

JT-60SA 用 500keV 負イオン源の開発

○大島克己^{A)}、小島有志^{A)}、花田磨砂也^{A)} 田中豊^{A)}、河合視己人^{A)}、秋野昇^{A)}、藻垣和彦^{A)}

^{A)}日本原子力研究開発機構 トカマクシステム技術開発ユニット

1 はじめに

日本原子力研究開発機構では、核融合実験装置(JT-60)を用いて炉心プラズマの長時間維持を目指した研究開発を行ってきた。現在、JT-60 を改修し、超電導コイルにて炉心プラズマの定常維持を目指した JT-60SA(JT-60 Super Advanced)計画を日本と欧州の共同で進めている^[1]。JT-60SA 計画では、国際熱核融合実験炉 (ITER) のサテライトトカマクとして ITER を支援した実験を行うと共に、原型炉に向けた高圧力定常プラズマの研究開発を行う。この計画を推進するにあたり、大出力・高エネルギーを有する負イオン源中性粒子入射装置 (ビームエネルギー500keV, 入射パワー10MW, パルス幅 100s) が求められている。しかし、これまで負イオン源の耐電圧性能が 400kV 程度と設計値の 490kV よりも低く、その耐電圧不足により入射パワーやパルス幅が制限されていることが大きな問題であった。また、原子力機構で ITER 用に開発している負イオン源も耐電圧不足に直面しており、耐電圧の改善は高エネルギー負イオン源の大きな課題となっていた。

JT-60 負イオン源の内部の電極間隔は、直径 160 mm の小型ロゴスキー電極で得られた結果に基づき設計された。しかしながら、JT-60 負イオン源の電極は支持枠を含めると直径 1.5 m 程度と非常に大きく、かつ、電極支持枠などに局所的に電界が集中しており、小型ロゴスキー電極を用いた耐電圧設計のための試験体系と大きく異なっていた。そこで、JT-60 負イオン源の耐電圧改善を目的として、同イオン源を用いて耐電圧の加速電極間のギャップ長依存性を調べ、同結果に基づく負イオン源の改造を実施した。その結果、加速電極端部や電極支持枠の角部等に生じる局所電界を低減することにより、ビームを加速しない無負荷状態での負イオン源の耐電圧を、電源の限界値である 500kV に大幅に改善することに成功した。その際の絶縁破壊確率は約 10%程度と極めて低い値であり、高電圧を安定に保持することに成功している。さらに、改造後の負イオン源を用いて、500keV, 3A の負イオンビーム加速を達成し、今まで大きな問題であった大型負イオン源の耐電圧を大幅に改善した。本報告書では、大型負イオン源の耐電圧改善に関する対策及び結果について報告する。

2 これまでの負イオン源の耐電圧改善対策

図 1 に JT-60 用負イオン源を示す。この負イオン源は、3 段の静電加速器を有しており、高電圧を印加した際に各段の電極間及び絶縁材である FRP 管に、強い電界が生成される。負イオン源の耐電圧性能は、大きく分けて電極・支持枠 (真空長ギャップ放電)、FRP (真空沿面放電) 及び球ギャップ (大気圧放電) で決まる。これまで、イオン源内部の真空中の FRP 絶縁管と金属製の電極支持枠が接触する箇所(電界三重重点)の電界緩和やイオン源外部の大気側の球ギャップ長の最適化等の対策を実施してき

