

小特集 NBI：核融合炉に向けた物理・工学の進展

3. JT-60U における N-NBI 加熱・電流駆動とトカマク定常化

池田佳隆, 及川聡洋, 井手俊介
(日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門)

N-NBI Heating and Current Drive in JT-60U towards Steady-State Tokamak

IKEDA Yoshitaka, OIKAWA Toshihiro and IDE Shunsuke

Directorates of Fusion Energy Research, Japan Atomic Energy Agency, Naka 311-0193, Japan

(Received 1 October 2005)

In steady-state tokamak fusion reactors, an efficient external current drive and a large fraction of the bootstrap current are required for non-inductive operation at low circulating power. NBI is a powerful and reliable actuator for the current drive and heating. A negative-ion based NBI (N-NBI) with a high beam energy more than 350 keV has been installed in the JT-60U tokamak in order to study the NBI current drive and heating in an ITER relevant regime. This paper presents recent achievements in N-NBI experiments and progress of the JT-60U N-NBI system for steady-state operation in ITER and tokamak fusion reactors.

Keywords:

steady-state, tokamak, NB, current drive, bootstrap current, negative ion, JT-60U, ITER

3.1 はじめに

トカマクプラズマの定常化のためには、電磁誘導を用いずにプラズマ電流を流す必要がある。この非誘導電流駆動には外部駆動方式とプラズマが自発的に電流を流す性質（自発電流：bootstrap current）を利用する方式があるが、システム効率の高いトカマク型核融合炉の実現には、自発電流の割合を高めたプラズマと高効率の外部駆動方式を組み合わせることが必要である[1]。中性粒子ビームをプラズマ電流と同じ向きに入射することで、プラズマ中で電離した高速イオンによりプラズマ電流を効率良く駆動することができる[2]。そこでJT-60Uでは、1994年、NBの入射方向をプラズマ電流方向に改造した接線NBI装置（ビームエネルギー：90 keV）を用い、自発電流割合約7割（ビーム駆動電流：約3割）の1 MA プラズマ完全非誘導電流駆動を世界で初めて実現し、トカマクプラズマの定常化研究の方向性を明確にした[3]。一方、ITERではプラズマ密度が高く、NBをプラズマ中心部まで到達させるために1 MeVのビームエネルギーが必要となる。従来の実験領域が正イオンNBI（以下、P-NBI）を用いた100 keV以下であったことから、ITERでのNBI電流駆動特性をより精度良く予測するためには、より高エネルギーのNBI加熱・電流駆動実験が求められていた。100 keVを超える高エネルギーの中性粒子ビームを効率良く生成するには、高い中性化効率を保つ負イオンを用いたNBI装置の開発が必要であったが、原研では世界に先駆けてアンペア級の負イオン生成に成功しており[4]、この技術を駆使して、1996年、JT-60Uに最大500 keVのビームエネルギーを持つ負イオン

corresponding author's e-mail: ikeda.yoshitaka@jaea.go.jp

NBI (N-NBI) 装置を世界で始めて建設、運転を開始した[5, 6]。この高エネルギービームが持つ高い電流駆動性能および強電子加熱という特性を活かして、ITERを模倣した高温・高圧力プラズマでのNBI加熱・電流駆動研究が大きく進展してきている。また、低粒子補給率、低運動量入力、アルファ粒子に近い粒子速度といった物理的特性を活かしたプラズマ研究にも成果をあげている。

本章では、ITERや定常トカマク型核融合炉を目指した最近のJT-60UにおけるN-NBI加熱・電流駆動を中心とした実験結果および同装置の技術的進展を紹介する。

3.2 JT-60U 負イオン NBI によるトカマク実験の進展

3.2.1 高エネルギー中性粒子の電離過程

NBI加熱・電流駆動特性を予測するためには、プラズマに入射した中性粒子の電離断面積を正確に把握する必要がある。プラズマ中に入射された高速中性粒子は荷電交換反応およびプラズマ中のイオン、電子との衝突によってイオン化されるが、この電離過程には1回の衝突による直接電離と準安定励起原子の生成を経由した多段階電離がある。Janevらは多段階電離過程を考慮した電離断面積を求め、断面積がビームエネルギーおよび電子密度の増加とともに増大することを理論的に示し、この多段階電離が重要になってくるエネルギー領域は数百keV以上であることを明らかにした[7]。しかしながら、従来の多段階電離の検証実験は、P-NBIによる140 keV $\cdot$ amu $^{-1}$ 以下のエネルギー領域で行われたため多段階電離の効果が小さく、Janevの理論

