

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760688

研究課題名（和文） 真空容器外磁場コイルを用いた球状トカマクの合体生成の最適化

研究課題名（英文） Optimization of spherical tokamak merging start-up by using outer poloidal field coils

研究代表者

山田 琢磨 (YAMADA TAKUMA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：90437773

研究成果の概要（和文）：UTST 装置で、真空容器外に設置された磁場コイルのみを用いて真空容器内に初期プラズマを2つ形成し、合体させることで球状トカマクを立ち上げた。最適化には、トロイダル磁場の増強や、電気二重層キャパシタと IGBT によって平衡磁場を生成した。ドップラー分光器による測定ではイオンのアウトフロー領域での加速が観測され、トリプル静電プローブによる測定では合体の X 点近傍での局所的な電子加熱が観測された。

研究成果の概要（英文）：On UTST, spherical tokamak start-up was demonstrated by merging two initial plasmas, which were generated inside the vessel by using the magnetic field coils located outside the vessel. To optimize the discharge, toroidal field was enhanced and equilibrium field was generated by electric double layer capacitors and IGBTs. Doppler spectroscopy measured the acceleration of the ions in the outflow region, and triple Langmuir probe measured the localized electron heating at the merging X-point.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：炉心プラズマ

1. 研究開始当初の背景

球状トカマクは通常のトカマクに比べてアスペクト比が小さく(2以下と定義される)、単位磁気圧あたりに閉じ込め可能なプラズマ熱圧力(ベータ値)が大きくなるのが利点である。経済的な核融合炉の実現のために球状トカマクに期待が寄せられていることは、大型核融合実験炉 ITER のアスペクト比の設計値が当初に比べて下がり3程度に近づいていることから明らかである。更なる低アスペクト比化を実現するためには中心軸

をなるべく細く取らなければならない、センターソレノイド(CS)の場所を確保するのが難しい。そこで、CS を全く使わないプラズマの生成・維持をすることが望ましい。CS を使わない球状トカマクの立ち上げ法の一つとして、合体生成法がこれまでに TS-3/TS-4 (東京大学) [Y. Ono *et al.*, Nucl. Fusion **43**, 789 (2003)]、START/MAST (英国原子力機構) [A. Sykes *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 1423 (2001)]等で研究されてきた。合体生成法では、合体時に磁力線が再結合することで磁気エ

エネルギーがプラズマ、特にイオンの運動・熱エネルギーに変換され、非常に高ベータな（50%にも及ぶ）球状トカマクが短時間のうちに生成されることが特徴である。しかし、これまでの合体生成実験は真空容器内部のコイルを利用したものであり、コイルがプラズマにさらされるため、実際の核融合炉に応用することは非現実的である。

球状トカマク合体実験装置 UTST（東京大学・柏キャンパス）は、合体生成に用いるポロイダル磁場(PF)コイルが真空容器外にあり、核融合炉により近い条件下での合体生成実験を行うことを目的としている。真空容器外の PF コイルによって真空容器内に 2 つの磁気中性点を生成し、そこで生じた 2 つのプラズマを、PF コイルの電流方向を反転することで中心部に押し出し、合体させる (Double Null Merging 法)。UTST では 2008 年に、世界に先駆けて初めて真空容器外のコイルによる球状トカマクの合体生成に成功した [T. Yamada *et al.*, 14th Intl. Workshop on Spherical Torus (Frascati, Italy, 2008)]。しかしながら加熱効果は期待したほどではなく、最適化の余地がある。その理由として 2 つの初期プラズマの生成中に中央部でリコネクションが始まってしまうことと、2 つの初期プラズマのポロイダル磁束が異なりアンバランスであることが挙げられる。UTST の合体生成実験はその動向が世界中からも注目されており、いかに高ベータ立ち上げが最適化できるかが期待されている研究である。

