

研究論文

JFT-2M におけるフェライト鋼装着によるリップル低減試験

川島 寿人, 佐藤 正泰, 都筑 和泰, 三浦 幸俊,
木村 晴行, 谷 孝志, 井戸 毅, 伊世井 宣明,
小川 俊英, 上原 和也, JFT-2M グループ
(日本原子力研究所)

Ripple Reduction Test by Ferritic Steel Board Insertion in the JFT-2M Tokamak

KAWASHIMA Hisato, SATO Masayasu, TSUZUKI Kazuhiro, MIURA Yukitoshi, KIMURA Haruyuki,
TANI Takashi, IDO Takeshi, ISEI Nobuaki, OGAWA Toshihide, UEHARA Kazuya and JFT-2M Group

Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 319-1195, Japan

(Received 25 November 1999 / Accepted 17 April 2000)

Abstract

Ripple reduction test by ferritic steel board (FB) insertion between toroidal field coils and vacuum vessel has been carried out in the JFT-2M tokamak. The magnetic analysis and probe measurement indicated that the ripple magnitude was reduced from 2.2% to 1.1% by the FB insertion. Increment of the first wall temperature caused by ripple trapped or banana drift fast ions was measured by the infrared TV camera during neutral beam injection. After the FB insertion, the maximum temperature increment was decreased from 75°C to 50°C in ripple trapped loss region and from 150°C to 100°C in banana drift loss region, respectively. The temperature decrement in ripple trapped loss region indicated that the heat load was reduced about half. It was confirmed that ripple trapped losses decreased with decrease of the safety factor or the ripple magnitude according to the ripple well parameter. In addition, FB insertion did not only give any adverse effect on the plasma discharge and confinement but also increased the edge toroidal rotation speed about twice faster than that before FB insertion during ELM free H-mode.

Keywords :

ripple reduction, ferritic steel board, ripple trapped loss, banana drift loss, magnetic measurement, infrared TV measurement, JFT-2M tokamak

1. はじめに

トカマクにおいては、有限個のトロイダルコイル (TFC) を等間隔に配置することによりトロイダル磁場を発生させることから、トーラスに沿った軸対称性が保たれず、数%程度のリップルを持ったトロイダル磁場となる。このトロイダル磁場リップルの影響により径方向へ拡散が大きくなり、高速アルファ粒子や中性粒子ビー

ム入射 (NBI) で生成される高エネルギー粒子の損失を生む [1-3]。ITER 定常運転シナリオである負磁気シア運転の計算では、リップルによる高速アルファ粒子の損失が 25% になることが予想される。その場合、熱流束は 4 MW/m² を超え、第一壁が深刻な損傷を受けることになり、リップル損失が問題とされている [4]。したがって、リップル損失を低減することが重要な課題である。

author's e-mail : kawasimh@fusion.naka.jaeri.go.jp

この論文は第16回年会(1999)で招待講演として発表された内容を論文化したものです。

リップル損失を低減する最も有効かつ経済的な手段として、強磁性体であるフェライト鋼を用いる方法が注目されている[5-8]. 適切な厚さと幅をもつフェライト鋼をTFC直下に装着すると、磁化したフェライト鋼から漏れ出た強い磁場によりTFC直下のプラズマ近傍のトロイダル磁場が弱まり、TFC間のトロイダル磁場が強まる。これにより、非軸対称リップル磁場成分を小さくすることが可能となる。ITERではフェライト鋼装着によるリップル低減化の設計検討が具体的に行われている。また、フェライト鋼には、F82H[9,10]のように低放射化、耐熱性を有したものが開発され、将来の炉構造材料として有望な候補にあげられている。しかし、強磁性体であるフェライト鋼は、その誤差磁場によるプラズマ制御、改善閉じ込めに対する影響が懸念され、最近までは核融合実験装置では使われてこなかった。フェライト鋼のプラズマへの影響については真空容器の内側にフェライト鋼を装着した小型トカマク装置HT-2で通常の放電が得られ、誤差磁場の影響は小さいことが示されているものの[11,12], 安定性や改善閉じ込めに対する影響はまだ解明されていない。

リップル低減化を実証するため、中型トカマク装置JFT-2M(主半径 $R_0=1.31$ m, 小半径 $a \times b=0.35$ m \times 0.53 m)にフェライト鋼板(FB)を装着した初めての実験を行った[13-15]. 今後、改善閉じ込めに対する影響や炉構造材としての強磁性体フェライト鋼使用の適合性を試験するための実験を予定している(先進材料プラズマ試験計画)[16-18]. 本稿では、FBを真空容器外側に配置することによって、予想したリップル低減効果を実験的に初めて実証したこと、現状のフェライト鋼がプラズマ閉じ込めに対し悪影響を与えないことなどを記述する。2, 3章でFBの設置および実験で用いた主な計測器について概説した後、4, 5章でFB装着前後の磁場構造の評価および第一壁温度上昇の測定により実験的に明らかにされたトロイダル磁場リップルとリップルによる捕捉損失およびバナナドリフト損失との関係について述べる。6章ではFB装着後のプラズマ制御、プラズマ閉じ込めへの影響について言及し、7章で結果をまとめる。

