

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760662

研究課題名(和文) トーラスプラズマにおける磁気島の発生・成長機構の解明および能動的制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on the elucidation of appearance and growth mechanism of magnetic islands and their active control in torus plasmas

研究代表者

諫山 明彦 (Isayama, Akihiko)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門那珂核融合研究所・研究主幹

研究者番号：90354597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：新古典テアリングモード(NTM)に起因する磁気島に着目し、その発生・成長過程における構造を解析した。その結果、「NTMが検出限界以下の幅から徐々に成長する」場合に加え、NTM発生位置における別の崩壊現象に誘起される場合があることがわかった。後者は前者に比べ発生時の規格化ベータ値(圧力に関連)が高く、NTM発生場所での圧力勾配も高いことがわかった。また、磁気島の回転が停止する際の磁気島幅は停止から再回転する際の磁気島幅より大きい(ヒステリシスがある)ことがわかった。また、磁気島の能動的制御装置(2周波数ジャイロトロン)の開発を進め、定格出力に向けよい見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：Structure of magnetic islands associated with neoclassical tearing modes (NTMs) during their onset and evolution has been investigated. The NTM islands were found to be triggered by a small collapse associated with another instability, in addition to onset without detectable instabilities. It was found that the value of the normalized beta for the collapse-triggered NTM is larger than that for the trigger-less NTM, and that the pressure gradient at the mode location is steeper for the former case. The magnetic island width at which the plasma rotation suddenly slows down is larger than that at the plasma starts to rotate after the island width is decreased. This indicates that there is a hysteresis in the island width for mode locking and unlocking. The development of a device for active control of magnetic islands, a dual-frequency gyrotron, has made progress, and a good prospect has been obtained toward the achievement of its nominal values.

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：磁気島 テアリングモード 電磁流体力学的不安定性 電子サイクロトロン波 トカマク プラズマ
核融合

1. 研究開始当初の背景

(1)新古典テアリングモード

核融合炉においては圧力の高いプラズマを定常的に維持する必要がある。正磁気シア(プラズマの中心ほど電流が流れている電流分布)のトカマクプラズマにおいては、理想MHD(電磁流体力学的)安定性限界よりも低い圧力において、新古典テアリングモード(Neoclassical Tearing Mode, NTM)と呼ばれる不安定性が発生することが、JT-60Uをはじめとする世界のトカマク実験においてわかった。NTMが発生するとプラズマの圧力が低下することから、NTMの発生・成長機構を明らかにして、NTMの発生を回避したり、外部から電磁波をNTM発生場所に入射して局所的に電流を流すことによりNTMの発生により失われた電流を補うことでNTMを安定化したりすることが国際熱核融合実験炉ITERや原子力機構で建設中の超伝導トカマクJT-60SAでは必要と考えられている。

NTMが発生すると、磁気島と呼ばれる構造がプラズマ中に形成される。磁気島が成長することは磁場の乱れが大きくなることに対応する。一般に、プラズマは有限の回転速度で回転しており、磁気島が小さいときには磁気島はプラズマ回転速度と同程度の速度で回転しているが、磁気島がある程度大きくなると外部金属構造物上の誘導電流磁場との相互作用によりプラズマの回転が停止する。プラズマの回転が停止した後さらに磁気島が大きくなるとプラズマ崩壊に至る場合があることから磁気島を制御することが重要となっている。

NTM磁気島の幅が広くかつその回転速度が十分高い領域での磁気島構造については、JT-60U等で解析が行われてきた。一方で、NTMの発生・成長時の磁気島構造については、磁気島幅が小さいことから磁気島計測の点で課題があり解析が十分行われていなかった。また、プラズマ回転が低い場合の磁気島構造についての計測上の問題があり十分な解析がなされていなかった。

(2)磁気島制御

磁気島を外部から能動的に制御する手段として、磁気島領域に局所的(数~10cmの範囲:プラズマ小半径10%以下)に100GHz帯、数MWクラスの電子サイクロトロン波を入射する方式(電子サイクロトロン電流駆動:Electron Cyclotron Current Drive, ECCD)が有効であると考えられており、ITERやJT-60SAでもそのための装置が実装される。ITERやJT-60SAにおいて有効な磁気島制御をするためには、電磁波の発振源であるジャイロトロンの性能を向上することが重要である。例えばJT-60SAにおいては、ジャイロトロン1基あたり出力1MW、出力時間100秒が必要となっている(ジャイロトロン数:9)。また、ジャイロトロンの出力電磁波の周波数が通常1つであるが、出力電磁波の周波数を