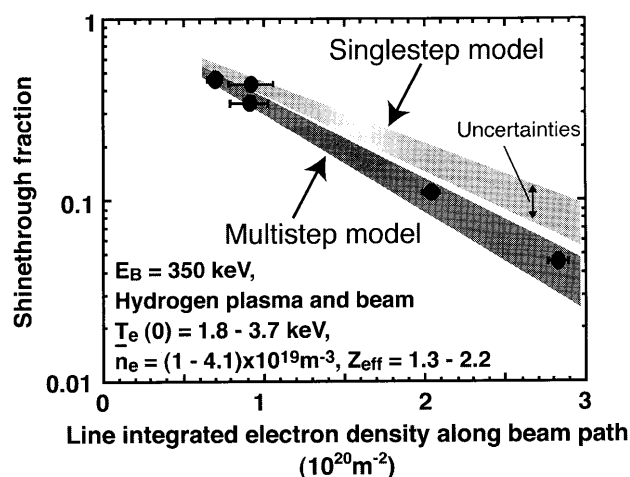


Fig. 1 Dependence of the shine-through fraction on the line-integrated electron density along the beam path. Measurement (circles) and predictions (shaded areas).

を確認するのは困難であった[8]。これに対して JT-60 U では N-NBI の 350 keV 軽水素ビーム入射により、対向面の第一壁温度上昇を考慮して全体のパワー収支から電離量を評価し、Janev の理論と比較した[9, 10]。Fig. 1 に N-NBI の突き抜け割合（電離せずにプラズマを突き抜けたパワーの割合）を示す。直接電離モデル（single-step model）と多段階電離を含めた多段階電離モデル（multi-step model）の差が大きくなる高密度領域で実験結果は多段階電離モデルと一致し、ITER における 1 MeV の NBI 加熱・電流駆動の評価には多段階電離過程の考慮が不可欠であることを明らかにした。

3.2.2 NBI 電流駆動

NBI 電流駆動は、理論的にはビームエネルギーとともに電流駆動効率 $\eta_{CD} \equiv n_e R_p I_{CD} / P_{abs}$ (n_e : 平均電子密度, R_p : プラズマ大半径, I_{CD} : 全駆動電流, P_{abs} : 吸収電力)が高くなると予想されており、1 MeV の NBI を用いる ITER では $3.4 - 4.4 \times 10^{19} \text{ Am}^{-2} \text{ W}^{-1}$ 程度（定常運転シナリオ）と予測されている。しかしながら、ビームエネルギーが 100 keV 以下の当時の実験では、得られた電流駆動効率が $0.5 \times 10^{19} \text{ Am}^{-2} \text{ W}^{-1}$ 以下と大きな差があり、JT-60U の N-NBI 電流駆動実験に多くの期待が寄せられた。一方、駆動電流の測定においても、近年動的 Stark 効果（MSE）偏光計測の開発と解析手法の発展により非誘導電流密度分布の計測が可能となった[11]。JT-60U でも 1996 年の N-NBI 装置の運転開始と時を同じくして MSE 計測が本格的に稼働を始め[12]、350 keV を超える高エネルギービームの NBI 電流駆動特性が詳細に調べられた[13]。Fig. 2 に中心電子温度 4 keV のプラズマにおける 360 keV の N-NBI の駆動電流密度分布を示す。実験結果（太線）を ACCOME コード（二次元 Fokker-Planck 方程式に基づいて NB 電流駆動を計算）[14] による予測と比較すると、電離断面積として single-step モデルを使った場合（細破線）は計測結果と明らかな違いがあるが、multi-step モデルを使った計算結果（太破線）は良い一致を示す。この結果から、前節で示したように、ビームエネルギーが数百 keV 以上において

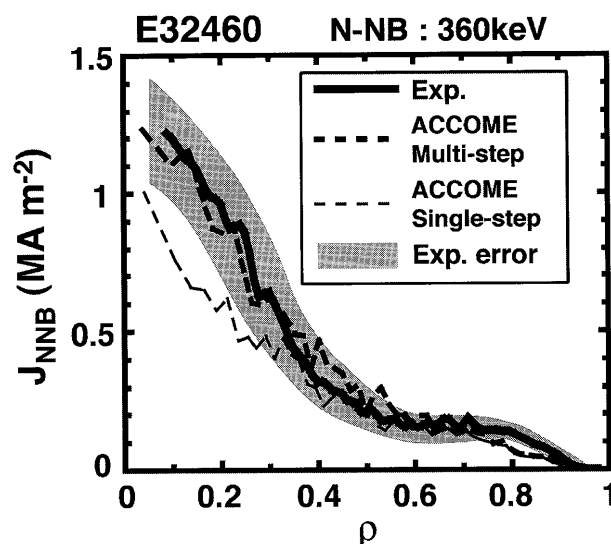


Fig. 2 Measured (solid line) and calculated (dashed lines) N-NBI driven current density profiles. Thin and thick dashed lines correspond to theoretical calculations by ACCOME using the single-step and multi-step models for ionization cross-section, respectively.

