

第1章 和文報告

1.1 遠山・高瀬研究室

学内では、球状トカマクプラズマの研究を行っている。TST-M 球状トカマク装置では、プローブによる揺動の測定と輸送の評価に重点をおいて実験を行った。その一方で、プラズマの更なる高性能化を目指して、新装置 (TST-2) を設計、製作した。学外では核融合科学研究所、日本原子力研究所と共同研究を行っており、RF 加熱、各種電磁波、プローブを用いたプラズマ計測をテーマとしている。

1.1.1 TST-M における実験

序

球状トカマクは、従来のトカマク型プラズマ閉じ込め装置と比較して高い圧力のプラズマを低い磁場で閉じ込めることが出来るなどの利点が指摘されている。我々は、94年に球状トカマク装置 TST を建設し 95年6月より実験を開始した。TST 及び、コイル系を改造した TST-M 装置では、

球状トカマク配位の実現とその基本的な性質の解明に重点を置いて実験を行ってきた。装置建設当時は、球状トカマク装置は世界的に珍しく、装置設計や運転方法は試行錯誤の連続であった。また、そのような状況で行われた実験 (プローブを用いた輸送の測定、Helicity Injection による電流駆動など) は先駆的なもので、球状トカマク研究の知識と経験の蓄積に役立った。今日では、世界各地で球状トカマク装置が建設され、一種の流行になった感さえある。TST 装置はその先駆的な役割を十分果たしたと考えられ、98年度には、TST 装置における実験を終了し、新装置 (TST-2) を設計製作することとした。TST-2 では TST-M の約3倍のプラズマ電流 (200kA) を約5倍の時間 (50ms) 維持することを目標としている。運転開始は99年の夏を予定している。この装置ではこれまでの研究課題を引き継ぐと共に、プラズマ電流立ち上げの高効率化、高周波を使った加熱、波動物理の研究などを計画している。

プローブを用いた揺動測定

球状トカマクのプラズマ閉じ込め特性を評価するために、プローブを用いて TST-M プラズマ中の静電揺動、磁気揺動を測定し、揺動によって生じる輸

送を求め、閉じ込め特性を評価した。

静電揺動の測定はトリプルラングミュアプローブを用いて行なった。プローブヘッド部には、直径 $\phi 2$ mm、長さ 2 mm の円筒形のモリブデン製プローブピンが、トロイダル方向に4列、鉛直方向に2列、4 mm 間隔で配列してある。ダブルプローブに流れるイオン飽和電流とプローブ電位、および独立したシングルプローブの浮遊電位の測定値から電子温度 (T_e)、電子密度 (n_e)、空間電位 (ϕ_s) を、またそれぞれの値の平均値からの変位の二乗平均値を揺動 (\tilde{T}_e 、 \tilde{n}_e 、 $\tilde{\phi}_s$) として求める。静電揺動により生じる電場揺動は、2箇所空間電位の値から、 $\tilde{E} = -\nabla\phi_s = -ik\phi_s$ として求める。この電場揺動と磁場によって生じる $E \times B$ ドリフトの速度が、プラズマ中の粒子輸送、熱輸送を駆動する流速となる。径方向外側への輸送を考えた時、ドリフト速度は、 $v_r = (\mathbf{E} \times \mathbf{B})/B^2 \cong E_z/B_t$ で表すことができる。これを用いて静電揺動による径方向の熱輸送は、次のように表せる。

$$q_E = \frac{3}{2} \langle \tilde{p}_e \tilde{v}_r \rangle = \frac{3}{2B_t} \left(T_e \langle \tilde{n}_e \tilde{E}_z \rangle + n_e \langle \tilde{T}_e \tilde{E}_z \rangle \right). \quad (1.1.1)$$

(ここで、 $p_e = n_e T_e$ は電子圧力を示す。) 図 1.1.1 に $R = 0.5$ m [プラズマが最も広がった時 ($t = 0.3 \sim 0.4$ ms) の磁気軸の位置は $R_{axis} \sim 0.45$ m] における静電揺動による熱輸送の変化を示す。プラズマ電流がピークする時刻で、熱輸送は $q_E = 0.2 \sim 0.6$ kW/m² を示している。

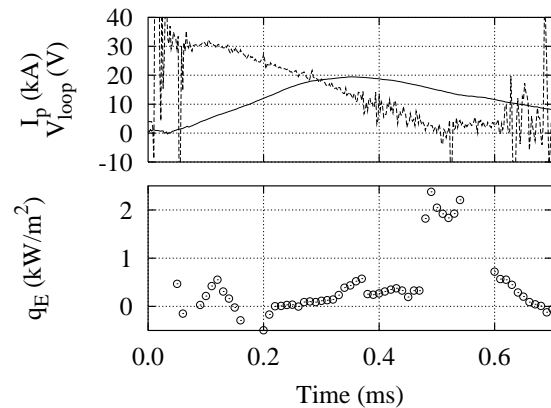


図 1.1.1: Time evolutions of the plasma current I_p , the loop voltage V_{loop} , and the heat flux due to electrostatic fluctuations q_E .

磁気揺動の測定は磁気プローブを用いて行った。プローブヘッド部は、径方向と鉛直方向を向いた2つのピックアップコイルが収められている。これを用いて、径方向の磁気揺動 (\tilde{B}_r) を測定した。磁気揺動による径方向の熱輸送は、Rechester - Rosenbluth

のモデルを用いて、次のように表せる。

$$q_B = \chi_B n_e \nabla T_e = v_{th}^e L_{||} \left(\frac{\tilde{B}_r}{B_0} \right)^2 n_e \nabla T_e. \quad (1.1.2)$$

(v_{th}^e は電子の熱速度、 $L_{||}$ は径方向磁気揺動の磁力線に沿った相関長) この結果、磁気揺動は静電揺動に比べ2桁以上小さく、磁気揺動による輸送は、TST-Mにおける熱輸送の主たる要素ではないことがわかった。

またTST-Mでは、オペレーション(各コイルの通電パターン)を変えることで生成するプラズマのアスペクト比を制御することができる。低アスペクト比プラズマ($A=1.4$)と高アスペクト比プラズマ($A=2.5$)で、静電揺動、磁気揺動のレベルの比較を行なった。図1.1.2にそれぞれのプラズマにおけるイオン飽和電流揺動と磁気揺動の分布を示す。これより、静電揺動、磁気揺動ともに、低アスペクト比プラズマの方が低いレベルを示していることがわかる。

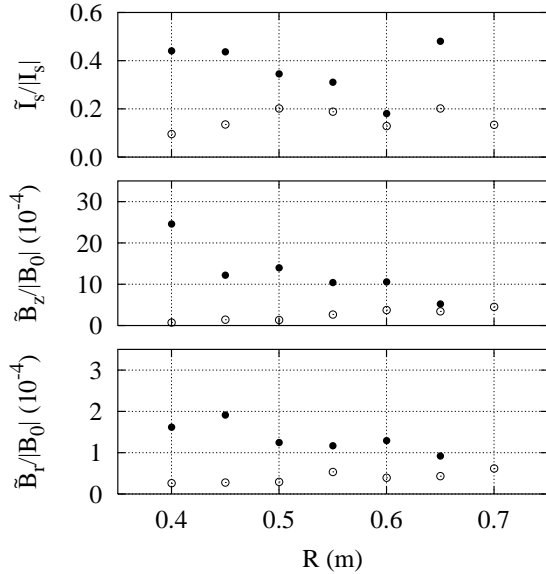


図 1.1.2: Comparison of fluctuations in a low aspect ratio plasma ($A=1.4$, open circles) and a high aspect ratio plasma ($A=2.5$, solid circles).