複数に切り替えることが可能になれば、NTM磁気島の制御性がさらに高くなる。しかしながら、1MW、10秒程度の出力を越える複数周波数ジャイロトロンは現在世界的にも開発されておらず、実証が重要となっている。

2. 研究の目的

(1)NTM磁気島の発生・成長・減速過程

NTM磁気島の発生・成長時・減速時における磁気島の構造を明らかにし、ECCDによるNTM磁気島制御において考慮すべきことを明らかにする。また、発生条件や発生要因を明らかにし、NTM発生早期からNTM磁気島を制御するための要件を明らかにする。さらに、減速が起こる条件や減速からの回復の条件について明らかにする。

(2)ジャイロトロン開発およびECCD特性評価

NTM磁気島の制御性を拡張することを目的として、2周波数ジャイロトロンの開発を進める。対象装置としてはJT-60SAとし、2周波数で出力1MW、出力100秒間のジャイロトロンの実現性を検討し、開発・運転を行う。

NTM磁気島のECCDに対する応答は、駆動電流密度やECCD位置などに依存することがJT-60Uの過去の解析によりわかっている。これらの知見をJT-60SAに外挿し、ECCD性能を高めるために必要な条件を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)NTM磁気島の発生・成長・減速過程

実験データとしては、主にJT-60U実験のものを用いる。磁気島構造の解析の際には、電子サイクロトロン放射(ECE)測定による電子温度揺動分布の時間発展を主に解析する。また、NTM発生時にはECE強度が解析のためには十分でない場合があるので、磁気プローブによる磁場揺動強度も用いる。磁場揺動強度の空間構造を評価するため、トロイダル方向及びポロイダル方向に並べられた複数チャンネルの磁場揺動信号の相関を解析する。

他のトカマクにおけるNTM磁気島と比較するため、米国・ジェネラルアトミックス社のDIII-D装置の磁気島を解析する。DIII-DのECE測定装置の空間分解能はJT-60Uのものより低いいためNTMの発生・成長時の解析は困難であるが、十分成長した後の挙動の解析は可能である。一方で、DIII-Dでは、外部磁場コイルによりNTM磁気島を能動的に回転・停止させることができる。このような制御はJT-60Uではできないことから、新しい制御手法のデータとなりうる。

なお、解析対象とするNTMとしては、プラズマへの影響が大きく、そのためにITERなどにおいても重要視されているポロイダルモード数(m)が2、トロイダルモード数(n)が1のNTMと主とするとともに、 $m/n=3/2$ のNTMが現れている場合はその挙動も解析する。

(2) ジャイロトロン開発および ECCD 特性評価
2 周波数ジャイロトロンの開発は、JT-60SA に適用することを念頭に進める。JT-60SA で想定されている 1MW、100 秒の出力が可能となるよう熱設計等を行う。

JT-60SA で想定されているトロイダル磁場強度 1.7-2.3T のもとで、NTM 磁気島の制御性を検討する。NTM 安定化に際しては、電流駆動量やトロイダル方向・ポロイダル方向の入射角度が重要なパラメータであることから、典型的な条件での ECCD 特性を検討する。

4. 研究成果

(1) 磁気島の発生・成長

JT-60U の NTM が発生・成長する過程を解析した。NTM の発生や成長はプラズマパラメータに依存することから、これらによる不確実性を排除するため、ほぼ同一の実験条件において発生した NTM の磁場揺動や電子温度揺動の分布を解析した。その結果、約 80% の放電においては明確な MHD 不安定性がなくても NTM が発生し、残り 20% においては NTM 発生位置における小コラプスにより NTM がトリガーされていることがわかった(図 1)。また、小コラプスによりトリガーされた場合は規格化ベータ値(プラズマ圧力に関連)がやや高く、また NTM 発生位置での圧力勾配が高いことがわかった。明確な MHD 不安定性がなく NTM が発生する場合は、NTM は周期的な振動から成長し、振幅が大きくなるとモード周波数が急激に減少する(「モードロック」)(図 2)。一方、小コラプスにより NTM がトリガーされた場合は、小半径の 10% 程度以上の幅をもつ磁気島が発生直後から現れ、回転周期も不規則となることがわかった(図 3)。この小コラプスは、(a)小コラプスが発生した場合としない場合で分布を比較すると、前者の方が $m/n=2/1$ 面での圧力勾配が大きい、(b)小コラプスの崩壊速度は 1ms 以下のオーダーである、(c)小コラプス前後でミリ秒オーダーで温度が変化するのは $m/n=2/1$ 付近に局在している、などのことから、以前 JT-60U で観測された Barrier Localized Mode(BLM)であ

