

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889069

研究課題名(和文) 中心ソレノイドの磁束消費を最小限に抑えた先進プラズマ電流立ち上げシナリオの開発

研究課題名(英文) Development of the advanced plasma current ramp-up scenario with the minimum magnetic flux consumption of the central solenoid

研究代表者

若月 琢馬 (Wakatsuki, Takuma)

国立研究開発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・博士研究員

研究者番号：40734124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：TOPICS統合輸送解析コードを用いてJT-60SAで中心ソレノイドを用いることなくプラズマ電流を立ち上げるシナリオを構築した。中心ソレノイドを用いない運転ではプラズマの安定性限界に近い運転が求められるため、理想MHDモードの安定性解析を行った。低トロイダルモード数の安定性解析をMARG2Dコード、無限トロイダルモード数の安定性解析をバレーニング方程式に基づいて行った結果、中性粒子ビーム入射と電子サイクロトロン波の入射パワーを調整して圧力分布、電流分布を最適化することで、理想MHD不安定性を回避できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Plasma current ramp-up scenario with no central solenoid flux consumption in JT-60SA is investigated using an integrated modeling code, TOPICS. Since the plasma is near the stability boundary in such non-inductive scenarios, the stability of the ideal MHD mode is investigated. The stability of MHD modes with low toroidal mode numbers are investigated using MARG2D code, in addition, that with infinite toroidal mode number is examined based on the ballooning equation. As a result, the ideal MHD instability can be avoided when the pressure profile and the current profile are optimized using neutral beams and electron cyclotron waves.

研究分野：工学

キーワード：核融合プラズマ 統合コード シミュレーション 立ち上げ 磁束消費

1. 研究開始当初の背景

核融合発電を実用化するには高温・高密度のプラズマを長時間閉じ込めておく必要がある。現在核融合炉実現に最も近いのはトカマク型磁場閉じ込め方式であるが、トカマク炉が発電炉として実用化されるためには他の発電方法と比べ遜色のない、十分高い経済性が求められる。核融合炉の建設コストはトロイダル磁場コイルのサイズと磁場強度に大きく依存する一方、核融合出力密度はプラズマ圧力の自乗に比例するので、プラズマ圧力の閉じ込め磁場圧力に対する比が経済性の重要な指標となる。この限界はアスペクト比 ($A = R/a$, R :大半径 a :小半径)の逆数に比例することから、アスペクト比の低いトカマク炉設計が行われている。低アスペクト比形状を実現するためには、電磁誘導でプラズマ電流を駆動するために用いられているCSを小型化、ないし取り除くことが必要である。しかし、どの程度の磁束供給能力を持つCSが、炉心級プラズマの生成、維持に必要なか未だ定量化されていない。そのため、従来の大型トカマクと比べて低いアスペクト比を持ち、炉心級に近いプラズマを生成可能なJT-60SA超伝導トカマクにおいて、CSによる電流駆動をなるべく行わないプラズマの生成、維持に関する研究が計画されている。

2. 研究の目的

CSのサイズはプラズマ電流を立ち上げる際にどの程度CSによる電流駆動が必要とされるかで決まる。そこで、JT-60SAの実験で中性粒子ビーム入射(NBI)および電子サイクロトロン波(ECW)を用いてプラズマ電流を駆動し、CSの電流駆動を用いずにプラズマ電流を立ち上げるシナリオを構築する。このシナリオの構築を通じ、実際の発電を行う炉においてCSを削減した場合、NBI、ECW等の加熱、電流駆動源への要求をはじめとし、どのような運転法が求められるかを明確化し、コンパクトな核融合炉実現へ向けた研究を加速させることを目的とする。

3. 研究の方法

TOPICS 統合輸送解析コードを用いて、JT-60SAでCSを用いずにプラズマ電流を立ち上げるシナリオを研究する。TOPICSはプラズマの密度分布、温度分布、電流分布を輸送モデルに従って無矛盾に解くことができるため、CSを用いずにプラズマ電流を立ち上げるために、どの程度NBI、ECWを入射する必要があるか、そしてその時の電流分布、圧力分布の時間発展を計算することができる。