2. フェライト鋼装着の概要

リップル低減のためJFT-2Mに設置したFBの概要をFig.1に示す。FBは16ヶ所のTFCと真空容器(VV)の間に赤道面から上下肩部にかけて設置されている。各トロイダルセクションでリップルを下げるためのFBの厚み、形状、設置位置については、バナナドリフトイオン

の拡散係数[19]を小さくすることの重要性が指摘されていることから[17,18], 単に磁場の最大値と最小値から決まるリップル率を下げるのではなく、フーリエ展開されたリップル率、すなわち、基本16モードリップル率(δ_{16})および第二高調波32モードリップル率(δ_{32})を下げるよう設計した[13,20]. ただし、既存のコイル、加熱装置、計測装置等の存在という制約のもとにFB形状の最適化を行った。低衝突周波数領域でのリップルによるバナナドリフトイオン拡散係数の比例量 $\sum_{16,32} n^{2.25} \delta_n^{1.5}$ の δ_{16} , δ_{32} に対する等高線分布をFig.2に破線、細線、一点鎖線で示す。ここで $\delta_n \equiv (2 \cdot \sqrt{a_n^2 + b_n^2} / a_0) \times 100$ (a_n, b_n : フーリエ係数, n : トロイダルモード数)で定義される。FBを最適化した場合の δ_{16} および δ_{32} については、トーラス一周上の磁場強度分布を計算し、それをフーリエ展開して求めている[14,15]. Fig.2の●は、標準的なトロイダル磁場(B_t)である1.3 T用に最適化したFBを装着した場合における、 $R=1.6$ m, $Z=0.0$ mでのトロイダル磁場強度($B_t=1.3$ T, 1.6 T, 2.2 T)に対する δ_{16} および δ_{32} の関係を示す。FBの装着により、1.3 Tでの δ_{16} は2.2% (FB装着前)から0.75% (FB装着後)に低減される。1.3 T用FBを装着したままで磁場を $B_t=1.3$ Tより大きくすると、 δ_{32} は小さくなるものの、 δ_{16} が大きくなることから、 $\sum_{16,32} n^{2.25} \delta_n^{1.5}$ の値が大きくなり、バナナドリフトイオンの拡散の増大が予想される。フェライト鋼の厚みは、重ね合せた薄板(8.4 mm厚)の枚数を調整すること

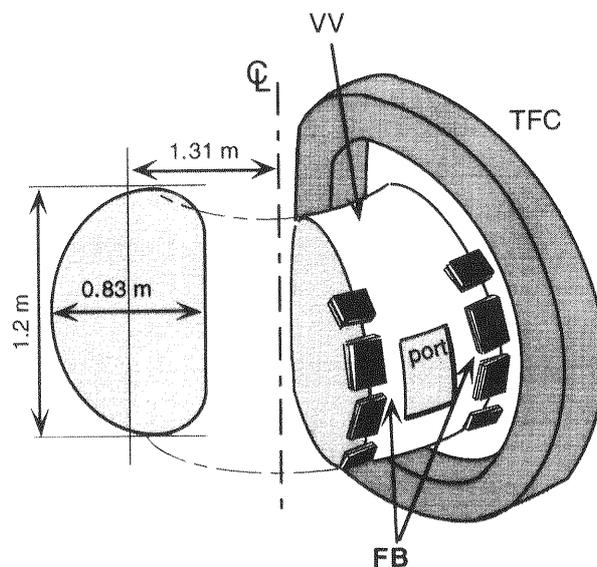


Fig. 1 Schematic view of Ferritic steel Board (FB) insertion on JFT-2M. FB is inserted between all the 16 Toroidal Field Coils (TFCs) and the Vacuum Vessel (VV). Thickness of FB can be adjusted for $B_t \leq 2.2$ T.

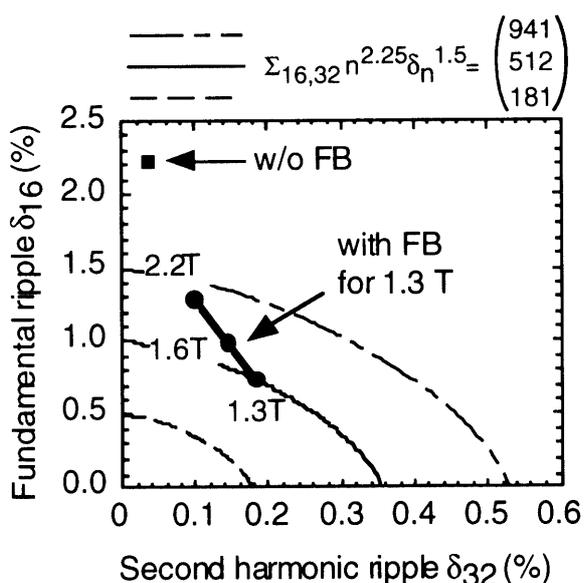


Fig. 2 Relation between fundamental mode (δ_{16}) and the second harmonic mode (δ_{32}) for the optimum FB thickness on $B_t = 1.3T$ (●) at the position of $R = 1.6\text{ m}$, $Z = 0.0\text{ m}$. $\Sigma_{16,32} n^{2.25} \delta_n^{1.5}$ is a value proportional to the ripple banana diffusion coefficient in a weak collisional regime. ■ shows the case without FB.