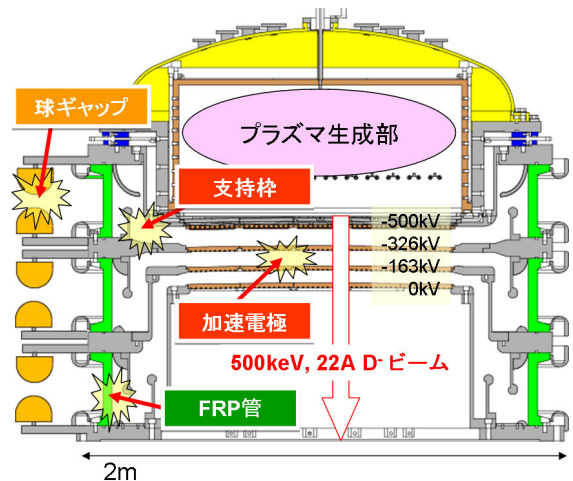


図 1 JT-60 負イオン源

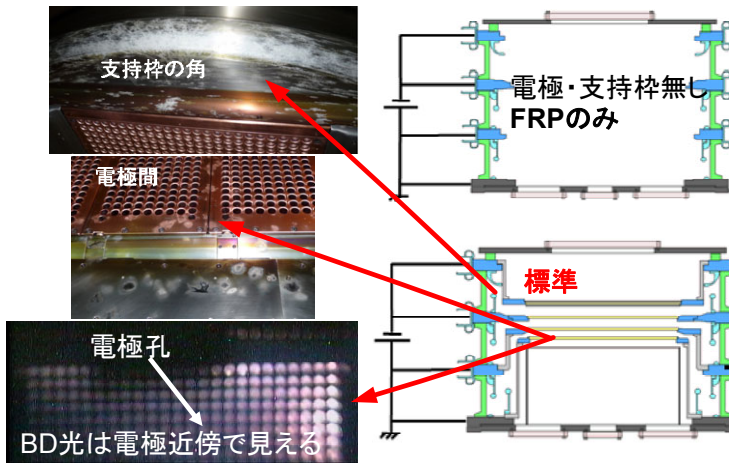


図2 支持棒・加速電極部の放電痕

たが、設計値を満たす耐電圧を得ることができなかつた。そこで、図2に示すように加速電極・支持棒の無い状態で単段耐電圧試験を行ったところ、設計値を満たす単段 170 kV の耐電圧を得たことや、絶縁破壊時に電極間から発光が観測されること、また、内部点検時に支持棒角部に放電痕が観測されることから、電極間での絶縁破壊が支配的と考えられ、加速電極・支持棒の耐電圧に着目して耐電圧の改善を行った。^[2]

3 耐電圧のギャップ長依存性

まず、500 kV が保持可能なギャップ長を決めるために、実機負イオン源を用いて単段耐電圧のギャップ長依存性を調べる必要があった。そのためには電極間距離（ギャップ長）を自由に変える必要があったが、負イオン源の構造上の制約から、電極間隔を狭めることは容易であったが伸長することが困難であった。そこで、電極支持棒の接続方法を精査し、支持棒の取り付け位置を工夫することによって、ギャップ長が伸長できることを確認し、耐電圧試験を行った。その結果、図3に示す様に加速器の耐電圧設計に用いていた小型電極の 100 倍程度の面積を有する実機負イオン源では、小型電極に対して半分程度の耐電圧性能であることが分かった。その原因の一つと

して、電極端部や電極支持棒の角部等に生じる局所電界による絶縁破壊が考えられる。また、加速電極間の距離を 85mm 以上に広げても耐電圧が飽和することが分かった。この耐電圧の飽和の原因は、図4中で上下方向に加速電極間の距離を広げても、横方向の距離は変化しないために、加速電極間距離よりも短い距離に設定されていたビーム放射シールド（陽

