

研究論文

LHD 用負イオン方式 NBI の開発

金子 修, 竹入 康彦, 津守 克嘉, 岡 良秀
長壁 正樹, 秋山 龍一, 浅野 英児, 河本 俊和
(核融合科学研究所)

Development of Negative-Ion-Based NBI for the LHD

KANEKO Osamu, TAKEIRI Yasuhiko, TSUMORI Katsuyoshi, OKA Yoshihide,
OSAKABE Masaki, AKIYAMA Ryuichi, ASANO Eiji and KOHMOTO Toshikazu

National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan

(Received 3 December 1998/ Accepted 5 January 1999)

Abstract

High power negative-ion-based neutral beam injectors for the LHD were constructed and started in operation in September 1998. Two beam lines with a pair of ion sources are installed tangentially in opposing direction. The maximum energy of the beam is 180 keV for hydrogen, and the total injection power is designed to be 15 MW with the pulse length of 10 seconds. One of the specific features of the negative-ion-based NBI system is the requirement on the vacuum pressure in order to avoid the stripping loss of negative ions as well as to realize the optimum gas line density for neutralization, which results in the long beam line. The system was then designed carefully by considering the focal length of the ion sources, neutralizing efficiency, and geometrical and re-ionizing loss of the beam. It is also considered the error magnetic field produced by the ferromagnetic materials that are indispensable for NBI for the magnetic shield over the long neutralizing region.

Keywords:

NBI, ion source, negative ion, plasma heating

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) は, 核融合炉に外挿しうるパラメータのプラズマを生成・保持することを目的の一つとしているが, そのために主加熱として 15 MW の中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱を計画した. NBI の仕様を決定するにあたっては, ヘリカル系の特徴を考慮し, ビームの損失が少ない接線入射および良好なビーム吸収に基づく中心加熱を基本とした. その結果ビームエネルギーは軽水素で 100 keV を超し, システムは負イオンを用

いざるを得なくなったが, このような大量の負イオンを発生するイオン源は計画スタート時には存在せず自主開発が最大の課題となった. 1990 (平成 2) 年から始まった負イオン源開発は, このように大電流をめざしたものであったが 8 年に及ぶ開発研究の結果, 負イオンの高電流密度化に成功し, 1 イオン源あたりの負イオン電流値としては世界最高レベルに達することができた [1-5].

一方, 1995 (平成 7) 年度からは NBI 入射装置本体の設計・製作が始まり, 開発中の負イオン源の結果を基

corresponding author's e-mail: kosamu@nifs.ac.jp

†この論文は第15回年会にて招待講演として発表されたものを論文化したものです.

に最適なシステム作りを進めた[6]. この間にビームエネルギーを見直して 180 keV とし, イオン源サイズを最終決定して, 2 台のビームライン・4 台のイオン源により 15 MW の入射を行うべく設計を進めた[7]. 本論文では負イオンを用いた入射装置, 特にビームライン設計上の検討と初期運転結果について述べる.

2. ビームラインの設計

NBI の基本性能はイオン源によって定まるが, 一般にイオン源の能力としては引き出し可能なイオン電流密度に上限がある. 特に負イオン源では大きな制限となっている. 一方ビームエネルギーはプラズマへの吸収(分布)を最適化する観点から範囲が限定されるが, こちらは負イオンの場合は設定エネルギー成分のみのビームとなるから考えやすい. この 2 つの条件から負イオン源の大きさ, 台数を決めるわけであるが, この過程で現実的な製作性や機器の設置条件, ビームのポート通過効率を考慮する. LHD では当面ビーム種として軽水素を用いるが, ビームエネルギーとして当初 125 keV を想定していた. その後, ビームの吸収断面積が multi-step ionization を考慮すると大きくなるとの指摘から[8,9] ビームエネルギーを 180 keV に上げ, 高密度プラズマへの吸収分布を改善することとした. ビームエネルギーの上昇に伴い(電流値を同じとすれば)ビーム出力は上がるので, 当初 3 台で計画していたビームライン台数を 2 台とし完全な平衡入射とした.