2. 研究の目的

本研究では、真空容器外 PF コイルを用いた高ベータ球状トカマクの合体生成の高効率化を目標とする。リコネクション時間はコイル磁場浸透時間以下であるので渦電流を含んだコイル磁場制御とそれを通じたプラズマ位置制御法を確立した上で、最大のプラズマ加熱が引き出せる高速合体を目指す。東京大学の UTST 装置では CS を用いた放電において Double Null Merging 法によるプラズマ合体が観測されたが、合体はまだまだアンバランスである。そこで予備電離の改良をすることで上下 2 つの初期プラズマのポロイダル磁束のアンバランスを解消し、合体加熱の最適化を行う。さらに合体の過程では上下付近にあるアクセラレーションコイルを用いて初期プラズマを一気に押し出し、リコネクション過程の促進することで加熱効率の上昇を目指す。また、円環磁場を発生させるトロイダル磁場(TF)コイルのターン数と電源容量を増強し、平衡磁場には IGBT 半導体スイッチで制御された電源を用いる。これらの改善を行ったうえで、CS を用いないプラズ

マ合体による高ベータ球状トカマク立ち上げを行うことを目標とする。また、同時サンプリング数を増やすなど測定器の充実を図り、合体プラズマの加熱やヘリシティー注入などの現象を観測する。

3. 研究の方法

(1) 予備電離の調整

予備電離は真空容器の内部の底に設置されたワッシャーガンによって行われ、ワッシャーガンによって生成された種プラズマは TF コイルと平衡磁場コイルによって生成された螺旋磁場によって上方まで伝わっていくが、予備電離は下方で強く、上方で弱く、上下 2 つの磁気中性点における予備電離には偏りがある。そのため下方で生成されたプラズマのポロイダル磁束のほうが上方のプラズマより大きく、合体は上方が下方に吸収されるまでしか起きず、その後下方プラズマが中央に移動して終わるため合体過程が長く保持されない。そこで上下の予備電離をバランスさせるために上方にも同様のワッシャーガンを設置した。

(2) コイル・電源の増強

円環磁場を生成する TF コイルを従来の 8 ターンから 16 ターンに増やし、電源を 4 kV, 25 mF, 200 kJ で使用していたものから、最大 3.3 kV, 128 mF, 700 kJ のものに増強した。CS は 8 kV, 0.85 mF, 27 kJ から、最大 10 kV, 20 mF, 1 MJ に増強し、余った電源を、プラズマの合体が始まった時に合体速度を速めるために用いるアクセラレーションコイルに用いることとした。電気二重層キャパシタを用いた電流源を核融合プラズマとしては初めて使用し、制御には半導体 IGBT を用いた。これにより秒オーダーの準直流電源の開発を行い、より長寿命の合体プラズマの維持を目指した。

(3) 290 チャンネル磁気プローブアレー

UTST 装置には、プラズマの存在領域に直接磁気プローブアレーが挿入されており、その領域は真空容器断面のほぼ 2/3 に及ぶ。上部磁気中性点付近に 64 チャンネル、合体面付近に 81 チャンネルあり、各チャンネルにはピックアップコイルがトロイダル方向 (θ ・軸方向 (z) にそれぞれ 2 つずつ設置されており、合計 290 チャンネルの磁気プローブによって真空容器内の磁場 B_r 及び B_z の計測を直接行う。また得られた磁場からポロイダル磁束 Ψ 、電流密度 j などを計算することができる。従来までデジタイザのチャンネル数が不足していたため、上部磁気中性点付近と合体面付近を切り替えて測定を行っていたが、デジタイザを拡充することで全チャン

ネルの同時測定を可能とした。

(4) イオンドップラー分光計測器

イオンの発する線スペクトルは、発光体の熱運動・集団運動によってそのスペクトル線にドップラー広がり・中心波長にドップラーシフトが生じる。そのため、線スペクトルのドップラー広がりの半値全幅からイオン温度 T_i が求められ、ドップラーシフトからはイオンの流速を求めることができる。本研究ではドップラー分光計測器を用いて UTST 装置における磁気リコネクション時のイオンの振る舞いを検証した。計測視線を複数用意し、特に磁気リコネクションによるイオンの局所加熱・加速を確認するために、プラズマに垂直(Radial)・接する(Tangential)方向の視線におけるドップラー広がりを測定し、比較を行った。集光はプラスチック光ファイバで行い、光学レンズにより焦点を合わせて分光器に入射した。分光器の仕様は、焦点距離 1 m、グレーティングは 1200 grooves/mm である。分光器の射出口に配置した受光素子としては、16 チャンネルの光電子増倍管(PMT)を用いた。PMT は時間分解能が速いため、光量の時間変化を早い時間分解能で計測することが可能である。PMT の出力は、電流電圧変換を経て、1 MHz サンプリングのデジタルザによって同時計測した。発行スペクトルには不純物炭素ライン(CII: 426.7 nm)を用いた。

