特 集

核融合研究開発の最近の状況

6 核融合工学研究開発の現状

6.2 中性粒子ビーム加熱システム

柏木美恵子[†], 戸張博之, 小島有志, 梅田尚孝, 平塚淳一, 市川雅浩

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー研究開発部門那珂核融合研究所

ITER プロジェクト部NB加熱工学研究グループ

311-0193 茨城県那珂市向山801-1

[†]kashiwagi.mieko@qst.go.jp

中性粒子ビーム発生源となる負イオン源では、加速器の絶縁破壊、及びビームによる電極への熱負荷が高いことが耐電圧・長パルスの観点で問題であったが、加速器で用いる大面積電極の耐電圧特性を明らかにして絶縁破壊を抑制し、高精度の負イオンビーム軌道制御法を考案して電極熱負荷を低減した結果、ITER で必要な1MeV ビームの60秒間連続生成を実証した。イタリア (Consortio RFX) に建設中のITER NB 実機試験施設に向けた1MV 直流高電圧電源機器開発では、機器開発を通じて機器製作を完了させ、2017年時は全体の9割の機器を据付け、2018年に電源統合試験を実施する計画で順調に進展している。

Key Words: neutral beam system, negative ion source, NBTF (Neutral Beam Test Facility), DC high voltage power supply

1. はじめに

中性粒子ビーム加熱システム (NBI) は、図1に示すように、負イオン源で高エネルギー負イオンビームを発生し、これを電氣的に中性な粒子 (原子) に変換した後、強力な磁場に閉じ込められた核融合プラズマに入射し、これを加熱・電流駆動するための装置である。既に、LHDやJT-60では、加熱の中核装置としてエネルギー数百keV以上の高エネルギー負イオンNBIが使用されている¹⁾。ITERでは、現在世界最高出力を有するJT-60 NBIに比べ、エネルギー密度、電流共に約2倍となる1MeV, 40A (電流密度200A/m²) の負イオンビームを3600sにわたり安定に発生することが求められている。そこで、大容量 (～1m³) 高周波負イオン生成部と大面積電極 (～1m²) を有する5段の静電加速器を組合せた負イオン源を用いてこの要求

性能を実現する計画である。量子科学技術研究開発機構機構では、JT-60、及びMeV級イオン源試験装置 (MTF) における負イオン源開発研究を通じて、大電流・高エネルギー・長パルスの負イオンビーム加速の実証を目指すと共に (図2)、イタリア (Consortio RFX) に建設中のITER NB 実機試験施設 (NBTF) に向けてNBI用高電圧電源機器製作を進めてきた。JT-60及びITERに向けた負イオン源開発、NBTFに向けた機器製作進捗状況について報告し、原型炉

図1 NBIからビーム入射の概要 (Color online)

図2 ITERに向けた1 MeV ビーム開発 (Color online)

用NBIに向けた見通しを示す。

2. 負イオンの大電流化と高エネルギー加速

負イオンの大電流化については、負イオンの消滅反応を抑制する磁場配置の考案、負イオン生成を促進するセシウム添加などを経て、負イオン電流を4-5倍まで増加させる技術確立し、1990年代に十アンペア級の負イオン生成を実証した。JT-60SAに向けては、パルスを従来の10秒から100秒まで延長することが求められているため、負イオンを長時間安定に生成するための電極温度制御法を確立し、15A、100秒を達成している。これらの成果は、ITERの負イオン生成部の設計にも取り入れられている。

負イオンの高エネルギー加速に向けては、当初、JT-60、及びMTFにおける1MeV加速器試験共に、耐電圧が低く、定格の8割程度に留ま

るという問題があった。加速器内の放電光や放電痕を調査した結果、加速電極に設けられた約1000個のビーム通過用孔、また電極を支える支持構造物の角部など、局所的に電界が集中する場所が放電の起点となり絶縁破壊を生じる傾向を掴んだ。そこで、これら電界集中箇所の耐電圧特性を調べ、これを元に加速電極間ギャップを調整した結果、JT-60では定格の500 keVビームを達成した²⁾。

しかし、1 MeV加速器試験では、電極の熱負荷を十分低減できず、高エネルギー・長パルスの同時達成が難航した。この原因を調べるために、3次元負イオン・電子軌道解析コードを改良し、負イオンと残留ガスとの衝突による負イオン電流減少過程、及び二次粒子発生過程を考慮すると共に、加速器全体の広範な電界分布まで考慮して解析した結果、1 MeV加速器の長い加速ギャップにおいては、空間電荷反

図3 長パルスに向けた加速電極の改良 (Color on-line)

図4 1 MeV ビーム長パルス試験の進展 (Color on-line)