揺動の周波数解析と統計的性質

上述のトリプルプローブを用いて、電子温度、電子密度、空間電位を測定した。プラズマ電流 13kA、磁気軸の位置 $R=380\text{mm}$ のプラズマを測定、解析した。代表的な例として、 $R=400\text{mm}$ で測定した、電子密度、電子温度、空間電位から、それぞれの相関を求め、輸送を評価した結果を示す。粒子輸送への寄りを周波数ごとに表したトランスポートスペクトルの積分値から、全粒子 Flux は $\Gamma = 9.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$

であり、拡散係数は $D = 22 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 程度である。全エネルギー Flux は $Q = 210 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、熱拡散係数は $\chi = 140 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 程度であった。これは、前述のアンサンブル平均を用いた解析結果とほぼ一致する。

揺動の統計的性質を調べた。図1.1.3は、電子温度の確率分布を示したものであるが、実線のガウス分布からはずれており、左右非対称性が見られる。この分布は、べき型で表され、電子密度、電子温度、空間電位のべきの指数は、1.2 ~ 1.3 程度である。

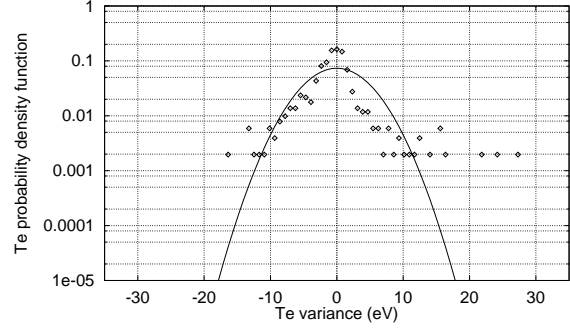


図 1.1.3: Probability distribution of the electron temperature (data points) compared with a Gaussian distribution (solid line).

可視光強度分布測定

プラズマより放射される可視光分布を測定し、水素イオンの粒子補給率(生成率)を求め、プラズマの粒子閉じこめ時間を評価することを目的として実験を行った。

16チャンネルのPIN Photo Diode Arrayを3セット、計48チャンネルを用いて可視光分布(波長400-1100nm)を測定し、得られたデータを計算機トモグラフィ(CT)の手法の1つである最大エントロピー法(MEM)によって可視光の2次元空間分布を求めた。MEMとは再構成領域を矩形画素で区切り、定常状態において最大のエントロピーをもつことを利用して再構成像を求める方法である。また、得られた可視光強度分布をもとにプラズマのグローバルな粒子閉じこめ時間 τ_p の評価を次式で行った。

$$\frac{dN_e}{dt} = -\frac{N_e}{\tau_p} + \int S(r) dV \quad (1.1.3)$$

ここで、 N_e は全電子数、 $S(r)$ は水素イオンの生成率の空間分布である。 $S(r)$ の評価は衝突放射モデルを適用し、プローブによる電子温度・電子密度の測定結果を用いることにより行った。

プラズマ電流 13kA の放電を測定した。水素イオンの生成率 $S(r)$ の評価をするには、水素スペクトルの Balmer α 線(波長 656.3nm)の発光強度が必要になる。本測定器は、波長 400-1100nm 間の放射光

を測定している為、光学フィルタ（中心波長 657nm、半値全幅 4.2nm）を用いて測定信号に対する H_{α} 線の寄与を求めた。その値は、およそ 80% であった。プラズマ電流がピークとなる時刻 $t = 0.4\text{ms}$ における H_{α} 発光強度分布を図 1.1.4 に示す。この結果及び、プローブから得られた電子温度・電子密度の測定結果から、この時刻で、プラズマの中心付近での電子密度は $3 \times 10^{17}\text{m}^{-3}$ 、電子温度は 6eV、水素イオンの生成率は $1 \times 10^{22}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ であることが分かった。また、求めたポロイダル断面での諸量の分布がトロイダル方向に対称に分布していると仮定して、グローバルな粒子閉じこめ時間の評価をすると $30\mu\text{s}$ 程度、エネルギー閉じこめ時間は $5\mu\text{s}$ となった。

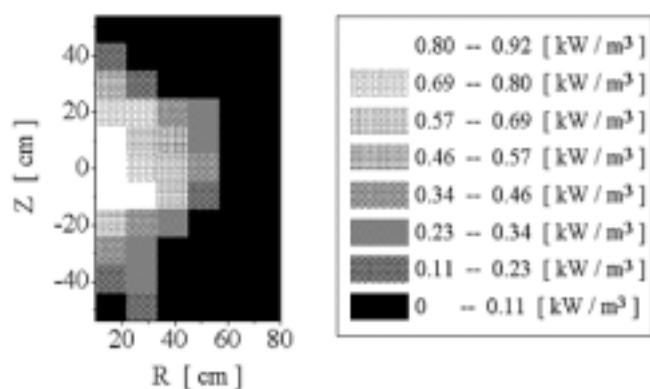


図 1.1.4: H_{α} emissivity profile ($t = 0.4\text{ms}$).

プラズマ最外郭磁気面の測定

TST-M では OH コイルの磁束を変化させることで生じる起電力を使ってプラズマを点火している (Inductive Startup)。この時、磁束を 1) 増やす場合と 2) 減らす場合の二通りが考えられる。両者では起電力の向きが逆になるため、逆向きのプラズマ電流が流れる。TST-M では OH コイルのもれ磁束があるため、2つの方法で生成されるプラズマの形状が異なると予測されていた。しかし、これまではプラズマ外形の測定は行われていなかった。今年度新たに増設した flux loop (22 本) と磁気コイルアレイ (23 個) を用いて磁気計測を行い、filamentary current model に基づいてプラズマ最外郭磁気面を求めた。図 1.1.5 は二つの運転方法で生成したプラズマの典型的な最外郭磁気面を示したものである。1) の方法ではプラズマがセンターポストから離れ、アスペクト比 2.5 の通常のトカマク配位になっている。他方 2) の場合にはアスペクト比は 1.4 となり、球状トカマク配位が出来ていることが判る。

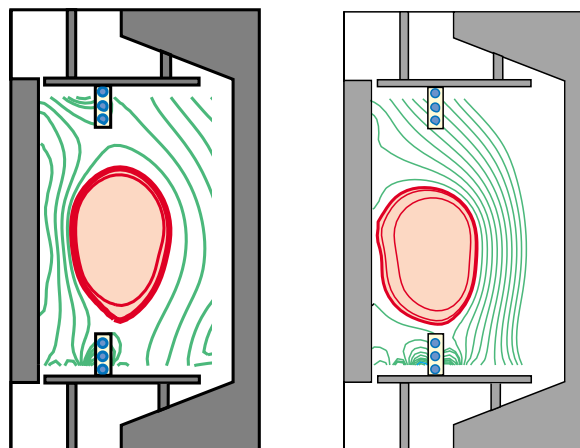


図 1.1.5: Last closed flux surfaces for ramp up (left) and ramp down (right) operations of the OH coil.