により、最大トロイダル磁場 2.2 T 以下の磁場に対して最適化できるようにしており、1.3 T 用では全厚が約 50 mm である。以下に示す実験結果は、1.3 T 用 FB を装着した場合である。

3. リップル低減実験にかかわる計測器

リップル率を磁場構造の変化から直接的に評価するた

め磁気プローブ列を製作し、真空容器の大気解放中に 4 番ポート (P4) から挿入して、トロイダル磁場コイルに通電して FB 装着前後の磁場変化を測定している。ここで、ポートの呼称は、真空排気系から右回りに P1 ~ P16 としている (Fig. 3 (a) 参照)。この磁気プローブ列は、3 方向 (径方向、トロイダル方向、垂直方向) 成分のピックアップコイルを組み込んだプローブを FRP 板 (長さが TFC 直下からポート中心間のトロイダル方向距離相当) の上に 6 個並べたものである。

高速イオンの供給源となる中性粒子 (軽水素ビーム) 入射装置 (NBI, PIB) および高速イオン損失にかかわる主な計測器 (赤外線カメラ, 損失イオンプローブ, イオン感度プローブ, ボロメータ列等) の配置を Fig. 3 (a) に示す。NBI は P11, P12 から接線方向 (磁気軸に対し 38°) に入射され、プラズマ電流 (I_p) に対して順方向 (Co) と逆方向 (Ctr) になる。また、PIB は P4 からほぼ垂直 (磁気軸に対し 80°) に入射される。

高速イオン損失量を評価するために、第一壁温度測定用の赤外線カメラ (IRTV) を P3, P4 内壁外側を見込むように設置した。この内壁外側には、反射を避けるための高純度カーボンのタイル (熱放射率がほぼ 1) を使用し、容器中心 ($R = 1.31\text{ m}$, $Z = 0.0\text{ m}$) からポロイダル角 $\pm 84^\circ$ の範囲で、ポート開口部を除く P3 の約半分から P4 全領域にのみ敷き詰めている。真空容器壁からタイル表面までの高さは、赤道面から下側で 10 cm, 上側で 7 cm になり、とくに、赤道面から下側のタイルは真空容器内構造物の内で最もプラズマ側に近く、弱磁場側最外殻磁気面はここで規定される。IRTV の視野角の制限か

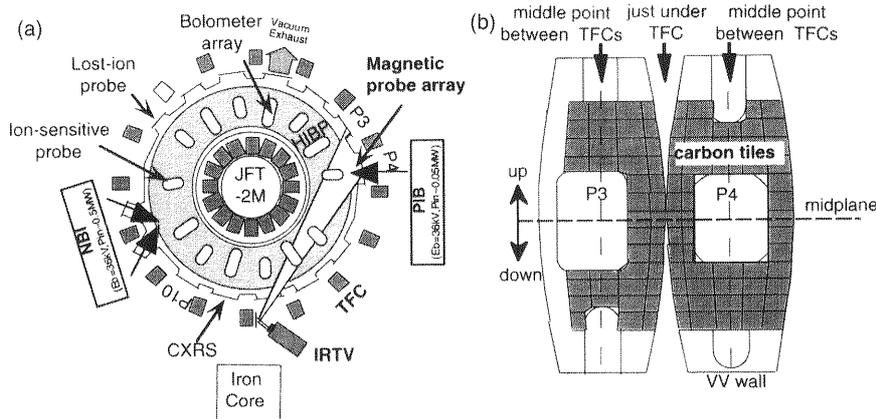


Fig. 3 (a) Arrangements of neutral beam injection systems and some diagnostic tools for the ripple reduction study on JFT-2M. (b) First wall from P3 to P4 which is covered with graphite tiles partially for IRTV measurement.

