

解説

最近の NBI 技術

小原 祥裕
 (日本原子力研究所)
 (1996年3月17日受理)

Current Status of the NBI Technology

OHARA Yoshihiro

Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-01, Japan

(Received 17 March 1996)

Abstract

Technology of the negative-ion-based neutral beam injectors for heating and current drive in the fusion plasmas has progressed in recent years, particularly, in Japan. On the basis of the progress of high power negative ion sources, two development programmes are carried on, a 500keV, 10MW NBI system for JT-60U and a 180keV, 15MW NBI system for the Large Helical Device (LHD). Additionally, R&Ds and an engineering design of the reactor-relevant 1MeV NBI system for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) are carried on intensively under the international collaboration. The current status of the negative-ion-based NBI technology is described.

Keywords:

negative ion source, neutral beam injector, NBI, plasma heating, current drive

1. はじめに

トカマク方式等の核融合炉において、加熱・電流駆動技術は高温燃焼プラズマを生成するとともに、プラズマを安定に保持していく上で重要な技術である。プラズマ自身の持つ比抵抗によるジュール加熱で達成できるプラズマ温度は数 keV 程度であり、自己点火に必要な数 10keV まで温度を上げ、かつ燃焼制御を行うためには、別的手段による加熱が必要である。また、トカマク方式ではプラズマを閉じ込める上で重要なプラズマ電流を電磁誘導により誘起しているため、原理上プラズマは断続的にしか作ることができない。定常的に運転するためには、非誘導によるプラズマ電流の駆動が不可欠である。さらに、プラズマ電流の空間的分布を制御したりプラズマにトロイダル方向の運動量を与えたりすることにより、プラズマ閉じ込めの改善や不安定モードの抑制が可

能と考えられている[1].

このような加熱・電流駆動を行う方法として、中性粒子ビーム入射による方法 (Neutral Beam Injection; 略して NBI) と高周波入射による方法がある。中性粒子ビーム入射による方法は、プラズマ閉じ込めのための磁場の影響を受けない中性粒子ビームを入射してプラズマと衝突させることによって、イオン化・熱化の過程を経てプラズマを加熱する方法である。さらに、円環状のプラズマに接線方向にビームを入射することにより、加熱と同時にビーム自身によってプラズマ電流の駆動も行うことができる。

中性粒子ビームは今日まで磁場閉じ込め核融合研究において、多くの重要な役割を果たしてきた。プラズマの加熱のために、正イオンビームを用いた約 100keV で数 10MW 級の水素または重水素の中性粒子ビーム入射装

置 (NBI) が開発され、世界の3大トカマク等において高温プラズマの実現に貢献してきた。日本原子力研究所(原研)のJT-60Uでの世界最高の核融合三重積の達成[2]や、米国のプリンストンプラズマ物理研究所のTFTRでのDT核融合出力10MWの達成[3]は、いずれも100keV程度で30MW以上の中性粒子ビームを入射することによって初めて可能となったものである。このように正イオンビームを用いた100keV級のNBI技術は既に確立されたものとなっており、核融合プラズマの研究に大きな役割を果たしてきた。

一方、国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor: ITER)等の次期核融合実験装置においては、加熱の他に電流駆動や電流分布制御にも用いることが期待されており、このためには従来よりもエネルギーが約1桁高い1MeV級の中性粒子ビームを50~100MW以上入射することが必要とされる。このような高エネルギーになると従来の正イオンを用いたのでは中性粒子ビームを効率良く生成することは不可能となる。このため高エネルギー領域においても60%以上の高い中性粒子への変換効率を持つ負イオンを用いることが不可欠である。しかしながら負イオンの生成は正イオンの生成とは原理が異なり大電流を得ることは容易ではなく、長年mA程度の負イオンを生成するのがやっとであった。最近になって負イオンビーム技術は日本で大きく進展し、実用上必要な10A以上の大電流負イオンビーム生成が可能となった[4,5]。さらに、大電流負イオン源開発の進展を受けて、JT-60U用と核融合科学研究所のLHD(Large Helical Device)用の負イオンNBI計画が立案され[6,7]、現在その建設が進められている。さらにITER用の1MeV級NBI技術開発も原研が中心となって進められている[8]。このように、負イオンNBI技術は日本が世界を大きくリードしている技術領域の1つである。

本解説では、負イオンを用いたNBI研究開発上の最近の主な成果について紹介する。

2. NBIの原理とその技術

負イオンを用いたNBIの原理は基本的には従来の正イオンを用いたNBIと同じである。中性粒子ビーム入射装置の基本構成をFig.1に示す。まず、負イオン源から引き出され加速されたイオンビームは、中性化セルを通過する間に中性ビームに変換され、直進して核融合装置真空容器内に入射し、プラズマを加熱する。一方、中性化されなかった負イオンビームと中性粒子から再電

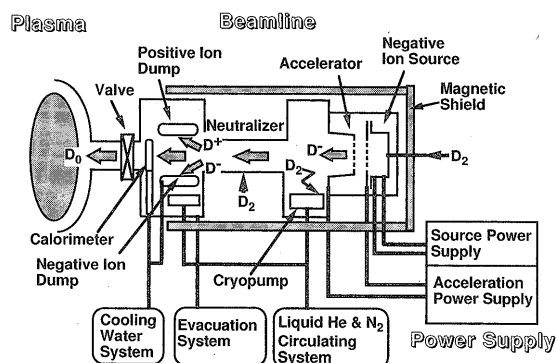


Fig. 1 Principle of the negative-ion-based NBI system.