1.1.2 TST-2 装置の設計製作

序

TST 及び TST-M 装置では、低アスペクト比プラズマをトロイダルブレイクのある装置で実現するために真空容器内にトロイダルコイルとオーミックコイルを設置した。トロイダルブレイクを設けたことで大きな周回電圧をかけることが可能となり、早いブレイクダウン (0.02ms) と速いプラズマ電流の立ち上げ ($40\text{kA}/0.5\text{ms}$) が可能となった。また、アスペクト比 1.3 のプラズマを生成することに成功した。一方、上記主要コイルを真空容器内に設置するためにコイルとして Mineral Insulated (MI) ケーブルを用いた。その結果、上記主要コイルの電流容量、熱容量は比較的低いものになり、プラズマ電流や放電時間が犠牲になった。TST-2 装置では、主要コイルを大気側に置いて、これらの電流容量、熱容量を数倍にすることを設計目標とした。この条件と低アスペクト比を両立させるために、トロイダルブレイクのない真空容器を設計した。このため、真空容器に流れる渦電流を出来るだけ小さくするような真空容器と、低い周回電圧でブレイクダウンを実現ためのコイル配置を検討した。TST-2 装置は図 1.1.6 に示す構造をもつ。

TST-M 装置およびプラズマの実績パラメータと TST-2 の設計 (目標) パラメータを比較すると表 1.1.1 のようになる。

真空容器

真空容器の形状は内径 1400mm 長さ 800mm の円筒状の部分と上下の鏡板からなる (図 1.1.6 参照)。上側鏡板と円筒部はフランジで締結され、フランジが強め輪の役割をする。真空容器にはトロイダルコ

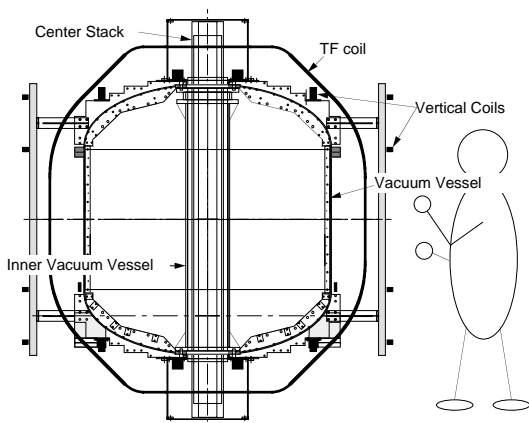


図 1.1.6: Cross sectional view of the TST-2 device.

レイクがない。そのため、プラズマ電流立ち上げのための周回電圧をかけたときにトロイダル方向に渦電流が誘起される。この渦電流は、プラズマの平衡を制御するのが難しくする。そこで、TST-2では、薄肉（厚さ6mm）の真空容器を設計した。JIS圧力容器規格による計算式を用いると、真空容器の許容外圧は約2.4気圧となる。この計算では、真空容器上のポートによる切り欠きを考慮していない。また、通電時に大きな電磁力が真空容器にかかる。そこで、真空容器を真空容器内外に取り付けたりブで補強している。これらのリブは各種機器（コイルや計測器）の取り付け座としても用いられる。渦電流が大きいと予想される内筒部は厚さ1.57mmのInconel625合金を用いる。この合金はステンレスよりも抵抗率が1.7倍大きく、強度は1.6倍強い。

コイル系と予想されるプラズマ

トロイダルコイル、オ-ミックコイルとも真空容器の外側に設置されている。センタ-スタックは2層（合計約240ターン）のオ-ミックコイルと24本のトロイダルコイルの中心部を備えている。オ-ミックコイルは最高0.13Vsec（ダブルスウィングで0.26Vsec）の磁束変化が可能で、最大プラズマ電流は200kA程度になると考えている。トロイダル磁場は最大0.4Tの運転が可能なよう設計されている。トロイダルコイルは4組上下対称な位置に置かれており、それぞれの用途はオ-ミック漏れ磁束補正に1組、垂直磁場生成に2組、渦電流補正に1組である。また、真空容器外周部のフランジの渦電流を補正するためにパッシブコンダクターを設置する。補正コイルとパッシブコンダクターで、放電開始時に真空容器中心の0.4m×0.4m程度の領域でトロイダル磁場成分が1gauss以下になるようにしている。

TST-2に生成されるプラズマは概略大半径 $R=0.37\text{m}$ 、小半径 $a=0.23\text{m}$ 、アスペクト比 $A=1.6$ を持つ（図1.1.7）。楕円度は外部磁場や内部インダクタンスに

装置 パラメーター	TST-M Achieved	TST-2 Target
真空容器構造	円筒型	二重円筒型
真空容器材料	SUS310S	SUS304, Inconel625LCF
真空容器内径	1800mm	1400mm
真空容器高さ	1600mm	1500mm
トロイダル磁場	<0.3T	<0.4T
OH ターン数	100Turns	238Turns
センター部外径	208mm	253mm
OH flux swing	0.025Vs	0.13Vs ×1 ~ 2
プラズマ電流	20 ~ 150kA	~ 200kA
放電時間	1 ~ 10ms	~ 50ms
主半径	0.23 ~ 0.43m	~ 0.37m
従半径	0.13 ~ 0.33m	~ 0.23
アスペクト比	1.3 ~ 2.5	~ 1.6
楕円度	0.8 ~ 1.5	1.1 ~ 1.8

表 1.1.1: Achieved parameters of TST-M and target parameters of TST-2.

よって変化する。平衡計算によると楕円度1.2~1.8程度のものが生成できる予測される（内部インダクタンス0.3~1.1の時）。

RF加熱のためのコムラインアンテナの製作

TST-2での実験主題の一つとしてICRF周波数帯での加熱実験がある。加熱のために用いるコムラインアンテナの設計、製作、最適化を行っている。コムラインアンテナとは、櫛のようにストラップを並べた形状からその名が付けられたもので、ループアンテナを構成する端の1つのストラップに対する電流導入と、隣接ストラップ間の誘導によって進行波を励起する。コムラインアンテナは複雑な整合器が少なく済み、プラズマの状態変化に対しても整合をとるのが容易であるという大きな利点を持っている。現在は真空外で、モックアップを製作し、ストラップの長さや本数、構成するキャパシタンス、インダクタンスの大きさなどのパラメータを変化させて、最適な条件を探っている。TST-2完成にあわせて加熱実験を始めるために、目下研究を続進中である。

球状トカマクにおけるHHFW加熱の検討

イオンサイクロトロン周波数帯の速波（High Harmonic Fast Wave, HHFW）は、誘電率の極めて高い、球状トカマクプラズマ中の伝搬・吸収特性に優れ

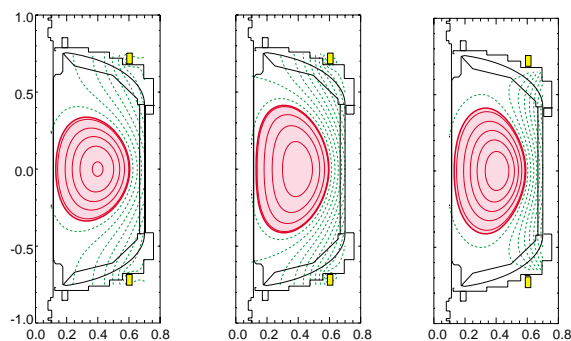


図 1.1.7: Equilibrium plasma shapes for low β (left and middle) and high β (right) cases; $I_p=200\text{kA}$, $B_t=0.2\text{T}$, $A=1.55$.



図 1.1.8: A photograph of the combline antenna mockup.