ら、視野は上側または下側半分になる。IRTV本体は、測定可能温度領域が0~500°C(4段フィルタ切り替え)、高速時間応答(1画像あたり最高1/60秒)、高分解能二次元画像(256×256メッシュ)のものを使用している。カメラ位置から対向壁までの距離は~3.5mであり、空間分解能は1メッシュあたり約3mmにできた。

4. 磁場構造解析によるリップル率低減の評価

ここでは、FB装着前後でのリップル率(δ)の変化、磁場計算および磁気プローブによる磁場計測から解析・評価した結果について述べる。フェライトを含む非線形三次元磁場計算で、 $B_t=1.3$ TにおいてP4セクションの $R=1.6$ m、 $Z=0.0$ mにおける δ が、FB装着前には2.2%だったものが、装着後1.1%に半減することがわかった。リップル率は $\delta \equiv (B_{max} - B_{min}) / (B_{max} + B_{min})$ で定義される。ここで、 B_{max} 、 B_{min} はセクションにおける磁場の最大値と最小値である。一方、トロイダル磁場の測定ではリップルの大きさが数%であるのに対して、測定精度も1%程度であるため、リップル率を精度良く求めることができない。そこで、リップル率の指標としてR方向磁場成分(B_R)の測定結果を評価した。 B_R はその最大値が δ にほぼ比例するので、相対的に精度の高い測定が可能となる。予め計算で求めた $B_t=1.3$ Tの場合の B_R 成分のトロイダル分布をFig.4に点線(FB装着前)および実線(FB装着後)で示す。FB装着前後で B_R の最大値が

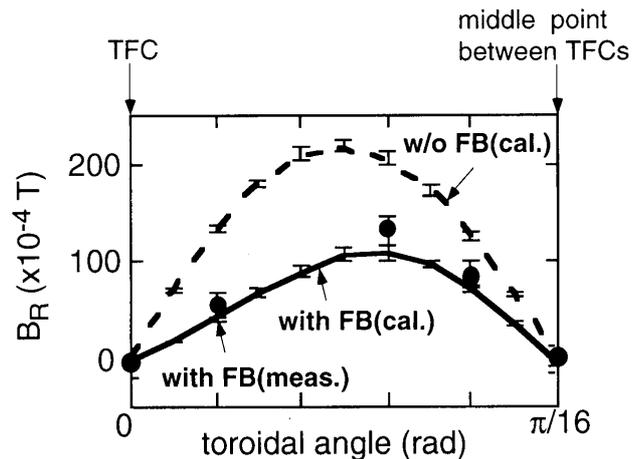


Fig. 4 Toroidal distribution of radial magnetic field (B_R) before (broken line) and after (solid line and circles) FB insertion by calculation (cal.) and measurement (meas.) at $B_t=1.3$ T, $R=1.6$ m, $Z=0.0$ m.

0.022 Tから0.011 Tへと半減しており、リップルが半減していることがわかる。測定では、FB装着前の磁場分布は計算どおりであると仮定して面積、角度等の較正を行い、この較正值を用いたFB装着後のデータのみをFig.4に●で示す。FB装着後の B_R の測定値は計算結果とはほぼ同様なものになっており、フェライト鋼装着によってリップル率がほぼ半減していることが磁場測定から確認できた。

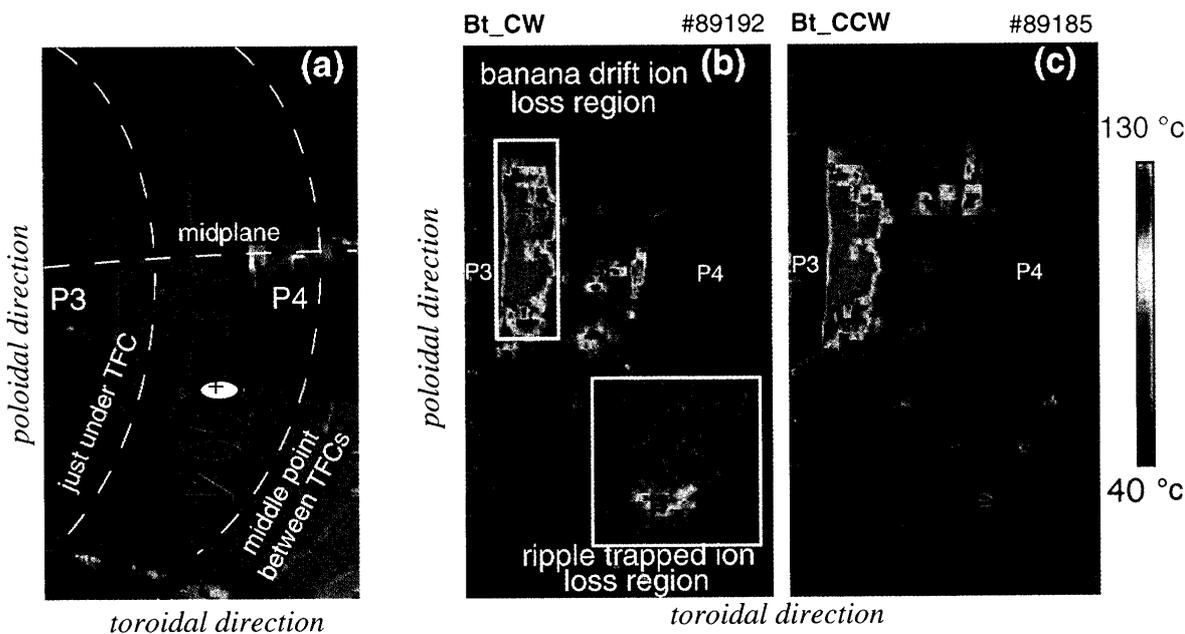


Fig. 5 (a)Viewing area of IRTV. (b), (c)Surface temperature profiles on the first wall measured by IRTV during NBI ($E_b=36$ kV, $P_{NBI} \sim 0.5$ MW) before FB insertion, in cases of Clock Wise (CW) and Counter Clock Wise (CCW) B_t directions, respectively.