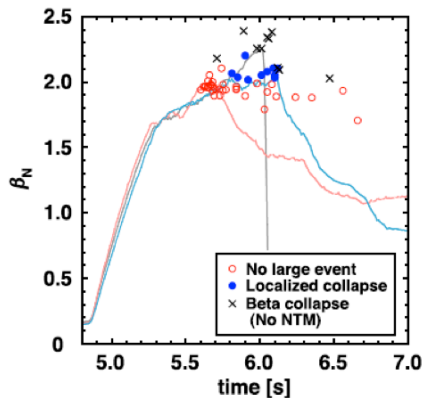


図 1: NTM 発生時の規格化ベータ値。○は別の不安定性がなく NTM が発生した場合、●は小コラプスによりトリガーされた場合、×はベータコラプスが発生した場合(NTM 発生なし)。実線は各場合の典型放電における規格化ベータ値の時間発展。

ると考えられる。BLM が NTM をトリガーする現象は今回初めて観測された。BLM によりトリガーされた NTM は周波数が不規則になり揺動波形の予測が困難になることから、電子サイクロトロン(EC)波のパワー変調による安定化が困難となる。このことから BLM を回避することが重要であることが示唆された。

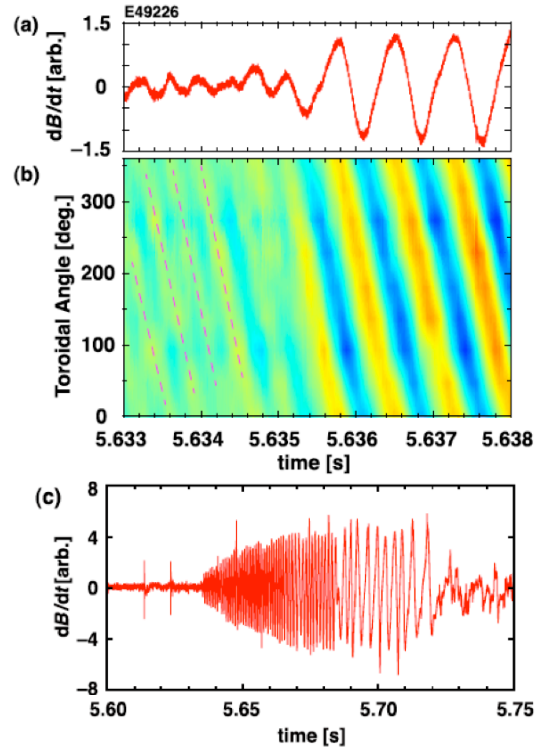


図 2: 別の MHD 不安定性がなく NTM が発生したときの磁場揺動信号。(a)トロイダル角で 0 度付近での磁場揺動の振幅、(b)トロイダル角方向の磁場揺動強度分布の時間発展。点線は $m/n=3/2$ の NTM。 $m/n=2/1$ の NTM は $t=5.635$ s 付近から正弦波状の波形で徐々に成長している。(c)磁場揺動強度の時間発展。NTM の成長後、 $t=5.68$ s 付近より回転速度が低下している。

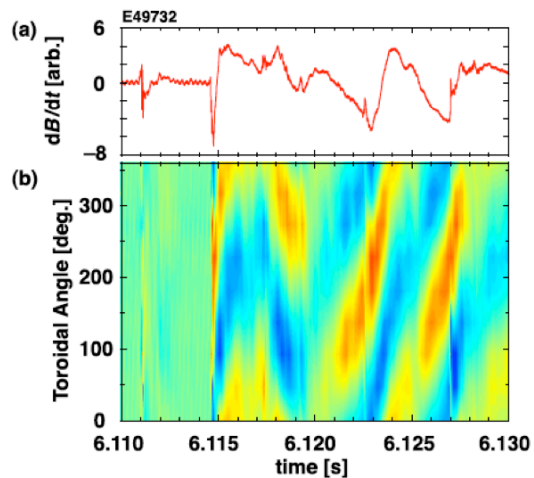


図 3: 小コラプスにより NTM がトリガーされたときの磁場揺動信号。(a)トロイダル角で 0 度付近での磁場揺動の振幅、(b)トロイダル角方向の磁場揺動強度分布の時間発展。 $t=6.115$ s 付近で小コラプスが発生し $m/n=2/1$ の NTM がトリガーされている。