2.1 イオン源並びとビーム入射角

LHD では接線入射を行うことが高速イオンを閉じ込める上で重要である. しかしながら LHD の真空容器形状はプラズマと合わせるように回転楕円トラスになっているためビームが真空容器壁と接触しないよう入射角を選べると選択の余地はほとんどないことがわかる. LHD の負イオン源は外部フィルタ方式[2]としたのでフィルタ磁石間隔を大きくとれず, ビーム引き出し領域の 1 辺を 25 cm とし, 他辺を 125 cm とする細長い構造をとった. したがってイオン源はメンテナンスの容易さから縦置き・横並びにするのが望ましいが, 1 ビームラインあたりの台数は入射角の制限から 2 台を限度と考えた. 最終的には 2 台の横に並んだビーム軸のなす角(3.6 度)を 2 等分する仮想軸の LHD 中心からの距離が 3.7 m となる角度としている. ちなみに LHD の標準配位におけるプラズマ主半径は 3.75 m である. この位置関係を Fig. 1 に示す. 幸いなことに入射されたビームはすべて周回粒子となり, 高速イオンの直接軌道損失はない

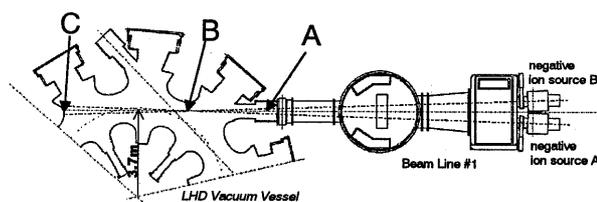


Fig. 1 Arrangement of a neutral beam line and the LHD vacuum vessel.

ことがシミュレーションで示されている.

2.2 ビームラインの構成

Fig. 2 にビームラインの構成を示す(1号機, 2号機もほぼ同様). 2 台の負イオン源が矩形の拡散容器に取り付けられる. 拡散容器には $360 \text{ m}^3/\text{s}$ のクライオソープションポンプを設置し, 真空度を 0.04 Pa に保つ. 拡散容器出口にはそれぞれのイオン源に対応してテーパ状の矩形中性化セルが接続されている. セルの長さは 3.5 m であり, 拡散容器内を含めて中性化領域となるよう動作真空度を選んだ. セル出口には偏向磁石とビームダンプを設置した真空容器があり, この中には $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ のクライオソープションポンプを搭載して運転ガス圧を $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ まで落とし, ビームの再電離損失を 5% 以内としている. ガス線密度は正負の残留イオン比が等しくなるように選びビームダンプへの熱負荷を軽減している. 中性化用のガスは基本的にイオン源から流れてくるものを利用するが, イオン源は極力低ガス圧動作をめざすので中性化セルにもガス導入ができるように配慮した. なお, イオン源から拡散容器, 中性化セル出口まではイオンビームに対する磁場の影響を避けるため軟鉄とミュンメタルの二重構造による磁気シールドを施し, 内部の磁場を 0.5 G まで落とす設計としている.

2.3 ビーム焦点の選択とポート通過効率

LHD はトロイダルコイルを持たないので接線ポートを比較的大きくとれるが, 基本的に円形ポートとなる. それに対して負イオン源の引き出し面積は $25 \text{ cm} \times 125 \text{ cm}$ と非常に大きく, かつ 2 本のビームを通過させることを考えると幾何学的には厳しい条件となる. また, LHD は超伝導コイルを用いたシステムであり装置全体がベルジャ容器の中に入っているためポート長はベルジャポートから真空容器まで約 2 m ある. 管径は, 最も制限される真空容器側では 60 cm, ベルジャ側で 80 cm であるが, 内部を水冷保護板で覆うと 52 cm まで落ちる. このような形状の下でビームに要求される条件は, ①入射ポート通過効率を最大にし, ②プラズマ中のビーム径を最小にし, ③対向面アーンプレートの最大熱負荷