ており、球状トカマクプラズマの加熱・電流駆動に有用であることが理論的に予測されている。実験的には、プリンストンの CDX-U で 12 MHz, 100 kW の実験で電子加熱が観測されており、2 - 5 MHz, 400 kW の実験準備が進んでいる。また、ウィスコンシンの Pegasus では 7 - 19 MHz, 1.5 MW、プリンストンの NSTX では 30 MHz, 6 MW の実験が予定されている。

以下に CDX-U および TST-2 における FWEH (速波による電子加熱) の例を示す。図 1.1.9 に CDX-U の実験に対応する条件下、すなわち $f = 12\text{ MHz}$, $B = 0.1\text{ T}$, $T_{e0} = 0.1\text{ keV}$, $n_{e0} = 2 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$, $n_\phi = 8$ を用いて計算された、電場のプラズマ断面内での分布、および RF による電子加熱の分布が示してある。加熱分布はプラズマ中心に極めて極在している。これは波束追跡コードによる計算結果とよく合う。実際の実験結果より推測される加熱分布はこれよりいくぶん幅広い分布となっている。次に TST-2 装置で予測される条件下、すなわち $f = 30\text{ MHz}$, $B = 0.3$

T , $T_{e0} = 0.1\text{ keV}$, $n_{e0} = 2 \times 10^{19}$, $n_\phi = 10$ を用いた計算結果を図 1.1.10 に図示する。この場合でも、プラズマ中心部にピークを持った加熱分布が予測されるが、CDX-U の場合と比べるとかなり幅広い分布となっている。CDX-U や TST-2 では、電子温度が十分高くないため、電流駆動実験は困難であるが、プリンストンで稼動し始めた NSTX や、後述の JFT-2M、LHD では高い電子温度が得られるので、電流駆動効率も高く、電流駆動実験も可能であると考えられている。

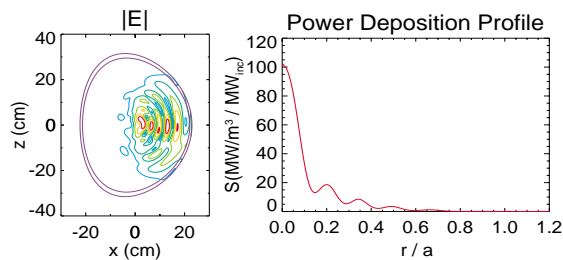


図 1.1.9: Simulation of electron heating by HHFW on CDX-U; $f=12\text{ MHz}$, $B=0.1\text{ T}$, $T_{e0} = 0.1\text{ keV}$, $n_{e0} = 2 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$, $n_\phi = 8$.

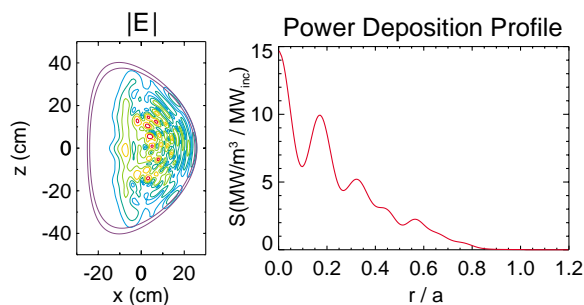


図 1.1.10: Simulation of electron heating by HHFW on TST-2; $f=30\text{ MHz}$, $B=0.1\text{ T}$, $T_{e0} = 0.1\text{ keV}$, $n_{e0} = 2 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$, $n_\phi = 10$.

通常型トカマクにおいては、速波による少数イオン加熱がよく用いられるが、この方法は球状トカマクでは適用が難しい。少数イオン加熱を行うには、周波数を少数イオンのサイクロトロン周波数に合わせなければならないが、球状トカマクでは磁場が小さいため周波数を低く選ばなければならない。速波が伝搬できる条件 ($\omega > k_{\parallel} v_A$) を満たすのが困難となる。TST-2 では、限られた条件下 (密度が高く、トロイダルモード数が小さい) でのみ、速波の伝搬条件を満たすことが可能となる。また、加速された水素イオンを閉じ込めるため、プラズマ電流は十分高くなければならない。TST-2 における FW による少数イオン加熱 (ヘリウムプラズマに少数の水素イオ

ンを混入した場合)の計算例 ($f = 4.5$ MHz, $P = 200$ kW, $B = 0.3$ T, $I = 200$ kA, $T_{e0} = 0.1$ keV, $n_{e0} = 2 \times 10^{19}$, $n_H/n_e = 0.1$, $n_\phi = 3$) を図 1.1.11 に示す。この場合、少数イオンによる吸収はプラズマ半径の内側半分程度に極在しており、衝突によって少数イオンのパワーの 50% は電子加熱に、33% はイオン加熱に使われると予測される。

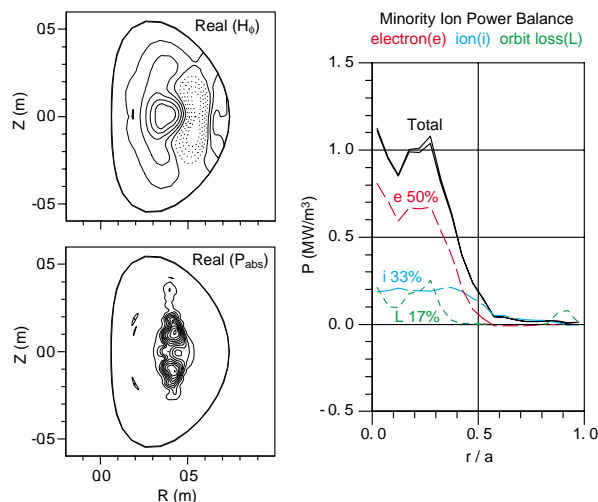


図 1.1.11: Simulation of minority ion heating by FW on TST-2; $f=4.5$ MHz, $P=200$ kW, $B=0.3$ T, $I=200$ kA, $T_{e0} = 0.1$ keV, $n_{e0} = 2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, $n_H/n_e = 0.1$, $n_\phi = 3$.

1.1.3 CHS における実験

多層膜反射鏡を用いた軟 X 線分光による電子温度測定

核融合科学研究所のヘリカル装置 CHS に多層膜反射鏡を用いた軟 X 線分光装置を設置し、電子温度の測定を行なっている。特に電子温度の速い変化(揺動)を測定し、他の計測による揺動と比較する事を目標とする。この軟 X 線分光装置は分光素子に多層膜 X 線反射鏡を用い、多層膜におけるブラッグ反射を利用して、プラズマからの放射のうち軟 X 線領域を分光する。

本年はアンブ等を改良し S/N 比を大幅に向上することが出来た。図 1.1.12 に本装置によって観測された軟 X 線信号の時間変化を示す。電子密度や放射損失パワーの上昇に伴い、信号強度が大きくなっているのが認められる。また 120ms 付近では $m = 2$ の連続的な磁場揺動が進展するのに伴い、信号強度が著しく低下しているのが観測された。電子温度及び密度には大きな変化がなく、不純物の挙動による実効電荷数の奇与が予測されるが、詳細については現在検討中である。

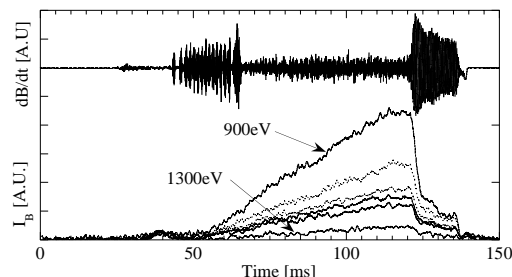


図 1.1.12: Time evolution of the soft X-ray emission at various energies. The magnetic fluctuation amplitude is also plotted.