(2) 磁気島の減速

NTM に起因する磁気島の成長に伴うプラズマ回転の変化を解析した。NTM 磁気島の幅は、プラズマの電流分布や圧力分布などにも依存することから、これらの影響をできるだけ排除するために、ECCD により NTM 磁気島を安定化および不安定化する手法を採用した。この手法は、「ECCD 位置が磁気島中心にあるときは ECCD は NTM 安定化に寄与し、逆に磁気島幅程度ずれた位置にあるときは不安定化に寄与する」という事実 (JT-60U で過去に実証) を利用したものであり、この研究目的としては初めて用いられた手法である。

解析の結果、磁気島幅が増加にするとモード周波数が減少する (トロイダル回転速度が減少することに対応) ことがわかった (図 4)。また、その変化は $f/f_0 = 0.5 * [1 - (B/B_0)]^{0.5}$ の形の関数でフィッティングできることがわかった。ここで、 f 、 B はそれぞれモード周波数、磁場揺動強度 (磁気島幅の 0.5 乗に比例) であり、 f_0 、 B_0 は係数である。さらに、モード周波数が「磁気島幅がゼロのときの値」の半分程度までに減少すると、上記フィッティング式から想定される周波数から外れ、それまでのモード周波数の 1/5 程度ま

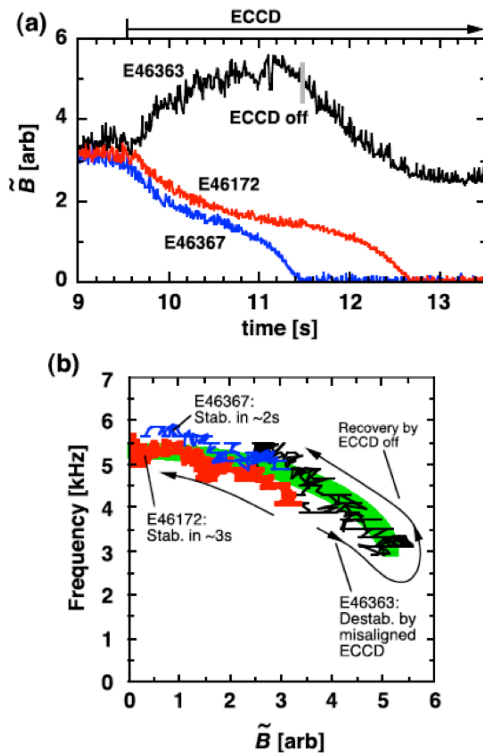


図 4: (a) 磁場揺動強度の時間発展。放電 E46363 は、ECCD により NTM を不安定化している ($t=11.5$ s で ECCD オフ)。放電 E46172 と E46367 はともに NTM を安定化しているが、E46367 の方が最適位置に近いことより早く NTM が安定化されている。(b) NTM 周波数と磁場揺動強度との関係。各色の線は (a) に対応しており、緑色の線はフィッティング曲線である。磁場揺動強度の増大とともに NTM 周波数が減少している。放電 E46363 では ECCD オフの後、磁場揺動強度が減少 (不安定化効果が減少) するとともに周波数が増大している。

で急激に減少することがわかった (図 5)。また、この状態から (NTM 不安定化のための) EC 駆動電流を減少して磁気島幅を徐々に減少させるとある磁気島幅 (典型的には高回転から低回転への遷移が起こったときの磁気島幅の 80% 程度) でモード周波数が急激に増大し、上記フィッティングで記述できるモード周波数に復帰することを観測した。このことは、この「遷移現象」が起きる磁気島幅にヒステリシスがあることを示している。すなわち、いったん低回転速度側への遷移が起こると、再び高回転側に遷移させるためにはより強く安定化させる必要がある。プラズマ回転は抵抗性壁モードなどの不安定性を抑制するために重要と考えられていることから、低回転速度への遷移が起こる前に NTM を安定化して回転を維持することが重要であることを示している。

