

## 6.3 高瀬研究室

当研究室では、磁場により閉じ込められた高温プラズマの研究を行っている。この研究は未来のエネルギー源としての核融合の実現を目指したものであり、そのために不可欠な高温プラズマの物理的理解を目標としている。核融合研究は既にトカマク方式を用いて、「燃焼プラズマ」(核融合反応による自己加熱が支配的となるプラズマ)の実現を狙える段階にあるが、われわれの研究室ではトカマクの効率を改良した球状トカマク(ST)方式の研究を進めている。STでは、プラズマを閉じ込める磁場の圧力に対するプラズマの圧力(この比は $\beta$ とよばれ、プラズマ閉じ込めの効率を表す)が従来のトカマク方式の数倍大きくできると期待されている。

高温・高ベータプラズマは非線形複雑系の典型例であり、様々な興味深い現象が起こる。例えば、プラズマの圧力勾配により電場が生じ、強い流れが生じる。流れに強い勾配ができるとプラズマ中の乱流が抑制され輸送が軽減される。さらに、プラズマには輸送の大きい状態と輸送の小さい状態が存在し、これらの中で遷移を起こす。また、プラズマ中に自発的に電流が流れるようになり、プラズマを閉じ込めるのに必要な磁場をプラズマ自身が作り出すようになる。我々はこのような高温・高ベータのプラズマ実験を行うために、平成11年度にTST-2球状トカマク装置(大半径0.38m、小半径0.25m、トロイダル磁場0.3T、プラズマ電流0.2MA)を新設した。この装置は電子密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度200eV、 $\beta = 5\text{--}10\%$ のプラズマを生成できるよう設計されており、STプラズマで起きる電磁流体(MHD)不安定性、プラズマ乱流による輸送、波動を用いたプラズマ加熱等の研究を行っている。また、プラズマ加熱あるいはプラズマ計測の手法においてもSTでは従来のものが使用できない場合も多く、これらの開発も合わせて行っている。更に、開発した計測・加熱手法を用いて学外の研究所との共同研究も活用して幅広い研究を行っている。平成15年度には、TST-2を本郷より九州大学に移設し(図6.3 a)、8.2GHzの高周波を使ってプラズマ電流を駆動する実験を行う。年度末には柏新キャンパスの実験棟に再度移設し、本格的なST研究を展開する予定である。

### 6.3.1 TST-2 球状トカマク実験

#### 磁気リコネクション

内部磁気リコネクション(IRE)はSTに特有のMHD不安定性であり、プラズマ電流に正のスパイクが現れ、プラズマのエネルギー損失を引き起こす。この不安定性により、電流分布が変化することがわかっており、逆磁場ピンチ配位で見られる安定配位への緩和との類似性が指摘されている。TST-2でIREの特徴について調べたところ、IREの強さには様々なレベルがあり、プラズマのエネルギー・粒子損失等は、プラズマ電流の変化の大きさに比例することや、IRE発生時に不純物イオンの温度が上昇するこ



図 6.3 a: TST-2 spherical tokamak being transported out of the Hongo Campus.

とがわかった。明瞭なIREはプラズマ電流が最大100kA程度の放電の後半にしばしば観測され、IREに共通する特徴は下記のとおりである。(i) 磁気揺動振幅が増加し、プラズマ電流のスパイクのピークとほぼ同時に最大となる。(ii) 水素や低イオン化エネルギースペクトル線がIREからやや遅れて最大となる。(iii) 100keV程度の硬X線がIRE前から現れ始め、IREの直前に発生が止まる。(iv) このときに、電子密度・軟X線・高イオン化エネルギーのスペクトル線( $\text{C}^{4+}$ ,  $\text{O}^{4+}$ 等)強度の急激な減少が起きる。同時にこれらのスペクトル線で測定した不純物イオンの温度が上昇し、数百 $\mu\text{s}$ の時定数でもとのレベルに戻る。

図6.3 bは、IRE前後のイオン温度の変化、及びスペクトル線の強度変化を示したもので、プラズマ電流の変化の似ている4つの放電を用いた。これらの温度の波形と同様の波形が逆磁場ピンチプラズマでも観測されており、磁気リコネクションに起因する加熱が起きている可能性が示唆される。加熱エネルギーの源は、プラズマ中の磁気エネルギーと考えて矛盾しない。TST-2で観測されているのは、不純物イオンであることと、低エネルギー成分(熱速度成分)の加熱が見られたことから、遁走イオンとは異なる機構である可能性が高い。

静電プローブアレイを用いて周辺プラズマにおける分布の時間発展を計測し、IRE前後の周辺プラズマ構造の変化を調べた。IREの直後は密度や電子圧力の勾配が平坦化し、周辺部のパラメータが上昇する。これはIREによって熱や粒子が周辺部に吐き出された結果と思われる。同時にプラズマ電位と流れの分布を計測し、IRE直前には存在した電場のシア及び流れのシアが、直後には消滅しており、IREに伴い周辺部の流れ構造が大きく変化することが判明した。

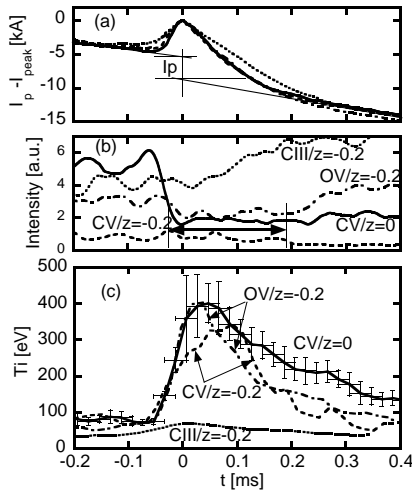


図 6.3 b: Changes at an IRE of (a) the plasma current, (b) intensities of various line spectra, and (c) ion temperatures derived from these line spectra.