離された正イオンビームは偏向磁場等によって軌道を曲げられた後、イオンダンプに導かれ除去される。イオン源や中性化セルから流出する水素ガスはビームライン真空容器内に収納された大容量のクライオポンプによって排気される。そのほか、イオン源に電力を供給するイオン源用電源や受熱機器冷却のための冷却水循環設備、真空排気設備、クライオポンプのための液体ヘリウム・液体窒素供給循環システムなどから構成されている。このような装置を実現する上で最も重要な機器は、従来技術に比べて桁違いに大きなイオンビーム出力が要求される大出力負イオン源の開発であることはいうまでもない。また、エネルギーも従来に比べて約1桁高くなるため、大電流負イオン加速器と負イオン加速のための超高電圧直流電源の開発も重要な課題である。その他、ビームライン設計上、中性化の方式、残留イオンの処理法、磁気シールド等が重要である。さらにITER等炉対応のNBIでは、中性子シールド、遠隔保守、トリチウム閉じ込め等の安全設計が不可欠である。次章では、ビームの生成、加速、輸送に関連する主な項目として、イオン源、中性化セル、残留イオン処理および加速電源に限って最近の技術開発上の進展を述べる。

3. 負イオンNBI装置の技術開発の最前線

(1) 負イオン源

a. 負イオン生成

負イオン源は高エネルギー加速器用などのために古くから用いられてきたが、その電流値は高々mAレベルであり、核融合用の要求仕様からはほど遠いものであった。実用化のためには縦横数10cm以上の広い領域から一様に、 $10 \sim 30 \text{ mA/cm}^2$ の電流密度かつ0.3Pa程度以下の低運転ガス圧で負イオンを生成する必要がある。電

流密度は高ければ高い程良いという訳ではなく、引き出しや加速電極間の電界強度を耐電圧上2~3kV/mm以下に抑えるためには上記電流密度程度が望ましい。運転ガス圧も引き出し・加速電極間での電子剝離損失を10~20%以下に抑えるためには、0.3Pa程度以下のガス圧で負イオンを生成できることが不可欠である。負イオン源を用いたNBIを現実的に設計することが可能となったのは、体積生成法による水素負イオン生成が有効であることが実証され、大型化が容易な多極磁場型プラズマ源と多孔形電極を組み合わせることでアンペア級の負イオンビームを安定に収束性良く生成できるようになってからである[9]。この体積生成法では水素負イオンは主として振動励起分子の生成過程と振動励起分子の電子付着乖離過程の2段階過程により生成される(Fig. 2)。色々な最適化の研究が行われてきたが、結局体積生成法のみでは電流密度と運転ガス圧の条件を同時に満足することには成功していない。そこで原研で開発されたのが、多極磁場プラズマ源のプラズマ閉じ込め性能を改善し、かつプラズマに面した1枚目の電極(プラズマ電極)表面をごく少量のセシウムで覆い、その温度を200~300℃に保つことによって仕事関数を下げ、表面生成過程も利用する方法である(Fig. 2)[10]。この方式ではプラズマ源の形状を半円筒型にし、かつ近年開発された強力ネオジウム磁石を用いて表面磁場を強くしてプラズマ閉じ込めを改善している。このため、低ガス圧運転を可能にするとともに、原子状水素の生成を促進し、プラズマ電極表面からの負イオン生成を増大させていることが本質的であると考えられる。すなわち、従来プラズマ閉じ込めの良いプラズマ源は水素負イオンとの衝突断面積が大きいプロトンの

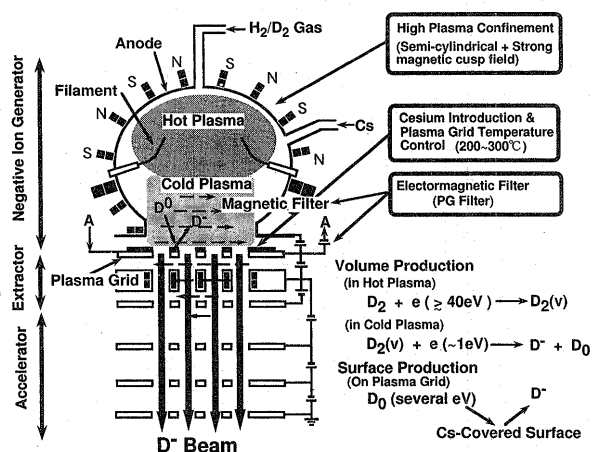


Fig. 2 Schematic diagram showing the concept of a high power negative ion source.

密度が高いことから負イオン源には適さないと考えられていたが、高プロトンの正イオン源が高性能な負イオン源にもなることを示している。この方式で初めて負イオン生成に必要な電流密度と運転ガス圧を同時に満足することができた。なおセシウム消費量は十分小さく、加速電極の耐電圧性能を劣化させて運転に支障をきたすことはない。

さらに大電流を生成するためには広い領域から一様に負イオンを引き出す必要がある。従来負イオン生成上重要なフィルタ磁場をプラズマ中に磁石を配置したりプラズマ源の外側に強力な磁石を配置することにより得ていたが、フィルタ磁場が空間的に不均一になったり、プラズマの損失面積が増えたりして大電流化をする上での問題となっていた。しかし、プラズマ電極自身に数kAの電流を流すことにより、広い引き出し面上に一様にフィルタ磁場を生成することが可能となった(PGフィルタ)[11]。しかも重水素負イオンを生成するときは水素負イオン生成時に比べてフィルタ磁場を数10%増大させる必要があるが、本方式では制御が極めて容易である。

以上の研究開発の結果、現在小型イオン源では運転ガス圧0.35Paで20mA/cm²、1.4Aの重水素負イオンが[12]、またJT-60U用大型イオン源ではPGフィルタを用いて45cm×110cmの領域から運転ガス圧0.2Paで8mA/cm²、13.5Aの重水素負イオンが生成されている[13]。

b. 負イオン引き出し

正イオンの引き出しと異なって、負イオンを引き出すとき同じ電荷を持つ電子も同時に引き出される。従来の体積生成方式では、負イオン電流の数10倍から100倍もの電子が同時に引き出されていた。このような大量の電子が引き出され加速されたのではもはやシステムとしては成り立たなくなる。このためまずプラズマからの電子

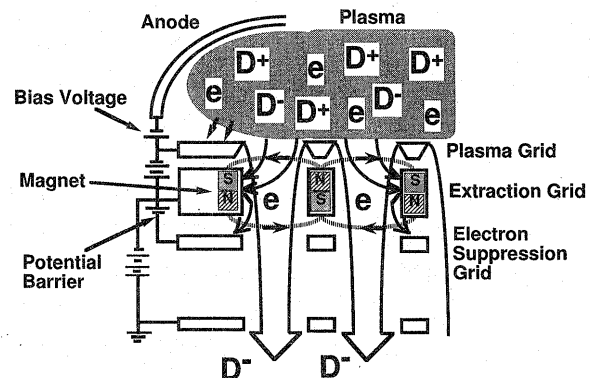


Fig. 3 Concept of electron suppression in the negative ion extractor

の引き出しを抑制する必要がある。さらに、引き出された電子は負イオンの収束性を乱すことなく負イオンと分離し電極に当てて処理するとともに、加速部への漏洩を抑える引き出し系の開発が重要となる。