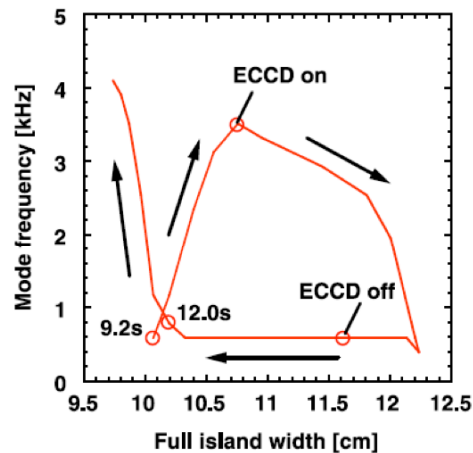


図 5: 磁気島幅と NTM 周波数との関係。図中“ECCD on”の条件で ECCD により NTM を不安定化すると磁気島幅の増大とともに NTM 周波数が増大する (図 4 の放電 E46363 と同じ現象)。周波数が 2.5kHz 程度 (図 4 (b) で磁場揺動強度が 0 のときの NTM 周波数の約半分) になると急激に周波数が減少する。ECCD による不安定化を停止すると (“ECCD off”) 磁気島幅は減少するが、しばらくは周波数は低い状態を維持する。磁気島幅がある程度 (周波数減少時の約 80%) まで小さくなると周波数が急激に増大し、図 4 (b) と同程度の約 4kHz となる。

(3) 低プラズマ回転時の磁気島構造

一般に、磁気島はプラズマの流れに乗って移動している。今回、プラズマ回転速度が高速から低速に至る過程での磁気島構造を解析した。その結果、高速度で回転しているときは磁気島の境界は時間的に正弦波状に変化するのに対し、低速度で回転しているときは歪んで見えることがわかった。この理由として、磁気島の回転速度が一定でないことのほか、磁気島境界に歪みが生じていると考えられる。EC 波パワーを変調することにより NTM 磁気島を効果的に安定化することができるが、このような歪みがある場合は変調波形もそれに応じて変える必要があることを示唆している。

NTM は圧力の高いプラズマが生成できるトカマクで観測されているが、その磁気島構造の装置間での比較はほとんど行われていない。磁気島構造を比較するために、米国・ジェネラルアトミックス社の DIII-D トカマクにおける NTM 磁気島の解析を行った。DIII-D では $m/n=2/1$ の磁気島を外部磁場摂動によりトロイダル方向に回転させた際、ミリ秒オーダーで急速に起こる崩壊現象が観測された。解析の結果、崩壊は $m/n=2/1$ および $3/2$ の共鳴面付近で最も早く観測されており、また、崩壊直前に $m/n=3/2$ の磁気島が成長していることがわかった。このことから崩壊現象は 2 つの磁気島の結合により現れた可能性がある (JT-60U では観測例なし)。また、磁気島の構造を解析した結果、磁気島の回転が低下するにつれて磁気島が歪んで見えることがわかった。上述のように、同様の現象は過去に JT-60U において観測されており、類似の挙動を示すことが明らかとなった。

(4) ECCD 特性の計算

NTM 磁気島を制御する手法として、磁気島中心への ECCD が有効であることが JT-60U の実験および TOPICS コードにより過去に示されている。JT-60SA や ITER における NTM 磁気島の制御性を予測するため、JT-60SA や ITER における ECCD 特性の計算を行った。前者については、各種の平衡において駆動電流量を最大化するための入射条件を明らかにした (図 6)。後者においては、ITER 水平ランチャーからの新しい EC 波入射範囲に基づく ECCD 特性を計算した結果、新しい駆動範囲により電流駆動位置が拡大できることがわかった。また、NTM 安定性に関する解析の結果、JT-60SA では 110GHz または 138GHz の EC 波を 7MW 入射することにより、NTM 発生位置において自発電流密度と同程度以上の ECCD が可能であることがわかった。このことから、NTM 磁気島の発生により失われた電流を補うことが可能であり、効果的な NTM 安定化が可能であることがわかった。

(5) ジャイロトロンの開発

ジャイロトロンは発振周波数を 1 つとして設計されることが多いが、上記 (4) の解析の結果、トロイダル磁場強度が 2.3T (JT-60SA の最大磁場) のときには 130-140GHz 帯の EC 波が最適であることがわかった。そこで、設計当初から 2 周波数で運用することを想定し、発振モード選択や熱負荷解析等を行った。設計・製作を進めたのちに運転を 2012 年より開始した。その結果、110GHz と 138GHz で 1MW、10 秒の発振に成功し (2013 年度現在)、設計値の達成に向けた見通しが得られた。また、既存の 110GHz ジャイロトロンを用いた開発では、1MW 出力で 70 秒、1.4MW 出力で 9 秒間 (いずれも 110GHz 帯の同パワーでは世界最長) の維持に成功した。

