

ITER 及び JT-60SA に向けた大電流負イオンビームの長パルス化の進展

日本原子力研究開発機構 市川雅浩、平塚淳一

核融合炉の早期実現に向けた実験装置である ITER 及び JT-60SA では、プラズマ加熱及び電流駆動のために、高エネルギー負イオン源を用いた中性粒子入射 (NBI) 装置が主加熱装置として利用される。日本原子力研究開発機構では、500 keV, 22 A, 100 s の負イオンビームを生成する JT-60SA 用負イオン源/加速器、1 MeV, 40 A, 3600 s の負イオンビームを加速する ITER 用加速器を実現するための開発研究を進めている。このような大電流・高エネルギーの負イオン源/加速器は JT-60U 及び LHD でのみプラズマ実験に実用化されているが未だ開発段階であり、近年、真空耐電圧研究の進展から高エネルギー化に目処を得て、現在、負イオンビームの長時間生成・長時間加速を目指した技術開発が進行中である。

負イオンビームの長時間生成に向けては、近年、JT-60SA 用負イオン源を用いて 15 A の大電流負イオンビームを 100 秒生成することに成功しているが、パルス幅が 60 秒程度を超えると負イオン生成が徐々に劣化するという長時定数の課題が明らかになった。現在、長パルス中にプラズマ生成部の壁温が上昇する事により、内壁に吸着したセシウムがプラズマ電極上にリサイクリングされる現象に着目しており、壁面温度と Cs の挙動を基礎実験からモデル化しているところである。本モデルからは、チェンバー温度が 60°C を超えると、内壁からの脱離 Cs が増加して、プラズマ電極表面に堆積し、Cs 層が厚くなる傾向が得られており、過度な Cs リサイクリングにより負イオン生成の劣化が示唆されている。

22A の大電流負イオン生成に向けては、アーキングと呼ばれるプラズマ生成部内の短絡放電現象による電流の制限が大きな課題である。これについては、運転開始直後のチェンバー壁面からの脱離酸素や長期間の運転で内壁から脱離する酸素や Cs などの不純物の影響に着目しており、まず酸素に起因したアーキングについて調べた。長パルス運転時の壁面温度上昇により酸素脱離量の増加を模擬するためにチェンバー外部から酸素ガスを導入し、酸素量の増加によりアーキング発生の臨界アークパワーが通常運転時の値 60 kW から低下していき、ほとんど酸素のみのプラズマになると半分にまで減少することが判明し、酸素が大強度長パルスイオン源においてアーキングを誘起する要因の一つであることが分かった。

負イオンビームの長時間加速に向けては、ITER NBI を模擬した MeV 級加速器を用いて、ITER 級の 1MeV ビームの開発を実施中である。これまでの MeV 級加速器では、引出電極に装着された電子抑制用磁石により負イオンビームが偏向されてその一部が加速電極の熱負荷となり、1 MeV, 200 A/m² の高電流密度ビームのパルス幅が 0.4 秒に制限されていた。そこで、高精度なビーム偏向の補正のために、空間電荷効果を考慮して 3 次元の多孔ビームの軌道計算を実施し、高電流密度ビーム引出の可能な引出電極を開発した。また、負イオンビームが加速電極に衝突する領域やその熱負荷の分布を、電極に設置した 30ch の熱電対から明らかにし、その結果を基に、衝突面積を低減すると共に、衝突時に発生する二次電子を抑制する構造の電極を開発した。これにより全電極での熱負荷がビーム加速電力の 15% から 9% に下がり、973 keV, 190 A/m² のビームをブレイクダウンせずに 60 秒間引き出すことに世界で初めて成功した。

現在、これらの結果を基に、更なる長パルス化を目指した開発を進めている。