現在最も効率よく電子を抑制できる引き出し系の概念を Fig. 3 に示す [14]。まず電子の引き出し抑制のためには、陽極電位のアークチェンバーに対してプラズマ電極に数ボルト程度のバイアス電圧を引加することにより、負イオン電流をほとんど減少させることなく電子電流のみを負イオン電流の10倍程度にまで下げることができる。さらにセシウムを用いることにより、負イオン電流密度や運転ガス圧を改善できるばかりでなく電子電流も大幅に低減することができる。バイアス電圧の印加とセシウムの使用により最終的に電子電流は負イオン電流と同じまたはそれ以下に下げることが可能となっている [15]。プラズマパラメータはまだ正確に測定されていないが、ほとんど負イオンと正イオンのみよりなるプラズマが生成されていると考えられている。核融合科学研究所ではプラズマ電極面上に格子状の電極を配置したエッグボックス型の電極構造により、負イオン電流を下げることなく電子電流を下げる事ができた [16]。

10kV 程度で引き出された負イオンと電子は、引き出し電極内に埋め込まれたダイポール磁場および PG フィルター磁場の合成磁場により曲げられ水冷却された引き出し電極に衝突させて処理される。さらに電極で反射された電子や負イオンから剝離した電子が加速部へ漏洩するのを防ぐため、電子抑制電極によりポテンシャル障壁をつくっている。イオンはダイポール磁場を利用することもありビーム軸の偏向は小さく、電極孔中心軸の径方向偏位によってビーム軸は補正可能である。

このようにして、引き出し電極の熱負荷は大幅に小さくすることが可能となり、長パルス運転上の最大の問題を解決することができた。また加速部への電子電流の漏洩も負イオン電流の数%程度まで抑制することが可能となっている [17]。

c. 負イオン加速

引き出し部において電子を分離された 10keV 程度の負イオンは、加速部に入ってさらに数 100keV 以上の高エネルギーに加速される。電流が mA レベル以下であれば技術的には特に難しい点はない。しかしアンペア級の大電流イオンを数 100keV 以上に加速した例は未だ世界に無く未踏の領域である。JT-60U では 22A の重水素負イオンビームを 500keV まで、LHD では 40A の水素負イオンビームを 180keV まで (20A の重水素負イオン

ビームを 360keV まで)、また ITER では 40A の重水素ビームを 1MeV まで安定に加速することが目標である。特に負イオンの場合は、加速中に電子剝離過程で発生する電子や電極表面からの 2 次電子の加速を抑制しつつ、負イオンのみを選択的に加速する必要がある。加速方式としては加速効率と電源の効率を合わせて 80% 以上の高い効率が得られる静電加速方式が最も優れている。高周波加速方式は、現状ではまだ十分高い加速効率が得られておらず基礎研究の段階にある。

静電加速方式では、負イオン生成部と接地電極間に直流高電圧を印加し負イオンを静電的に加速する。加速電極構造としては Fig. 4 に示すように多段加速系と 1 段加速系の研究開発が進められている。前者はビーム光学上、耐電圧上望ましいが、加速中間電位供給のために大口径高電圧伝送路が必要となるなどコスト上不利である。一方、後者は加速電極間の真空度を低減でき負イオンの電子剝離損失を抑制できるとともに加速中間電位の供給が不要なことから電源の合理化が可能である。しかし耐電圧上やビーム光学上問題が多い。すなわち、電極間の絶縁破壊電圧は電極間隔の約 0.5 乗に比例するため、高エネルギーに加速する場合はビーム光学上必要な電界強度を得ようとすれば耐電圧上制約を受ける可能性がある。また、ビーム光学上も、多段加速系では各段の電界強度を下流に向かって強くすることにより大電流ビームでも収束性良く加速できるが、1 段加速ではビーム電流の増大とともに空間電荷効果が大きくなると十分収束できなくなる。性能的には多段加速が望ましいが、電源を合理化できるという点では 1 段加速が優れている。JT-60U 用負イオン NBI 装置では、直径 14mm の電極孔を 1080 個持つ 3 段静電加速系により 13.5A の重水素負イオ

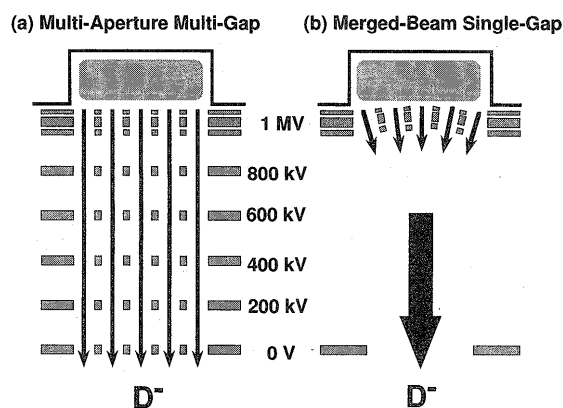


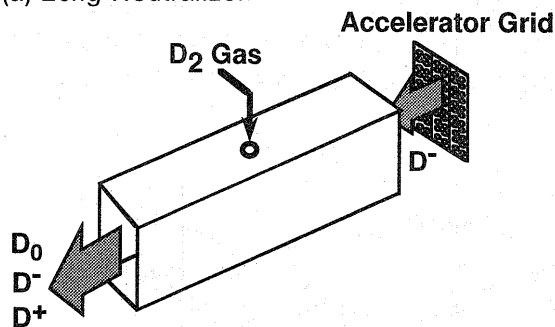
Fig. 4 Concept of electrostatic accelerators for 1MeV negative ion production.