### プラズマ波動実験

STの特徴の一つは、従来のトカマクに比べて小さい磁場で高い密度のプラズマを閉じ込められる点であるが、このような高 $\beta$ プラズマにおいて高次高調速波 (HHFW) は加熱・電流駆動の方法として期待されている。14年度に行った予備実験では、プラズマの有無によるアンテナ放射抵抗の変化に対応して整合をとることに成功した。最高 200 kW の電力をアンテナに供給したが、明確な加熱は観測されていない。加熱実験を評価するためには電子温度測定が不可欠なので、現在電子パーシュタイン波 (EBW)、軟 X 線、トムソン散乱による電子温度計測の開発を進めている。

コムラインアンテナを用いた HHFW 波動実験の際示唆された周波数スペクトルの拡がりを、数 ms という高時間分解能で詳しく計測した。トロイダル方向におよそ  $60^\circ$  離れたプローブで測定されたスペクトルでは、ピークから 10dB 下がった点でおよそ 30 kHz 程度の周波数拡がりが見られた。周波数拡散の原因としてはプラズマ周辺部での密度揺動による散乱が有力な候補として考えられる。実際、放電中にガスを注入して密度を上げると、スペクトルの変化が観測された。現在シミュレーション計算との比較を行っている。

### 測定器の開発

#### EBW を用いた電子温度計測と加熱の研究

ST では、電子のプラズマ周波数 ( $\omega_{pe}$ ) はサイクロトロン周波数 ( $\omega_{ce}$ ) より高いため、高い誘電率をもつ。このようなプラズマでは通常プラズマ計測や加熱に使われる電子サイクロトロン波 (ECW) は伝播

できないため、EBW を用いることが提案されている。ECW は電磁波 (横波) であり、プラズマ外の真空領域でも伝播できるが、EBW はプラズマ中でのみ存在できる。プラズマ中で黒体輻射によって生じる EBW をプラズマ外で検出するためには、ECW にモード変換する必要がある。モード変換効率は密度勾配に依存するので、密度分布も同時に測る必要がある。図 6.3 c に示すように、モード変換がおきる領域の密度勾配は高々数 cm である。測定された密度勾配を用いてモード変換効率を一次元全波コードで計算し、電子温度分布を求めた。電子温度はプラズマ中心部で約 300 eV であることがわかった。

この逆過程を用いると、プラズマ外部から強力な電磁波を入射し、EBW にモード変換させてプラズマに吸収させることで、プラズマの加熱や電流駆動ができる。プラズマ中で EBW が伝播する様子は光線追跡計算により求めることができる。1) 赤道面付近から入射した波動はプラズマ中で伝播方向が変化する、2) 赤道面よりわずかに離れたところから入射した波動は伝播方向が変化する前に吸収される、3) 赤道面より大きく外れたところから入射した EBW はプラズマ中心に到達する前に吸収される、ということがわかった。15年度には 200 kW 程度の高周波電力を用いて、100 kA 程度の電流を流す実験を九州大学と共同で行うことを計画している。

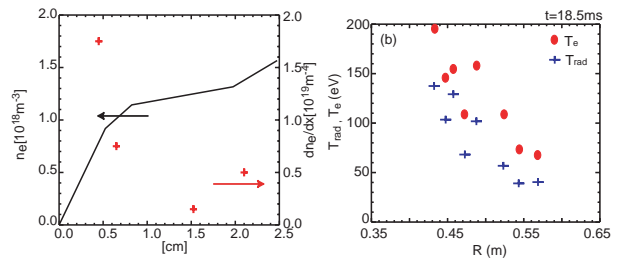


図 6.3 c: Density profile and density gradient (left). Measured radiation temperature and deduced electron temperature (right).

### トムソン散乱による電子温度計測

電子温度・電子密度を同時に測定できるトムソン散乱計測装置を開発している。電子温度は散乱されたレーザー光のドップラー拡がりから、電子密度は散乱光の光量から求まる。TST-2 では、YAG レーザの倍波 (波長 532 nm, 230 mJ/pulse, 10 Hz) を用いる。倍波での測定は基本波 (1064 nm) に比べて光子の数は約 1/4 になるが、安価で高検出効率の光検出器が使えるため、多チャンネル化に有利である。プラズマ中に入射したレーザーの散乱光は、球面ミラーを用いて光ファイバーに集光し、伝送された散乱光は検出器へ導かれる。分光器は、多段の干渉フィルターと APD (Avalanche Photo Diode) により構成されるポリクロメーターである。干渉フィルターを光軸に対して  $9^\circ$  傾けて使用するが、この際波長のシフトと約 11% の光量損失がある。