(5) トリプル静電プローブ

トリプル静電プローブは1本の共通な電極に異なるバイアスをかけ、プラズマの電圧-電流特性曲線上の2点を取ることによって瞬時的にその時点の電子温度・密度を測定することができる計測器である。今回は合体時の電子密度を $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度を 10 eV 程度と予想してプラズマに露出される端子の大きさを $\Phi 1 \text{ mm}$ 長さ 5 mm として設計を行った。また合体後新たにできた球状トカマクは電子密度が最高値でおおよそ $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度と見積もられていた。このため信号全体では多くの電荷が流れることが予想されたため、十分な電源を保障するため、回路は積層セラミックコンデンサを並列につなぎオシロスコープでバイアス電圧の降下が十分小さいことも確認した。また配電システムからのノイズをカットするために電源には電池 (9 V 乾電池) を使用することによってノイズを抑制した。この静電プローブは挿入位置を変化させることによって $z = 0$ (中心面) の径方向を自由に測定することが可能となっている。さらにコイル電流によって重畳するオフセット分を差し引くことによって更に精度の向上にも成功した。

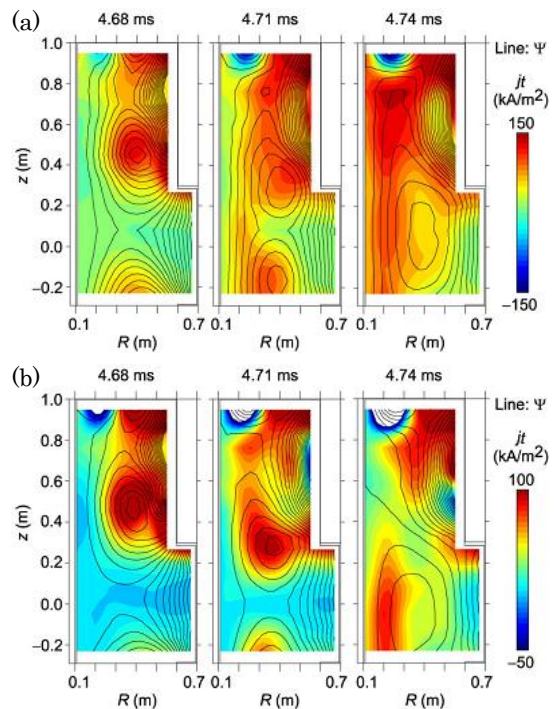


図 1. Double Null Merging 法に (a) CS による誘導を併用した場合と、(b) CS を用いない場合の合体の磁気面。線がポロイダル磁束 Ψ 、色がトロイダル電流密度を表す。

4. 研究成果

(1) 合体の観測

UTST で行われている Double Null Merging の具体的方法は、まず TF コイル・平衡磁場コイルにより螺旋磁場を形成する。次に PF コイルに通電してそれぞれ上下に磁気中性点を形成し、PF コイル電流の急激な立下りにより磁気中性点において初期プラズマを生成する。最後に PF コイル電流の反転により初期プラズマを中心面に押し出し、さらにアクセラレーションコイルに通電することでプラズマを押し付けて中心面付近で合体をさせる。磁気中性点の生成に用いる PF コイルの電流波形は、コンデンサバンクに接続された PF コイルの電流が反転してから第 2 ピークでクローバ回路を動作させることで必要な波形を得ている。またその際、CS に通電することで誘導によるトロイダル方向のプラズマ電流駆動が可能である。真空容器内部の 2 ヶ所に設置されたワッシャーガンによって、初期プラズマを生成する際の予備電離がバランス良く行われ、磁気プローブアレーによる計測から球状トカマクの綺麗な合体生成が観測された。CS を併用した場合、最大プラズマ電流 310 kA が確認された。また、CS コイルによる電流駆動を用いない場合においても球状トカマクの合体生成に成功し、プラズマ電流 40 kA を達成した。図 1 は磁気プローブアレーによる合体中のポロ

