

## 補足説明

### 1. プラズマの加熱と閉じ込め性能

プラズマの圧力（温度×密度）を高めるには、外部からプラズマを加熱する必要がある。その方法の一つとして、高エネルギーの中性粒子ビームをプラズマへ入射する方法があり（図1）、JT-60の主要な加熱方式となっている。入射された中性粒子は、プラズマ中でイオンと電子に分かれ、生成した高速イオンがプラズマ中を回りながらプラズマにエネルギー（熱）を与えて、プラズマを加熱する。

プラズマの閉じ込め性能とは、どのくらい少ない加熱パワーで効率良く高いプラズマ圧力を維持できるかを示すもので、図2の閉じ込め時間で示される。閉じ込め時間は、装置の大きさ、プラズマ電流、磁場強度を大きくするほど高くなることが分かっているが、規模が同じでも閉じ込め時間が長い場合と短い場合がある。ITERの標準運転では、閉じ込め性能が良く、閉じ込め時間が長くなるモード（閉じ込め改善モード）を用いることが想定されている。

ITERの標準運転モードについて、世界の多数のトカマクのデータから比例則（経験式）が作られている。実際の閉じ込め時間と比例則から計算された閉じ込め時間との比を「閉じ込め改善度」と言う。閉じ込め性能は、ITERで得られるプラズマ圧力を決める要因の一つとなっている。ITERの標準運転の性能予測では、閉じ込め改善度＝1を想定している。閉じ込め改善度が1以上の状態を「高閉じ込め」と言う。閉じ込め改善度の値を上げることは炉心プラズマ研究の大きな目的の一つである。

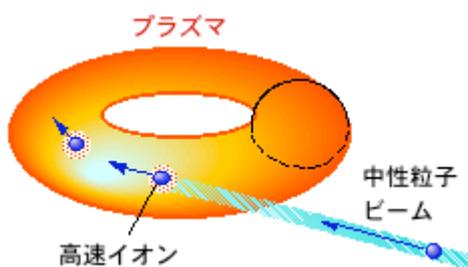


図1 中性粒子ビームの入射によるプラズマの加熱



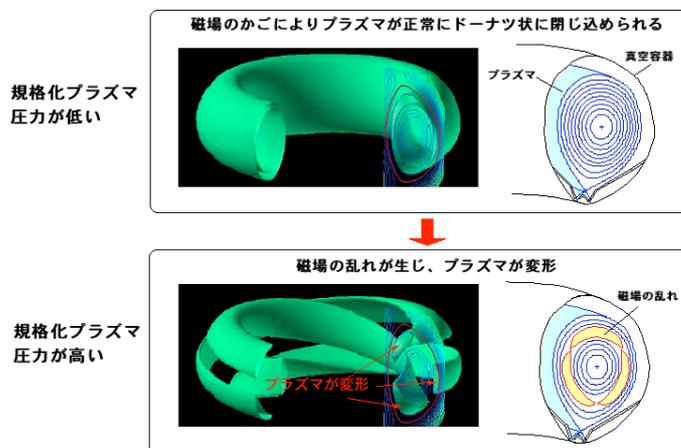
$$\text{閉じ込め時間 [秒]} = \frac{\text{プラズマエネルギー [ジュール]}}{\text{プラズマ加熱パワー [ワット]}}$$
$$\text{閉じ込め改善度} = \frac{\text{実際の閉じ込め時間 [秒]}}{\text{比例則による閉じ込め時間の計算値 [秒]}}$$

図2 プラズマの閉じ込め性能と閉じ込め時間、閉じ込め改善度。

## 2. プラズマ圧力と規格化プラズマ圧力

プラズマの圧力は、通常の気体の圧力と同様に、その密度と温度の積に比例する。単位体積あたりの核融合出力は、プラズマの圧力の二乗に比例するため、高い核融合出力を得るには、プラズマの圧力を高くする必要がある。