### 実効電荷数の測定

プラズマからの制動放射強度を測定することによって実効電荷数の計測を行った。実効電荷数は、プラズマ中の不純物量の目安を与える重要な指標である。制動放射強度測定に用いる  $525 \pm 2 \text{ nm}$  の波長領域には線スペクトルがないことを可視分光器を用いて確認し、この領域に透過域をもつ干渉フィルターと光電子増倍管検出器を用いた計測器を製作した。電子温度が十分高くプラズマ電流がピークに達した後の比較的定常的な時間帯では制動放射光計測が可能であるが、電子温度の低い、プラズマ電流の立上がり・立下り時や、IRE 直後には、制動放射光以外の放射を検出するため、実効電荷数測定が不可能となることがわかった。

測定された制動放射強度、線積分密度、電子温度、プラズマの最外殻磁気面位置を用いて TST-2 プラズマにおける実効電荷数を導出した。プラズマ電流が 100 kA 付近の電子温度を 300–400 eV として実効電荷数を求めると、1–3 の間で推移する事がわかった。電子温度の絶対値計測の精度が向上し、かつ電子温度分布、電子密度分布が決定されると実効電荷数計測の精度向上が可能となる。IRE 直後の計測不可能な時間帯を放射強度のスパイクの時間幅と仮定すると、それ以後の計測可能な時間帯で、電子温度一定と仮定した場合、実効電荷数は上昇していることがわかった。これは全放射強度の上昇と同期し、壁からの不純物の侵入の結果と考えられる。

### X 線波高分析

軟 X 線波高分析測定は、プラズマから放射される軟 X 線のエネルギースペクトルを測定し、電子温度や不純物量を求めるものである。検出器はシリコンにリチウムをドーパした Si(Li) 型検出器で、これに軟 X 線が入射するとそのエネルギーに比例した高さのパルスを発生する。このパルスの高さのヒストグラム（エネルギースペクトル）を作成し、その傾きから電子温度を求めることができる。較正は  $^{55}\text{Fe}$  の密封線源を用いて行った。50 MHz サンプリングの高速 ADC を用いたパルス波形の直接処理という手法を新たに導入し、1 ms という高時間分解能での解析を行った。

X 線スペクトル解析により求めた TST-2 プラズマの電子温度は、計数率が最も多く信頼度の高い時間で 340 eV の値を取る。この結果は EBW 計測によって求めた電子温度と一致している。絶対値の不確定要素があることから、スペクトルの形を優先してフィッティングさせた場合、電子温度は 470 eV の値をとる。従って TST-2 球状トカマクプラズマの電子温度はデータ解析の不確定性を考慮に入れて 300–500 eV の範囲である。放電後半では TST-2 プラズマの電子の速度分布は単純な Maxwell 分布をしておらず、高エネルギーの高速電子が存在することが示唆される。これはプラズマ中にかかっている誘導電場により加速され続ける逃走電子の生成によると考えられる。

### 6.3.2 トカマクプラズマ中の径電場構造における電極バイアスの効果

トカマクプラズマの閉じ込め改善において、径電場の急峻な構造形成が重要な役割を果たしている。トカマクにおいて、プラズマ中に挿入した電極を用いて電圧を印加する（電極バイアス）と、自発的 H モード遷移と同様に改善閉じ込め状態が得られる。このとき局所的にピークを持つ径電場構造の形成が観測されている。本理論研究は電極バイアスという外部駆動力が存在する場合の径電場構造形成機構の理解を目的とする。電場を決定するモデルは径方向電流（ここではシア粘性による電流、新古典輸送過程から生じる局所電流、リミターへの直接損失による軌道損失電流、電極電流を考慮）のつりあいが基本となる。それぞれの電流項の径電場に関する依存性が重要となる。本モデルは複数の駆動力項を含み、自発遷移と電極バイアス遷移両者を包括している。同一の境界条件から、空間的に一様な径電場分布とともに、局所的なピークを持つ孤立波解が複数個得られる。定常解には安定な領域と不安定な領域があり、その境界点が 1 つの状態から他の状態へ遷移する臨界点を与える。臨界点でのモードの安定性解析から、ピークを 1 つ有する構造への遷移が選択的に起こることがわかる。新古典輸送と軌道損失というふたつの機構の競合から、圧力勾配をパラメータとした自発遷移への電極バイアスの効果がわかる。正バイアス時には新古典輸送項がもたらす特徴が強く現れ、多くの孤立波解が存在し得るのに対して、負バイアス時には電場に関する径電流の複雑な非線形応答の影響が現れる。また、圧力勾配が大きくなると負バイアス時には遷移が起こらない。複数要素の競合からもたらされる複雑な非線形応答は、さらに多くの解への分岐をもたらす。径電場構造は対称性を破る要素に敏感に反応し、プラズマパラメータの空間分布を考慮した場合、ピーク位置は正（負）バイアス時では勾配の強い（弱い）領域に引き寄せられる（Fig. 6.3 d）。 $X$  および  $x$  は、規格化した径電場および位置である（電極とリミターの位置はそれぞれ  $x = -20$  および  $x = 20$ ）。ピークの移動量はパラメータの曲率に対数的な依存性を示す。そして、ひとつ山構造のピーク位置が、空間非対称項により多数山構造の一番外側のピーク位置に現れるので、径電場空間構造の測定からシア粘性係数を推定することができる。

