小特集

NBI：核融合炉に向けた物理・工学の進展

NBI: Progress in Physics and Engineering toward Fusion Reactors

1. NBI 開発の経過と最新の成果

井上 多加志

(日本原子力研究開発機構)

Background and Latest R&D Achievements

INOUE Takashi

Japan Atomic Energy Agency, Naka 311-0193, Japan

(Received 1 October 2005)

The neutral beams (NB) in JT-60U and LHD are unique systems in the world to clarify the physics necessary to realize ITER and future fusion reactors. There were considerable progresses in these years in the plasma physics research utilizing those existing NB systems, which substantially contributed in the ITER and fusion reactor designs. In the meantime, the operation and tests in the existing systems together with the R&D toward ITER have achieved remarkable breakthroughs and milestones, such as achievement of the ITER relevant high power density beams in the MeV accelerator R&D. The R&D results developed for the existing NB systems have now widely spread in the industries, in particular in Hi-Tech device manufacturing processes, and are supporting technological basis of the IT societies.

Keywords:

ITER, fusion reactor, neutral beam, NB, ion source, accelerator, ion beam application

1.1 はじめに

本学会誌に粒子ビーム技術に関する小特集[1]が掲載されてから3年が経過した。本小特集はその続編として、この3年間におけるビーム技術の進展を紹介する目的で企画されたものである。ITERがいよいよ建設に向けて動き出した昨今、本小特集では、特に核融合炉用中性粒子入射装置(NBI)に関わるプラズマ物理とビーム工学の進展に焦点を当てることとした。

また、JT-60 正イオン NBI に代表される NBI 用大電流・大型正イオン源開発の成果は各所で熟成され、今や広範な産業分野に応用されるに至っている。本小特集の企画段階においては、この NBI 技術の産業応用に関する記事についても期待が寄せられた。筆者の専門分野外のこともあり、JT-60 NBI の建設に携わったメーカ各社にお願いしたところ多くの資料提供をいただき、一章を充てた。紙面の制約からほんの概要を紹介するにとどまったが、ご容赦願いたい。

author's e-mail: inoue.takashi52@jaea.go.jp

1.2 NBI 研究開発の経過

70年代初頭から開発が本格化した三大トカマク、TFTR, JET, JT-60 の NBI は、1980 年代中頃までに次々と運転を開始した。京都で1998年に開催された第7回イオン注入技術国際会議[2]は、三大トカマク NBI の初期運転結果が発表された国内初の国際会議だったと記憶するが、これまで不可能とさえいわれていた数10アンペアの大電流・大面積イオンビームが日米欧で揃って実現されたことから、産業界から非常に高い関心を持って迎えられた。

イオン源から発生したビームの中性粒子ビームへの最大変換効率を中性化効率と呼ぶ。従来の NBI ではガスセル中で中性化を行うが、このときの中性化効率をビームエネルギーの関数として示したものが Fig. 1 である。正イオンビームの中性化効率はエネルギーとともに低下し、ビームエネルギーが 100 keV/核子以下の三大トカマク NBI では、その中性化効率は20%程度である。プラズマが大型化する核融合炉では、プラズマ深部にビームを到達させるた

Fig. 1 Neutralization efficiency of positive and negative hydrogen ions as functions of beam energy.

めに 500 keV/核子程度のビームエネルギーが必要とされ、正イオンビームを中性化する方式では、実用に供し得ない。そこで日本原子力研究所(原研)では、高エネルギーでも60%程度の中性化効率の得られる負イオンに注目し、1986年までに負イオンを用いた実験炉用 NBI の概念設計を完了した[3]。

同時に原研では、数々ある水素負イオン生成法の中からいち早く体積生成法に着目し、大電流負イオン源の開発が開始された。体積生成法は、現在利用されている各種負イオン源において、水素負イオン生成法の主流となっているものであり、ITER NBI 用負イオン源にも(セシウム添加)

体積生成法が採用されている。1986年に1アンペア[4, 5], 1990年には10アンペアの大電流負イオン生成に世界で初めて成功し[6], 核融合炉 NBI 用大電流負イオン源への見通しを拓いた。引き続き原研では、1991年から加速器開発[7]を開始するとともに、1992年には低電流密度(100 A/m²)ながら24時間連続負イオン生成を実証した[8]。これと平行して核融合科学研究所(NIFS)においても大型ヘリカル装置(LHD)用 NBI の検討が開始され、大型負イオン源の開発が始まった。NIFS は1991年に3.3 アンペア[9], 1993年に5.2 アンペア[10], 1994年には16.2 アンペア[11]と着実に負イオン源の大型化と大電流化を推進した。これらの成果をもとに、原研においてはJT-60U 負イオン NBI (Fig. 2)が[12], NIFS においては LHD NBI (Fig. 3)が建設された[13]。

このように、負イオン源の大型化・大電流化開発において、日本は名実ともに世界をリードし、今もって10アンペア以上の負イオンビームを発生し得る技術を持つのは原研と NIFS のみである。負イオン NBI は、高い中性化効率を活かした高エネルギー NBI であるが故、reactor relevant なプラズマ加熱と電流駆動が可能であり、JT-60U と LHD におけるユニークな炉心プラズマ研究を推進する上で不可欠な装置となっている。ITER の建設に際しても、NBI 分野は日本の大きな貢献が期待される分野の一つとなろう。

しかしながら、先に述べた負イオン源大型化・大電流化開発における急ピッチの進展に比べて、運転開始後の負イオン NBI 装置の性能向上は、JT-60U, LHD どちらにおいて

Fig. 2 The negative-ion based (N-) NB system in JT-60U.