トカマクプラズマにおいては、磁場のかごを作ってプラズマを閉じ込めている（図3上）。磁場の強さやプラズマ電流に対するプラズマの圧力の大きさを「規格化プラズマ圧力」と言う。ITER や核融合炉では、規格化プラズマ圧力が高いほど、大きい核融合出力が得られる（図4）が、その一方で、規格化プラズマ圧力が高くなると、磁場の乱れが発生しやすくなる。磁場の乱れが発生すると、プラズマが変形し、エネルギー（熱）が逃げて圧力が低下してしまう（図3下）。プラズマの制御技術によりこの磁場の乱れを起こさないようにして規格化プラズマ圧力を高めることは炉心プラズマ研究の大きな目的の一つである。



$$\text{規格化プラズマ圧力} = \frac{\text{プラズマ圧力}}{(\text{プラズマ電流}) \times (\text{磁場強度}) / (\text{プラズマ小半径})}$$

図3 規格化プラズマ圧力と磁場の乱れ

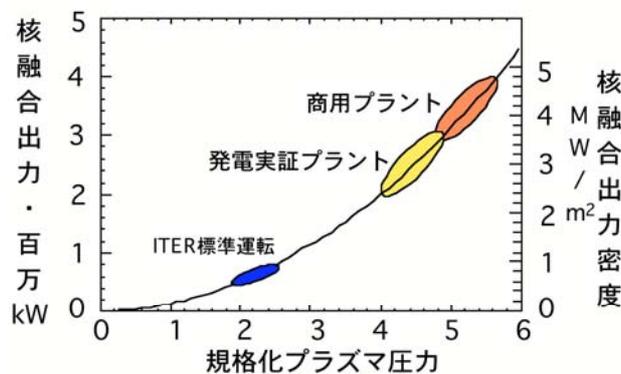


図4 ITER および核融合炉における規格化プラズマ圧力と核融合出力との関係

### 3. エネルギー増倍率（Q 値）と自己加熱

核融合反応が起きている ITER などのプラズマでは、核融合反応で生じる高エネルギーのヘリウムイオンがプラズマを加熱する（図5）。このプラズマ加熱に使われるパワーは、プラズマ内部で核融合反応によって生じるパワー（核融合出力）の 20% である。プラズマ加熱パワーは、中性粒子ビーム入射などによる外部加熱パワーと核融合反応による加熱パワーの合計となる。核融合反応による加熱パワーを外部加熱パワーと区別して、自己加熱パワーと呼ぶ。

核融合出力と外部加熱パワーの比をエネルギー増倍率（Q 値）と言う。すなわち、

$$(\text{エネルギー増倍率}) = (\text{核融合出力}) / (\text{外部加熱パワー})$$

Q=1 を臨界プラズマ条件、Q=無限大を自己点火プラズマ条件と言う。Q が大きいほど、核融合反応による自己加熱パワーに対して外部加熱入力は小さくなり、自己加熱の割合が増える（図6）。核融合炉では Q=20-50 で運転されると想定され、自己加熱割合は 80%以上に達する。一方、現在のトカマクでは、Q は最大で 1 程度であり、自己加熱割合は 20%以下である。自己加熱割合が 1 に近いプラズマは、外部加熱入力で温度を制御できる現在のトカマクのプラズマとは異なり、主に自らの核融合反応のパワーで温度を保つような状態であり、核融合炉の実用化のためにはそのような自己加熱領域のプラズマの制御が不可欠である。