も、multi-step モデルと（古典的な）衝突過程で電流駆動特性を予測できることを明らかにした。

NBI により生成された高エネルギーイオンの減速時間は電子温度の $3/2$ 乗に比例して長くなるため、電子温度が高いほど NBI 電流駆動性能が向上することが期待できる。ITER では電子温度が 20 keV 以上になると考えられており、電子温度の上昇とともに電流駆動性能が向上するという理論に基づいて、中性粒子ビームの駆動電流を予想している。このため電流駆動性能の電子温度への依存性を ITER の電子温度に近い領域において検証する必要があった。そこで 1999 年から運転を開始した電子サイクロトロン (EC) 加熱[15]により中心電子温度を 4 keV から 10 keV まで変えて、N-NBI 駆動電流の電子温度依存性を調べた[16]。Fig. 3 に MSE 計測で求めた N-NBI 駆動電流密度分布を積分して得た全 N-NBI 駆動電流値と理論計算値を比較する。中心電子温度 10 keV までの広い領域で両者は一致し、NBI 電流駆動理論の正当性が実証された。また中心電子温度 10 keV、線平均密度 $7.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ においてビームエネルギー 360 keV、入射電力 3.75 MW の N-NBI により、NBI 電流駆動としては最大の駆動電流量となる 1 MA、電流駆動効率としては $1 \times 10^{19} \text{ Am}^{-2} \text{ W}^{-1}$ を達成した。

Fig. 4 に世界のトカマク装置で達成した NBI 電流駆動効率を示す。JT-60U 以外の装置のデータはすべて P-NBI によるものである。また図中の最高値、 $1.55 \times 10^{19} \text{ Am}^{-2} \text{ W}^{-1}$ は、3.2.3 節で述べる高電子温度、高密度の高ボロイダルベータ H モードプラズマで得られたものである。この図からわかるように JT-60U の N-NBI 電流駆動実験により、ITER に近い電子温度、ビームエネルギー領域において電流駆動理論の検証および高い電流駆動性能を実証し、ITER の電流駆動性能の予測の精度が大きく向上した。

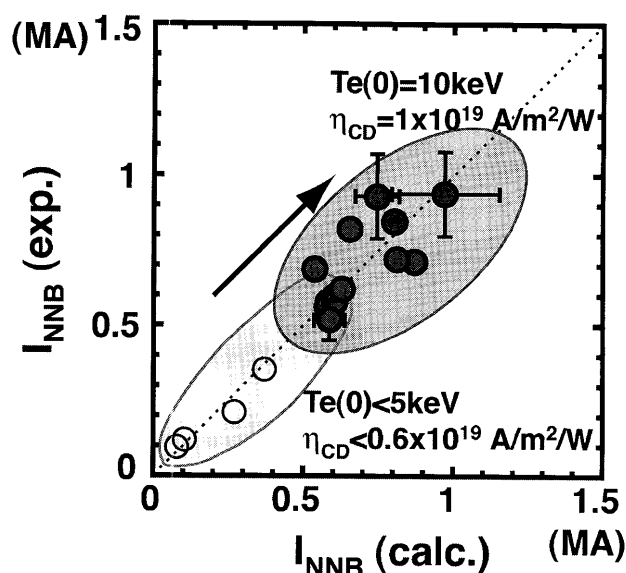


Fig. 3 Comparison of measured N-NB driven currents $I_{\text{NNB}}(\text{exp.})$ with calculated ones $I_{\text{NNB}}(\text{calc.})$.

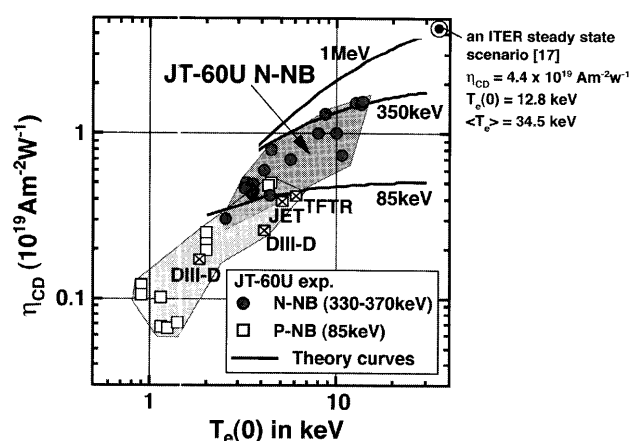


Fig. 4 Electron temperature dependence of the NBI current drive efficiency η_{CD} . The central value is chosen as a representative value of T_e . The theoretical curves for the three beam energies are calculated on a typical profile shape of T_e .