ンビームを 400keV まで加速することに成功している [13]. さらに ITER では 1MeV まで加速することが要請されている. 現在 1MeV 加速系として, 加速性能からも電源システム合理化の観点からも, どういう加速系が良いかを研究するため原研とフランスのカダラッシュ研究所にそれぞれ MeV 級イオン源試験装置 (1MeV, 1A) [18] と容量は小さいが重水素ビームの加速が可能な試験装置 (1MeV, 0.1A) [19] が建設された. 現在まだ負イオン電流密度は小さいがいずれの方式でも 800keV 以上に負イオンを加速することに成功しており, 今後 1MeV 加速実証を目指して更なる進展が期待されている.

(2) 中性化セル

負イオンの中性化の方法として, ガスセルを用いる方法が最も容易であり, かつ 60% という高い中性化効率を得ることができる. さらに 80% 以上の高い中性化効率を得られる可能性のあるプラズマレーザーを用いる方式もあるがまだ基礎研究の段階である. ガスセルを用いる場合, 最適なガス線密度が存在し, 負イオンのエネルギーが数 100keV 以上になっても最適値近傍で約 60% の中性化効率を得られる. 最適なガス線密度を得るためには 2 つの考え方があり, Fig. 5 に示すように 1 つは中性化セルを長くしてガス密度を低くする方法であり, 今 1 つは中性化セルを短くしてガス密度を高くする方法である. 前者はビームラインが長く大きくなるが排気系を大幅に

(a) Long Neutralizer



(b) Short Sub-divided Neutralizer

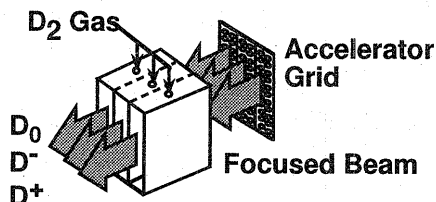
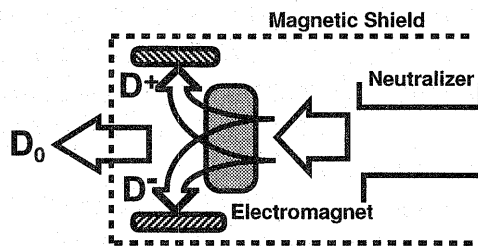


Fig. 5 Concept of gas neutralizer

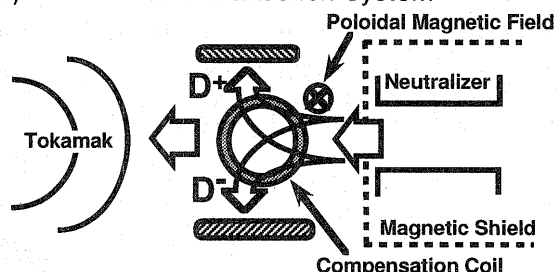
小さくすることが可能であり, 設計によってはクライオポンプに換えてターボ分子ポンプの使用が可能となり, ビームライン中のトリチウムの蓄積を避けることができる. 一方後者の方式ではガスセルのコンダクタンスが大きくなり必要なガス排気速度が過大となることから, Fig. 5 に示すように多チャンネル化によりコンダクタンスを小さくすることが不可避である. 多チャンネル化した場合, 中性化セルのビーム光学上のアクセプタンスが小さくなり収束性に優れた負イオンビームの生成が必要となる. 近年ビーム発散角 ($1/e$ の半値幅) が 3mrad 以下の高収束性ビームが得られており, 中性化セルの多チャンネル化が可能となっている.

JT-60U および LHD 用負イオン NBI 装置の中性化セルは前者の考えに基づいて設計製作されている. 後者の考えに基づいて現在設計が進められているのが ITER 用負イオン NBI 装置である [20]. 後者の方がビームライ

(a) Electromagnet Deflection System



(b) Poloidal Field Deflection System



(c) Electrostatic Deflection System

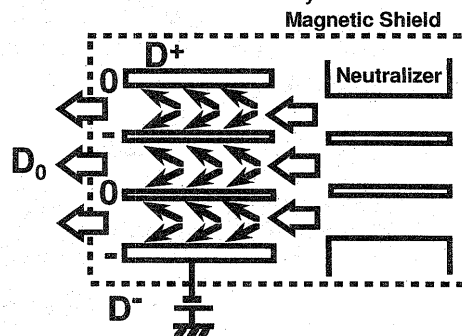


Fig. 6 Concept of residual ion deflection

ンをよりコンパクトにでき、かつ磁気シールドも容易になることからより炉との整合性に優れた方式といえる。

(3) イオンダンプ

a. 残留イオンの偏向

負イオンビームは最適ガス線密度の中性化セルを通過後約60%が中性粒子ビームになり、残留イオンは約20%の負イオンビームと約20%の正イオンビームより成る。正イオン NBI 装置では残留イオンは正イオンのみである。これらの残留イオンは従来の NBI 装置では、偏向磁石による磁場により曲げられイオンダンプに導かれていたが、ビームエネルギーやビーム断面寸法が大きくなると偏向磁石自身が大きなものとなり、かつ偏向磁石周囲の空間を磁気遮蔽する必要があること、また、ビームが収束されてイオンダンプ上の熱負荷が過大になること、またイオン分離後の空間電荷によるビームの広がりが問題となる等の欠点がある。このためトカマクからの漏洩ポロイダル磁場を積極的に利用することが提案され [21]、JT-60U 用負イオン NBI 装置で実用化された。漏洩磁場は時間的に変化するため変動分を補償するためのコイルを配置し、一定磁場が残留イオン偏向部に加わるようにしている。本方式により残留イオン偏向部の大幅な合理化が可能となった。

一方、実験炉用 NBI では放射線の強い真空容器中に絶縁材で囲われたコイルを配置するには無理がある。このため、Fig. 6 に示すように静電偏向により残留イオンを分離することが考えられている [22]。正イオンを受ける受熱面と負イオンを受ける受熱面のいずれか一方に数 kV 程度の比較的低い負の電圧を印加することにより、