ITER では自己加熱割合が 2/3 となる Q=10 のプラズマを制御して長時間維持(約 400 秒) することを主要な技術目標としている。

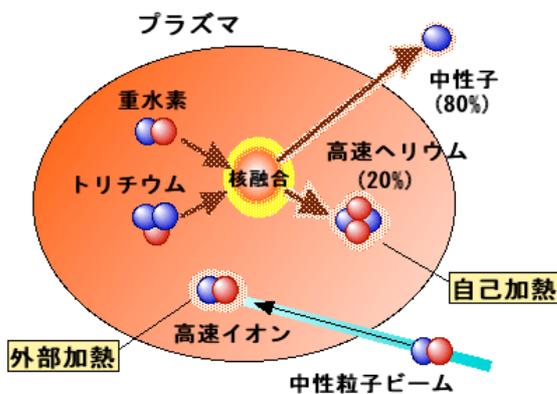


図5 外部加熱パワーと核融合反応による自己加熱パワー

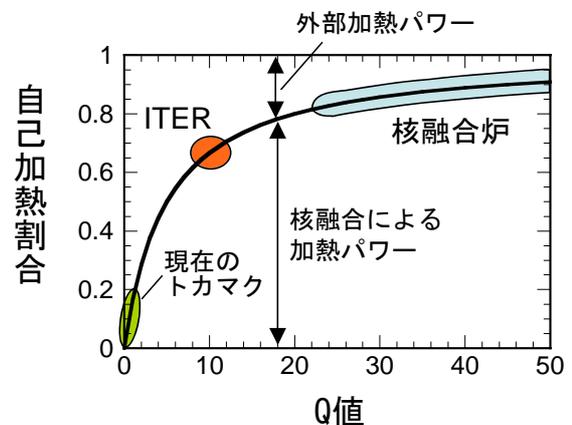


図6 エネルギー増倍率と自己加熱割合との関係

#### 4. 高圧力・高閉じ込めプラズマの長時間維持

図7に、規格化プラズマ圧力と閉じ込め改善度との積と維持時間との関係を示す。ITER および将来の核融合炉では、高いエネルギー増倍率（小さい加熱入力）で大きな核融合出力を得るために、プラズマ圧力とプラズマの閉じ込め性能をともに高くし、それを長時間維持する必要がある。規格化プラズマ圧力と閉じ込め改善度は、それぞれ、プラズマ圧力とプラズマの閉じ込め性能の指標となる量であり、その積でプラズマ圧力保持能力と閉じ込め性能を代表させることができる。

(規格化プラズマ圧力) × (閉じ込め改善度) : プラズマ圧力保持能力と閉じ込め性能の指標

ITER ではこの値として 1.8 が必要とされている（規格化プラズマ圧力=1.8、閉じ込め改善度=1）。

JT-60 では、長時間の高パワー加熱が可能であるため、従来、規格化プラズマ圧力と閉じ込め改善度との積の長時間維持において世界をリードする成果を上げていた（図中の白丸）。昨年のフェライト鋼装着による閉じ込め性能の改善により、さらにその値を向上し（図中の赤三角）、プラズマ加熱装置の現在の最大運転時間である 30 秒近くまで、ITER で必要とされる値（1.8）を維持することに成功した。

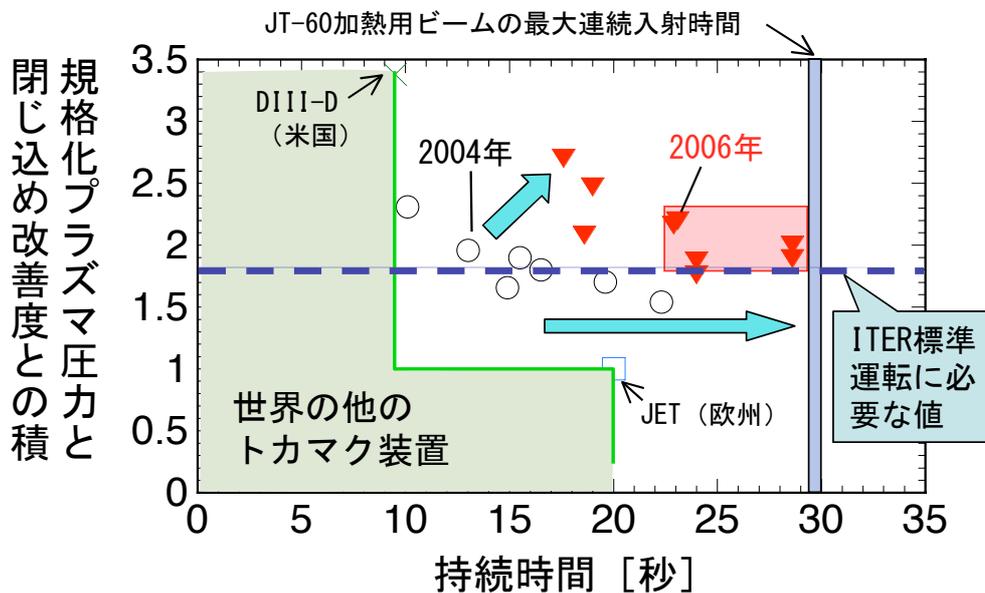


図7 長時間放電におけるプラズマ性能の向上

## 5. 磁性体を用いた閉じ込め磁場形状の改良

トカマク装置では、ドーナツ状に並べたコイル（トロイダル磁場コイル）で強い磁場（トロイダル磁場）を発生させてプラズマを閉じ込める。プラズマを構成する荷電粒子（イオンや電子）は、らせん状の磁力線にそってドーナツの周方向にぐるぐる回ることによって閉じ込められる（図8(a)）。