3.2.3 高性能プラズマの完全非誘導電流駆動

ITERの定常運転、更にはトカマク型核融合炉では、NBI単体の電流駆動性能のみならず、閉じ込めやベータ値、自発電流も含めた非誘導電流駆動の割合を同時に向上した総合性能の高いプラズマが必要となる。一例として、ITERの定常運転シナリオの検討例[17]をTable 1に示す。このケースでは、ITERの運転開始当初から装備されるNB2基(33 MW)とEC(20 MW)を用いてエネルギー増倍率 $Q \geq 5$ と完全非誘導電流駆動を実現するには、規格化圧力 $\beta_N = 2.76$ 、熱化エネルギーのELMy-Hモードに対する閉じ込め改善度 $HH_{98(y,2)} = 1.67$ 、規格化電子密度 $\langle n_e \rangle / n_G = 0.8$ (n_G : グリーンワルド密度)が必要となる。この時、自発電流割合は47%であり、残りの53%をNBとECによる電流駆動でまかなうことになる。

Table 1 Parameters for an ITER $Q=5$ non-inductive scenario using NB + EC [Polevoi2004].

R/a (m)	6.2 / 2.0	$\langle n_e \rangle$ (10^{19} m^{-3})	5.7
B_T (T) / I_P (MA)	5.3 / 9.0	$\langle n_e \rangle / n_G$	0.8
$\kappa_{95} / \delta_{95}$	1.7 / 0.33	$\langle T_e \rangle / \langle T_i \rangle$ (keV)	12.8 / 11.4
$HH_{98(y,2)}$	1.67	Fusion power (MW)	275
β_N	2.76	$P_{\text{NB}} / P_{\text{EC}}$ (MW)	33 / 20
q_{95} / q_{min}	5.8 / 1.5	$I_{\text{NB}} / I_{\text{EC}} / I_{\text{BS}}$ (MA)	4.15 / 0.6 / 4.25

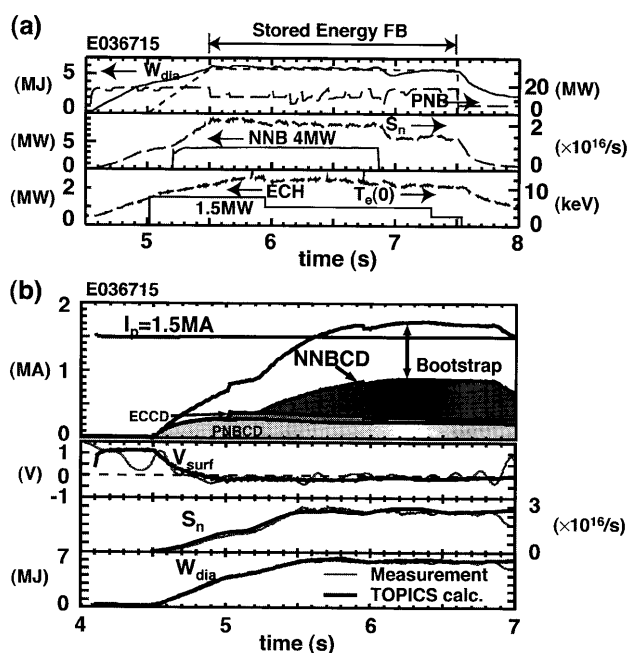


Fig. 5 (a) Waveforms of a discharge (E36715) in which the highest η_{CD} is achieved. The plasma stored energy W_{dia} is adjusted to reference value by the feedback control using P-NBI. (b) Time evolutions of non-inductive currents driven by N-NBI, P-NBI, EC and the bootstrap current in E36715 are calculated by TOPICS. Calculated time evolutions (bold lines) of the surface loop voltage V_{surf} , the neutron production rate S_n and W_{dia} are compared with measurements (thin lines).

上述のような高性能プラズマを実現するには、いくつかの閉じ込め改善モードが候補となるが、ここでは内部輸送障壁および周辺部輸送障壁を併せ持つ高ポロイダルベータHモードプラズマでのN-NBIを用いた定常化研究を紹介する。Fig. 5(a)に放電波形例を示す。高規格化圧力を保持するには新古典テアリングモード (NTM: Neoclassical Tearing Mode) を回避する必要があり、この放電では蓄積エネルギーの帰還制御[18]によってベータ値を不安定性の発生閾値以下に安定に保つよう制御している。非定常輸送コードTOPICS[19]を使って放電を再現した結果をFig. 5(b)に示す。表面での周回電圧、中性子発生率、蓄積エネルギーのシミュレーション波形が実験を良く再現していることがわかる。N-NBI(0.61 MA)、P-NBI(0.26 MA)、EC (0.05 MA) による電流駆動と自発電流 (0.76 MA) を合わせると非誘導駆動電流は1.7 MAに達し、プラズマ電流1.5 MAを超えオーバードライブしている。この時、中心電子温度

