

論文内容の要旨

論文題目 低コスト中性粒子ビーム装置の開発と
高ベータ球状トーラスへの入射

氏名 今中 平造

磁気閉じ込め核融合研究はトカマクを中心として、研究が盛んに進んでおり国際熱核融合実験炉 ITER により、将来の核融合商業炉に必要な物理的、工学的な様々な検証が予定されている。一方でトカマク方式は高い安定性の引き換えとしてベータ値(=プラズマ圧力/磁気圧)が数%と低く、核融合プラズマの高い圧力を支えるのに、低ベータのため強力な磁気圧を発生させるコイル群を初めとして装置構造体に膨大なコストがかかってしまう。そのため、トカマク方式での商業炉は現実的ではない。

そこで、トカマクに代わる次世代の閉じ込め方式として高ベータな配位の研究も盛んに行われており、コンパクトトーラスの分類される配位は総じて炉構造がコンパクトでシンプルであり、中には高いベータ値を持ち次世代炉としての有力な可能性を秘めているものも少なくない。

球状トカマクはコンパクトトーラスに属する配位であり、優れた閉じ込め性能と高いベータを兼ね備えた配位として簡素な炉構成、低コストな核融合炉の候補として盛んに研究が行われている。球状トカマクではさらに高ベータな状態としてバルーニングモードの第 2 安定領域が注目されており、この領域で安定な配位が実現出来ればベータ値が 50%を超える閉じ込め効率の大幅な改善が期待でき、将来の商業炉の有力な一形態となりえる。

逆転磁場配位(FRC)もコンパクトトーラスに属する配位であり、トロイダル磁場を持たず、ポロイダル磁場のみでプラズマを閉じ込めている。そのため、ベータ値は原理的に 100%となり飛びぬけて閉じ込め効率の高い配位であり、安定で定常な閉じ込めが達成されれば核融合炉の大幅なコストダウンだけでなく、D-T 炉の後継炉である D-H_e³ 炉としての利用も期待されている。FRC の問題点は球状トカマクに比べてプラズマ閉じ込め性能の点で大きく劣っており、その内部構造や不安定性についても不明な点が多く残されていることである。そのため、現時点では実用炉としては球状トカマクの方が有力であると考えられている。

プラズマ合体装置TS-4ではプラズマ合体という方法によりコンパクトトーラスの急速な加熱や、FRCプラズマの立ち上げに利用している。プラズマ合体は2つのコンパクトトーラスを磁気リコネクション現象を介して合体させ、その際開放される磁場エネルギーがプラズマ粒子(主にイオン)の加熱エネルギーなるというものであり、高いベータ値を持つ球状トカマクや、FRC配位の生成が可能である。

プラズマ合体による加熱効果はプラズマの磁場強度と比例関係にあることが理論式から予想され、ドップラー広がりを用いたイオン温度計測からその効果が確認されている。計測結果の外装では1T程度の磁場を持つプラズマであればITERと同程度の温度を実現できるという強力な加熱効果がある。また、FRC生成過程ではトロイダル磁場エネルギーも完全に解放され加熱エネルギーに使用されるため、最も強力な過熱エネルギーが得られる。

球状トカマクでは加熱効果以外にも第2安定領域へのアクセス法として利用が考えられており、FRCを生成後に外部トロイダル磁場の印加で第2安定な球状トカマクを生成する方法が提案されている。今回は球状トカマク同士の合体により第2安定な球状トカマクの生成を試みた。図1はバルーニングモードの安定性判別の結果を示した図であるが、外部磁場コイル電流値(I_{tfc})の強化により不安定領域を第2安定領域に向けて横切っていくのが確認できる。今後の研究で更なるトロイダル磁場の強化やプラズマエネルギーの向上によりこの方法での第2安定化の実現が期待される。

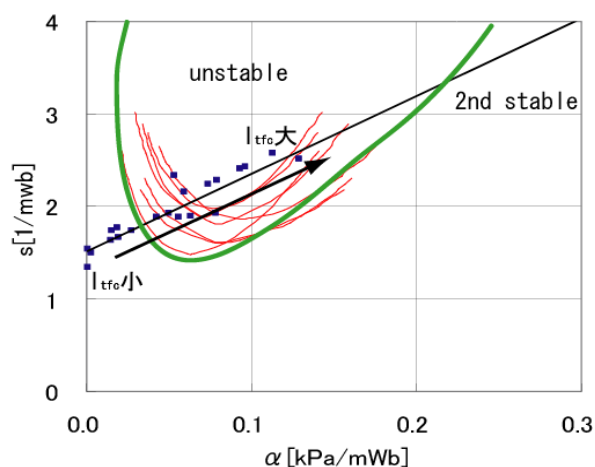


図1. プラズマ合体球状トカマクのバルーニングモードに対する安定性.