両面間に平行電界を形成し正負両イオンビームを反対方向に偏向する。負の電圧を印加するのは周りから電子を引き込まないようにするためである。この平行電界によりビームは収束されることなく受熱面に一様に入射し除熱が容易となる。アンペア級の負イオンビームを用いた静電偏向実験はエネルギー回収実験で既に実施しており、小容量の電源で有効にビーム偏向が可能となっている。

b. 高熱負荷除熱

イオンダンプやカロリメータの表面熱流束は数～数 10MW/m² という高熱負荷に曝され、かつ数 MW の高い除熱能力が要求される。しかも片面から入ってくるため受熱面と反対側の面との間の温度勾配が大きくなり熱応力や熱変形が問題となってくる。除熱という観点では冷却管内部にリボン状のテープを取り付けたスワール管が開発され、旋回流によって直管に比べて約1.5倍の限界熱流束を得ることができる。しかし、片面入熱の場合熱変形が問題となる。このため Fig. 7 に示すように受熱面の反対側にも熱が伝わるようにフィンをつけた冷却管が開発された。本冷却管は、熱変形を小さくできるばかりでなく、核沸騰も冷却管内面の広い領域にわたって起こることから 1 本当たりの除熱能力が30～40%も増大するという大きな効果がある。この結果、Fig. 8 に示すようにフィン付きスワール管は通常のスレート管より約2倍の限界熱流速が得られる [23]。さらに最近では、スワール管より圧力損失が約20%低減でき限界熱流束は変わらないというより優れた冷却管も開発されている [24]。これらの高性能冷却管はダイバータ板用冷却管と共通の技術として現在も開発が続けられている。JT-

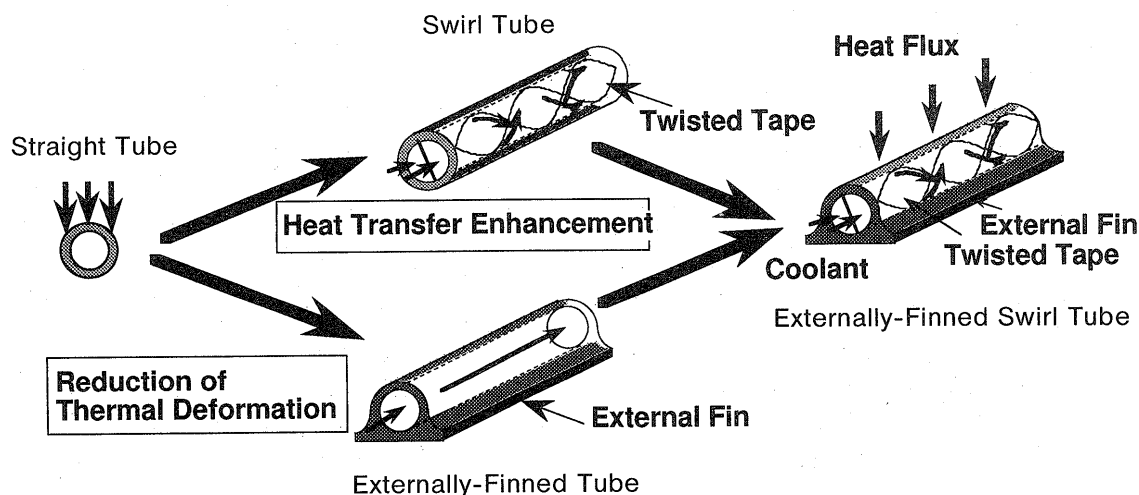


Fig. 7 Concept of the externally-finned swirl tube which gives high Critical Heat Flux (CHF) and a low thermal deformation simultaneously

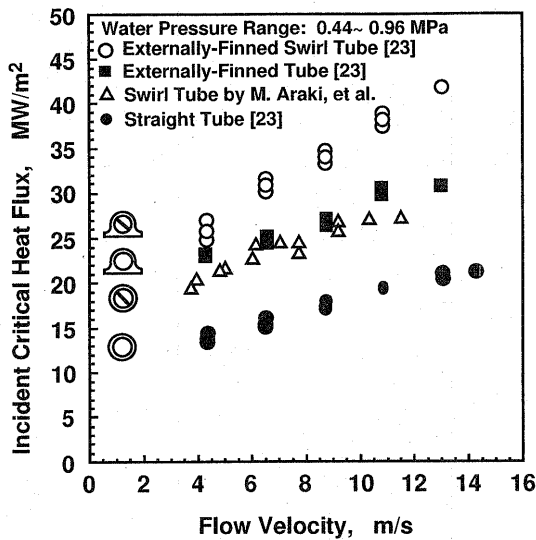


Fig. 8 Incident critical heat flux of various water cooling tubes.

60U 負イオン NBI 装置のイオンダンプには最大表面熱負荷 15MW/m^2 , 1 本当たり 130kW の入熱を想定して, 内径 10mm × 外形 14mm × フィン幅 25mm × 長さ約 1.3m のフィン付きスワール管が用いられ, 約 10m/s の冷却水が流されている。

(4) 電源技術

電源技術, 特に加速電源技術はイオン源技術と表裏一体の関係にあり, 安定にビームを加速する上で極めて重要な技術である。

イオン源加速部の電極間には直流高電圧が印加され, イオンビームが静電的に加速される。設計にもよるが加速電極間には数 $10 \sim$ 数 100kV で数 kV/mm の電界が印加されるため, 必ず放電破壊が発生する。逆に放電破壊を起こさせながら加速部のエージングを行い耐電圧性能を向上しているといえる。放電破壊は加速電源にとっては負荷短絡現象であり, 放電破壊が発生したときには瞬時に電流を遮断し, 電源を保護する必要がある。同時に加速電極に過大な放電破壊のエネルギーが流入して電極を焼損しないように加速電極を保護する必要もある。低容量の電源であれば負荷に直列に抵抗を入れるだけで電源と加速電極を保護することは容易である。しかし NBI 用加速電源のように数 $\text{MW} \sim$ 数 10MW の大容量の電源となると高インピーダンス化することは困難であり, 直流出力側に真空管や半導体スイッチで構成される高速遮断スイッチを配置して, 数 $10 \sim$ 数 100 マイクロ秒で遮断が行われる (Fig. 9)。このような直流出力側に高速遮断スイッチを配置する方式は, 加速電圧が $100 \sim$