1.1.4 LHD における実験

大型ヘリカル装置における干渉計を用いた密度計測

大型ヘリカル装置は核融合科学研究所に設置されたヘリカル型プラズマ実験装置であり、平成 9 年度末より稼働した。プラズマの密度を計測する手段として 1 チャンネルミリ波 (140, 285GHz) 干渉計及び、13 チャンネル遠赤外レーザー干渉計の開発研究を行ってきた結果、最初のプラズマではミリ波干渉計が稼働し始め、平成 10 年 9 月からは遠赤外レーザー干渉計が稼働した。遠赤外レーザー干渉計では光源として CO_2 レーザー励起の CH_3OH レーザー (出力は 150mW 以上) を用いた。ビート周波数 (1MHz) の安定度はフィードバック制御により $\pm 5\text{kHz}$ (10ms の時間分解能で測定) に抑えられている。干渉光学系は約 20m の高さの架台に据え付けられ、位相測定精度は 1/100 フリンジ (プラズマの線積分密度にして $2 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$) である。この精度は主として機械的振動が原因である。図 1.1.13 は線積分密度から再構成したプラズマの密度分布の時間変化を示したものである。

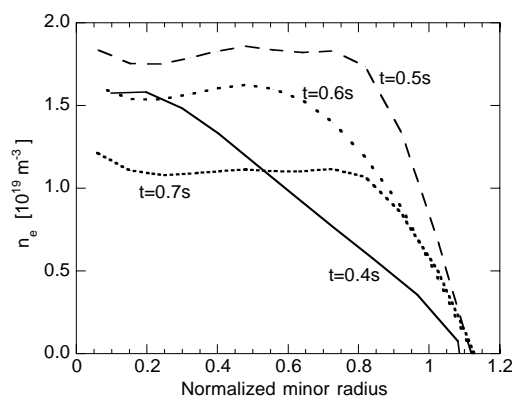


図 1.1.13: Time evolution of the density profile after NB injection.

LHD 用速波電流駆動アンテナの開発研究

コムラインアンテナのような進行波アンテナを LHD のようなヘリカル系の装置にも適用できるかどうかを検討中である。ヘリカル装置において、プラズマ性能が向上し、圧力が高くなるに従い、プラズマ自発電流（ブートストラップ電流と呼ばれる）が流れるようになる。このブートストラップ電流はプラズマの閉じ込め性能や安定性を劣化させることが理論的に知られている。ベータ値（プラズマ圧力の閉じ込め磁場に対する割合）の高い高性能プラズマを生成、維持するためにはこのブートストラップ電流を打ち消すことが必要だと考えられている。また最近、多数のトカマク型装置において電流分布を制御することによりプラズマの閉じ込め性能や安定性を飛躍的に向上できることが実験的に示されており、ヘリカル装置でも同様な効果が期待できる。

このためヘリカル装置に適用できる電流駆動、電流分布制御法として、ICRF 周波数帯の波動を考え、進行波を励起するのに適した進行波タイプのアンテナの候補としてコムラインアンテナを検討する。電流駆動に必要な波数スペクトルのシャープな進行波を励起するためにはなるべく磁場に沿った方向に長いアンテナが有利である。LHD ではアンテナの設置場所は弱磁場側又は強磁場側の二通りの可能性があるが、いずれにしてもアンテナはヘリカル型となる。ここでアンテナの総合的な性能を試験するためには、LHD の周辺プラズマを模擬したプラズマ負荷実験が不可欠である。球状トカマクでもアンテナを設置する弱磁場側では磁力線はかなりのピッチ角のヘリカル構造を持つため、ヘリカル型のアンテナのプラズマ負荷試験には特に適しており、TST-2 で LHD 用アンテナのプロトタイプの試験をすることができる。TST では低電力（1kW 以下程度）で実験を行うため、周波数を容易に変えることができるので、波の周波数とイオンサイクロトロン周波数の比、波の真空中での波長とアンテナの長さの比等をスキャンして最適条件を求めることができる。また外部回路（アンテナからプラズマ中に放射されず透過したパワーを再巡回させる方法等）の最適化も行うことが可能である。

1.1.5 JFT-2M における実験

高速ラングミュアプローブによる電場測定

1982 年にダイバーター配位プラズマへの中性粒子入射によって密度揺動が抑制され、閉じ込めが改善される H-mode が見い出され、その後の研究により半径方向の電場による剪断流が揺動抑制に重要な役割を果たしていることが明らかになってきている。現在原研の JFT-2M トカマク装置でも重イオンプローブ法などによって理論の検証が行われている。原研との共同研究において、半径方向の電場を測定するために、重イオンプローブ法よりも簡便で空間分解能の高い高速可動ラングミュアプローブの導入が予定されている。プローブ本体はアメリカ PMT 社の

Fast Probe である。このプローブは 300mm のストロークをおよそ 600ms で往復できるようになっている。直接プラズマに当たるチップの部分は現在はセラミックコーティングを施した直径 1mm 長さ 333mm のタングステンシャフトの先端 4mm である。このプローブ先端部を完全に作り直して一辺 4mm の正方形の 4 つの頂点に直径 1mm のモリブデンチップを配置できるように改造する。互いのチップを絶縁しまた電気信号経路をプラズマから守るため先端にはボロンナイトライドを、先端から真空と大気の接点までは SUS304 を用いる。改造したプローブは 1999 年 8 月に JFT-2M に取り付け、トリプルプローブとして使い、高い時間分解能でプラズマの密度、電子温度、空間電位を測定する予定である。

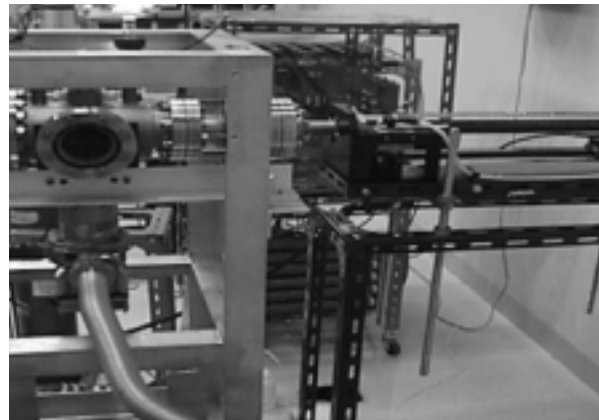


図 1.1.14: Plasma gun (left) and the fast probe (right).