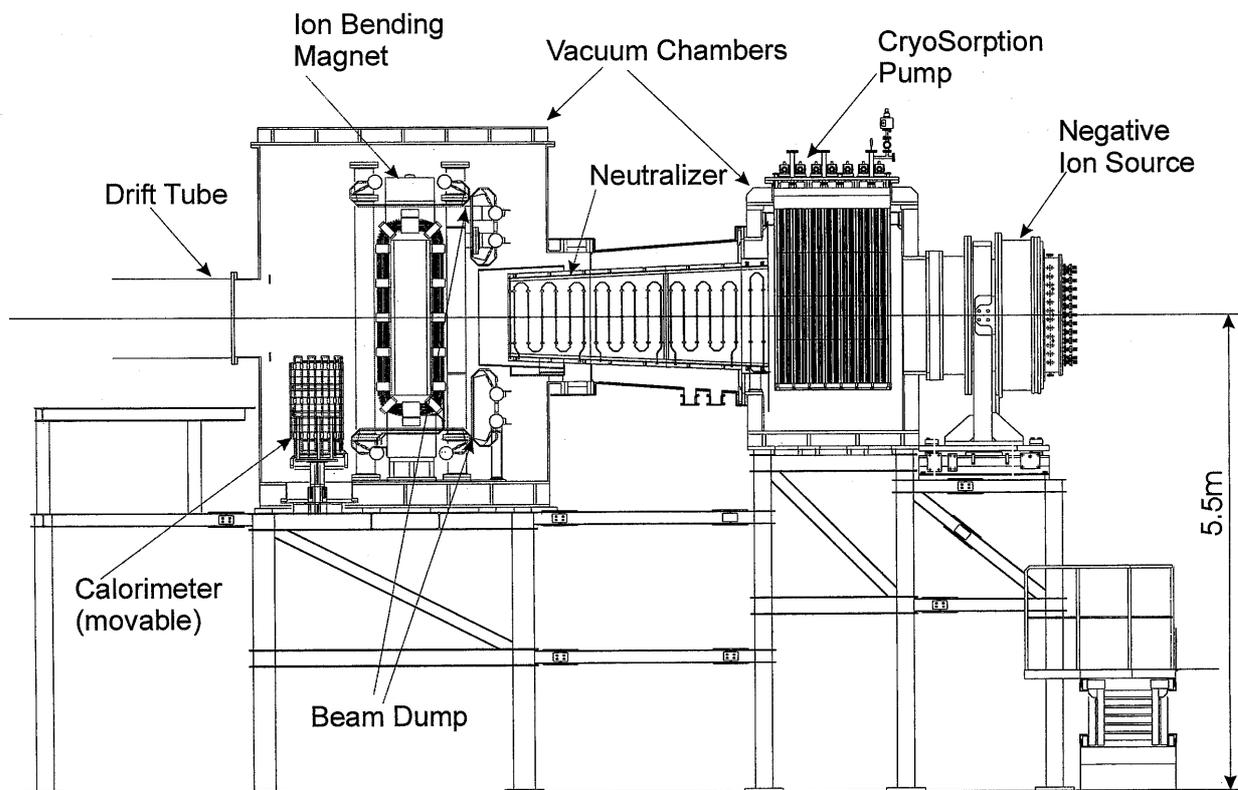


Fig. 2 A schematic vertical view of the beam line (#1).

を下げる，というものであるが，これらは一般に両立せず最適化を図ることになる．そのための自由度はビームの焦点距離の選択，2台のイオン源間隔ならびに入射角度の選択である．このうち②に関してはビーム発散に伴うものと2つのビームが交叉点を越えてプラズマ内で再び離れることの2つの要因がある．後者に関してはイオン源間隔をできる限り縮める以外に方法はなく，そのためLHDでは2台のイオン源を異なったエネルギーで運転するのをあきらめている．

ポート通過効率を最大にするため，ビームの焦点位置はポート管の中央 (Fig. 1 中A点) に選ぶのが常識であるが，2台のイオンビーム軸の交叉点をここに持ってくるとプラズマ内でビームの分離が起こりビームが真空容器壁に接近する．もっとも壁に近いのは Fig. 1 中のB点であるが，ここに焦点と交叉点を共に持ってくるとポート通過効率が落ちるとともにビーム対向面での熱負荷分布が急峻となり好ましくない．そこで焦点位置と交叉点位置の組み合わせを変えて比較検討したのが Table 1 である．この結果から個々のイオン源の焦点をA点とし，ビーム軸の交叉点をB点 (表中のケース (d)) とした．