200kV 以下の正イオン NBI 用に開発され現在信頼性良く機能している。しかし数 $100\text{kV} \sim 1\text{MV}$ 以上の加速電圧が必要とされる負イオン NBI においては, 電圧制御上直流スイッチを適用することには困難がある。このため交流低圧側にインバータを用いて GTO サイリスタバルブにより高速遮断する方式が開発された。インバータでは数 100Hz の交流を発生するため直流高圧側のフィルタコンデンサの容量を大幅に低減することが可能となり, 放電破壊時に電極へ流入するエネルギーの抑制が容易となる。本方式は原研の電子ビーム高熱負荷試験装置 100kV , 5A 電源で実証され [25], JT-60U 用 500kV , 64A 電源に適用された。さらに ITER へ向けた 1MV , 45A 電源の設計にも採用されている。

以上のように放電破壊時には高速スイッチにより加速電源は瞬時に遮断することができる。しかし, 高電位部にはイオン源とともに負イオン生成と引き出しに必要な各種電源を配置する必要がある。このため, 絶縁破壊時には負イオン生成用電源高圧部の対地浮遊容量に蓄積されたエネルギーやこれらの電源に給電するための絶縁変圧器の大きな対地静電容量に蓄積されたエネルギーは, 高速スイッチングの動作とは無関係に加速部電極にサージとして流入する。このサージエネルギーやサージ電流は数 10 マイクロ秒の短時間であるが, それぞれ数 100 ジュール以上, 数 10kA 以上にも達し, 電極は損傷を受け耐電圧性能が著しく低下することとなる。どの程度のサージエネルギーが許容されるかについては電界強度, ギャップ長等いろいろの要素があり未だ明確な指針はない。しかし正イオン源に比べて加速電極間隔が約 1 桁長い $40 \sim 80\text{mm}$ の負イオン源用加速系に関しては, 経験的に, 数 10 ジュール以下, $2 \sim 3\text{kA}$ 以下であれば顕著

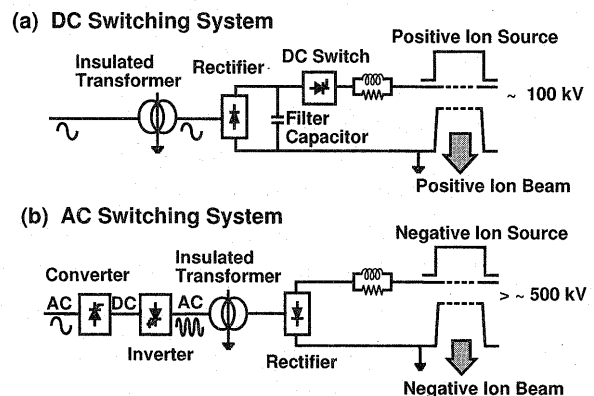


Fig. 9 Acceleration power supply systems with AC switch and DC switch. For the higher energy acceleration, the AC switching system is required.

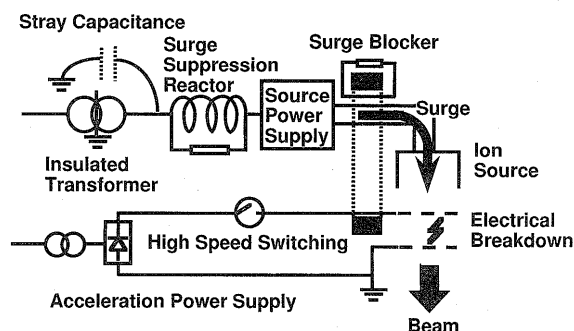


Fig. 10 Concept of the surge suppression in the power supply system.

な耐電圧性能の劣化は観測されていないといえる。このイオン源へのサージ流入抑制のために、Fig. 10に示すように2段階にサージの流入を抑制する方法が開発された[26]。第1段階として絶縁変圧器の対地静電容量に蓄積されたエネルギーは、絶縁変圧器とイオン生成電源の間にリアクトルを入れることによりサージ電流を大幅に低減することができる。第2段階としてイオン生成電源出力端とイオン源負荷端の間にサージブロッカーを挿入する。これは電源出力には影響を与えず浮遊容量からの流入サージのみを選択的に抑制する素子であり、磁性体コア、抵抗を接続した二次回路およびバイアス電源回路から構成される。一次回路に流れるサージのエネルギーは、変圧器の原理で二次回路の抵抗で消費され、イオン源への流入サージが抑制される。磁性体コアとして従来フェライトが使われてきたが、新たにフェライトの約4倍の飽和磁束密度を有するコア（ファインメット）が開発された[27]。本コアは鉄基超微結晶質磁性合金薄帯であり、寸法、重量、製作性等大幅に改善することができサージ抑制が容易になった。本コアはMeV級イオン源試験装置[18]およびJT-60U用500kV電源に用いられている。

4. 負イオン NBI 装置開発の現状

大出力負イオン源の目ざましい進展を背景にして、日本でのみ2つの負イオンNBI開発計画、即ちJT-60U用の500keV、10MWのNBI[28]およびLHD用の180keV（重水素では360keV）、15MWのNBI[29]の開発が進められている。JT-60Uの500keV NBIは建設が完了し総合試験が開始されている（Fig. 11）。そのイオン源は単基当たり500keV、22Aの重水素負イオンビームを10秒間発生させることが要求されており、現在までに400keV、13.5Aすなわち5.4MWの重水素負イオンビームが得られている[13]。さらに、平成8年3月には

ビーム出力はまだ小さいが初めてプラズマへの入射にも成功している[30]。一方、LHD用のNBIも1998年入射実験を目指して建設中である。さらに、ITER等の核融合実験炉へ向けた炉対応の1MeV級NBIの実現を目指したR&Dも原研が中心となって進められている。これらの負イオンNBI装置の主要設計パラメータおよび目標性能をTable 1に示す。また、各NBIのビームライン断面構造の比較をFig. 12に示す。それぞれの装置で設計条件や入射パワーは異なるが、ITERへ向けてよりコンパクトで高出力の装置の開発が進められていること

Table 1 Basic parameters of the negative-ion-based NBI systems for JT-60U, LHD and ITER