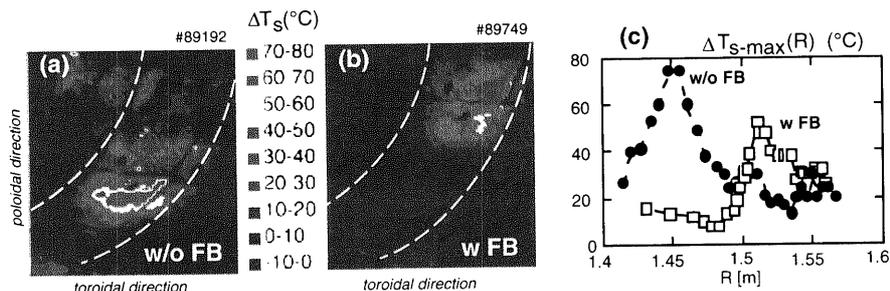


Fig. 6 (a),(b) : Comparison of IRTV data between without and with FB for ripple trapped losses at CW B_t direction (∇B direction of ion is downward). (c) Radial profiles of maximum temperature increment (ΔT_{s-max}) as the projections of viewing area of (a) and (b).

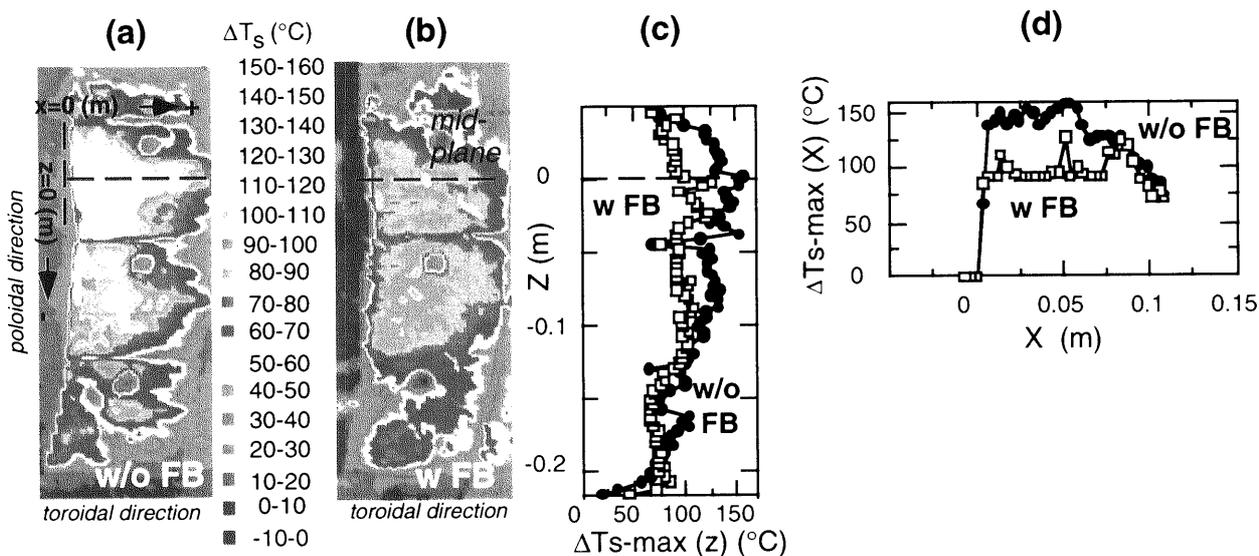


Fig. 7 (a),(b) : Comparisons of IRTV data between without and with FB for banana drift losses. (c),(d) : ΔT_{s-max} vertical and horizontal profiles against the torus in viewing area of (a) and (b).