は約 14 keV であり、N-NBI の電流駆動効率は $1.55 \times 10^{19} \text{ Am}^{-2} \text{ W}^{-1}$ に達した。また、高閉じ込め ($HH_{98(y,2)} = 1.4$) と高い規格化圧力 ($\beta_N = 2.5$) も同時に達成した[16, 20]。この放電では、高性能プラズマの持続時間は 1.3 秒であったが、その後、電流分布の調整による NTM 抑制等を進め、2004 年には $\beta_N = 2.4$ 、自発電流割合 45% のほぼ完全非誘導電流駆動プラズマを電流拡散時間の 2.8 倍の 5.8 秒間、維持することに成功している[21]。なお同放電では、中心電流駆動を担う N-NBI の停止により高性能プラズマの持続が終了している。これらの結果は Table 1 に示した ITER の定常運転シナリオのパラメータに近く、JT-60U 実験で ITER の定常運転シナリオをほぼ展望できるようになったと言える。

なお、JT-60U では 3.3 節に述べるように、最近、NBI の入射パルス幅を最長 30 秒まで拡張することで高性能プラズマの定常化研究をさらに進展させており[22]、現在まで、 $\beta_N = 2.3$ を電流拡散時間の 13 倍である約 22 秒間維持することに成功している[23]。また、閉じ込め性能の高い負磁気シアモードにおいて、P-NBI のみでほぼ完全非誘導電流駆動を高い自発電流の割合 ($\sim 75\%$) で 7.4 秒維持することにも成功しており[21]、この研究分野での NBI の役割はますます重要になっている。

3.2.4 N-NBI を用いたプラズマ研究

現在、世界のトカマク装置では、主に P-NBI を主加熱として実験を進めている。この場合、ビームイオン速度がバルクイオン速度により近いいため、まずイオンが主に加熱される。これに対してアルファ粒子による加熱が主体となる ITER では、ビームイオン速度が電子の速度に近いため、加熱パワーはまず電子に吸収される。一方、閉じ込め改善をもたらす内部輸送障壁は、電子やイオンの異常輸送を引き起こす微視的不安定性の抑制により形成されと考えられており、その微視的不安定性には電子温度がイオン温度と等しいかそれ以上になると発生しやすくなるものがある。したがって、電子加熱が支配的なプラズマでの内部輸送障壁の形成・維持がどのような影響を受けるかを評価することは重要な課題である。強電子加熱の特性を持つ N-NBI はこのような研究に適しており、EC 加熱と組み合わせて、電子加熱割合がイオン加熱の 2 倍程度の状況でも負磁気シアプラズマの内部輸送障壁が維持できることを実証している[24]。

ITER では、アルファ粒子や N-NBI ビームイオンの速度がアルヴェン速度 (v_A) に近いいためアルヴェン固有 (AE) モードが励起され、その結果、高エネルギーイオンの閉じ込めが悪化する懸念がある。これまでにイオンサイクロトロン波加熱や P-NBI を使った AE 励起実験が行われて来たが、高エネルギーイオン圧力 (β_h) や v_A に対するビームイオン速度 (v_{bi}) は低い領域に限定されていた。それに対して、JT-60U では N-NBI を用いることにより β_h や v_{bi}/v_A が高い領域に研究領域を広げ、ITER のアルファ粒子の β_h や v_{bi}/v_A に近い領域で、AE 周波数帯で周波数が急速に変化するモードや負磁気シア配位に固有の AE モードの一種 (RSAE) の実証[25]、高エネルギー粒子の圧力やその勾

配に帰因すると考えられる非常に大きなバースト的不安定性 (ALE: Abrupt Large Event) の発見[26]、等の多くの成果を得た。

3.3 JT-60U に見る NBI 長パルス化の技術課題

3.3.1 パルス幅の進展

JT-60U では、トカマクプラズマの定常化研究を推進するため、2003 年からプラズマ放電時間を 15 秒から 65 秒に拡張するとともに、11 基の P-NBI と 1 基の N-NBI から成る NBI システムの入射時間も 10 秒から 30 秒に伸長する改造に着手した。P-NBI 加熱装置では、真空容器のビーム対抗面の熱負荷が問題とならない接線入射ユニット (4 基) を 30 秒入射できるように電源系、制御系、更にはビームラインのビームリミタ等の改造を行い、2004 年にユニットあたり、受電容量限度の 2 MW、30 秒を実現した。また垂直入射の P-NBI (7 基) では、10 秒パルスを複数基、連結することで 30 秒入射を実現した。この結果、P-NBI の最大入射エネルギーは 330 MJ に達している[27]。一方 N-NBI 装置では、直流高圧電源の容量制限から、2 台あるイオン源のうち 1 台のみを使用することで、30 秒入射を目指すこととした。本節では、この N-NBI 装置での長パルス化改造および長パルス入射で明らかになった課題について紹介する。なお、N-NBI 装置では、現在までの調整で 350 keV、25 秒、 ~ 1 MW 或は 19 秒、 ~ 1.5 MW までのパルス幅延伸を達成している[28]。Fig. 6 に最近の N-NBI 加熱装置の入射パルス幅の進展を示す。