	JT-60U	LHD	ITER
Status	Completed in 1996	Under Construction	Engineering Design
Beam Energy	500 keV	180 (/ 360) keV	1 MeV
Injection Power	10 MW	15 MW	50 MW
Pulse Duration	10 s	10 s	10,000 s
Ion Species	D / H	H (/ D)	D
No. of Beamline	1	2	3
No. of Ion Source / Beamline	2	2	1
Negative Ion Beam Current / Source	22 A	40 (/ 20) A	40 A

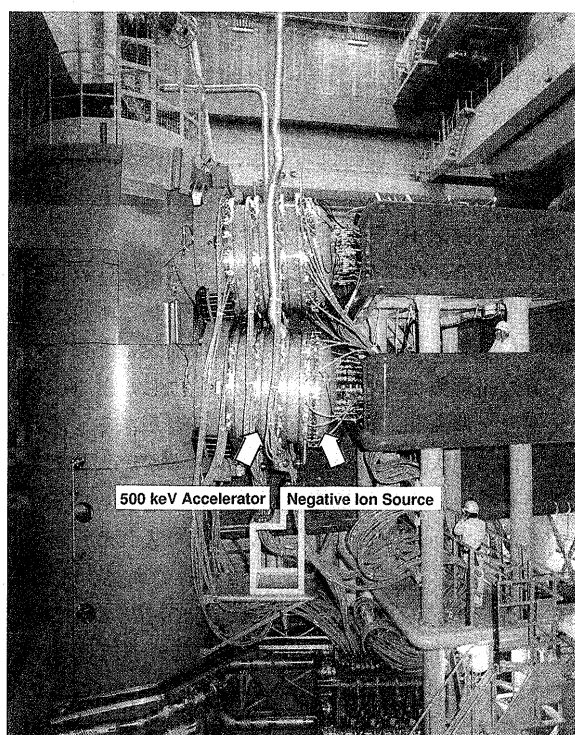


Fig. 11 The 500keV, 22A deuterium negative ion source mounted on the beamline

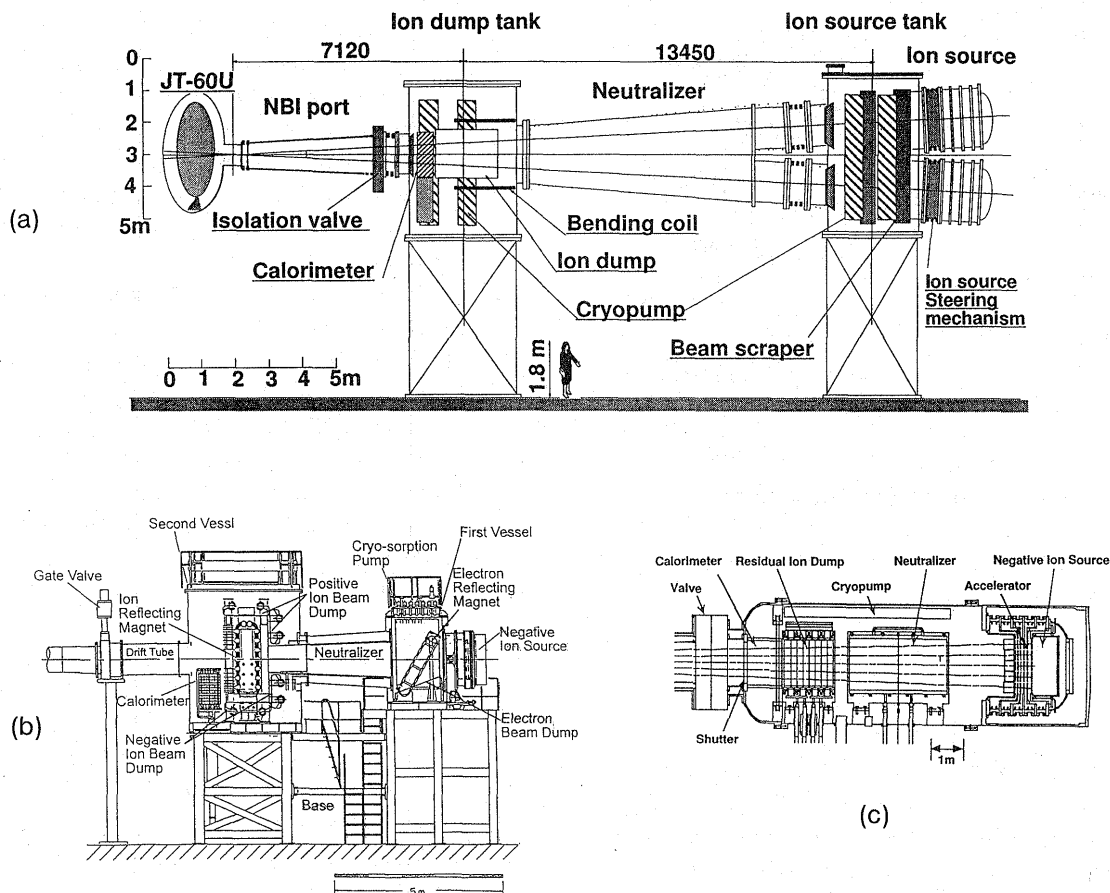


Fig. 12 Sideviews of (a) the 500keV 10MW NBI beamline for JT-60U, (b) the 180keV 7.5MW NBI beamline for LHD, and (c) the 1MeV 17MW NBI beamline for ITER. They are reduced on the same scale.