5. 第一壁温度計測による高速イオン損失評価

リップルによって高速イオンが損失する主な原因としては、リップルに捕捉されて損失するもの（リップル捕捉損失）とリップルがバナナドリフト軌道に影響を及ぼして損失するもの（バナナドリフト損失）の2つが考えられている。IRTVによる第一壁温度計測から、リップル捕捉損失およびバナナドリフト損失による第一壁の局所的な温度上昇について実験解析し、FB装着により高速イオン損失が低減されたことを以下に示す。リップルによる高速イオン損失に関する実験は、OH加熱プラズマ ($I_p = 200$ kA, I_p の方向は時計回り, $B_t = 1.3$ T, 線平均電子密度 $\bar{n}_e \sim 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, リミタD型配位)に順方向のNBI (加速電圧 $E_b = 36$ kV, 入射パワー $P_{NBI} \sim 0.5$ MW)を入射して行った。Fig. 5(a)は予め可視カメラで撮影したIRTV下側視野の内壁外側部分である。イオンの ∇B

ドリフト方向が下向きになる、すなわち、 B_t の方向が時計回り(CW)方向の場合、磁場が最小になるP4直下でのリップル捕捉損失による温度上昇が予想される。IRTVによるFB装着前の第一壁温度分布をFig. 5(b),(c)に示す。 B_t の方向がCWの場合、リップル捕捉損失によると推測される温度上昇がP4中央下側に、バナナドリフト損失によると推測される温度上昇がP3側赤道面付近に見られる(Fig. 5(b))。 B_t の方向を半時計回り(CCW)に反転させることにより、リップル捕捉イオンが上側に向かう場合、下側の温度上昇は消失することから、これがリップル捕捉イオンによると確認できる(Fig. 5(c))。

FB装着前後で高速イオン損失の比較を行う。FB装着前後のリップル捕捉損失による温度上昇領域がある部分を拡大してFig. 6(a), (b)に示す。ここでの温度 ΔT_s は、

B_t の方向によらずNBIによって第一壁温度が全体的に上昇することから、 $\Delta T_s \equiv (T_{NBI} - T_{OH})_{CW} - (T_{NBI} - T_{OH})_{CCW}$ で定義する。ここで第1, 2項括弧内は B_t の方向がCWとCCWの場合のNBI中のOHからの上昇温度分であり、1, 2項の差がリップル捕捉損失高速イオンによる温度上昇と判断した。FB装着後は、装着前に比べ、リップル捕捉損失による温度上昇領域が狭く、ピーク温度も低い。このことはFig. 6(c)の径方向分布によく示される。Fig. 6(c)はFig. 6(a)および(b)中の破線で挟まれた領域のトロイダル方向のIRTV一列メッシュ毎に最高温度上昇値(ΔT_{s-max})を求め、各列位置を大半径方向に投影した ΔT_{s-max} の分布である。FB装着前に、内側にあった温度上昇領域が、装着後、約6 cm 外側に移動し、最高上昇温度は約75°Cから約50°Cまで下がった。このことはFB装着によってリップル率が小さくなり、リップル井戸が大半径の外側に移動したためであると推測される。リップル損失領域の温度変化の面積積分が損失パワーに比例すると仮定して、損失パワーを見積もると、FB装着後、壁の熱負荷が約50%低減されたことになる。

一方、バナナドリフト損失による温度上昇領域を拡大したものをFig. 7(a), (b)に示す。この場合の ΔT_s は、OHからの上昇分のみをとっている。(c), (d)は(a), (b)図内での垂直方向(z)および赤道面水平方向(x)の最高上昇温度分布をそれぞれ示す。図に示されるように、FB装着前は最高上昇温度が約150°Cになるものが、FB装着でリップル磁場成分が低減され、温度分布が平坦になって最高上昇温度は100°Cに減少していることがわかる。これらの第一壁温度測定結果は、FB装着によるトロイダル磁場リップル低減効果と高速イオン損失の関係を実験的に初めて明らかにするものである。

次に、FB装着後に B_t を1.3 Tから2.2 Tまで変化させることにより、リップル捕捉損失の安全係数(q)およびリップル率(δ)への依存性を調べた結果について述べる。 q および δ の増大とともに、リップル井戸パラメータ($\alpha = r|\sin \theta|/NR_0 \cdot q \cdot \delta$)にしたがってリップル捕捉領域および損失が大きくなること[21]が理論的に予想されている。今回変化させた B_t の範囲で、表面安全係数(q_s)は5.5から9.0、 δ は1.1%から1.5%に増大する。大半径方向の半値幅(FWHM)でとったリップル損失領域の広がりをFig. 8上図に示す。半値幅は B_t が1.3 Tから1.6 Tになるときに急激に増大し、その後、2.2 Tまでは徐々に増加する。この変化は、 q , δ の増大とともにリップル捕捉領域が広がるという理論的予想に一致する。Fig. 8下図はリップル捕捉損失領域における ΔT_s の面積積分値