トロイダル磁場は、コイルの真下で強く、その間で弱くなる。その強弱の度合いを「磁場リップル」と言う。中性粒子ビームの入射などで生成される高速イオンの一部は、磁場の強い場所で跳ね返されドーナツの周方向に回ることができない。このような粒子は、コイルの間を往復しながら磁場に対して垂直方向に逃げて行く。これをリップル損失と言ひ、プラズマ加熱効率の低下をもたらす（図8(b)、図9(a)）。

強磁性体であるフェライト鋼をコイルの下に置くと、フェライト鋼はコイルの下の磁場を弱め、コイルの間の磁場を強めるような磁場を生成する（図9(b)）。その結果、磁場の強弱がなくなり、高速イオンはドーナツの周方向にぐるぐる回るようになり、良好に閉じ込められる。（図9(c)）。

ITERでは、中性粒子ビームの入射および核融合反応で生成される高速イオンの損失を低減するため磁性体の装着が予定されている。

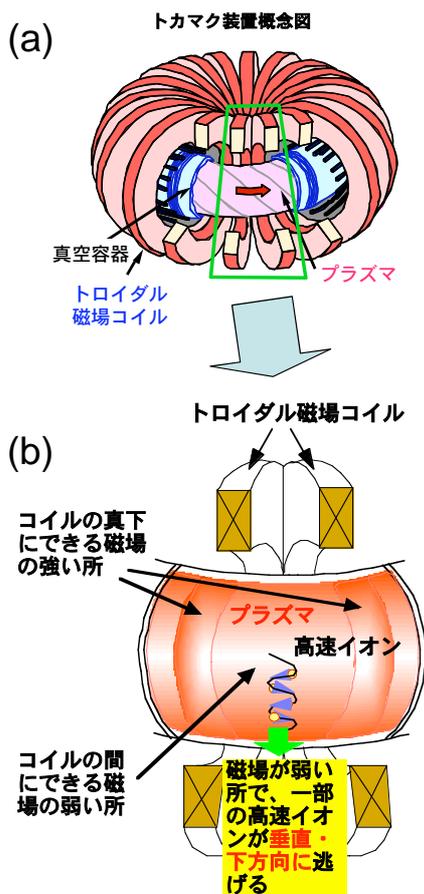


図8 トカマクにおけるリップル損失

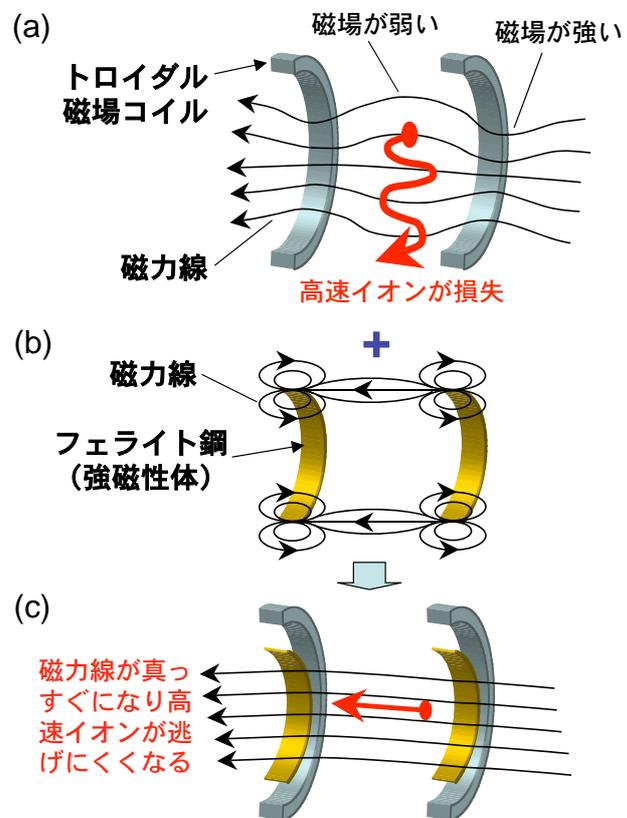


図9 フェライト鋼によるリップルの低減

## 6. JT-60 におけるフェライト鋼の装着

フェライト鋼は長さ・幅 15cm 程度、厚さ 2cm 程度のタイル形状とし、従来の炭素材タイルを一部取り外してその場所に取り付けた (図 10(a))。JT-60 装置の断面図における取付け位置を図 10(b) に示す。18 個あるトロイダル磁場コイルの直下のみ装着された (図 10(c))。取付けたタイルは 1100 枚程度である。フェライト鋼装着後の真空容器内写真を図 10(d) に示す。従来の炭素材タイルの部分は黒っぽく、フェライト鋼タイルの部分は白っぽく見える。