3.3.2 加速電極の熱負荷

N-NBI 装置が P-NBI 装置と大きく異なる点は、負イオンの生成効率が正イオンに比べ低いために、負イオンの電流密度が 1 桁程度小さくなることである。このことは、同じビーム電流を得るために N-NBI 装置では 1 周り大きいソースプラズマが必要であることを意味する。このため JT-60 の N-NBI 装置では、長さ 122 cm、直径 68 cm のカマボコ形

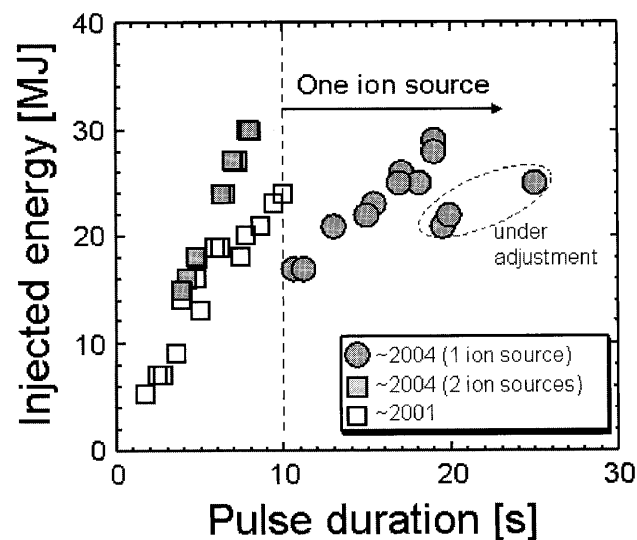


Fig. 6 Progress of the injected energy in the long pulse operation.

状の大型ソースプラズマ源と大口径多孔電極（幅：45 cm，高さ：110 cm）を有する3段加速部により，888本（設計当初は1080本）のマルチビームで22 Aの負イオンビーム電流を500 keVまで加速する構造となっている[5]．同装置は，2002年に355 keV，2.6 MWの10秒入射に成功しているが[29]，その際，電極冷却水温度が100℃近くまで上昇し続けており，30秒化にあたっては電極熱負荷の低減が急務であった．負イオン源電極の熱負荷の要因は，電極間で加速される負イオンが適正な軌道を描かずに電極自体に衝突する直接衝突損失（Direct interception）と，負イオンが加速部内の残留ガスと衝突して電子を剥ぎ取られ，その電子あるいは中性化した粒子が電極に衝突する中性化損失（stripping loss）の2つが考えられる．前者に関しては，加速部内の負イオンビーム軌道を正確に把握することが必要である．そこで，イオン源から3.5 m離れた位置に可動式のターゲット板を挿入し，それにビームを照射してターゲット板面の温度分布を観測することで，ビーム軌道測定を行う計測システムを開発した．この結果，各引き出し孔から発生するビームレットごとの電流密度が不均一であること，ビーム束の周辺部のビーム軌道が外側に偏向していることが明らかとなった．この周辺部ビームの偏向は，ビームレット同士の干渉が相殺されるビーム束の中央部では小さく，かつ電流密度とともに強くなることから，ビームレット同士の空間電荷効果が関与していると考えられる[30]．このため長パルス化にあたっては，引出電極の周囲に薄板を装着し，ビーム束の周辺部の電界を変形させることで，ビーム軌道を補正する工夫をイオン源に施した[28]．一方，中性化損失を抑制するためには，プラズマ源の真空度は維持したまま加速部内の残留ガスを低減する必要がある．このため電極の一部を排気ダクトに改造し，加速部内の真空度を6割程度，改善する試みを実施した．Fig. 7に，電界補正および真空度改善を施す前と後の接地電極（GRG）の損失の改善を示す．ここで，横軸はプラズマ源の真空度である．真空度の依存性がある損失分は中性化損失，依存しない分はビームが電極に直接衝突したためと考えられる．通常運転の真空度は0.3 Paであり，中性化損失が10%から7%程度に低減できた．この結果，入射パワーは1.6 MWながら15秒で冷却水温度が55℃で飽和に達し，30秒運転への目処が立った[31]．ただし，電源容量限界でしまる最大入射パワー3 MW程度に上げるためには，直接衝突損失を5%以下にする必要がある，このためには第5章で述べる大面積引き出し面上に負イオンを一般的な密度で生成し，マルチビームレットの電流密度不均一を是正する技術の確立が必要である．

3.3.3 性能改善にむけて

これまでの長パルス入射から以下の課題が明らかとなった．イオン源のソースプラズマ生成にはフィラメントを用いたアーク放電を用いる．アーク放電電流はフィラメント自体に流れ込むため，アーク放電を開始するとフィラメント温度が変化していく．JT-60 Uでは約3,000 Aの大電流アーク放電を安定に動作する必要がある，従来の10秒以下のパルス幅では，フィラメント電流（電圧）をブレプログラム