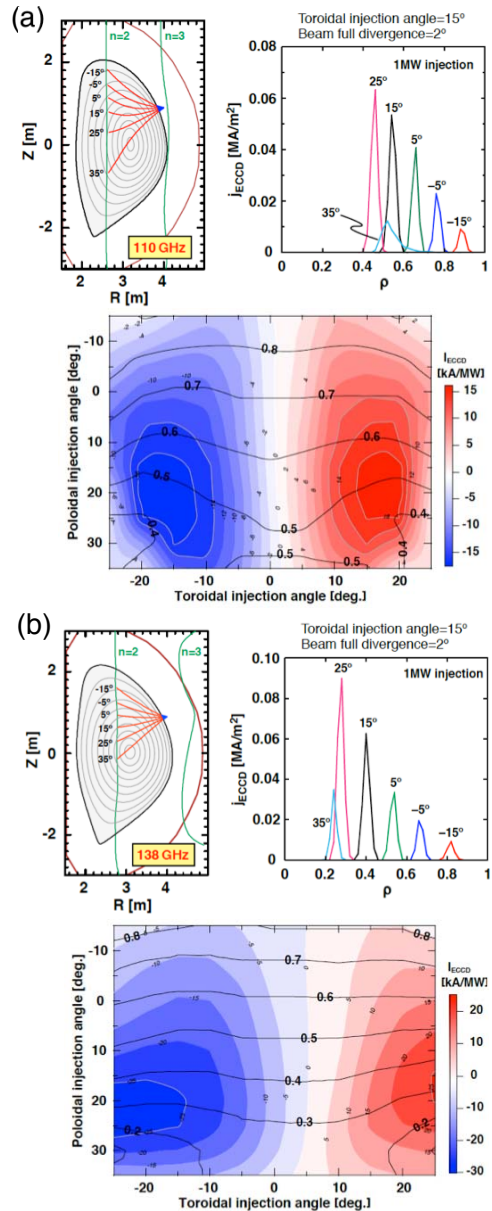


図 6: JT-60SA の (a) 高磁場・高電流シナリオ (トロイダル磁場 2.25T、プラズマ電流 5.5MA) での ECCD 特性、および (b) 高ベータシナリオ (トロイダル磁場 1.7T、プラズマ電流 2.3MA) での ECCD 特性。各図で、左上図は各種入射条件のもとでの 110GHz (a) および 138GHz (b) の EC 波の伝搬経路、右上図は EC 駆動電流密度分布、下図は種々のトロイダル入射角、ポロイダル入射角のもとでの EC 駆動電流量の等高線図である。下図で黒い等高線は EC 駆動電流密度がピークとなる位置での規格化小半径を表す。(a) の場合、入射 EC 波の屈折の効果が大きいため、周辺部入射では EC 電流駆動位置が (b) に比べより外側になる。また、同様に屈折の効果により、規格化小半径で 0.4 程度以下の場所への入射の場合、EC 駆動電流量が正に最大になるトロイダル角は (a) で 15 度程度、(b) で 25 度以上となる。一方、NTM 安定化のように、規格化小半径で 0.5-0.7 の場所への入射の場合には、トロイダル角を 15-20 度程度より大きくしても EC 駆動電流量は大きくは増えない。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① A. Isayama and the JT-60 team: "Advanced Tokamak Research in JT-60U and JT-60SA", Plasma and Fusion Research, Vol. 5, S1003 (7pp) (2010), 査読有
- ② A. Isayama, 他: "Effect of Magnetic Island Associated with Neoclassical Tearing Modes on Plasma Rotation in JT-60U", Plasma and Fusion Research, Vol. 5, 037 (6pp) (2010), 査読有
- ③ A. Isayama and the JT-60 team: "Overview of JT-60U Results Toward the Resolution of Key Physics and Engineering Issues in ITER and JT-60SA", Fusion Energy 2010 (Proceedings of 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea), OV1-4 (2010), 査読無
- ④ A. Isayama and the JT-60 team: "Overview of JT-60U Results Toward the Resolution of Key Physics and Engineering Issues in ITER and JT-60SA", Nuclear Fusion, Vol. 51, 094010 (13pp) (2011), 査読有
- ⑤ A. Isayama, T. Kobayashi, S. Moriyama, K. Yokokura, M. Shimono, M. Sawahata, S. Suzuki, M. Terakado, S. Hiranai, K. Wada, J. Hinata, Y. Sato, K. Hoshino, K. Sakamoto, K. Kajiwara, Y. Oda, K. Hamamatsu, M. Saigusa and C. Sozzi, "Progress in the Development of the ECRF System for JT-60SA", Fusion Energy 2012 (Proceedings of 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, the United States of America), FTP/P1-16, (2012), 査読無
- ⑥ A. Isayama, T. Kobayashi, K. Yokokura, M. Shimono, M. Sawahata, S. Suzuki, M. Terakado, S. Hiranai, K. Wada, J. Hinata, Y. Sato, K. Hoshino, S. Moriyama, K. Sakamoto and K. Hamamatsu, "Recent Results from the Development of the Electron Cyclotron Heating System for JT-60SA toward High-Power Long-Pulse Operations", Plasma and Fusion Research, Vol. 7, 2405029 (5pp) (2012), 査読有
- ⑦ A. Isayama, G. Matsunaga, Y. Hirano and the JT-60 team, "Onset and Evolution of $m/n = 2/1$ Neoclassical Tearing Modes in High- β_p Mode Discharges in JT-60U", Plasma and Fusion Research Vol. 8, 1402013 (8pp) (2013), 査読有

