkin, S. Kubo, H. Igami, Y. Yoshimura, *et al.*, (他 6 名, 1 番目)

"Analysis of Propagating Mode Contents in the Corrugated Waveguides of ECH System for Precise Alignment", Proceedings on 18th International Toki Conference, NIFS-PROC-78, 2009, 301-304. 査読無し

② T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, *et al.*, (他 14 名, 1 番目)

"Handling Technology of Mega-Watt

Millimeter-wave for Optimized Heating of Fusion Plasmas",

Proceedings on Global Congress on Microwave Energy Applications, 2008, 571-574. 査読無し

③ T. Shimozuma, H. Idei, M. A. Shapiro, R. J. Temkin, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, *et al.*, (他 7 名, 1 番目)

"Propagating Mode Analysis and Field Reconstruction in the Corrugated Waveguides of a High Power Electron Cyclotron Heating System",

Proceedings on 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2008, R5D38. 査読無し

④ T. Shimozuma, S. Kubo, H. Igami, *et al.*, (他 10 名, 1 番目)

"Clear Transition to High-Te State with an Electron Internal Transport Barrier Creation in EC Heated LHD Plasmas",

Journal of Physics : Conference Series 123, 012022-1 – 012022-9 (2008). 査読あり

⑤ T. Shimozuma, S. Kubo, H. Igami, *et al.*, (他 5 名, 1 番目)

"Efficient Heating at the Third-Harmonic Electron Cyclotron Resonance in the Large Helical Device",

Plasma and Fusion Research 3, S1080-1 – S1080-5 (2008). 査読あり

⑥ Y. Takeiri, A. Komori, H. Yamada, *et al.*, (他 19 名, 8 番目)

"Stability and Confinement Studies of High-Performance NBI Plasmas in the Large Helical Device Toward a Steady-State Helical Fusion Reactor",

Plasma and Fusion Research 3, S1001-1 – S1001-8 (2008). 査読あり

⑦ T. Shimozuma, S. Kubo, *et al.*

"Experimental Conditions of ECRH and Magnetic Configuration for Efficient Electron Heating in Large Helical Device"

Conference Abstracts of 34th European Phys. Soc. Conf. on Plasma Physics, 2007, P4-153, 査読無し

⑧ H. Idei, T. Shimozuma, *et al.*

"Mode retrieval in a circular corrugated waveguide"

Conference Digest of 2007 Joint 32nd Int. Conf. IRMMW and Int. Conf. on 15th THz Electronics

2007, 69-70, 査読無し

⑨ T. Notake, S. Ito, S. Kubo, T. Shimozuma, *et al.*, (他 7 名, 4 番目)

"Development of High Power Transmission System for ECRH in LHD",

Fusion Science and Technology, 51, 409 – 411, (2007). 査読あり

⑩ M. Yokoyama, H. Maaßberg, K. Ida, *et al.*, (他 11 名、8 番目)  
”Core Electron-Root Confinement (CERC) in Helical Plasmas, Nuclear Fusion”,  
*Fusion Science and Technology*, 51, 409 – 411, (2007). 査読あり

[学会発表] (計 10 件)

①下妻 隆、他

”Analysis of Propagating Mode Contents in the Corrugated Waveguides of ECH System for Precise Alignment”

第 18 回国際土岐コンファレンス, 平成 20 年 12 月 10 日, 岐阜県土岐市 (日本)

②下妻 隆、他

「大電力ミリ波のコルゲート導波管内伝搬モードの *in situ* 分析に関する研究」

プラズマ・核融合学会第 25 会年会, 平成 20 年 12 月 3 日, 栃木県宇都宮市 (日本)

③下妻 隆、他

”Propagating Mode Analysis and Field Reconstruction in the Corrugated Waveguides of a High Power Electron Cyclotron Heating System”

第 33 回赤外、ミリ波、テラヘルツ波に関する国際会議, 平成 20 年 9 月 18 日, パサデナ, ロサンゼルス (米国)

④下妻 隆、他、

”Recent Studies Toward Improvement of Total ECH Efficiency in LHD”,

Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2008, 平成 20 年 9 月 11 日, サンディエゴ (米国)

⑤下妻 隆、他

”Handling Technology of Mega-Watt Millimeter-wave for Optimized Heating of Fusion Plasmas”

マイクロ波エネルギー応用に関する全体会議 MAJIC1, 平成 20 年 8 月 8 日, 大津 (日本)

⑥下妻 隆、他

「入射偏波のフィードバック制御による ECH 吸収効率最適化法の検討」,

第 7 回核融合エネルギー連合講演会, 19C14, 平成 20 年 6 月 19 日, 青森市 (日本)

⑦下妻 隆、他

「コルゲート導波管内伝搬モード分析による大電力ミリ波長距離伝送の効率改善」

プラズマ・核融合学会 第 24 回年会, 平成 19 年 11 月 30 日, 兵庫県姫路市イーグレ姫路

⑧出射 浩、他

「放射電界を用いた円形コルゲート導波管伝播モードの解析」

プラズマ・核融合学会 第 24 回年会, 平成 19 年 11 月 30 日, 兵庫県姫路市イーグレ姫路

⑨出射 浩、他

”Mode retrieval in a circular corrugated waveguide using Radiated Field”

第 32 回赤外・ミリ波に関する国際会議, 平成 19 年 9 月 3 日, カーディフ イギリス

⑩下妻 隆、他

”Experimental Conditions of ECRH and Magnetic Configuration for Efficient Electron Heating in Large Helical Device”

第 34 回プラズマ物理に関するヨーロッパ物理学会, 平成 19 年 7 月 6 日, ワルシャワ ポーランド

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

下妻 隆 (SHIMOZUMA TAKASHI) 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 80270487

### (2) 研究分担者

出射 浩 (IDEI HIROSHI)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号: 70260049

### (3) 連携研究者

久保 伸 (KUBO SHIN) 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授

研究者番号: 80170025

吉村 泰夫 (YOSHIMURA YASUO) 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号: 90300730

伊神 弘恵 (IGAMI HIROE) 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号: 10390634

### (4) 研究協力者

M. A. Shapiro

マサチューセッツ工科大学・プラズマ科学核融合センター・研究員

R. J. Temkin

マサチューセッツ工科大学・プラズマ科学核融合センター・主任研究員