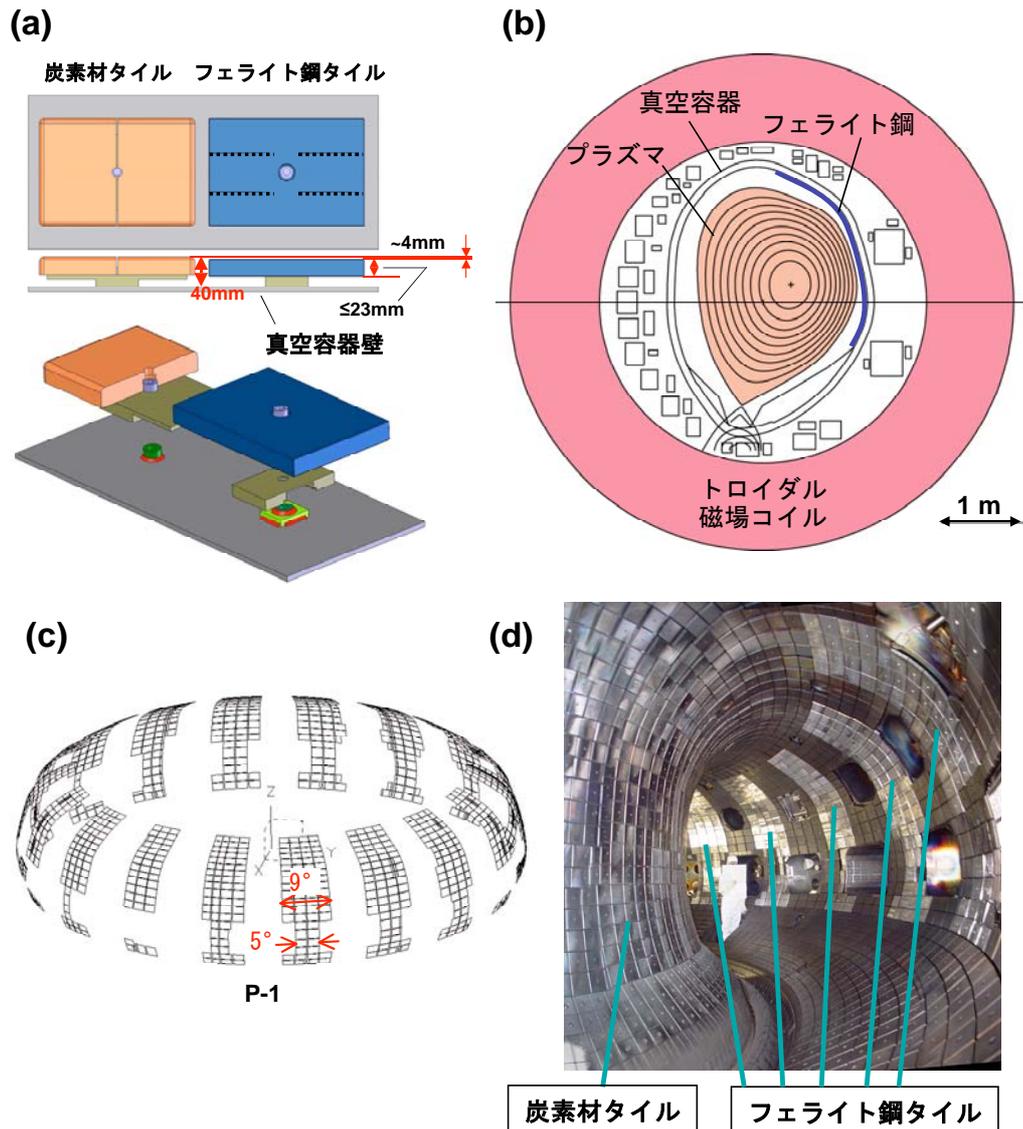


図 10 JT-60 におけるフェライト鋼タイルの装着。(a) 真空容器壁へのフェライト鋼タイルの固定方法。(b) JT-60 装置断面図。(c) フェライト鋼全体の配置。(d) フェライト鋼タイル装着後の真空容器内写真。

## 7. フェライト鋼装着による磁場形状の変化

JT-60 の真空容器内の磁場強度の円周に沿う分布を図 11 に示す。破線はフェライト鋼装着前の値で、18 個のトロイダル磁場コイルに対応して、規則的な 18 個の山と谷がある。山と谷の高さの差が磁場リップルの大きさに対応する。実線はフェライト鋼装着後の値で、山と谷の高さの差が全体に小さくなり、磁場リップルが約 4 分の 1 に小さくなっていることが分かる。