発、及び加速器内部構造が作る電界の歪みによる負イオン軌道の曲がりが無視できないほど大きく、その結果、負イオンが電極に衝突すること、また、その際に2次電子が発生し、電極熱負荷の要因になっていることを明らかにした。そこで、負イオン軌道の曲がりを補正し、電極熱負荷を低減できる電極形状を考案した結果 (図3)³⁾、図4に示すようにITER要求相当 (1 MeV、電流密度200 A/m²) で60 sのビーム加速を達成した⁴⁾。現在は、1000 s級の連続運転を目指している。

3. NBIの電源開発

ビーム生成時に加速電極間で絶縁破壊が生じた際、そのエネルギーが電源に損傷を与えるため、システム保護が重要な課題であった。そこで、磁性体を用いてエネルギーを吸収するコアシナバ回路、電源を高速遮断する高速インバー

タなどを開発し、JT-60用負イオン源の安定運転技術を確認した。これらの成果は、ITERに反映されることとなり、日本は、ITER用1 MV高電圧電源を製作することとなった。まず、ITERに先立ち、イタリア (Consorzio RFX) で建設中のNBTF用電源機器の製作を進め、2017年3月までにNBTF用の1 MV電源機器の製作が完了し、そのうち9割の機器は現地での据付けも完了した。2018年からは欧州機関と協力してNBTFでの電源統合試験を実施する。

4. 原型炉用NBI⁵⁾

1.5~2 MeV、数10 A、定常運転の負イオンビームが必要と考えられるが、ビーム発生技術としてはITERの延長と考えることができる。さらにメンテナンス性・経済性を考慮すると、セシウムを使わない負イオン生成技術・中性化効率の高いレーザー中性化方式の開発が必要となるであろう。前者についてはまだ基礎研究の段階であるが、後者については使用可能な高出力レーザーが開発されており、原理実証試験が待たれる。また炉設計の観点では、現在のNBIが核融合炉の周辺を占有する配置、及び比較的大きなビーム入射ポートの改善が望まれる。これについては、ITERにおける大電流ビームの収束技術を高精度化することにより、ビーム源を炉から離れた箇所に設置しても、ビームを小口径に絞って長距離入射するなどで対応できると考えられる。このように、ITER NBIにおける技術を確認することが、原型炉NBIに大きく近づく布石となる。

文 献

- 1) 井上多加志他, 小特集「NBI: 核融合炉に向けた物理・工学の進展」, *J. Plasma Fusion Res.*, **81** (2015)
- 2) Kojima, A., et al., Long-pulse production of high current negative ion beam by using actively temperature controlled plasma grid for JT-60SA negative ion source, *Rev. Sci. Instrum.*, **1655**, 060002 (2015)
- 3) Kashiwagi, M., et al., Study of beamlet deflection

and its compensations in a MeV accelerator, *Rev. Sci. Instrum.*, **1390**, 457 (2011)

- 4) Hiratsuka, J., et al., Long-pulse acceleration of 1 MeV Negative ion beams toward ITER and JT-60SA neutral beam injectors, Proc. of IAEA Fus. Eng. Conf. 2016, FIP/1-3Ra (2016)
- 5) Inoue, T., Hanada, M., Kashiwagi, M., Nishio, S., Sakamoto, K., Sato, M., Taniguchi, M., Tobita, K. and Watanabe, K., Design study of a neutral beam injector for fusion DEMO plant at JAERI, *Fusion Eng. Des.*, **81**, 1291–1297 (2006)

Abstract

Recent Status of Nuclear Fusion Research and Development

6 Status of Fusion Engineering Research

6.2 Neutral Beam System for Heating and Current Drive

Mieko KASHIWAGI[†], Hiroyuki TOBARI, Atsushi KOJIMA, Naotaka UMEDA, Junichi HIRATSUKA and Masahiro ICHIKAWA: NB Heating Technology Group, Department of ITER Project, Naka Fusion Institute, Fusion Energy Research and

Development Directorate, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 1–801 Mukoyama, Naka-shi, Ibaraki Pref. 311–0193, Japan, [†]kashiwagi.mieko@qst.go.jp

Recent progress to realize the neutral beam (NB) systems for ITER and JT-60SA is reported. In the negative ion source as the primary beam source of the NB system, a vacuum breakdown between acceleration grids and excess power loading on the acceleration grid due to beam particles have limited to demonstrate the MeV-class and long pulse beam accelerations. To solve these issues, a vacuum insulation with large acceleration grid were established and precise control technique of the beam particles have been developed. As the results, 1 MeV beams with the relevant current density of the ITER requirement has been successfully demonstrated for 60 s seconds stably. In the 1 MV dc high voltage power supply components for the ITER NB test facility (NBTF) under construction in Italy, all components have been successfully completed based on the R&Ds. As the results, 90% of them have been installed in the NBTF site in 2017 and the integrated test of the power supply will be completed in 2018. Finally, the overview for the DEMO NBI based on these R&Ds is described.