### 6.3.3 学外機関との共同研究

#### JT-60U および JFT-2M トカマクにおける共同研究

トカマク型核融合炉においては、通常トラス中心部に設置されるトロイダル電場誘起用のセンターソレノイド（CS）を用いてプラズマを生成し、プラズマ閉じ込めに必要なプラズマ電流を立ち上げるが、CS を使わずにプラズマ電流を立ち上げることができれば核融合炉の設計は飛躍的に改善される。これは、当研究室で研究している ST 核融合炉では特に

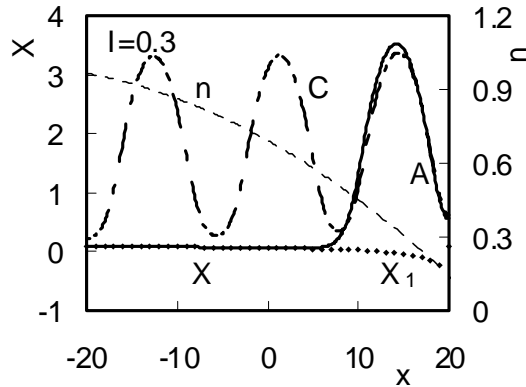


図 6.3 d: Effect of a non-uniform background density profile  $n$  (dashed line). Radial electric field structures with single (A) and triple peaks (C) are shown.

深刻な課題である。そこで、CSを使わないプラズマ電流立ち上げ法を開発するため、電流駆動・加熱設備の整っている日本原子力研究所の JT-60U トカマクで共同実験を行っている。平成 14 年度には、図 6.3 e に示すように高周波 (ECW および LHW)、中性粒子ビーム入射 (NBI) ならびに垂直磁場コイルと形状制御コイルのみを使った、CS なしプラズマ立ち上げの実証に成功した。生成されたプラズマはプラズマ境界部および内部に輸送障壁をもつため閉じ込め性能が優れており、かつ自発電流が 90% 以上という核融合炉実現のために有利な条件を満たしていた。これは画期的な成果であり、多くの新聞に報道されたほか、IAEA 主催の国際会議でもポストデッドラインの口頭発表 (世界中で 3 件のみ) に選ばれるなど、世界的に高い評価を得ている。

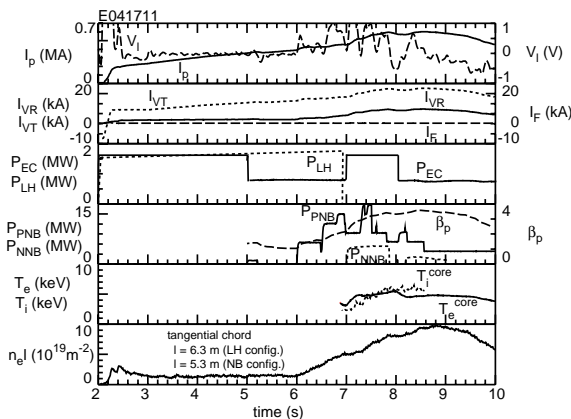


図 6.3 e: Plasma current rampup by RF and NB heating and current drive, combined with induction by vertical field and shaping coils, in JT-60U.

JFT-2M において、高閉じ込めモード時のプラズマ周辺部領域で MHD 揺動が観測されている。高速駆動プローブを用いて磁気揺動に同期する浮遊電位揺動を計測した結果、高閉じ込めモード時特有の磁気揺動と極めて相関が強い浮遊電位揺動 (約 290 kHz) が検出され、セパトリックスから遠ざかるにつれて浮遊電位揺動の振幅が指数関数的に減少する様子が観測された。また、周波数が異なる (約 80 kHz) が磁気揺動と発生タイミングに近い揺動が反射計にも検出された。

#### LHD ヘリカル装置における共同研究

LHD ヘリカル装置において、プラズマの安定性や閉じ込め性能を改善するため、磁力線のピッチ角を表す回転変換の制御が重要であると理論的に予測される。これを達成する一つの方法として、プラズマ中に電流を流すことが考えられる。このためには、プラズマ中に一方向に伝播する波を励起する必要がある。このような実験を可能にするため、新型の進行波励起アンテナの開発を行っており、14 年度にはその製作を完了させた。今後これを LHD に設置し、東大主導の実験を行っていく予定である。

プラズマを効率良く閉じ込めて核融合反応を達成するために、プラズマ中の不純物粒子輸送やプラズマ中心への粒子供給は重要である。これらを調べるために、LHD プラズマに様々な不純物 (C, Al, Ti, Mo, etc.) ペレットを入射した。粒子の振る舞いを調べるために干渉フィルター (中心波長 536 nm、半値幅 6.2 nm、透過率 66%) と光電子増倍管を用いて、0.1 ms の時間サンプリングで可視域制動放射計測を行った。その波長付近は強い不純物ラインがない領域として知られている。プラズマから放射される制動放射強度を測定することでプラズマの平均イオン価数である実効電荷数 ( $Z_{\text{eff}}$ ) を求めることができる。炭素ペレットの場合は速い時間変化で  $Z_{\text{eff}}$  分布は平坦になり、電子密度は中心の密度が上昇して周辺が減少することから粒子拡散が起きていることがわかる。チタンペレットの場合は  $Z_{\text{eff}}$  分布からプラズマの外側で溶融して、ある価数まで達した後、徐々にプラズマ内部への輸送・イオン化が進んでいることを示唆する結果を得た。電子密度分布は周辺の密度が減少せずに、中心での密度が徐々に増加している。