がわかる。

5. おわりに

最近の NBI 技術開発上の主な成果を以下の 3 項目にまとめた。

- 1) 核融合の加熱と電流駆動のための大出力負イオン源の開発において、実用レベルの 10A 級の水素および重水素負イオン生成に成功した。
- 2) JT-60U や LHD で初めて負イオン NBI 装置が実用化されつつある。JT-60U 負イオン源ではすでに 400keV, 5.4MW の重水素負イオンビームを生成するとともに、プラズマへの入射も開始された。
- 3) ITER 等の実験炉へ向けた 1MeV 級負イオン加速技術も開発が進められており、既に 800keV 以上に負イオンを加速できるまでに至っている。

正イオンを用いた最初の NBI が英国カラム研究所で

構想され、米国オークリッジ国立研究所で 60kW 程度の NBI が開発されたのが約 25 年前である。その後三大トカマク等のために $\sim 100\text{keV}$, 20 \sim 40MW の NBI が開発され核融合研究に役立てられてきた。当初から将来の NBI として負イオンを用いた NBI の実現は NBI 研究開発に携わる者の長年の夢であり、かつ挑戦的な技術開発課題であった。しかし大出力負イオン源技術において、近年日本において大きな進展を見ることができ (Fig. 13), 負イオン NBI 装置は実用レベルに達した。負イオン NBI 技術は日本の技術としてさらに核融合炉との整合性のとれた信頼性の高いものが開発され、核融合研究に役立てられていくことを切望するものである。

最後に本解説をまとめるにあたり図面や助言をいただいた栗山正明, 奥村義和, 荒木政則, 渡辺和弘の各位に、また LHD と ITER の NBI に関する図面を提供していただいた核融合科学研究所の黒田 勉先生および ITER 中

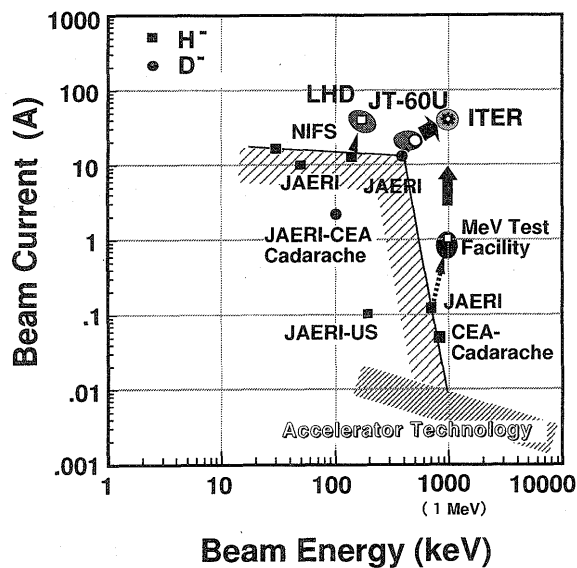


Fig. 13 Progress of high power negative ion sources and future goals

央チームの R. Hemsworth 博士に謝意を表します。

参考文献

- [1] 菊池 満：プラズマ核融合学会誌 **70**, 255 (1994).
- [2] JT-60 Team presented by M. Kikuchi, *15th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Sevilla, Spain (1994) A-1-I-2.
- [3] K. M. McGuire, *et al.*, *The Physics of Plasma*, Special Issue (1995).
- [4] Y. Okumura *et al.*, *Proc. 16th Symp. on Fusion Technology*, London, U.K., 3-7 Sept., 1026 (1990).
- [5] Y. Takeiri *et al.*, *Proc. 18th Symp. on Fusion Technology*, Karlsruhe, Germany, 22-26 Aug., 609 (1994).
- [6] M. Kuriyama *et al.*, *Proc. 17th Symp. on Fusion Technology*, Rome, Italy, 14-18 Sept., 564 (1992).
- [7] T. Kuroda *et al.*, *Fusion Engineering and Design* **26**, 227 (1995).
- [8] Y. Ohara, *Fusion Engineering and Design* **26**, 415 (1995).
- [9] 奥村義和：核融合研究 **60**, 329 (1988).
- [10] Y. Okumura *et al.*, *Proc. 17th Symp. on Fusion Technology*, Rome, Italy, 14-18 Sept., 594 (1992).
- [11] M. Hanada *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 499 (1990).
- [12] K. Miyamoto, C. Jacquot, Private Communication (1996).
- [13] K. Watanabe *et al.*, *7th Int. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Ions and Beams*, Brookhaven National Laboratory, Oct. 23-27, (1995).
- [14] Y. Okumura *et al.*, *Proc. 11th Symp. on Fusion Engineering*, Austin, Texas, 18-22 Nov., 113 (1985).
- [15] Y. Okumura *et al.*, *Proc. 5th Int. Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams*, Brookhaven, NY, 169 (1990).
- [16] O. Kaneko *et al.*, *Proc. 15th Symp. on Fusion Engineering*, Hyannis, MA, 11-15 Oct., 462 (1993).
- [17] M. Mizuno *et al.*, *Proc. 6th Int. Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams*, Brookhaven, NY, 710 (1992).
- [18] T. Inoue *et al.*, JAERI-Tech 94-007 (1994).
- [19] J. Pamela, J. Bucalossi, C. Desgranges, M. Fumelli, P. Massmann and A. Simonin, *7th Int. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Ions and Beams*, Brookhaven National Laboratory, Oct. 23-27, 1995.
- [20] R. S. Hemsworth *et al.*, *16th Symp. on Fusion Engineering*, Champaign, Sep. 30-Oct. 5, 1995.
- [21] Y. Ohara *et al.*, *12th Symp. on Fusion Engineering*, Monterey, California, Oct. 12-16, 298 (1987).
- [22] J. Pamela *et al.*, *Proc. 18th Symp. on Fusion Technology*, Karlsruhe, Germany, Aug. 22-26, 629 (1994).
- [23] M. Araki *et al.*, *Fusion Engineering and Design* **9**, 231 (1989).
- [24] M. Araki *et al.*, to be published in *Fusion Technology* (1996).
- [25] M. Mizuno *et al.*, *Proc. 13th Symp. on Fusion Engineering*, Knoxville, TN, Oct. 2-6, 574 (1989).
- [26] 渡辺和弘, 伊藤孝雄, 松岡 守：プラズマ核融合学会誌 **69**, 1229 (1993).
- [27] Y. Yoshizawa *et al.*, *Materials Transaction, JIM*, **31**, 307 (1990).
- [28] M. Kuriyama *et al.*, *Fusion Engineering and Design* **26**, 445 (1995).
- [29] O. Kaneko *et al.*, *16th Symp. on Fusion Engineering*, Champaign, Illinois, 30 Sept. -5 Oct. (1995).
- [30] 伊藤孝雄他：プラズマ・核融合学会第13回年会，京都大学，3月21～23日 (1996) 22pC-5.