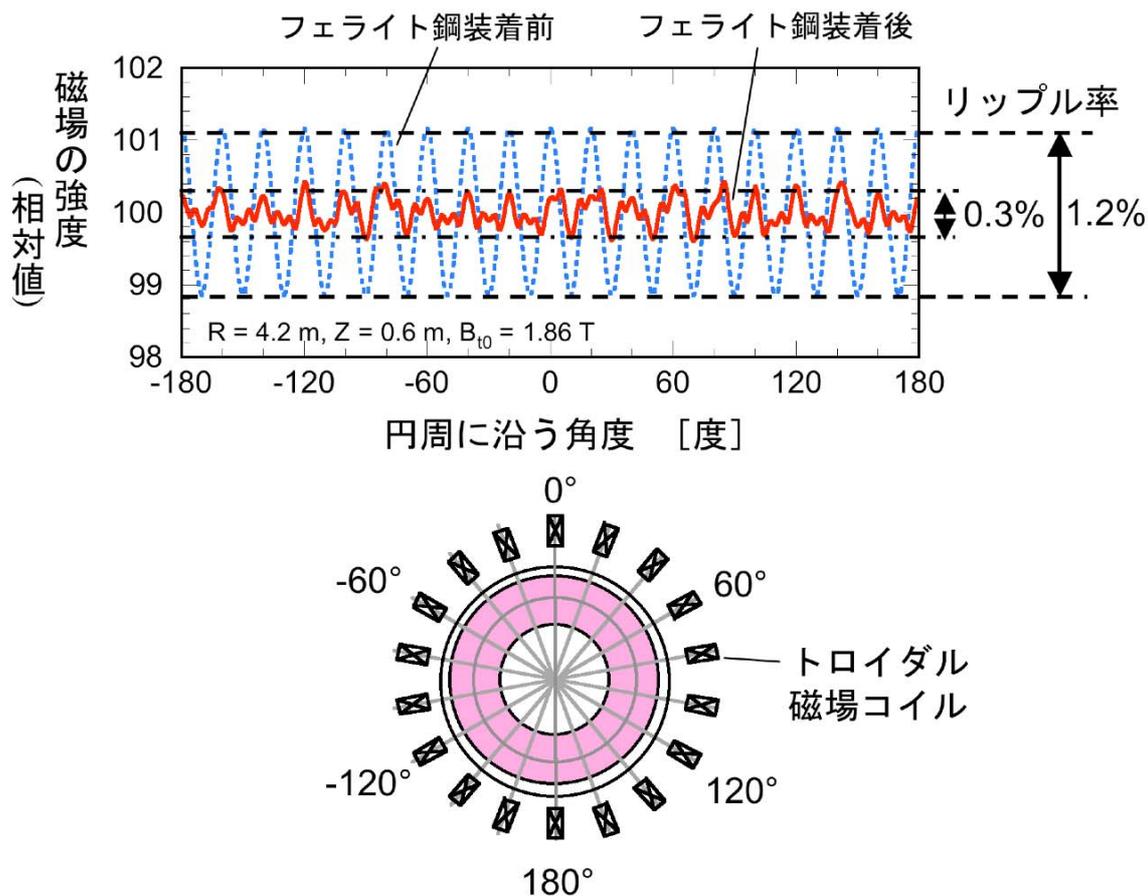


図 11 JT-60 装置の真空容器内部における磁場強度の分布。破線はフェライト鋼設置前、実線はフェライト鋼設置後を示す。

## 8. フェライト鋼装着による閉じ込め性能の向上

図 12(a)にプラズマ中の径電場の分布を示す。プラズマは正の電荷を持つイオンと負の電荷を持つ電子の集合体であり、その数の差で電場が決まる。正の電荷をもつ高速イオンが損失すると電子の数がイオンより多くなるため、プラズマ中に負の電場ができる。フェライト鋼装着前に比べて、フェライト鋼装着後に、径電場は正の方向に変化しており、これは高速イオンの損失量が減ったことに対応している。