速波電流駆動を用いたプラズマ高性能化の検討

JFT-2M には進行波を励起するためのコムラインアンテナが設置してあり、速波による電流駆動実験が予定されている。狙いとしては、今まで述べてきたように、負磁気シアと E×B 速度シアを活用して高性能化を目指す。プラズマ電流立ち上げを速く行うと、電流密度分布は周辺部にピークをもつ凹型分布をとり、負磁気シア分布となる。電流は磁気拡散の時間スケールで中心部にピークをもつ分布へと変化して負磁気シア分布は失われていくが、ECH、FW、又は ECH と FW の併用で中心部を加熱することにより、この時間スケールをのばすことができる。更に成功性が高いのは、DIII-D における実験にない、プラズマ電流立ち上げ時に counter FWCD を用いて負磁気シア分布を形成・保持する方法である。これに ECH や NBI による中心加熱を加え、高性能化を目指す。中心加熱は FWCD による電子加熱によって実現される可能性もあるが、さらに ECH を加えることにより一層電子温度が高く、圧力勾配の大きいプラズマができる。ECH の効用としてはさらに、高電子温度の標的プラズマを作ることにより、FWCD

に用いる速波の吸収を高めることも重要である。

上記の JFT-2M における速波電流駆動を用いたトカマクプラズマ高性能化実験の検討を、トロイダル対称性のあるトラス系の全波 (full-wave) コード、TORIC を用いておこなった。TORIC はイオンサイクロトロン周波数帯の有限ラーマー半径近似の波動方程式を解く。ここで注意を要するのは、高次の高調波領域におけるモード変換やイオンによる吸収が重要となる場合には正しい結果は得られないという制限である。これらの効果は、電子による吸収が支配的となるこの実験の場合には重要であるとは思われないが、NBI を加えた場合には電子による吸収から高速イオンによる吸収に移行する可能性があるので注意を要する。この場合、負磁気シア分布は磁気拡散時間スケールで失われていくことになる。

コムラインアンテナにより励起されるのは進行波であるので、電子は一方に加速され、電流が駆動される。TORIC により計算された吸収パワーを駆動電流に換算するために、Ehst-Karney によるパラメータフィットを用いる。これは数種のパラメータを用いた Fokker-Planck 方程式の解に対するフィットであり、従来の実験結果をよく再現している。

以下に JFT-2M における FWCD の例を示す。図 1.1.15 に電場のプラズマ断面内での分布、および RF により駆動された電流の分布が示してある。計算にはこの実験で予想される値、すなわち $f = 200$ MHz, $B = 1.2$ T, $T_{e0} = 2$ keV, $n_{e0} = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $Z_{\text{eff}} = 2.5$ を用いた。この場合、400 kW の RF パワーが 100% の方向性を持って 100% 吸収されたとすると、RF により駆動される全電流は約 60 kA である。実際には、RF 出力パワーの制限や、方向性・吸収の不完全さにより、実現される値はこれより幾分小さくなるのが予想される。

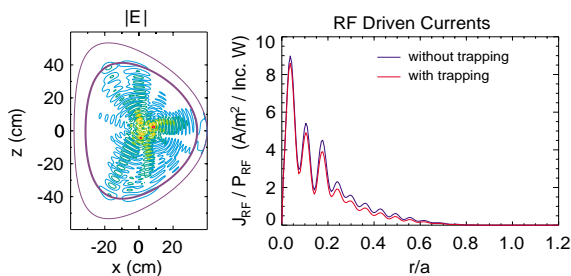


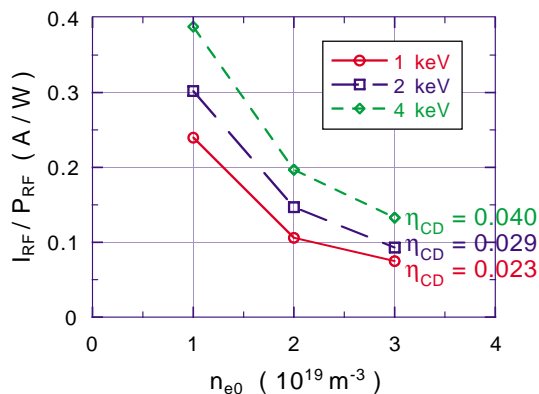
図 1.1.15: Simulation of FWCD on JFT-2M. Profiles of electric field amplitude and driven current density are shown for the following conditions; $f=200$ MHz, $B=1.2$ T, $T_{e0} = 2$ keV, $n_{e0} = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $Z_{\text{eff}} = 2.5$. In this case, about 60kA current is driven by 400kW of RF power.

次にプラズマの密度・電子温度を変化させた場合の結果を図 1.1.16 に図示する。ある電子温度に固定

して密度を変化させた場合、電流駆動効率

$$\eta_{CD} = \langle n_e \rangle R I_{RF} / P_{RF} \quad (1.5.4)$$

はほぼ一定の値を保つので、RF により駆動される電流は密度に反比例して変化する。また、電子温度を高くすれば η_{CD} が増大するので、電子温度が高く、密度が低い領域が電流駆動に適していることがわかる。このため、ECH による電子加熱が有効であると考えられる。予測される RF 駆動電流は、プラズマ中心部の電流密度と同程度の大きさなので、電流密度分布を制御するのに十分な値である。



current drive efficiency: $\eta_{CD} \equiv \langle n_e \rangle R I_{RF} / P_{RF}$

図 1.1.16: Dependence of the RF-driven current on plasma density and temperature. The current drive efficiency $\eta_{CD} = \langle n_e \rangle R I_{RF} / P_{RF}$ remains approximately constant as the density is varied, and increases as the temperature is raised.

1.1.6 その他

合成開口法を用いた反射計によるプラズマの揺動像の再構成

マイクロ波反射計はプラズマの密度揺動を測定できる手法であるが、反射面が滑らかな鏡面ではなく、揺動によってでこぼこしている場合には、反射波が互いに干渉し、測定信号は通常の解析が不可能になるほど複雑になる。合成開口法はこれを解決する手段である。この手法では、多数のアンテナで波を受信して、計算機などを用いてこれらの信号を合成する。ハードウェアとしてマルチアンテナによる測定が必要で、ソフトウェアとして測定信号から反射面の構造(揺動)を再構成するアルゴリズムが必要である。本年はマルチアンテナの基礎となる 1 入力 2 出力のピンスイッチのテストを行った。その結果、ON 出力