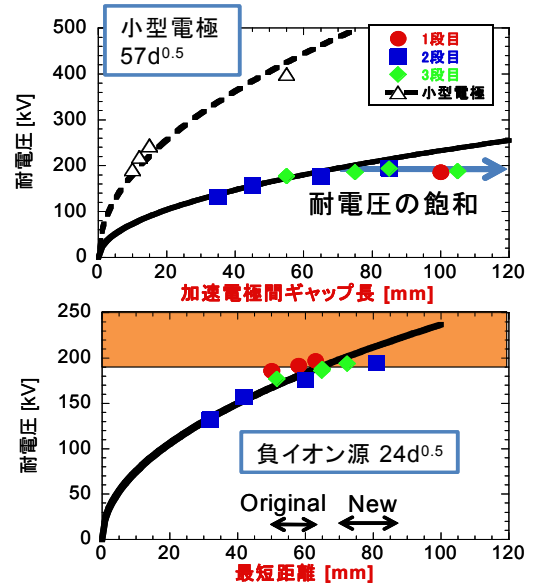


図3 耐電圧のギャップ依存性

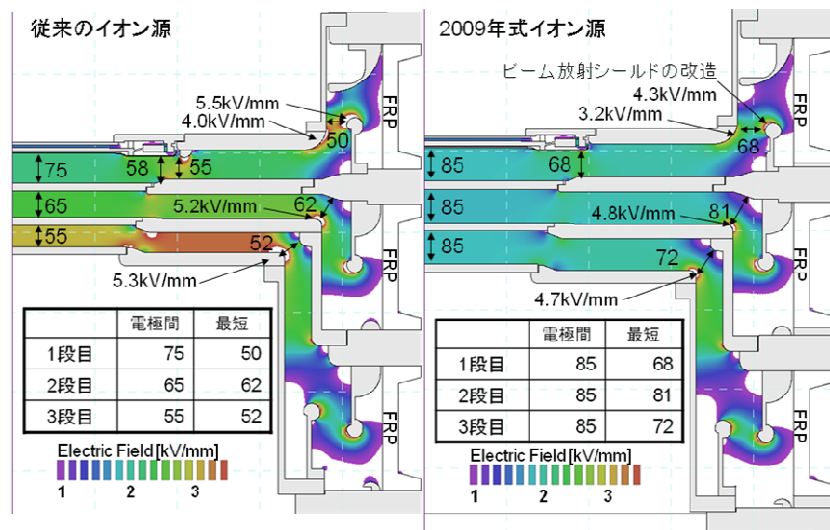


図4 従来と2009年式イオン源の電界分布

極) と支持枠 (陰極) 間の耐電圧によって制限されていたためであると推察した。そこで、負イオン源内部の陰極と陽極との距離を単段あたり 200kV の電圧を与えるギャップ長(68mm 以上)に調整するとともに、同条件を満足するビーム放射シールドを再設計した。その結果、本改造後の耐電圧特性は、図 3 に示すように、単段あたり 190 kV 以上に改善することができた。その際、改造後の負イオン源内部で最も高い電界は従来の 5~6 kV/mm 程度から 4~5 kV/mm に低減させている。

4 負イオンビームの 500kV 加速試験

改良した負イオン源で 3 段の耐電圧試験を行った結果を図 5 に示す。まず、ビームを加速しない無負荷コンディショニングを行った。コンディショニング開始後約 1 時間程度で、加速電源の出力限界値である 500 kV に到達した。これは 10^{-4} Pa の真空状態で得られた結果であり、ビーム加速時にガスを導入すると 10%程度耐電圧が上昇するため、ビーム加速時よりも厳しい条件で得られたものである。また、500kV 印加時の絶縁破壊確率は 10%程度と極めて低く、改良後の負イオン源は安定に高電圧を保持した。加えて、高電圧の長時間保持の可能性を調べるために無負荷耐電圧の長パルス実験を行った。その結果、490kV の加速電圧を加速電源のブリーダ抵抗の温度上昇で制限される 40 秒まで保持する事に成功した。印加パルスを伸長する際に無負荷耐電圧の劣化は観測されず、長パルス化に向けた見通しを得ている。

さらに、5 枚ある加速電極の中心の電極 1 枚のみでビーム加速試験を実施した。その結果を図 6 に示す。無負荷コンディショニング後すぐに、500keV の加速エネルギーで水素負イオンを加速することに成功した。同時に、18m 下流に設置されたカロリメータで測定したビーム電流値は約 3A である。これにより、1A を超える負イオンビームを世界で初めて 500kV まで加速することに成功した。また、今回得られたビーム電流値 (3A) の範囲では、加速電圧の耐電圧の劣化は観測されず、ビーム加速時の耐電圧も大幅に改善した。