また、検討したシナリオが理想MHD安定性を満たしているかを確認するため、TOPICSとMHD安定性解析コードMARG2Dとの連携計算を行った。さらに、MARG2Dで解析できるトロイダルモード数 n の小さいMHDモードに加えて、無限 n のバルーニングモードの安定性も、バルーニング方程式から計算した。これらのMHDモードの安定性を保ちながらCSを使わずにプラズマ電流をランプアップするための

電子密度の選び方や、NBI、ECWの入射法を研究した。

4. 研究成果

統合輸送コード TOPICS を用いて JT-60SA において 0.6 MA から 2.1 MA まで、CS による電流駆動を行うことなくプラズマ電流を立ち上げるシナリオを構築した。構築したシナリオの例を図 1 に示す。NBI、ECW を用いてプラズマ電流を駆動することで、CS が駆動する電流量が 0 未満になるオーバードライブ状態を達成し、CS による誘導電流駆動を用いずにプラズマ電流を立ち上げた。このとき、プラズマ電流の立ち上げ時にプラズマの磁場エネルギーを増加させるために必要となる CS 磁束消費 ($I_{INT} + I_{EXT}$) がオーバードライブしたことによる削減 (I_{RES}) によって打ち消され、CS を含めた外部コイルの磁束消費なしでプラズマ電流が立ち上げられている。また、JT-60SA では図 2 に示すように NBI、ECW を様々な位置に入射できる。また、NBI は 85 keV の入射エネルギーを持つ P-NB と 500 keV の入射エネルギーを持つ N-NB がある。高エネルギーの N-NB は高い電流駆動効率を持つが、プラズマ密度を高くすることのできないプラズマ電流立ち上げ初期では吸収効率が悪くなってしまふ。そのため、プラズマ電流立ち上げ前半では P-NB と ECW を用いて電流駆

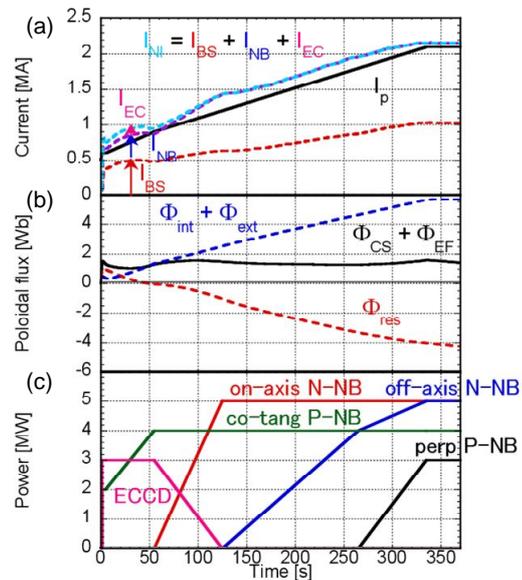


図 1: TOPICS による JT-60SA の 0.6 MA から 2.1 MA までの電流立ち上げのシミュレーション例。(a)プラズマ電流 I_p 、非誘導駆動電流 I_{NI} とその 3 つの成分(自発電流 I_{BS} 、NBI 駆動電流 I_{NB} 、ECW 駆動電流 I_{EC})。 I_{NI} が I_p をオーバードライブしている。(b)電流ランプアップ中の CS を含めた外部制御コイルの磁束消費 $I_{CS} + I_{EF}$ がゼロになっている。(c)JT-60SA で効率よく電流駆動をするために NBI、ECW の入射パワー波形を最適化した。