と OFF 出力のパワー比は 22dB であり、実用上十分なレベルであることがわかった。また、計算機を用いて反射波の干渉の効果を評価した。実際のプラズマの屈折率の空間的な変化を取り入れた計算は複雑なので、真空中での波の伝搬と波型の反射面を仮定して計算した。反射波の位相と反射面の構造の関係を反射面上の波型の波長 (λ_f) と振幅 (a) をパラメータとして求めた。その結果、線形な領域、符号の反転する領域、高調波構造を示す領域等があることがわかった。これらの性質は、簡単化したモデルで定性的に説明でき、そのうち、線形なパラメータ領域は条件 $2\pi x_c/\lambda_f < 1$ and $4\pi a/\lambda_0 \times 2\pi x_c/\lambda_f < 1$ で表される。ここで、 x_c は入射ビーム幅などで決まる反射面の実効的な観測領域のサイズを示し、 λ_0 は測定波長を示す。プラズマでは偏波方向によって屈折率が異なる。この効果を利用すれば、反射計による分布計測の新たな手法があり得ることがわかった。また、屈折率の偏波方向依存性を利用すると干涉計の自由度を増すことができ、実効的な 2 波長化が可能である。JIPP T II-U トカマクの反射計を利用してこの効果を示した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] J. E. Rice, M. Greenwald, I. H. Hutchinson, E. S. Marmor, Y. Takase, S. M. Wolfe, F. Bombarda, Observations of Central Toroidal Rotation in ICRF Heated Alcator C-Mod Plasmas, Nucl. Fusion 38, 75 (1998).
- [2] A. Ejiri, K. Kawahata, S. Okajima, Properties of extraordinary mode interferometry for plasma density measurements, Rev. Sci. Instrum. 69, 2349-2353 (1998).
- [3] A. E. Hubbard, R. L. Boivin, R. S. Granetz, M. Greenwald, I. H. Hutchinson, J. H. Irby, Y. In, J. Kesner, B. LaBombard, Y. Lin, J. E. Rice, T. S. Pedersen, J. A. Snipes, P. C. Stek, Y. Takase, S. M. Wolfe, S. Wukitch, Measurements of the high confinement mode pedestal region on Alcator C-Mod, Phys. Plasmas 5, 1744 (1998).
- [4] J. A. Snipes, R. S. Granetz, M. Greenwald, A. E. Hubbard, I. H. Hutchinson, J. Irby, J. Kesner, S. Migliuolo, T. S. Pedersen, J. Ramos, J. Rice, P. C. Stek, Y. Takase, S. M. Wolfe, ELMs and fast edge fluctuations in Alcator C-Mod, Plasma Phys. Control. Fusion 40, 765 (1998).
- [5] I. Ogawa, T. Idehara, A. Sakai, K. Yoshida, T. Tsuchida, K. Kawahata, A. Ejiri, H. Iguchi, K. Tanaka, K. Matsuoka, R. Akiyama, M. Osakabe, S. Okamura, T. Minami, C. Takahashi and W. Kasperek: Production of an intense, well collimated submillimeter wave beam and its application to plasma scattering measurements, Int. Journal Infrared Millimeter Waves, 19, 727-736 (1998).
- [6] F. Bombarda, P. T. Bonoli, B. Coppi, R. S. Granetz, A. Hubbard, J. H. Irby, S. Migliuolo, P. O'Shea, J. E. Rice, Y. Takase, S. M. Wolfe, G. T. A. Huysmans, W. Kerner, Analysis of saw-tooth phenomena in Alcator C-Mod plasmas, Nucl. Fusion 38, 1861 (1998).
- [7] K. Minami, A. Ejiri, K. Tanaka, T. Watanabe, Linear Mode Conversion between Ordinary and Extraordinary Waves in Plasma with Large Magnetic Shear, Jpn. J. Appl. Phys. 37, 6601-6608 (1998).
- [8] K. Nagasaki, A. Ejiri, T. Mizuuchi, T. Obiki, H. Okada, F. Sano, H. Zushi, S. Besshou, and K. Kondo, Effects of magnetic shear on electron cyclotron resonance heating in heliotron/torsatron configurations, Phys. Plasmas, 6, 556-564 (1999).
- [9] K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Ito, A. Ejiri, S. Okajima, Far infrared laser interferometer system on the Large Helical Device, Rev. Sci. Instrum., 70, 707-709 (1999).
- [10] K. Tanaka, K. Kawahata, A. Ejiri, CHS-group, J. Howard, S. Okajima, Faraday rotation measurements on compact helical system by using a phase sensitive heterodyne polarimeter, Rev. Sci. Instrum., 70, 730-733 (1999).

(会議抄録)

- [11] S. J. Wukitch, P. T. Bonoli, M. Porkolab, C. K. Phillips, G. Schilling, J. R. Wilson, Y. Takase, D(3He) heating in Alcator C-Mod, in Radio Frequency Heating and Current Drive of Fusion Devices (Proc. 2nd Europhysics Topical Conference, Brussels, Belgium, 1998) (Eur. Phys. Soc., Petit-Lancy, Switzerland, 1998) p. 5.
- [12] A. Ejiri, S. Shiraiwa, N. Kasuya, E. Ishiyama, S. Duorah, Y. Nagashima, N. Uetake, K. Tanji, K. Yamagishi, Y. Takase, H. Toyama: Operational modes of TST-M and plasma properties, (Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Spherical Tori, Tokyo, Japan, 1998)
- [13] S. Shiraiwa, A. Ejiri, N. Kasuya, Y. Nagashima, N. Uetake, K. Tanji, S. Duorah, E. Ishiyama, K. Yamagishi, Y. Takase, H. Toyama: Magnetic measurements and comparative studies of plasma performance under different operating conditions on TST-M, (Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Spherical Tori, Tokyo, Japan, 1998)
- [14] E. Ishiyama, K. Tanji, A. Ejiri, A. Shiraiwa, S. Duorah, N. Uetake, N. Kasuya, Y. Nagashima, K. Yamagishi, H. Toyama, Y. Takase: Turbulence Measurement using Electrostatic and Magnetic Probes in TST-M, (Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Spherical Tori, Tokyo, Japan, 1998)
- [15] Y. Takase, A. Ejiri, E. Ishiyama, S. Shiraiwa, S. Duorah, N. Uetake, K. Tanji, N. Kasuya, Y. Nagashima, K. Yamagishi, H. Toyama: Full-Wave ICRF/HHFW Heating and Current Drive Modeling in Spherical Tokamaks TST-M and CDX-U, (Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Spherical Tori, Tokyo, Japan, 1998)