ここで我々が採用しているビーム収束方法は次のとおりである．負イオン源電極を長手方向に5分割し各々の電極が焦点位置に向かうように設置するとともに，各分割電極内のビームレットは孔軸ずれによる静電収束を行っている [4]．静電方式による焦点距離はビームエネルギーで変わるので，この条件でビームレットの焦点距離が変化した場合 (機械的に設定した分割電極の焦点距離は一定にして) のポート通過効率に及ぼす影響を計算したのが Fig. 3 である．この結果からビームレットの焦点距離の変化に対して依存性は弱いといえ，ビームの運転上好ましい結果となっている．

一方，ポート径は通過効率に大きな影響を及ぼす．Fig. 4 はビームレット発散角 10 mrad. の通過効率のポート径依存を表したものである．通過効率95%以上確保を目標としていたが最終的にはポート内部に設置した保護板の断面形状 (16角形) の最短間隔は 52 cm となりほぼ満たされたものとなっている．

2.4 残留イオン処理

180 keV 負イオンのガスセル中の最適中性化効率は約 60% である．残りは正負両種のイオンビームであり，

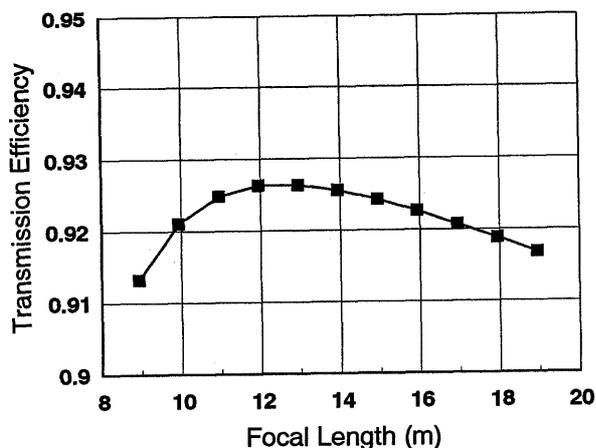


Fig. 3 Dependence of the transmission efficiency of the tangential port on the focal length of the ion source.

Table 1 Comparison of (1) the heat load on the armor plate and (2) the least gap between the beam edge and the wall in four combinations of the focal point of an ion source and the crossing point of two beams; (a) both points at A in Fig.1, (b) both points at B, (c) focal point at B and crossing point at A, and (d) focal point at A and crossing point at B.

	Heat load	Gap
(a)	16 MW/m ²	0.03 m
(b)	23 MW/m ²	0.10 m
(c)	22 MW/m ²	0.02 m
(d)	15 MW/m ²	0.12 m

その比はガス線密度に依存する。これらのビームパワーは強力であり、所定の場所にビームを導入し熱処理を行わなくてはならない。このためのイオンビーム偏向方式としてLHDからの漏れ磁場を利用することも検討したが実験条件により漏れ磁場強度が大幅に変化するため電磁石を用いて確実な偏向を行うことにした。ただしイオンビームのサイズが大きいため偏向磁石もかなり大きなものとなり、逆に本体への不整磁場発生が懸念された。そのため極力ヨークを小型化することに努めた。1号機ではビームダンプへの熱負荷を小さくするため180度反射型を採用したがビームダンプをヨーク内側に設置することによりヨークを小型化した。2号機では透過型偏向

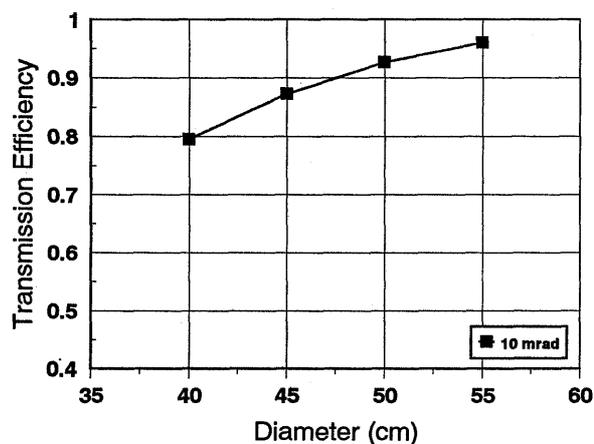


Fig. 4 Dependence of the transmission efficiency on the diameter of the tangential port.