#### NSTX 球状トカマクにおける共同研究

日本国内では TST-2 は最大規模の ST 装置であるが、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所の NSTX ならびに英国 UKAEA Fusion の MAST は TST-2 より一回り規模の大きな ST 装置である。当研究室はこれらの研究グループと緊密な協力関係をもっており、特に NSTX の実験には直接参加している。14 年度にはプラズマ電流立ち上げシナリオの開発および EBW の輻射を利用した新電子温度計測法の開発で共同研究を行った。15 年度には東大主導のプラズマ電流立ち上げ実験を行う予定である。

## &lt; 報文 &gt;

## (原著論文)

- [1] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Multiple Bifurcation of the Radial Electric Field Structure Induced by Electrodes in Tokamaks, *Plasma Phys. Control. Fusion* **44**, A287–A292 (2002).
- [2] Y. Takase, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, S. Ide, S. Itoh, Y. Kamada, T. Maekawa, O. Mitarai, Y. Miura, Y. Sakamoto, S. Shiraiwa, T. Suzuki, S. Tanaka, T. Taniguchi, K. Ushigusa, JT-60 Team: Plasma Current Start-up, Ramp-up, and Achievement of Advanced Tokamak Plasmas without the Use of Ohmic Heating Solenoid in JT-60U, *J. Plasma Fusion Res.* **78**, 719–721 (2002).
- [3] N. Takeuchi, R. Kumazawa, K. Saito, T. Watari, T. Seki, Y. Torii, T. Mutoh, Y. Takase, T. Yamamoto: The Radio Frequency Characteristics of the Compline Antenna, *J. Plasma Fusion Res. SERIES* **5**, 314–317 (2002).
- [4] H. Nozato, S. Morita, M. Goto, A. Ejiri, Y. Takase: Measurement of bremsstrahlung profile with a high-spatial resolution on LHD, *J. Plasma Fusion Res. SERIES* **5**, 442–445 (2002).
- [5] O. Mitarai, Y. Takase: Plasma Current Rampup by the Outer Vertical Field Coils in a Spherical Tokamak Reactor, *Fusion Sci. Technol.* **43**, 67–90 (2003).
- [6] B. Jones, P.C. Efthimion, G. Taylor, T. Munsat, J. R. Wilson, J.C. Hosea, R. Kaita, R. Majeski, R. Maingi, S. Shiraiwa, J. Spaleta, and A. K. Ram: Controlled Optimization of Mode Conversion from Electron Bernstein Waves to Extra-ordinary Mode in Magnetized Plasma, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 165001 (2003).
- [7] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Analysis of the Radial Electric Field Structure Bifurcation Induced by Electrodes in Tokamaks, in “Bifurcation Phenomena in Plasma” (ed. S.-I. Itoh and Y. Kawai, Kyushu Univ. Press, Fukuoka, 2002) pp. 341–354.
- [8] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Asymmetrical Bifurcation of the Radial Electric Field Structure Induced by Electrode Biasing in Tokamaks, *Plasma Phys. Control. Fusion* **45**, 183–198 (2003).
- [9] H. Nozato, S. Morita, M. Goto, A. Ejiri, Y. Takase: Acceleration characteristics of spherical and non-spherical pellets by the LHD impurity pellet injector, *Rev. Sci. Instr.* **74**, 2032–2035 (2003).
- [10] T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Nagayama, T. Kaneba, A. Ejiri: X-mode pulsed radar reflectometer for density fluctuation measurements on LHD, *Rev. Sci. Instr.* **74**, 1506–1509 (2003).
- [11] M. Gilmore, W.A. Peebles, S. Kubota, X.V. Nguyen, and A. Ejiri: Progress toward a practical magnetic field diagnostic for low-field fusion plasmas based on dual mode correlation reflectometry, *Rev. Sci. Instr.* **74**, 1469–1472 (2003).

- [12] S. Shiraiwa, Y. Nagashima, M. Ushigome, T. Yamada, T. Taniguchi, S. Ohara, K. Yamagishi, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, M. Aramasu, A. Ejiri, and Y. Takase: Electron Bernstein wave emission diagnostic assisted by reflectometry on TST-2 spherical tokamak, *Rev. Sci. Instr.* **74**, 1453–1456 (2003).