イダル磁束 Ψ とトロイダル電流密度を表し、図1(a)がCSを併用した場合、(b)がCSを用いなかった場合である。どちらの場合でも合体がバランス良く進行し、合体面上に電流シートが形成されていることが分かる。

(2) 電気二重層キャパシタによる平衡磁場

電気二重層キャパシタにIGBT半導体スイッチを組み合わせた電源をUTSTの平衡磁場コイルの電流源として開発し、核融合プラズマ実験装置に電気二重層キャパシタを初めて適用した。これにより秒オーダーの準直流電源の開発に成功し、電気二重層キャパシタが核融合プラズマ分野にも有効に応用できることを証明した。図2は、電気二重層キャパシタによる平衡磁場を加えることで、UTSTプラズマの寿命が延びた様子を示す。従来の平衡磁場はコンデンサ電源を用いていたためパルス幅が短く、また付近に設置されているPFコイルの急激な電流の変動により誘導を受け、PFコイル放電開始後は役に立っていなかった。電気二重層キャパシタを用いた準直流電源はPFコイルによる誘導を受けず、長時間UTSTプラズマに必要な平衡磁場を供給することができた。

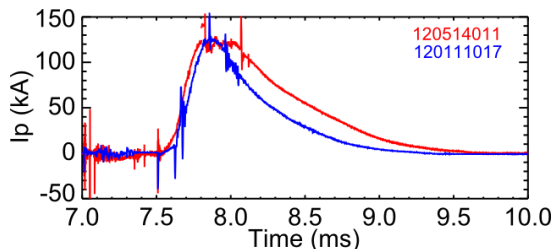


図2. 電気二重層キャパシタ (赤) とコンデンサ電源 (青) を使用して平衡磁場を加えた時のUTSTプラズマ電流の比較。

(3) イオンアウトフローの計測

PMTアレイを受光素子に用いたドップラー分光計測器を開発し、UTST合体生成プラズマにおけるイオン温度・流速を測定した。炭素不純物ライン(CII: 426.7 nm)を測定することでイオン温度の計測に成功した。CSを用いた放電で合体後に15–25 eVのイオン温度を計測した。図3のように合体プラズマのRadial、Tangential、非合体プラズマのRadialのドップラー広がり の時間発展を比較すると、合体プラズマのRadial視線のみにおいて合体の時間帯にドップラー広がりの増大が確認された。これはTangential視線からは観測されなかったことから合体中のイオン温度の上昇そのものではなく、磁気リコネクションのX点からの径方向外向き、内向きのアウトフローとフローの無い3成分が重なりスペクトルが広がったと結論付け

られた。この仮定の下でのアウトフロー速度は約24 km/s程度と見積もられ、これはアルヴェン速度約22 km/sおよび2次元磁気計測によるポロイダル磁束の時間発展から見積もられる磁力線の速度約35 km/sと非常に近い値であった。このことから、UTST装置における磁気リコネクションは、イオンの加速までは達成していると考えることができ真空容器外部のコイルのみを用いたプラズマ合体における磁気リコネクションを介したエネルギー変換を初めて実証した。