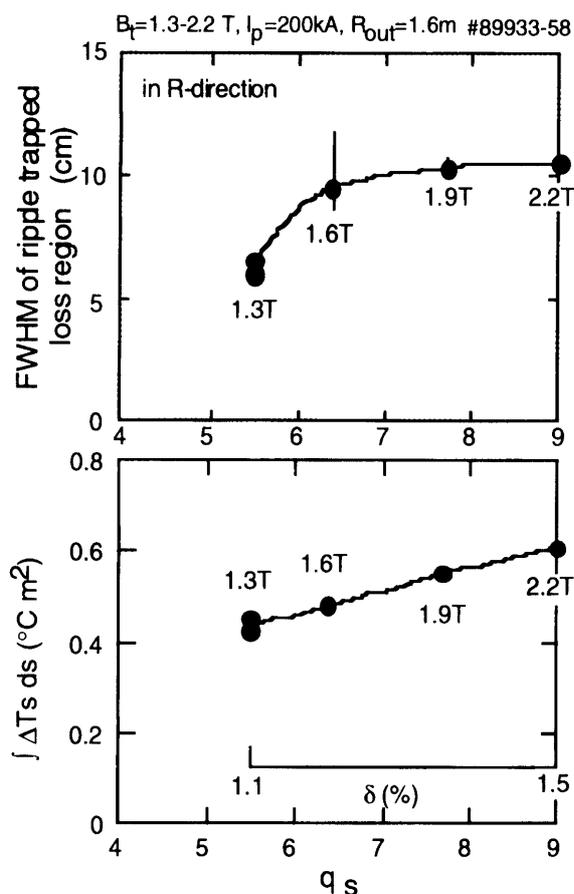


Fig. 8 (q, δ)-dependencies of ripple trapped losses with FB by changing of B_t .

(損失パワーに比例)の q , δ に対する依存性を示す。リップル捕捉による損失量もまた q, δ とともに大きくなるのがわかる。リップル捕捉領域の広がりや損失量については、プラズマ電流の変化による q 依存性、プラズマ位置の変化による q, δ 依存性においても、 B_t を変えた場合と同様にリップル井戸パラメータに従った変化を示した。

6. フェライト鋼のプラズマへの影響

JFT-2Mにおけるフェライト鋼のプラズマに対する影響を調べたところ、FB装着後においても、リミタ配位での正常放電および上シングルヌル(USN)ダイバータ配位でのHモード放電とも容易に得ることができた[13]。リミタ配位でのITER89PLモード閉じ込めスケールング則にエネルギー閉じ込め時間を照合すると、FB装着前後での違いは小さく、Lモード中のHファクタにはほとんど差がなかった[14]。USNダイバータ配位でのNBI順方向入射におけるELM free Hモード放電では、トロイ

ダル回転速度が速くなっていることがわかった. Fig. 9にFB装着前後のCXRS計測によるトロイダル回転(V_ϕ)の大半径方向分布を示す. FB装着前, セパトリス近傍で $V_\phi=20-30$ km/sだったものが, FB装着後, 約2倍の $V_\phi=50-60$ km/sにまで速くなった. このことは, 現状の厚み, 形状, 設置位置でのフェライト鋼がプラズマの制御と閉じ込めに悪影響を与えないこと, また, トロイダル磁場リップルの低減に伴い, Hモード時にはトロイダル回転速度を増大させることを示している.

7. 結論

JFT-2Mトカマクにおいてトロイダル磁場リップルを低減するため, 磁場閉じ込め装置として初めて強磁性体フェライト鋼を用いた試験を実施した. トロイダル磁場コイルと真空容器の間に設置されたフェライト鋼は, 既存装置と干渉しない範囲で, 基本および第二高調波リップルを低減するように厚み, 形状, 設置位置の最適化を行った.

フェライト鋼によるリップル低減効果を明らかにするため, 磁場構造および高速イオン損失の評価を行った. 磁場構造解析および磁気プローブ計測によって, FB装着前後で, リップル率が2.2%から1.1% ($R=1.6$ m, $Z=0.0$ m) に減ることを実証した. 軽水素中性粒子入射によって生成された高速イオンの損失をIRTVによる第一壁温度上昇から評価した. FB装着前, $R\sim 1.45$ mにあったリップル捕捉損失温度上昇領域が, 装着後, $R\sim 1.51$ mの外側に移動し最高上昇温度は約75°Cから約50°C

まで下がった. このことはリップル率の減少に伴いリップル井戸が外側へ移動することによって考えられる. また, この温度変化は熱負荷が約50%低減されたことを示している. バナナドリフト損失領域の最高上昇温度もまたFB装着後, 約150°Cから約100°Cに減少した. 一方, リップル捕捉損失領域の広がりや損失量は, 安全係数やリップル率の増大とともに大きくなり, リップル井戸パラメータに従った変化を示した.

FB装着後においても, リミタ配位での正常放電およびダイバータ配位でのHモード放電も容易に得られた. さらに, ダイバータ配位でのNBI順方向入射を行ったELM free Hモード放電では, トロイダル磁場リップルの低減に伴いセパトリス近傍のトロイダル回転速度が, 装着前の20-30 km/sに対し, 約2倍の50-60 km/sと速くなった.

このように, JFT-2Mに今回設置したフェライト鋼が1) トロイダル磁場リップルや高速イオン損失の低減に有効であること, 2) プラズマ放電や閉じ込めに悪影響を及ぼさないことを実験的に評価できた.