## (会議抄録)

- [13] A. Ejiri, S. Shiraiwa, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi and Y. Takase: Visible Fluctuation Measurements on the TST-2 Spherical Tokamak, in *High Temperature Plasma Diagnostics (Proc. 14th Top. Conf., Madison, WI, USA, 2002)*.
- [14] Y. Takase, C.P. Moeller, T. Seki, N. Takeuchi, T. Watari, R. Callis, A. Ejiri, H. Ikezi, H. Kasahara, N. Kasuya, R. Kumazawa, T. Mutoh, K. Ohkubo, R.A. Olstad, M. Saigusa, K. Saito, S. Shiraiwa, T. Taniguchi, H. Torii, H. Wada, K. Yamagishi and T. Yamamoto: Development of a Fishbone Travelling Wave Antenna for LHD, in *Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002)* paper IAEA-CN-94/FT/P2-05.
- [15] Y. Takase, S. Ide, S. Itoh, O. Mitarai, O. Naito, T. Ozeki, Y. Sakamoto, S. Shiraiwa, T. Suzuki, S. Tanaka, T. Taniguchi, M. Aramasu, T. Fujita, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, K. Hanada, E. Jotaki, Y. Kamada, T. Maekawa, Y. Miura, K. Nakamura, T. Nishi, H. Tanaka, K. Ushigusa, and the JT-60 Team: Formation of an Advanced Tokamak Plasma without the Use of Ohmic Heating Solenoid in JT-60U, in *Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002)* paper IAEA-CN-94/PD/T-2.
- [16] A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Takase, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, T. Yamada, M. Ushigome, Y. Nagashima, T. Taniguchi, K. Yamagishi: Ion Temperature Increase During MHD Events on the TST-2 Spherical Tokamak, in *Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002)* paper IAEA-CN-94/EX/P4-10.
- [17] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Effect of Electrode Biasing on the Radial Electric Field Structure Bifurcation in Tokamak Plasmas, in *Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002)* paper IAEA-CN-94/TH/P3-05.

## (国内雑誌)

- [18] 高瀬雄一: 「急速に進展する球状トカマク炉の研究」 文部科学時報 平成 15 年 2 月 特集 核融合研究開発について(ぎょうせい 2003) pp. 38-39.
- [19] 江尻晶: 「ローマクラブとクレタ文明と核融合」 文部科学時報 平成 15 年 2 月 特集 核融合研究開発について(ぎょうせい 2003) pp. 24-25.
- [20] 高瀬雄一: 「ST 研究の最近の進展 -MAST と NSTX-」(解説) プラズマ・核融合学会誌 **79**, 336-344 (2003).

## 〈学位論文〉

- [21] 糟谷直宏: “Bifurcation of the Radial Electric Field Structure Induced by an Externally Imposed Potential in Tokamak Plasmas (トカマクプラズマにおける外部印加ポテンシャルによる径電場構造分岐)” (博士論文)
- [22] 谷口智利: “Frequency Broadening of the High Harmonic Fast Wave in Plasmas (プラズマ中における高次高調速波の周波数拡散)” (修士論文)
- [23] 飯島大介: 「TST-2 球状トカマクプラズマの軟 X 線スペクトル解析」(修士論文)
- [24] 小堀陽佑: 「TST-2 球状トカマクプラズマにおける実効電荷数測定に基づく不純物挙動の研究」(修士論文)
- [25] 西友一郎: 「トムソン散乱装置の製作とプラズマ測定」(修士論文)

## 〈著書〉

- [26] 『第三世代の大学 東京大学新領域創成の挑戦』似田貝香門編(東京大学出版会 2002) pp. 74-75.

## 〈学術講演〉

## (国際会議)

## 一般講演

- [27] Y. Takase: “Plasma Start-up and Current Ramp-up with Minimal Use of OH Solenoid Flux”, ITPA Topical Group Meeting on Steady State Operation and Energetic Particles, Cadarache, France, Oct. 21-23, 2002.
- [28] Y. Takase, S. Shiraiwa, T. Taniguchi, O. Mitarai, S. Ide, T. Fukuda, Y. Sakamoto, T. Suzuki, X. Gao, Y. Kamada, Y. Miura, K. Ushigusa, S. Itoh, S. Tanaka, T. Maekawa, M. Gryaznevich, JT-60 Team: “Formation of an advanced tokamak plasma without the use of OH solenoid in JT-60U”, 44th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Orlando, FL, USA, Nov. 11-15, 2002.
- [29] S. Shiraiwa, H. Kasahara, D. Iijima, T. Nishi, Y. Kobori, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Nagashima, T. Yamada, T. Taniguchi, K. Yamagishi: “Electron Bernstein wave diagnostic development on the TST-2 spherical tokamak”, 44th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Orlando, FL, USA, Nov. 11-15, 2002.
- [30] Y. Takase: “Plasma Current Startup without the Ohmic Solenoid in JT-60U and Implications for ST Reactors”, Joint Spherical Torus Workshop and US-Japan Exchange Meetings, Princeton, NJ, USA, Nov. 18-21, 2002.
- [31] S. Shiraiwa, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, M. Aramasu, A. Ejiri and Y. Takase, Y. Nagashima, M. Ushigome, T. Yamada, T. Taniguchi, S. Ohara and K. Yamagishi: “Electron Bernstein wave diagnostic development on TST-2 spherical tokamak”, Joint Spherical Torus Workshop and US-Japan Exchange Meetings, Princeton, NJ, USA, Nov. 18-21, 2002.

## 招待講演

- [32] Y. Takase: “Recent Progress on the TST-2 Spherical Tokamak”, IAEA Research Co-ordination Meeting on Comparison of Compact Toroid Configurations, Vienna, Oct. 28-Nov. 1, 2002.