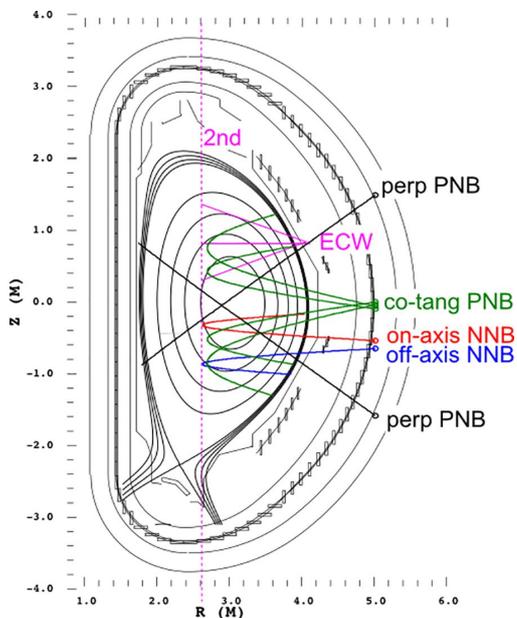


図2: JT-60SAにおけるNBI、ECWの入射位置とプラズマの磁気面の関係。

動を行い、後半では N-NB を中心に電流駆動を行うことで、高い吸収効率を保ちながら電流駆動を行えるシナリオを構築した。

このプラズマ電流立ち上げシナリオでは非常に強い加熱、電流駆動パワーを入射するため、プラズマの圧力の閉じ込め磁場圧力に対する比が大きくなり、プラズマが不安定になる可能性があった。そこで、MARG2Dを用いた安定性解析を行った結果、プラズマ電流立ち上げ初期に H-mode 遷移することで、不安定性を回避できることが明らかになった。これは、H-mode 遷移することで、プラズマ内部に加えて周辺部にも輸送障壁を形成されて、局所的な圧力勾配が低減されたこと、そして、圧力勾配が急峻になる位置がプラズマ

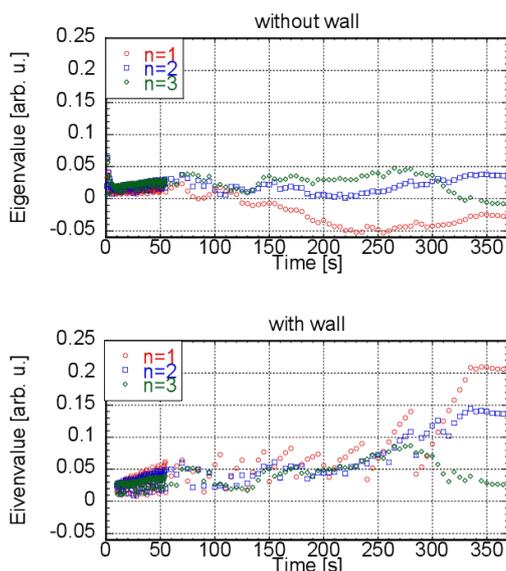


図3: MARG2Dで計算しMHDモードの固有値。固有値が負の時にモードは不安定になる。導体壁の効果でn=1のモードが安定化されている。

周辺部に近づいたため、プラズマを取り囲む導体壁による安定化効果が大きくなったことによる結果であると考えられる(図3参照)。

低nの理想MHDモードが安定な時でも、局所的な圧力勾配が急峻になると無限nのバルーニングモードが不安定化する。そこで、低nの不安定性に加えて無限nのバルーニングモードを安定化できる条件を調べたところ、内部輸送障壁の位置での圧力勾配をさらに下げることが明らかになった。

加熱、電流駆動によってどの程度圧力分布を操作できるかを計算するためには、プラズマの密度分布、温度分布、電流分布を輸送方程式に従って無矛盾に解く必要がある。これまで、温度分布、電流分布の発展は既存のトカマク装置での実験結果と良く一致するモデルが開発されてきたが、密度分布の発展を解くためのモデルで、実験結果との比較が十分に進んでいるモデルは存在しない。そこで、JT-60SAの前身であるJT-60Uの実験結果の統計的な解析から、熱拡散係数と粒子拡散係数の間に比例関係が存在すると指摘されていることに注目した。この関係に基づき、温度分布を解くモデルを拡張して密度分布を解くモデルを構築し、加熱、電流駆動に対する