磁石を採用してさらに磁石を小型化した。また、いずれの場合も本体漏れ磁場に対する磁気シールドは設置せずビームダンプを大型化することにより対処した。これも不整磁場を極力減らすためである。1号機と2号機は全体的な仕様はほぼ同じであるが、このイオン偏向系のみが大きく異なる点である。イオン偏向系の比較をFig. 5に示した。

なお、本装置ではプレプログラミングによりイオンビームエネルギーをパルス中に変化させることが可能である。偏向磁場強度はビームエネルギーに対応して自動的に変化するように制御されている。ただしイオン源の動作ガス圧は一定と考えているので中性化ガス線密度も一定となる（プレプロないしはフィードバック制御が可能なシステムになっているがイオン源の動作特性とのマッチングは難しい）。ガス線密度は180 keVのビームに対して最適となるよう排気系を設計している所以他のエネルギーでは必ずしも最適条件にない。この時の中性化効率と正負イオン比のビームエネルギー依存をFig. 6に示す。実験で使用するエネルギー範囲（図中ハッチ部）において中性化効率は大きく変化せず正負イオン比のみが変化することがわかる。ビームダンプへの熱負荷はビームエネルギーを下げるとパワーも減るので正イオンの比が増えても大きくなることはなく、運転上支障はない。

2.5 磁気シールドと不整磁場

LHDでは周辺に置かれた磁性体等で誘起される不整磁場成分を 10^{-4} 以下とするよう要求されている。NBIでは中性化領域の磁気シールド並びに偏向磁石は必要不可欠であり必要最小限の大きさにとどめる努力をしてきたが、なにぶんビームサイズが大きいことと高真空度が要

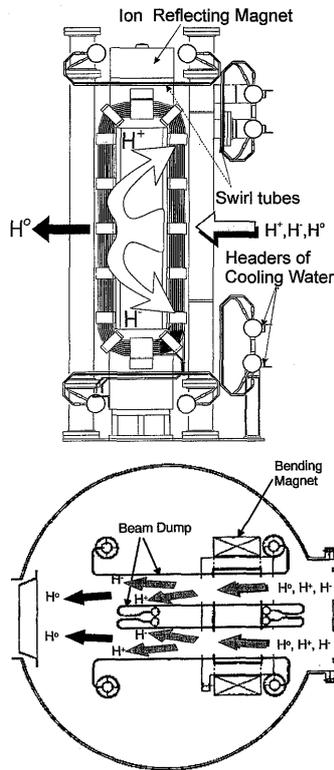


Fig. 5 Schematic diagrams of bending magnet and ion beam dumps; (a) 180-degree reflecting type for the beam line #1 (vertical view), and (b) 30-degree bending type for #2 (horizontal view).

求られて中性化セルが長くなるため、磁気シールドがかなりの大きさになる。そこで磁気シールドが作り出す不整磁場の大きさを漏れ磁場の空間分布を考慮して評価した。Fig. 7に標準磁場配位におけるLHD周辺の磁場分布を示す。(a)はLHD本体から比較的離れた場所での分布をダイポール磁場分布と比較したものであるが遠方ではよく近似でき、近傍ではむしろ小さくなっている。一方(b)は本体の極近傍の磁場分布であるがヘリカルコイルの影響で本体に近づくとも磁場強度が急激に増大することがわかる。この結果からNBI機器付近ではダイポール近似が成り立つことがわかるので、ダイポール磁場を用いて磁気シールドを始め電源トランスなどの磁性体も含めて誘起される磁気モーメント分布を求めLHDプラズマ中心軸上での不整磁場分布を計算したものがFig. 8である。最も寄与が大きいのは偏向磁石であることから1号機近傍で最大値が現れているが0.3G以下であり基準を十分満たしていることがわかる。

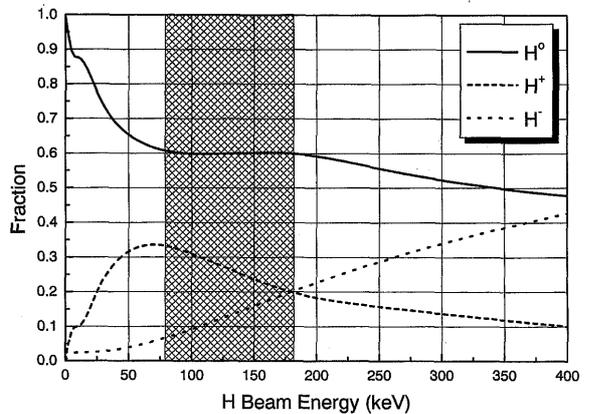


Fig. 6 Variation of neutralization efficiency and the ratios of positive and negative ion against the beam energy under the same gas line density optimized for 180 keV ions.