## (国内会議)

## 一般講演

- [33] 高瀬雄一: 「核融合研究の新しいあり方検討小委員会活動状況報告」核融合ネットワーク委員会 核融合研 4/30/2002
- [34] 高瀬雄一: 「球状トカマク新規プロジェクト」第2回新規プロジェクト部会 文部科学省 5/31/2002
- [35] 高瀬雄一: 「球状トカマク新規プロジェクト」第3回新規プロジェクト部会 文部科学省 6/11/2002
- [36] 高瀬雄一: 「JT-60 改修計画における物理検討の概要」第4回核融合エネルギー連合講演会 阪大コンベンションセンター 6/13-14/2002
- [37] 糟谷直宏、伊藤公孝、高瀬雄一: 「トカマクプラズマ中の径電場構造における電極バイアスの効果」第4回核融合エネルギー連合講演会 阪大コンベンションセンター 6/13-14/2002
- [38] 谷口智利、高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、牛込雅裕、永島芳彦、笠原浩史寛史、山田琢磨、飯島大介、小堀陽佑、西友一郎、荒益将、大原伸也、山岸健一: 「球状トカマクにおける高次高調速波の周波数拡がり」第4回核融合エネルギー連合講演会 阪大コンベンションセンター 6/13-14/2002
- [39] 糟谷直宏、伊藤公孝、高瀬雄一: 「トカマクプラズマ中の径電場構造における電極バイアスの効果」理論共同研究研究会「プラズマ理論の諸問題と展開」核融合研 7/2002
- [40] 高瀬雄一: 「先進的 RF 手法及び合体を用いた超高ベータ球状トカマクの開発」特定領域「核融合燃焼科学の新展開」ヒアリング 核融合研 8/8/2002
- [41] 高瀬雄一: 「JT-60U における CS なし電流立ち上げ実験」第3回プラズマ・核融合学会「球状トラス」研究調査専門委員会 核融合研 8/22-23/2002
- [42] 白岩俊一、高瀬雄一: 「TST-2 における球状トカマク研究 -HHFW, EBW を用いた加熱と計測の最近の実験結果-」第3回プラズマ・核融合学会「球状トラス」研究調査専門委員会 核融合研 8/22-23/2002
- [43] 高瀬雄一: 「センターソレノイドコイルを用いないプラズマ立ち上げ(1)」第1回トラス実験専門部会 原研那珂研 8/27/2002
- [44] 高瀬雄一: 「ITER 政府間交渉報告」第1回 ITPA 物理クラスター会合 中部大学 9/7/2002
- [45] 高瀬雄一: 「Steady State Operation and Energetic Particles TG 報告」第1回 ITPA 物理クラスター会合 中部大学 9/7/2002
- [46] 高瀬雄一: 「JT-60U におけるセンターソレノイドを用いないプラズマ電流立ち上げ実験」日本物理学会 2002 年秋季大会 中部大学 9/6-9/2002