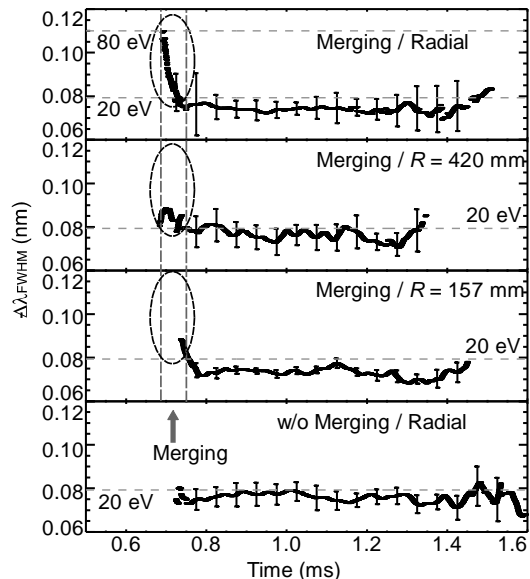


図3. ドップラー分光器により観測されたCIIのドップラー広がり。測定視線は、合体プラズマのRadial, Tangential ($R = 420, 157$ mm), 非合体プラズマのRadialである。また図中に、イオン温度が20, 80 eVとなるドップラー広がり の位置を示してある。

(4) 電子のX点での局所加熱

トリプル静電プローブを用いて、UTSTの磁気リコネクション時のX点付近($R = 0.35$ m)を含める5点で測定を行い、プラズマの再現性を仮定することで図4のような電子温度の径方向分布の時間発展が得られた。急激な電子温度の上昇が見られる $R = 0.35$ m, 7.7 msは、磁気プローブアレイの計測結果から、磁気リコネクションによるX点と電流シートが形成されている時間帯に等しく、合体による電子加熱が測定されたと結論付けられた。 $R = 0.35$ m以外では急激な電子温度の上昇は見られず、この加熱が $R = 0.35$ m (X点)付近における局所的な加熱であることが判明した。さらにこの加熱は0.01 msオーダーと非常に短時間で急加熱され、再び短時間で消えることが分かった。真空容器外に設置された外部PFコイルを用いた球状トカマクの合体生成実験において、合体のX点近傍で

電子加熱が確認されたのは世界で初めてである。イオン加熱がアウトフロー領域で加熱されるのと異なり、電子がリコネクション電場により電流シート内でジュール加熱されることは[Y. Ono *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 185001 (2011)]で報告されていたが、本実験結果はこの報告を裏付けるとともに、電子が電流シート内でもさらにX点近傍で局所的に加熱されるということを示した。

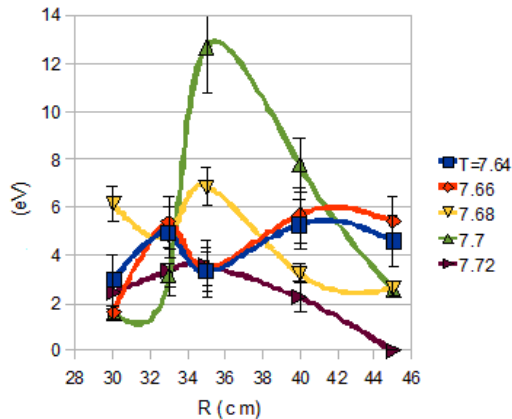


図4. UTST プラズマの合体時における電子温度の径方向分布の時間発展。複数の放電を用いた。 $R = 0.35$ m においてのみ、0.01 ms オーダーの速い加熱が観測された。

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. G. Watanabe, Y. Ono, T. Yamada, S. Kamio, Q. H. Cao, N. Suzuki, K. Ishiguchi and M. Inomoto, Magnetic Helicity Injection Mechanism for Double-Null Startup of the UTST Spherical Tokamak Plasmas, Plasma Fusion Res. **6**, 1202131 (2011), 査読有.
- ② S. Kamio, Q. H. Cao, K. Abe, M. Sakumura, N. Suzuki, T. G. Watanabe, K. Ishiguchi, R. Imazawa, T. Yamada, M. Inomoto, Y. Takase and Y. Ono, Multipoint Spectroscopy of Spherical Tokamak Heating by Magnetic Reconnection in UTST, Plasma Fusion Res. **6**, 2402033 (2011), 査読有.
- ③ 山田 琢磨, UTST における外部コイルを用いた球状トカマク合体実験, 日本物理学会第 66 回年次大会講演資料, 27pGY-4 (2011), 査読無.
- ④ M. Inomoto, K. Abe, T. Yamada, A. Kuwahata, S. Kamio, Q. H. Cao, M. Sakumura, N. Suzuki, T. Watanabe and Y.