[学会発表] (計 8 件)

- ① 諫山明彦, JT-60 チーム: "JT-60U における MHD 不安定性とその制御" 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 千葉・千葉県 (2010)
- ② A. Isayama and the JT-60 team, "Overview of JT-60U Results Toward the Resolution of Key Physics and Engineering Issues in ITER and JT-60SA" 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea,

OV1-4 (2010)

- ③ 諫山明彦, 松永剛, 石井康友, 坂本宜照, 森山伸一, 鎌田裕, 小関隆久, JT-60 チーム, "JT-60U における NTM 磁気島のプラズマ回転への影響", 第 27 回プラズマ・核融合学会年会, 札幌(北海道) (2010)
- ④ A. Isayama, T. Kobayashi, K. Yokokura, M. Shimono, M. Sawahata, S. Suzuki, M. Terakado, S. Hiranai, K. Wada, J. Hinata, Y. Sato, K. Hoshino, S. Moriyama, K. Sakamoto and K. Hamamatsu, "Recent Progress in ECRF System Development for JT-60SA", Japan-Korea Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Uji (Kyoto) (2011)
- ⑤ A. Isayama, T. Kobayashi, K. Yokokura, M. Shimono, M. Sawahata, S. Suzuki, M. Terakado, S. Hiranai, K. Wada, J. Hinata, Y. Sato, K. Hoshino, S. Moriyama, K. Sakamoto and K. Hamamatsu, "Recent Results from the Development of the Electron Cyclotron Heating System for JT-60SA toward High-Power Long-Pulse Operations", 21st International Toki Conference, Toki (Gifu) (2011)
- ⑥ A. Isayama, T. Kobayashi, S. Moriyama, K. Yokokura, M. Shimono, M. Sawahata, S. Suzuki, M. Terakado, S. Hiranai, K. Wada, J. Hinata, Y. Sato, K. Hoshino, K. Sakamoto, K. Kajiwara, Y. Oda, K. Hamamatsu, M. Saigusa and C. Sozzi, "Progress in the Development of the ECRF System for JT-60SA", Fusion Energy 2012 (Proceedings of 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, the United States of America), FTP/P1-16 (2012)
- ⑦ 諫山明彦, 小林貴之, 森山伸一, 横倉賢治, 下野 貢, 澤島正之, 鈴木貞明, 寺門正之, 平内慎一, 和田健次, 日向 淳, 佐藤福克, 星野克道, 坂本慶司, 梶原 健, 濱松清隆, "JT-60SA に向けた電子サイクロトロン加熱システムの開発", プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 春日・福岡, (2012)
- ⑧ A. Isayama and the JT-60SA team, "Progress in the Development of JT-60SA toward Steady-State High-Beta Plasma Research", A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas, Beijing (China) (2013)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

諫山 明彦 (ISAYAMA Akihiko)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門那珂核融合研究所・
研究主幹
研究者番号: 9 0 3 5 4 5 9 7