図 12(b) にプラズマの閉じ込め性能と高速イオンの損失割合との関係を示す。フェライト鋼の装着により、高速イオンの損失量はほぼ半減し、それに伴って閉じ込め性能が 20%程度改善した（同じ圧力のプラズマを 20%低い加熱パワーで得ることができた）。ここで、閉じ込め性能の評価においては、高速イオンの損失量の減少分を考慮に入れている。すなわち、高速イオンの損失量の減少分以上に必要な加熱パワーが減少した。プラズマ中の径電場はプラズマの閉じ込め性能に影響を与えることが分かっており、高速イオンの損失量の低減による径電場の変化が、閉じ込め性能が改善した理由と考えられる。

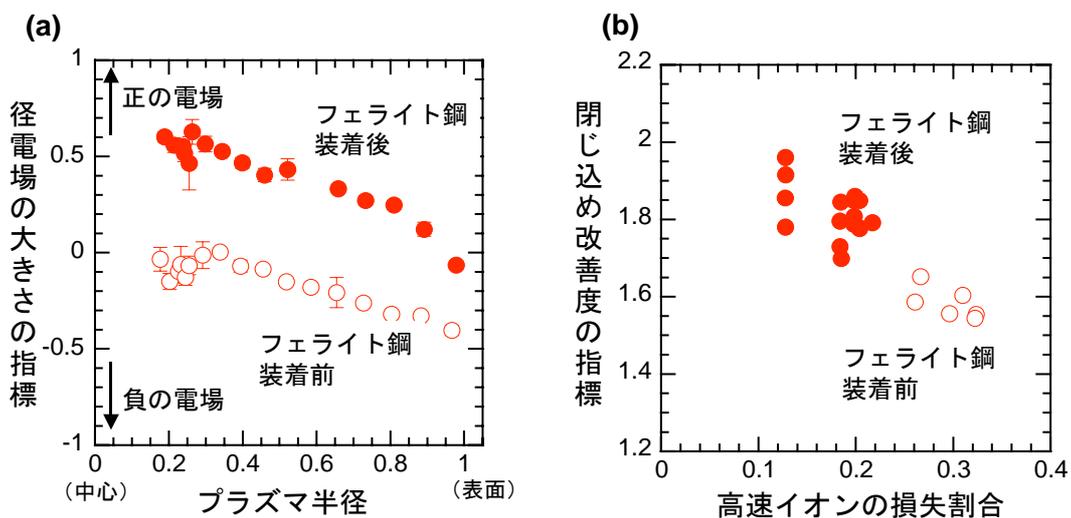


図 12 フェライト鋼装着前後でのプラズマの比較。(a) 径電場の大きさの分布。(b)閉じ込め改善度と高速イオンの損失率との関係。