Ono, Development of effective power supply using electric double layer capacitor for static magnetic field coils in fusion plasma experiments, Rev. Sci. Instrum. **82**, 033503 (2011), 査読有.

- ⑤ 阿部 圭太, 井 通暁, 山田 琢磨, 桑波田 晃弘, 神尾 修治, 作村 守央, 曹 慶紅, 今澤 良太, 小野 靖, 電気二重層キャパシタのパルスコイル電源への応用, 電学論 A **131**, 55-56 (2011), 査読有.
- ⑥ T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, N. Kasuya, K. Kamataki, H. Arakawa, T. Kobayashi, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh, Observation of Quasi-Two-Dimensional Nonlinear Interaction in a Drift-Wave Streamer, Phys. Rev. Lett. **105**, 225002 (2010), 査読有.
- ⑦ T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh, Study of Amplitude Correlation Technique in a Cylindrical Magnetized Plasma, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 085001 (2010), 査読有.
- ⑧ T. Yamada, R. Imazawa, S. Kamio, R. Hihara, K. Abe, M. Sakumura, Q. H. Cao, T. Oosako, H. Kobayashi, T. Wakatsuki, B. I. An, Y. Nagashima, H. Sakakita, H. Koguchi, S. Kiyama, Y. Hirano, M. Inomoto, A. Ejiri, Y. Takase and Y. Ono, Merging Startup Experiments on the UTST Spherical Tokamak, Plasma Fusion Res. **5**, S2100 (2010), 査読有.
- ⑨ T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, N. Kasuya, K. Terasaka, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh, Nonlinear Mode Couplings in a Cylindrical Magnetized Plasma, Plasma Fusion Res. **5**, S2016 (2010), 査読有.
- ⑩ T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, N. Kasuya, K. Terasaka, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh, Two-dimensional bispectral analysis of drift wave turbulence in a cylindrical plasma, Phys. Plasmas **17**, 052313 (2010), 査読有.

[学会発表] (計 11 件)

- ① T. Yamada, Merging startup experiments in UTST and MAST, Joint Meeting of the 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and the 16th International Workshop on Spherical Torus (29 Sep 2011) NIFS, Toki, Japan.

- ② T. Yamada, Experimental investigation of streamers (招待講演), Workshop on Electric Fields, Turbulence and Self-Organisation in Magnetized Plasmas 2011 (4 Jul 2011) Strasbourg, France.
- ③ T. Yamada, Observation of a streamer in drift wave turbulence (招待講演), 1st Asia Pacific Transport Working Group International Conference (14 Jun 2011) NIFS, Toki, Japan.
- ④ T. Yamada, Magnetic reconnections studies on MAST, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection 2010 (7 Dec 2010) Hotel Nikko Nara, Nara, Japan.
- ⑤ T. Yamada, Double null merging start-up experiments on UTST, 52nd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics (8 Nov 2010) Chicago, USA.
- ⑥ T. Yamada, Double Null Merging Start-up Experiments in the University of Tokyo Spherical Tokamak, 23rd IAEA Fusion Energy Conference (12 Oct 2010) Daejeon, Rep. of Korea.
- ⑦ T. Yamada, Merging Start-up and Sustainment Experiments on the UTST Spherical Tokamak, 19th International Toki Conference (9 Dec 2009) Ceratopia Toki, Toki, Japan.
- ⑧ T. Yamada, Nonlinear mode couplings in a cylindrical magnetized plasma, 19th International Toki Conference (8 Dec 2009) Ceratopia Toki, Toki, Japan.
- ⑨ 山田 琢磨, UTST 実験における球状トカマクの合体立ち上げと維持, プラズマ・核融合学会第 26 回年会 (4 Dec 2009) 京都市国際交流会館, 京都.
- ⑩ T. Yamada, Spherical tokamak start-up and sustainment experiments on UTST, 51st Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics (4 Nov 2009) Atlanta, USA.
- ⑪ T. Yamada, Merging Start-up and Sustainment Experiments on UTST, International Spherical Torus Workshop 2009 (22 Oct 2009) Madison, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 琢磨 (YAMADA TAKUMA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：90437773