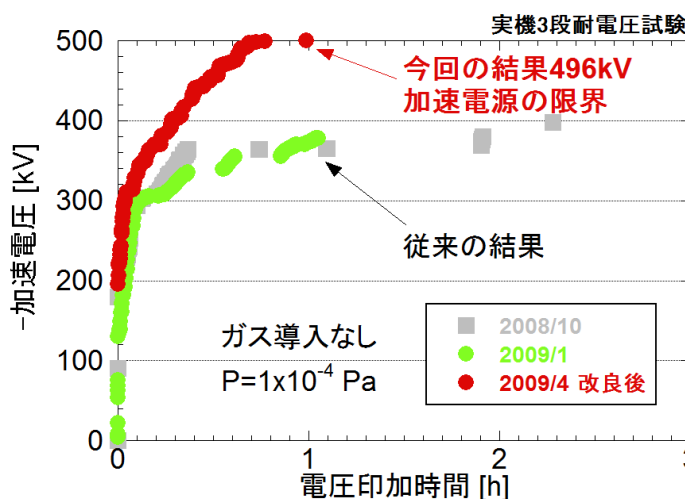


図 5 耐電圧試験結果

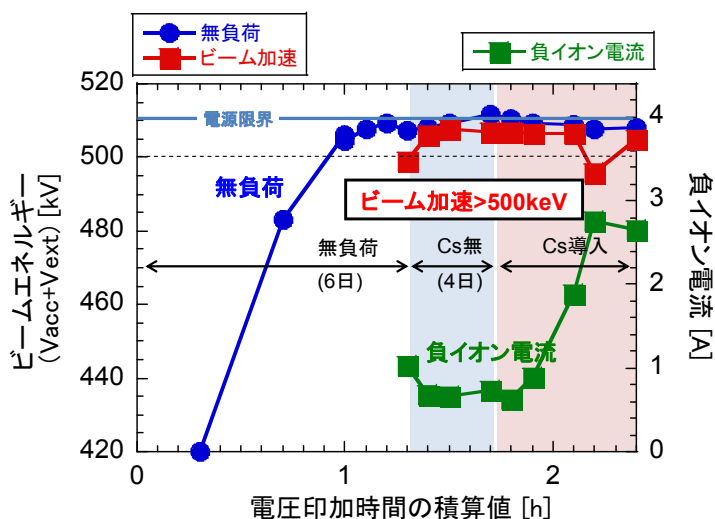


図 6 ビーム加速試験結果

5 まとめ

今まで分からなかった大面積電極の耐電圧のギャップ長依存性を、実機負イオン源を用いて明らかにし、その結果を基に負イオン源加速部の大幅な耐電圧改善を行い、真空状態で3段 500 kV の耐電圧を実現した。加えて、ビーム加速試験において、世界で初めて 500 keV, 3 A のビーム加速に成功した。

今回の結果は、大出力・高エネルギーを有する負イオン中性子入射装置を求められている JT-60SA 計画での 500 keV, 10 MW, 100 s 入射に向けて、耐電圧性能が大きく進展したものであり、将来の加速器に利用する耐電圧設計の指針につながる。また、この結果を受けて ITER 用負イオン源の加速器も同様な改良に着手し、耐電圧の改善を図る予定である。

参考文献

- [1] 菊池 満他 : “日欧の幅広いアプローチ計画と国内計画による JT-60SA 計画”, プラズマ・核融合学会誌, 82, 8, P455-469 (2006)
- [2] 篠崎信一 “負イオン源の耐電圧性能の改善” 平成 20 年度京都大学総合技術研究会 02-IV-1
- [3] 小島有志 “JT-60 負イオン源における耐電圧改善” 第 26 回プラズマ核融合学会年会 4pC03