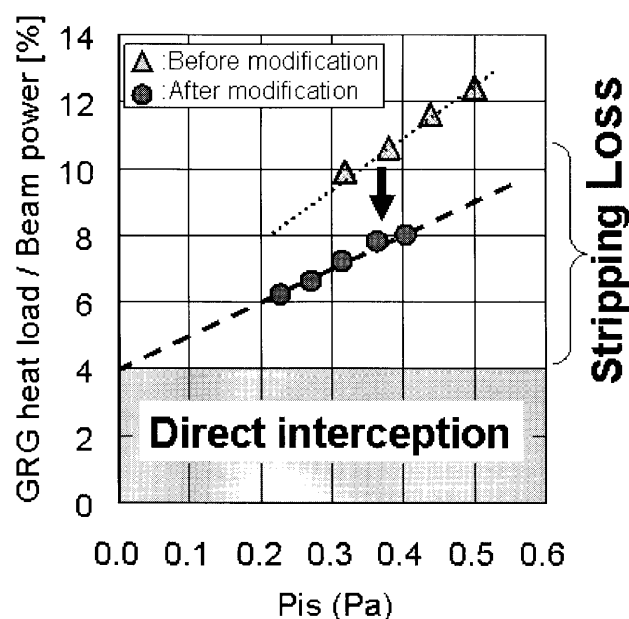


Fig. 7 Heat loads at the GRG before and after the modification of the vacuum conductance in the accelerator column. $V_{ext} / V_{acc} \sim 6.4 / \sim 350 \text{ kV}$, $j_{acc} \sim 14 \text{ mA/cm}^2$.

制御により途中で低減し，アーク放電の安定化を図っていた．しかしながらパルス幅の伸長に伴い，放電時間全体を見込んだブレプログラム制御の微細な設定が必要となり，効率的な運転が阻害された．そこでアーク放電電流をフィラメント電圧指令値へのフィードバック信号とする帰還制御システムを開発・導入することにより，設定パルス幅やアークパワーの変更にかかわらず安定したアーク放電電流を実現し，長パルスにおいても容易に安定した大電流負イオンビームを得る手法を確立した．

長パルス運転を長期間行うためには，フィラメントの長寿命化が不可欠な課題である．今回の30秒入射を目指した運転期間（通算約6ヶ月）では，48本中8本のフィラメントが断線し，その結果，運転期間の後半では更なるフィラメントの断線を避けるため，設定アークパワーを低下せざるをえなかった．運転終了後の分解点検の結果，フィラメント断線はアーキングと呼ばれる異常放電によるクレータ状の損傷によるものと判明した．同時期に運転したP-NBI装置では，総数176本のフィラメントが1本も断線していないことから，両NBI装置の違いであるフィラメント電流の過電流検出方法，セシウム使用の有無，フィラメント形状に今後のフィラメント長寿命化の鍵があると考えられる．特にN-NBI装置のフィラメントのアーキング痕はフィラメント温度が高温となる陰極部分の方に多いことから，陰極と陽極のフィラメント温度差を軽減できるテーパ型フィラメントを次の運転サイクルから導入し，その効果を調べる予定である．

JT-60U N-NBIでは，Cs蒸気を負イオン源中に添加して負イオン生成を促進している．これは，プラズマ電極表面の仕事関数を下げ，プラズマ電極に衝突する重水素原子あるいは重水素イオンに効率良く電子を付着させるものと考えられている[32]．この効果にはプラズマ電極の温度依存

性があることが基礎実験（ビーム電流 ~ 0.4 A）[33]でわかっていたが、JT-60UのN-NBI装置（ビーム電流 >10 A）においても、アークパワーを一定とした長パルス運転を行った際、アークパワーによりプラズマ電極温度が時間とともに上昇し、その結果、負イオン生成が増加する現象を確認した。したがって基礎実験で得た最適温度（ $250^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ ）にプラズマ電極を調整することで、今後、更なる負イオン生成の改善が期待できる。なおJT-60UのN-NBI装置では現在、プラズマ電極の強制冷却を行っていないが、30秒を超える長パルス運転では高温状態を維持できる冷却方式の検討・導入が必要である。

最後に、JT-60UのN-NBI装置の解決すべき課題として耐電圧の改善がある。パルス幅が長くなれば、途中で放電破壊が発生する可能性も高くなると考えられるので、長パルス運転には、短パルス運転よりもより高い耐電圧特性が必要と考えられる。負イオン源の高電圧印加時のガス放出を詳細に調べたところ、コンディショニング初期では炭化水素系が主成分のガス放出が放電破壊の有無にかかわらず発生していること、コンディショニングが進むとガス放出が抑制され、その場合、放電破壊が発生しないことを確認した。同様な現象はITER用MeV級加速器においても観測されており[34]、負イオン源の絶縁体であるFRP（ガラス繊維強化プラスチック）が炭化水素系ガスの発生源の可能性が高いことから、今後、FRP近傍の電界緩和[35]やベーキング等を図り、耐電圧特性の改善効果を確認していく予定である。