Fig. 3 Bird's-eye view of the LHD experimental hall. Three tangential NBI beamlines are installed. Each beamline has two large negative ion sources.

も一転してゆっくりとしたものとなった。ITER NBI 用加速器の開発においても同様、前回小特集掲載の数年前から当初計画からの遅れが目立っていた。その一因は、世界に類のない装置であるが故に、新たな課題に直面したからである。具体的には、大型負イオン源の負イオン一様生成、1 MV 高電圧の真空絶縁等の課題である。既存技術の転用による小手先の解決が効かない問題には、例えば第 5 章に述べるように、現象の詳細な観察に立ち返り、解析・考察に基づいて独創的な解決法を開発することが必要であった。このような解決へのアプローチは最先端機器の開発では当然のものであるが、時間を要するものである。

この数年間、原研、NIFS はもとより、大学を含む NBI・負イオン専門家の不断努力により、既存の負イオン NBI、ならびに ITER NBI 用負イオン源と加速器の R&D において、いくつかのブレイクスルーとマイルストーンの達成があった。

1.3 本小特集の構成とトピックス

本章に続く、本小特集の構成は以下のとおりである。

2. LHD における高エネルギー中性粒子ビーム入射のインパクト
3. JT-60U における N-NBI 加熱・電流駆動とトカマク定常化
4. ITER NB System: Compact Beamline and Design against Radiation
5. 核融合炉用負イオン源・加速器の開発の現状
6. NBI 技術の波及効果

最近のプラズマ物理研究では、高性能プラズマを得るた

めの実験手法として、プラズマ電流空間分布の能動制御が常識となっており、さらにその延長上で reactor relevant なプラズマ運転シナリオが検討されてきている。第 2 章、第 3 章においては、それぞれヘリカル型とトカマク型核融合炉の実現に向けた先進プラズマ研究における NBI の果たして来た役割とその成果をまとめた。さらに第 2 章では、LHD 性能向上のための開発と負イオン NBI における 5 MW 定格ビーム入射成功を報告する。また第 3 章では、NBI の長パルス化に向けた課題がまとめられた。

第 4 章では ITER NBI システムの設計から、コスト削減のための短尺ビームライン設計と耐放射線設計を解説する。執筆者は ITER NBI システムの工学設計に長年携わった A. Krylov 氏である。この 2 点は従来の負イオン NBI ではあまり考慮されてこなかったが、核融合炉用 NBI を構想する上では重要な設計要因となるものである。第 5 章では、ITER NBI 用負イオン源と加速器の開発の現状をまとめた。加速器開発においては、1 MV 真空絶縁技術の確立と、ITER 級パワー密度をもった負イオンビーム加速の達成を報告する。また既存負イオン NBI で長年問題とされてきた、大型負イオン源の一様性改善研究においては、負イオン生成機構に根ざした解決へのアプローチを述べるとともに、核融合炉用負イオン源に向けた原研の取り組みを紹介する。

第 6 章は、冒頭に述べたビーム技術の他分野への応用・波及の概要紹介である。NBI 用正イオン源開発で進展したビーム技術が、数々の産業分野、科学分野に貢献し、今日の IT 化時代を支える柱の一つとなっていることを、具体例をあげながら解説する。

参考文献

- [1] 竹入康彦他：小特集「粒子ビーム応用－その現状と展望－」プラズマ・核融合学会誌 78 (5) 389-418, 78 (6) 521-567 (2002).
- [2] T. Takagi Ed. "ION IMPLANTATION TECHNOLOGY", Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B37/38 (1989).
- [3] 堀池 寛他：「負イオンビームを用いた 500 keV 20 MW 中性粒子入射装置の概念設計」JAERI-M 86-064 (1986).
- [4] Y. Okumura *et al.*, AIP Conf. Proc. No.158, New York (1987).
- [5] T. Inoue *et al.*, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B37/38, 111 (1989).
- [6] Y. Okumura *et al.*, Fusion Tech. 1990 (Proc. 16th Symp. on Fusion Tech. London, 3-7 Sep. 1990) (1990) p.1026-1030.
- [7] K. Miyamoto *et al.*, Fusion Tech. 1994 (Proc. 18th Symp. Fusion Tech. Karlsruhe, 22-26 Aug. 1994) (1994) p.625-628.
- [8] Y. Okumura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 63 (4), 2708 (1992).
- [9] A. Ando *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 63 (4), 2683 (1992).
- [10] K. Tsumori *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 65, (4) 1195 (1994).
- [11] Y. Takeiri *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 66, (3) 2541 (1995).
- [12] M. Kuriyama *et al.*, Fusion Tech. 1996 (Proc. 19th Symp. Fusion Tech. Lisbon, 16-20 Sep. 1996) (1996) p.693-696.
- [13] O. Kaneko *et al.*, in Fusion Energy 1996, (1996) Vol.3, p.539.