- [16] H. Toyama, K. Hanada, K. Yamagishi, E. Ishiyama, S. Shiraiwa, S. Duorah, N. Uetake, K. Tanji, N. Kasuya, Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase: Turbulence-induced Transport in Spherical Tokamak TST-M, (Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Spherical Tori, Tokyo, Japan, 1998)
- [17] Y. Takase: Proposed US-Japan Joint Project on NSTX, (Proc. 1998 US-Japan Workshop on Spherical Tori, Toki, Japan, 1998).
- (国内雑誌)
- [18] 江尻晶、伊藤康彦: ミリ波干渉計の役割、プラズマ・核融合学会誌, 71 supplement, 180-182 (1998) (in Japanese).
- (学位論文)
- [19] 植竹望: TST-M における可視光分布測定 (修士論文).
- [20] 丹治晃一: TST-M におけるプローブによる揺動測定 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [21] H. Toyama, K. Hanada, K. Yamagishi, H. Totsumika, E. Ishiyama, S. Shiraiwa, S. Duorah, I. Nakajima, M. Ushigome, N. Uetake, K. Tanji, A. Ejiri, Y. Takase: Comparative Studies of Spherical Tokamak and Conventional Tokamak: Magnetic Turbulence-induced Transport, (Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan, 1998) IAEA-CN-69/EXP2/15.
- [22] R. Kaita, R. Majeski, J. Menard, T. Munsat, H. Kugel, P. Efthimion, M. Ono, D. Jens, B. Jones, D. Stutman, M. Finkenthal, T. Intrator, R. Fonck, W.-H. Choe, Y.-S. Hwang, V. Gusev, Y. Petrov, T. Seki, Y. Takase, High frequency fast wave results from the CDX-U spherical torus, in Fusion Energy 1998 (Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan, 1998) (IAEA, Vienna, 1999), IAEA-CN-69/CDP/12.
- [23] A. Fujisawa, H. Iguchi, S. Lee, K. Tanaka, T. Minami, Y. Yoshimura, M. Osakabe, K. Matsuoka, S. Okamura, H. Idei, S. Kubo, S. Ohdachi, S. Morita, R. Akiyama, K. Toi, H. Sanuki, K. Itoh, K. Ida, A. Shimizu, S. Takagi, C. Takahashi, M. Kojima, S. Hidekuma, S. Nishimura, M. Isobe, A. Ejiri, N. Inoue, R. Sakamoto, Y. Hamada, M. Fujiwara: Dynamic Behavior Associated with Electric Field Transitions in CHS Heliotron/Torsatron, (Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan, 1998) CN-69.
- [24] S. Okamura, K. Matsuoka, R. Akiyama, D. S. Darrow, A. Ejiri, A. Fujisawa, M. Fujiwara, M. Goto, K. Ida, H. Idei, H. Iguchi, M. Isobe, K. Itoh, S. Kado, K. Khlopenkov, T. Kondo, S. Kubo, S. Lee, G. Matsunaga, T. Minami, S. Morita, N. Nikai, S. Nishimura, I. Nomura, S. Ohdachi, K. Ohkuni, M. Osakabe, R. Pavlichenko, B. Peterson, H. Sanuki, M. Sasao, A. Shimizu, Y. Shirai, S. Sudo, S. Takagi, C. Takahashi, S. Takayama, M. Takechi, K. Tanaka, K. Toi, Y. Yoshimura, T. Watari: Confinement Physics Study in a Small Low-aspect-ratio Helical Device CHS, (Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan, 1998) OV4/5.
- [25] Y. Takase, A. Ejiri, E. Ishiyama, S. Shiraiwa, S. Duorah, K. Tanji, N. Uetake, N. Kasuya, Y. Nagashima: Research Program on the TST-M Tokamak, Bull. Am. Phys. Soc. 43, 1870 (1998), (Proc. APS 40th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, New Orleans, LA, Nov. 1998).
- [26] J. A. Snipes, A. Fasoli, R. Boivin, P. Bonoli, S. Migliuolo, M. Porkolab, J. E. Rice, S. M. Wolfe: Fast Particle Driven Modes during ICRF Heating in Alcator C-Mod, *ibid*, 1707.
- [27] P. T. Bonoli, M. Porkolab, J. J. Ramos, S. J. Wukitch, Y. Takase: Current Profile Control and Ideal MHD Stability of Advanced Tokamak Plasmas in Alcator C-Mod, *ibid*, 1707.
- [28] M. Porkolab, P. T. Bonoli, E. Marmor, J. Rice, S. J. Wukitch, R. L. Boivin, C. Fiore, M. Greenwald, A. Hubbard, I. H. Hutchinson, Y. In, J. Irby, J. J. Ramos, J. Snipes, S. M. Wolfe, G. Schilling, Y. Takase: Current Ramp-Up Experiments in Alcator C-Mod with Intense ICRH and Pellet Injection, *ibid*, 1820.
- [29] J. C. Rost, R. L. Boivin, M. Porkolab, J. Reardon, Y. Takase: Edge Ion Heating by Parametric Decay Instability during ICRH on Alcator C-Mod, *ibid*, 1820.
- [30] E. Nelson-Melby, P. T. Bonoli, A. Hubbard, M. Porkolab, S. J. Wukitch, Alcator C-Mod Group, G. Schilling, J. R. Wilson, Y. Takase: D(3He) Minority Heating and Mode Conversion, *ibid*, 1821.
- [31] G. Schilling, J. C. Hosea, C. K. Phillips, G. Taylor, J. R. Wilson, P. T. Bonoli, M. Porkolab, R. L. Boivin, C. Fiore, M. Greenwald, A. Hubbard, I. H. Hutchinson, E. S. Marmor, J. Rice, S. M. Wolfe, S. J. Wukitch, Y. Takase: ICRF Results and RF Upgrades for Alcator C-Mod, *ibid*, 1821.
- [32] R. Majeski, B. Jones, R. Kaita, J. Menard, T. Munsat, C. K. Phillips, J. R. Wilson, Y. Takase, V. V. Dyachenko, I. R. Jones, I. El-Fayoumi: Low Frequency RF Studies for NSTX and CDX-U, *ibid*, 1863.
- [33] B. Jones, R. Majeski, P. Efthimion, R. Kaita, J. Menard, T. Munsat, Y. Takase: Noninductive RF Startup in CDX-U, *ibid*, 1866.
- 招待講演

- [34] Y. Takase: Complex Phenomena in Fusion Plasmas, International Symposium on Complexity Science and Engineering, (Tokyo, February 1999).
- (国内会議)
- 一般講演
- [35] 遠山潤志:多層膜反射鏡によるプラズマ計測の開発、核融合研究所 LHD 計画共同研究成果報告会、1998年4月(土岐)
- [36] 遠山潤志:多層膜反射鏡によるトカマク TRIAM の計測、九州大学応用力学研究所共同研究成果報告会、1998年6月(福岡)
- [37] 江尻晶、白岩俊一、糟谷直宏、石山英二、Smita Duorah、永島芳彦、植竹望、丹治晃一、山岸健一、高瀬雄一、遠山潤志: TST-M 装置の運転モードとプラズマの特性、日本物理学会、1998年9月(沖縄)
- [38] 白岩俊一、江尻晶、糟谷直宏、永島芳彦、植竹望、丹治晃一、Smita Duorah、石山英二、山岸健一、高瀬雄一、遠山潤志: TST-M における異なる運転方式間でのプラズマの比較、日本物理学会、1998年9月(沖縄)
- [39] 石山英二、丹治晃一、江尻晶、白岩俊一、Smita Duorah、植竹望、糟谷直宏、永島芳彦、山岸健一、遠山潤志、高瀬雄一: TST-M におけるプローブを用いた揺動測定、日本物理学会、1998年9月(沖縄)
- [40] 遠山潤志、石山英二、白岩俊一、S Duorah、植竹望、丹治晃一、糟谷直宏、永島芳彦、山岸健一、江尻晶、高瀬雄一: トカマク、RFP における揺動による輸送、日本物理学会、1998年9月(沖縄)
- [41] 高瀬雄一、江尻晶、石山英二、白岩俊一、Smita Duorah、植竹望、丹治晃一、糟谷直宏、永島芳彦、山岸健一、遠山潤志、小川俊英、三浦幸俊、木村晴行、P.T.Bonoli、K.Takase: TST-M 及び JFT-2M における ICRF/HHF 周波数帯加熱・電流駆動の検討、日本物理学会、1998年9月(沖縄)
- [42] 遠山潤志:プラズマの加速、加熱と閉じ込め、仙台フォーラム、1998年12月(仙台)
- [43] 岡島茂樹、川端一男、江尻晶、田中謙治、伊藤康彦、徳沢季彦: 核融合科学研究所大型ヘリカル装置の干渉計用遠赤外レーザー、レーザー学会研究会、1999年1月(沖縄)
- [44] 李成珠、Smita Duorah、江尻晶、井口春和、藤澤彰英、石山英二、高瀬雄一、遠山潤志、小嶋護、岡村昇一、松岡啓介、トーラス実験グループ: CHS における多層膜反射鏡型×線分光法を用いた電子温度計測、日本物理学会、1999年3月(広島)
- [45] 石山英二、丹治晃一、江尻晶、白岩俊一、Smita Duorah、植竹望、糟谷直宏、永島芳彦、山岸健一、高瀬雄一、遠山潤志: TST-M における揺動による輸送、日本物理学会、1999年3月(広島)
- [46] 高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、糟谷直宏、永島芳彦、S. Duorah、石山英二、山岸健一、遠山潤志: TST-2 球状トカマク、日本物理学会、1999年3月(広島)
- [47] 白岩俊一、江尻晶、高瀬雄一、糟谷直宏、永島芳彦、S. Duorah、石山英二、山岸健一、遠山潤志: TST-2 球状トカマクの運転方式の検討、日本物理学会、1999年3月(広島)
- (セミナー)
- [48] 遠山潤志:核融合の物理、千葉大学セミナー、1998年7月(千葉)