青点は各条件での実験結果, 赤線は各実験で得られた安定境界,
緑線は想定される安定境界

中性粒子ビーム入射(NBI)加熱はプラズマの追加熱の方法のひとつである。NBIは電場により高速に加速された中性粒子ビームをプラズマに入射し、ビーム粒子とプラズマ粒子のクーロン衝突を介してビーム粒子の持つ運動エネルギーをプラズマ粒子に与え、プラズマを加熱するものである。NBIは磁気閉じ込め核融合プラズマの加熱方法としては最も実績があり、信頼性が高い。

一方で、NBI装置は高コストで定期的で専門的なメンテナンスが必要であるため、トカ

マクにかわる次世代核融合炉としての研究を進めているコンパクトトーラスの中型以下の装置への導入は進んでいない。

そこでイオン源を高コストでメンテナンスが必要となっていた従来のフィラメント方式からファラデーカップを用いた方式に切り代えることで低コストとメンテナンスの容易さを同時に実現した。図2は開発したNBI装置の構成図である。

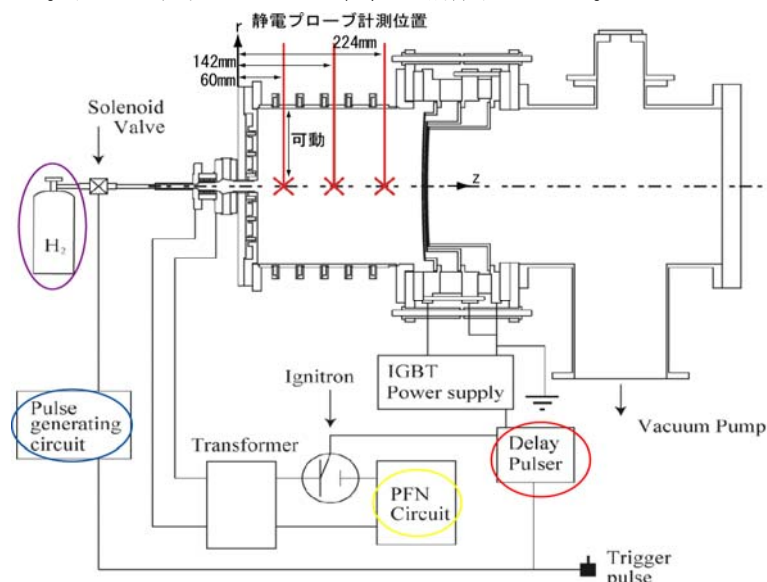


図2, 新たに開発した中性粒子ビーム入射装置

このNBIのスペックはターゲットであるTS-4のコンパクトトーラスへの入射を想定しているため、15kVと比較的低い加速電圧で、入射パワーを確保するために20Aというビーム電流を設定している。また、ビーム持続時間は1msecのパルス運転を想定している。

ワッシャーガンはNBIへの利用例がほとんど無いため、開発中のNBIが設計どおりのスペックを示し、ターゲットプラズマへのエネルギー注入が確認できれば、低コストNBIとして今後、他の幅広い中型装置への導入が期待される。

ワッシャーガンの調整の結果、図3のようなビーム電流波形が得られた。

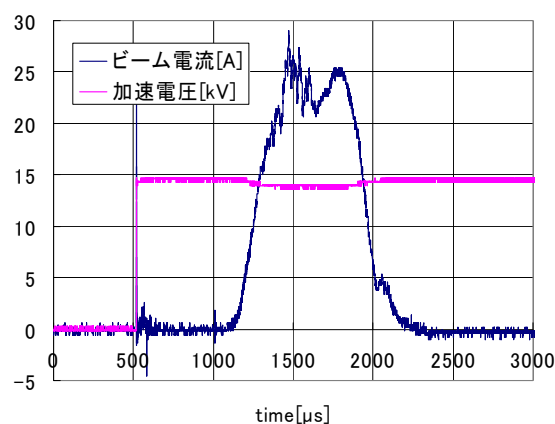


図3. NBIのビーム電流と加速電圧の時間変化

この結果から、加速電流 20A 以上が達成され、ビーム継続時間も 15A 以上で 600 μ sec 以上あり、TS-4 プラズマの加熱時間としては十分である。この結果から、実際の TS-4 装置合体球状トカマクに入射してみたところ、僅かにプラズマエネルギーが向上している結(図 4)が得られており、今後の検討、調整により更なるエネルギー注入が実現出来れば新たな NBI 装置として提案できる。

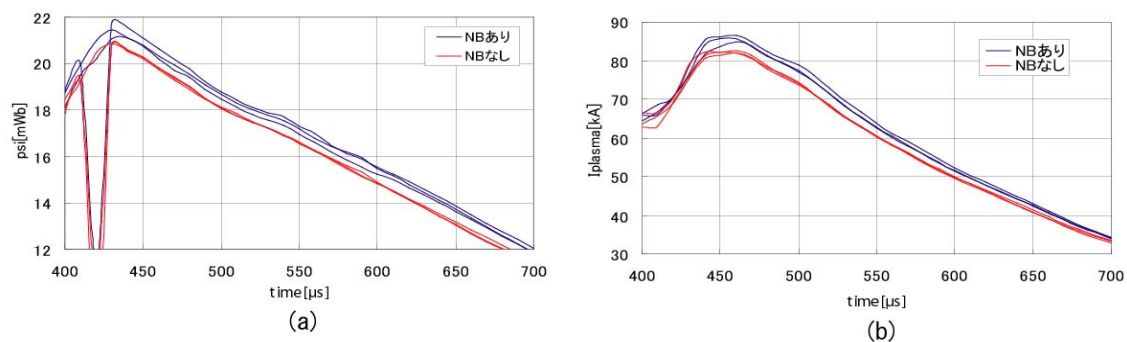


図 4. NBI 入射による球状トカマクの(a)プラズマ磁場の変化と(b)プラズマ電流の変化