2.6 再電離損失とドリフト管保護

Fig. 7 (b)ではLHD本体に近づくにつれ、磁場強度が急激に増大することを示した。このことはドリフト管内で再電離したイオンの軌道に大きな影響を及ぼす。すなわち磁場が空間的に急激に強くなるためあたかも磁場の障壁が存在するように、再電離したイオンはほぼ同じ場所ですべてその軌道を曲げられるため、1ヶ所にビームが集中する可能性がある。この事情を具体的に示したのがFig. 9である。このビームによる熱負荷を考慮し、ドリフト管内面にはモリブデン性の保護板を設置した。保護管の設置は前述したように実効的なポート径を小さくしビームの通過効率を落とす、すなわち保護管自身への熱負荷を増やすことになるので極力薄くしてはならない。具体的には16枚のステンレス製の冷却板にモリブデン板を機械的に固定し交換可能な構造にした後、ドリフト管内側に沿って16角形に配置し水冷パイプを内壁との間に収めている。

2.7 電子ビームダンプ

負イオン源では負イオンに伴って電子が加速される。一部は加速器内で電極の熱負荷の要因となるが残りは電子ビームとして引き出される。この量は我々の場合、現状で負イオンビームの2割程度とみており熱負荷として無視できない。負イオン源は非常に強く複雑な磁場構造を内部でとっており、それが外部にも漏れ出して電子

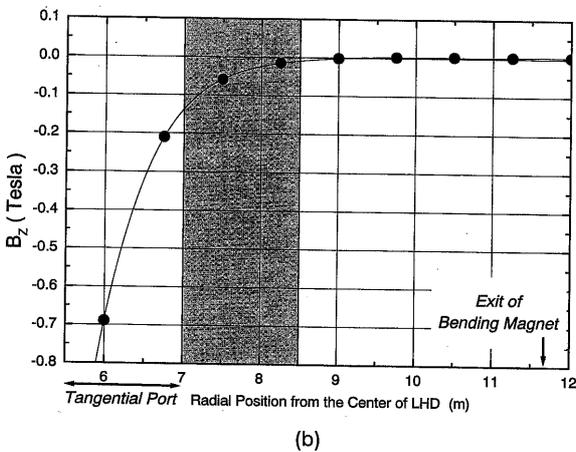
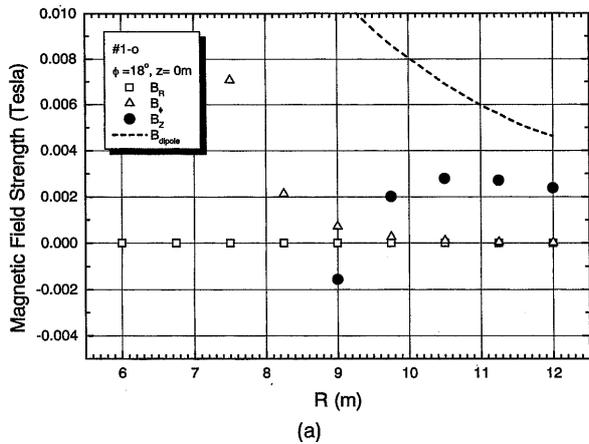


Fig. 7 A calculated residual magnetic field around the LHD in the case of 4 tesla operation. The magnetic field approaches the dipole field apart from the LHD (a), but increases abruptly in the vicinity of LHD (b).

ビームの軌道に影響を与えている。最も大きな成分は外部フィルタによるものであり、したがって電子は我々の設計では下側に曲がる。この傾向はテストスタンドにおける測定でも確かめられている [10]。ここで問題となるのはゲート弁がイオン源下流側にあることである。対策としてゲート弁とイオン源間にドリフト部を設けてそこに電子ビームダンプを設置することはできるが、コンダクタンスを悪くし負イオンの剝離損失を増長する恐れがある。そこで我々はゲート弁開放時にゲート弁内に挿入される可動型のビームダンプを導入しゲート弁を保護する構成とした。