謝辞

リップルに関することや計測装置について, ご教示, ご助言を賜りました日本原子力研究所の飛田健次氏, 全般にわたりご支援, ご鞭撻を賜りました日本原子力研究所の岸本 浩氏, 太田 充氏, 船橋昭昌氏, 清水正亜氏, 二宮博正氏, 木村豊秋氏に感謝いたします.

参考文献

- [1] J. Wesson, *Tokamaks Oxford Engineering Science Series* 48 (1997).
- [2] K. Tani, M. Azumi, H. Kishimoto and S. Tamura, *J. Phys. Soc. Japan* **50**, 1726 (1981).
- [3] 飛田健次, 濱松清隆, 滝塚知典, 鈴木正信: *プラズマ・核融合学会誌* **75**, 582 (1999).
- [4] K. Tobita, H. Harano, T. Nishitani, T. Fujita, K. Tani *et al.*, *Nucl. Fusion* **37**, 1583 (1997).
- [5] L. R. Turner, S.T. Wang and H.C. Stevens, *Proc. 3rd Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion*, Santa Fe (1978) p.883.
- [6] M. Ricci and N. Mitchell, *Proc. 15th Symposium on Fusion Technology*, Utrecht (1988) p.1565.
- [7] G.V. Sheffield, PPPL-2876 (1993).
- [8] M. Sato, Y. Miura, S. Takeji, H. Kimura and K. Shiba, *J. Nucl. Mater.* **258-263**, 1253 (1998).
- [9] M. Tamura, H. Hayakawa, A. Yoshitake, A. Hishinuma and T. Kondo, *J. Nucl. Mater.* **155**, 620 (1988).

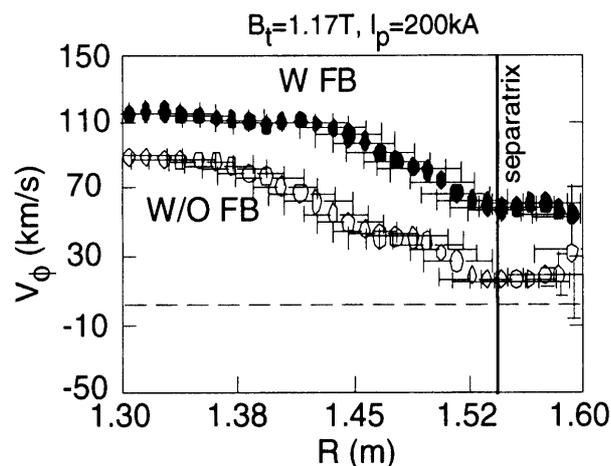


Fig. 9 Radial profiles of toroidal rotation velocity (V_ϕ) by CXRS measurement without and with FB. These data were obtained at ELM free H-mode during NBI Co-injection ($P_{\text{NBI}} \sim 0.8$ MW) for upper single null divertor configuration at $B_t = 1.17$ T.

- [10] K. Shiba, A. Hishinuma, A. Oyama and K. Masamura, JAERI-Tech 97-038 (1997).
- [11] M. Abe, T. Nakayama, K. Asano and M. Otsuka, J. Plasma Fusion Res. **73**, 1283 (1997).
- [12] T. Nakayama, M. Abe, T. Tadokoro and M. Otsuka, J. Nucl. Mater. **271-272**, 491(1999).
- [13] M. Sato, H. Kawashima, Y. Miura, K. Tsuzuki, H. Kimura *et al.*, *Proc. International Symposium on Fusion Nuclear Technology* (1999, Rome), to be published in Fusion Eng. Des.
- [14] K. Tsuzuki, M. Sato, H. Kawashima, Y. Miura, H. Kimura *et al.*, *Proc. 9th Int. Conf. on Fusion Reactor Materials* (1999, Colorado) to be published in J. Nucl. Mater.
- [15] H. Kimura, H. Kawashima, K. Tsuzuki, M. Sato, Y. Miura *et al.*, *Proc. 6th IAEA Technical Committee Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems* (1999, Naka).
- [16] 佐藤正泰, 三浦幸俊: プラズマ・核融合学会誌 **74**, 448 (1998).
- [17] M. Sato, Y. Miura, H. Kimura, M. Yamamoto *et al.*, *Proc. 20th Symposium on Fusion Technology* (1998, Marseille) p.545.
- [18] M. Sato, Y. Miura, H. Kimura, H. Kawashima, S. Sengoku *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **75**, 741 (1999).
- [19] V.Ya. Goloborod'ko, Ya.I. Kolesnichenko and V.A. Yavorskij, *Physica Scripta* **T16**, 46 (1987).
- [20] T. Nakayama, M. Yamamoto, M. Abe, T. Shibata, M. Otsuka *et al.*, *Proc. 18th Symposium on Fusion Engineering*, PA2-5 (1999, Albuquerque).
- [21] K. Tobita, K. Tani, Y. Neyatani, A.A.E. van Blokland, S. Miura *et al.*, *Rhys. Rev. Lett.* **23**, 3060 (1995).