以上のように、JT-60UのN-NBI装置は、長パルス化を通じ定常運転も見通した課題が明確になったことから、今後、適切な対応を施すことで、更なる性能向上が期待される。

3.4 おわりに

ITERが建設段階に入ろうとしている現在、JT-60Uをはじめとする世界のトカマクプラズマ研究はITERの定常運転および核融合炉の早期実現に向けた、高閉じ込め・高自発電流割合さらには高規格化圧力の完全非誘導電流駆動プラズマの追求が中心課題となってきた。このためには、燃焼プラズマにおける電流や圧力等のプラズマ諸量の空間分布制御が重要と考えられており、JT-60Uでは、垂直、接線入射のP-NBIに加えて高エネルギーのN-NBIにより、非常に多彩な研究が進められている。本章ではN-NBIに絞り最近の実験結果および同装置の現状について紹介したが、トカマクの定常化に向けて今後更なる進展を期待し本稿を終えることとしたい。

参考文献

- [1] M. Kikuchi *et al.*, Nucl. Fusion **30**, 265 (1990).
- [2] T. Ohkawa, Nucl. Fusion **10**, 185 (1970).
- [3] Y. Kamada *et al.*, Plasma Phys. and Control. Nucl. Fusion Research 1994 (Proc. 15th Int. Conf. Seville, 1994) IAEA-CN-60/A5-5.
- [4] Y. Okumura *et al.*, American Inst. Phys. Conf. Proc. No. 158, 309-318 (1986).
- [5] M. Kuriyama *et al.*, Fusion Sci. Technol. **42**, 410 (2002).
- [6] K. Ushigusa and the JT-60 Team, Plasma Phys. and Control. Nucl. Fusion (Proc. 16th Int. Conf., Montreal, 1996), vol.1, IAEA, Vienna 37 (1997).
- [7] R.K. Janev *et al.*, Nucl. Fusion **12**, 2125 (1989).
- [8] K. Tobita *et al.*, Plasma Phys. Control. Nucl. Fusion **32**, 429 (1990).
- [9] M. Nemoto *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **73**, 1374 (1997).
- [10] S. Suzuki *et al.*, Plasma Phys. Control. Nucl. Fusion **40**, 2097 (1998).
- [11] C.B. Forest *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 2444 (1994).
- [12] T. Fujita *et al.*, Fusion Eng. Des. **34-35**, 289 (1997).
- [13] T. Oikawa *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 435 (2000).
- [14] K. Tani, M. Azumi and R.S. Devote, J. Comput. Phys. **98**, 332 (1992).
- [15] Y. Ikeda *et al.*, Fusion Sci. Technol. **42**, 435 (2002).
- [16] T. Oikawa *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 1575 (2001).
- [17] A.R. Polevoi *et al.*, Proc. 20th Int. Conf. on Fusion Energy 2004 (Vilamoura, 2004) IAEA-CN-116/IT/P3-28.
- [18] T. Oikawa *et al.*, Fusion Eng. Des. **70**, 175 (2004).
- [19] H. Shirai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **64**, 4209 (1995).
- [20] Y. Kamada and the JT-60 Team, Nucl. Fusion **41**, 1311 (2001).
- [21] Y. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 574 (2005).
- [22] S. Ide *et al.*, to be published in Nucl. Fusion.
- [23] T. Suzuki *et al.*, Proc. 20th Int. Conf. on Fusion Energy 2004 (Vilamoura, 2004) IAEA-CN-116/EX/P5-15.
- [24] S. Ide *et al.*, Nucl. Fusion **44**, 87 (2004).
- [25] M. Takechi *et al.*, to be published in Phys. Plasmas.
- [26] K. Shinohara *et al.*, Nucl. Fusion, **41**, 603 (2001).
- [27] N. Akino *et al.*, Fusion Sci. Technol. **47**, 758 (2005).
- [28] Y. Ikeda *et al.*, Proc. 4th IAEA TM on Negative ion based NBI, Padova, Italy, 2005. (Nucl. Fusion submitted)
- [29] N. Umeda *et al.*, Nucl. Fusion **43**, 522 (2003).
- [30] Y. Fujiwara *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **71**, 3059 (2000).
- [31] N. Umeda *et al.*, to be published in Fusion Eng. Des. (Proc. 23rd Symp. Fusion Tech., Venice, Italy, 2004).
- [32] K.N. Leung, C.A. Hauck, W.B. Kunkel and S.R. Walther, Rev. Sci. Instrum. **60**, 531 (1989).
- [33] Y. Okumura, M. Hanada, T. Inoue, H. Kojima, Y. Matsuda *et al.*, Fusion Technology, Elsevier Science Publishers B. V., Vol. 2, 1026-1030 (1990).
- [34] T. Inoue *et al.*, American Inst. Phys. Conf. Proc. No. **380**, 397-405 (1995).
- [35] T. Inoue *et al.*, Fusion Eng. Des. **66-68**, 597 (2003).