- [47] 糟谷直宏、伊藤公孝、高瀬雄一: 「トカマクプラズマ中の電極バイアス下で形成される径電場構造の空間非対称性についての考察」 日本物理学会 2002 年秋季大会 中部大学 9/6-9/2002
- [48] 山田琢磨、江尻晶、白岩俊一、牛込雅裕、糟谷直宏、永島芳彦、野里英明、笠原寛史、飯島大介、小堀陽佑、谷口智利、西友一朗、荒益将、大原伸也、山岸健一、高瀬雄一: 「TST-2 における AM 干渉計を利用した密度計測」 日本物理学会 2002 年秋季大会 中部大学 9/6-9/2002
- [49] 高瀬雄一: 「球状トカマク (ST) 研究の現状」 第 13 回核融合エネルギー - 総合システム研究専門委員会 日本教育会館 9/17/2002
- [50] 高瀬雄一: 「ITER での研究計画の進め方及び共同研究のあり方に関する作業会 (仮称) の提案」 ネットワーク全体会合 核融合研 9/25/2002
- [51] 高瀬雄一: 「代替案の提案」 第 1 回トカマク国内重点化装置検討会 航空会館 10/10/2002
- [52] 高瀬雄一: 「低アスペクト比案の利点」 第 3 回トカマク国内重点化装置検討会 虎の門パストラル 11/7/2002
- [53] 江尻晶、白岩俊一、永島芳彦、笠原寛史、山田琢磨、牛込雅裕、飯島大介、小堀陽佑、西友一朗、谷口智利、荒益将、大原伸也、山岸健一、高瀬雄一: 「TST-2 球状トカマクにおける MHD イベント」 プラズマ核融合学会第 19 回年会 犬山 11/26-29/2002
- [54] 白岩俊一、永島芳彦、牛込雅裕、笠原寛史、山田琢磨、飯島大介、小堀陽佑、谷口智利、西友一朗、荒益将、大原伸也、山岸健一、江尻晶、高瀬雄一: 「TST-2 球状トカマクにおける電子バーンシュタイン波を用いた電子温度計測」 プラズマ核融合学会第 19 回年会 犬山 11/26-29/2002
- [55] 永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、山岸健一、牛込雅裕、糟谷直宏、野里英明、笠原寛史、山田琢磨、飯島大介、小堀陽佑、谷口智利、西友一朗、荒益将、大原伸也: 「静電プローブを用いた TST-2 周辺プラズマの分布計測」 プラズマ核融合学会第 19 回年会 犬山 11/26-29/2002
- [56] 笠原寛史、高瀬雄一、白岩俊一、谷口智利、江尻晶、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直弘、野里英明、山田琢磨、飯島大輔、小堀陽佑、西友一朗、荒益将、大原伸也: 「球状トカマクにおける HHFW 加熱実験」 プラズマ核融合学会第 19 回年会 犬山 11/26-29/2002
- [57] 江尻晶: 「マイクロ波を用いたプラズマ診断」 電気学会「プラズマを知る・操る」技術調査専門委員会 東京九段 11/1/2002
- [58] 高瀬雄一: 「速波電流駆動アンテナの開発研究」 LHD 計画共同研究報告会 核融合研 12/19/2002
- [59] 高瀬雄一: 「ICRF 高次高調速波 (HHFW) を使った高ベータプラズマ生成法の開発」 LHD 計画共同研究報告会 核融合研 12/19/2002
- [60] 江尻晶: 「超短パルスマイクロ波によるプラズマ診断」 LHD 計画共同研究報告会 核融合研 12/19/2002
- [61] 高瀬雄一: 「ITER における研究者参加について」 ネットワーク全体会合 核融合研 1/23/2003
- [62] 江尻晶: 「マイクロ波技術の利用」 「超短パルスマイクロ波によるプラズマ診断」研究会核融合研 1/27/2003
- [63] 白岩俊一: 「球状トカマクの定常化方策 2: EBW (電子バーンシュタイン波)」 第 16 回トライアム研究会「定常プラズマ源とプラズマ・壁相互作用に関する研究会」 九大 3/3/2003
- [64] 高瀬雄一: 「球状トラスにおける安定性と閉じ込め」 日米科学技術協力事業核融合分野事業報告会 東京ガーデンパレス 3/6-7/2003
- [65] 江尻晶: 「マイクロ波計測における共同研究」 「JT-60 プラズマの定常化診断研究」研究会 原研那珂研 3/10-11/2003
- [66] 糟谷直宏、谷口智利、伊藤公孝、高瀬雄一: 「トカマクにおける電極バイアスによる径電場構造形成」 若手科学者によるプラズマ研究会 原研那珂研 3/2003
- [67] 江尻晶、白岩俊一、永島芳彦、笠原寛史、山田琢磨、牛込雅裕、飯島大介、小堀陽佑、西友一朗、谷口智利、荒益将、大原伸也、山岸健一、高瀬雄一: 「TST-2 球状トカマクにおける高速電子の振る舞い」 日本物理学会第 58 回年次大会 仙台 3/28-31/2003
- [68] 野里英明、森田繁、後藤基志、高瀬雄一、江尻晶: 「LHD プラズマにおける不純物ペレットを用いた粒子輸送に関する初期結果」 日本物理学会第 58 回年次大会 仙台 3/28-31/2003
- [69] 永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、山岸健一、笠原寛史、山田琢磨、牛込雅裕、飯島大介、小堀陽佑、西友一朗、谷口智利、荒益将、大原伸也: 「TST-2 球状トカマクにおける分布と揺動」 日本物理学会第 58 回年次大会 仙台 3/28-31/2003

## 招待講演

- [70] 高瀬雄一: 「中心ソレノイドコイルを用いないトカマク運転」 プラズマ核融合学会第 19 回年会 シンポジウム II: トロイダルシステムにおける電流駆動・電流分布制御の新展開 犬山 11/26-29/2002
- [71] 高瀬雄一: 「共同研究のあり方 (利用者の立場から)」 プラズマ核融合学会第 19 回年会 特別討論会 大学におけるプラズマ・核融合研究のあり方 犬山 11/26-29/2002
- [72] 高瀬雄一: 「東京大学における研究の現状 TST-2 球状トカマク」 第 16 回トライアム研究会「定常プラズマ源とプラズマ・壁相互作用に関する研究会」 九大 3/3/2003

## (セミナー)

- [73] "Solenoidless Start-up Scenarios for NSTX", NSTX Physics Meeting, Princeton Plasma Physics Laboratory, March 24, 2003.

## 新聞記事

- [74] 日本工業新聞 平成 14 年 7 月 22 日 朝刊 2 面 「原研が実証 中心ソレノイドコイル使わず 発生電流 70 万アンペアトカマク型核融合炉運転手法 臨界プラズマ装置で」

- 
- [75] 日刊工業新聞 平成 14 年 7 月 22 日 朝刊 7 面  
「JT-60 核融合プラズマ閉じ込め 中心ソレノイド  
コイル使わず 原研などが成功」
- [76] 原子力産業新聞 「高性能プラズマを発生 JT-60  
ソレノイドコイル使わずに コスト削減に見通し  
得る」
- [77] 新しいばらき新聞 平成 14 年 7 月 24 日 朝刊 「高  
性能先進プラズマで原研 JT60 炉心大型コイル用い  
ず達成 トカマク型核融合炉 大幅簡素化に道」
- [78] 日経産業新聞 平成 14 年 8 月 5 日 朝刊 11 面 「原  
研や東大 核融合炉建設費安く プラズマ発生コイ  
ル不要」
- [79] 化学工業日報 平成 14 年 8 月 9 日 朝刊 7 面 「大  
型コイル使わず高温プラズマ生成 原研、東大など  
核融合炉小型化に期待」