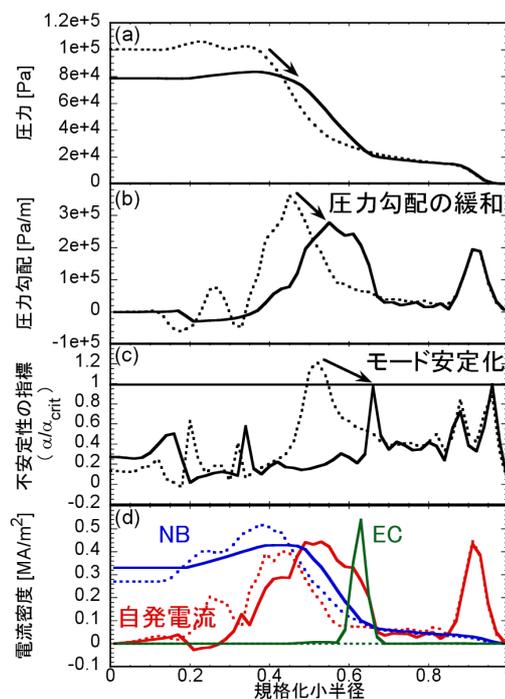


図4: 2.1 MAまでプラズマ電流を立ちあげた直後の (a) 圧力分布、(b) 圧力勾配、(c) 規格化圧力勾配のバルーニングモードの安定性限界 α_{crit} に対する比、(d) 電流密度分布を示す。点線は、図1で示したプラズマで、無限nバルーニングモードが不安定。実線は密度を半分程度に下げ、NBIパワーを8 MWまで下げるとともに7 MWのEC入射を行うことで得られた安定なプラズマ。

圧力分布の応答を調べた。

その結果、プラズマ密度を半分程度に下げ、電流駆動効率を上げることで、オーバードライブに必要なNBIパワーを17 MWから8 MWまで減らすことが可能になり、オーバードライブ状態を維持しつつ局所的な圧力勾配を低減できることが明らかになった。さらに、ECWによる局所的な電流駆動で安定性限界を高めることにより、図4に示すように、無限nバルーニングモードを安定化できることが明らかになった。

このシナリオでは入射パワーが制限されるため、プラズマ電流の立ち上げに500秒以上の長い時間がかかると予想される。しかし、無限nバルーニングモードは局所的な閉じ込めの劣化は引き起こすものの、プラズマのディスラプションにつながるわけではない。最大21 MWを入射するシナリオでは、ディスラプションにつながる低nのMHDモードを安定に保ちながら、150秒程度でプラズマ電流を立ち上げられることも示されている。

以上の研究結果から、JT-60SAでプラズマ密度、NBI、ECWの入射パワー調整によって、圧力分布、電流分布を適切にコントロールすれば、CSによる電流駆動を用いずにプラズマ電流をランプアップできる可能性があることを明らかにした。これにより、JT-60SAの実験を通じて、同様の電流ランプアップ手法を発電炉に適用し炉を小型化するには、どのようなNBI、ECW入射法や、どの程度の立ち上げ時間、プラズマ密度で運転する必要があるかを明らかにできることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

(1) Takuma WAKATSUKI, Takahiro SUZUKI, Nobuhiko HAYASHI, Junya SHIRAIISHI, Shunsuke IDE, Hirotaka KUBO and Yuichi TAKASE, Investigation of pressure profile controllability during plasma current ramp-up with reduced magnetic flux consumption in JT-60SA, Plasma and Fusion Research, 査読有, 11 巻, 2016, pp. 2403068 DOI: 10.1585/pfr.11.2403068

(2) T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide and Y. Takase, Simulation of plasma current ramp-up with reduced magnetic flux consumption in JT-60SA, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, 57 巻, 2015, pp. 065005 DOI: 10.1088/0741-3335/57/6/065005

(3) T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide, H. Kubo and Y. Takase, Current ramp-up scenario with reduced central solenoid magnetic flux consumption in JT-60SA, Europhysics Conference Abstracts, 査読無, 39E 巻, 2015, pp. P5.144

〔学会発表〕(計 3 件)

(1) T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide, H. Kubo and Y. Takase, Investigation of pressure profile controllability during plasma current ramp-up with reduced magnetic flux consumption in JT-60SA, 25th International Toki Conference, セラトピア土岐(岐阜県土岐市), 2015年11月3-6日

(2) T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide, H. Kubo and Y. Takase, Current ramp-up scenario with reduced central solenoid magnetic flux consumption in JT-60SA, 42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, 2015年6月22-26日

(3) T. Wakatsuki, et al., Simulation of plasma current ramp-up with reduced magnetic flux consumption in JT-60SA using TOPICS transport code, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, New Orleans, LA, USA, 2014年10月27-31日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若月 琢馬 (WAKATSUKI Takuma)

国立研究開発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・博士研究員

研究者番号：40734124