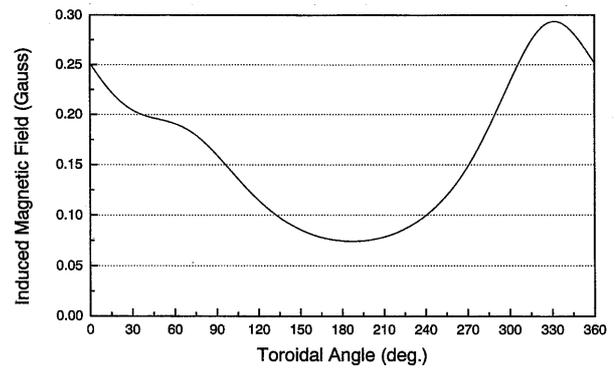


Fig. 8 An estimated error magnetic field strength along the toroidal axis of the LHD plasma due to the ferro-magnetic materials used in the NBI.

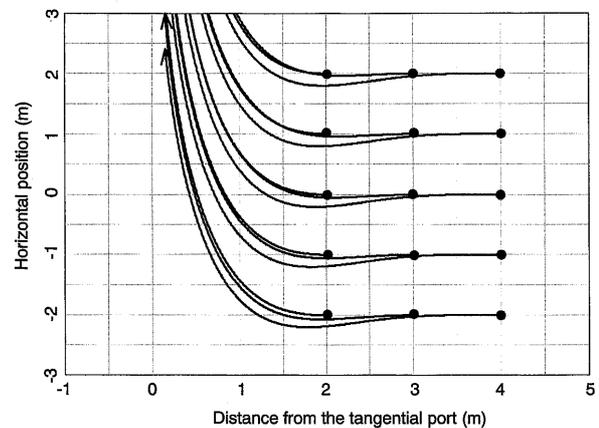


Fig. 9 Examples of the orbits of re-ionized neutral beam in the tangential port. Particles ionized at different positions along the beam concentrate almost at the same area on the wall.

3. 初期運転結果

3.1 実機におけるコンディショニング

NBIは1, 2号機とも、1998年3月に本体室への据付を完了し、第一サイクル実験期間の終了後から本格的な調整試験に入った。4台の負イオン源に関しては、本年度の実験がLHDの磁場強度が仕様値の1/2である1.5 Tで行われることから、ECHによるターゲットプラズマとして十分な密度を期待できないことを想定して電極ギャップをビームエネルギー100 keVに設定した。そして核融合科学研究所にある負イオン源開発用テストスタンドにおいて順次コンディショニングを他の機器の据付作業と平行して進めておいた。この段階で4台のイオン源のうち3台については100 keV・25 A・1秒間、および1 MW・10秒間のビームコンディショニングを済ま

せ、残りの1台についても20 Aまでのコンディショニングを済ませた。そして1998年8月から実機ビームラインに取り付け、総合試験・コンディショニングを進めた[11]。

調整に当たって一番問題となるのはイオン源電極間ブレイクダウンに伴うサージによる機器破損やノイズによる誤動作であるが、アース系の慎重な分離と機器間の確実な電位固定により対処した。具体的には一点接地箇所としてイオン源を選び、加速電源および電源の戻り線は絶縁を施している。また、NBIでは高電位に浮いた電源を多数持つが、これらはいずれも大型電源であり大きな大地間浮遊容量を持つ。高電圧を印加するとこの容量にエネルギーが充填され、イオン源内ブレイクダウン時には急速に放電されるわけであるが、この放電電流の流れるルートも固定できるよう架台も基本的に大地と絶縁した後にアース線を設置している。イオン電流が流れ込むビームラインも同様である。ビームラインに供給される冷却水や液体窒素等の冷媒供給配管、および真空排気配管にもすべて絶縁ブレイクを挿入している。またアース線にも耐圧を持たせ不用意に大地と接触しないようにしている。負荷端短絡時の急速なサージに対しては交流、直流側にそれぞれサージブロック回路を設置している。このような対策を施した後に定格電圧を印加し負荷端でギャップ放電によりイオン源電極間ブレイクダウンを模擬して外部に対してノイズを発生していないことを確認した。また、この間にNBI機器アースの電位分布も測定し、短絡電流値、基準点に対する電位変動値、減衰時定数がおおむね設計値を満足していることを確認した[11]。特に神経を使ったのは超伝導コイルのクエンチ検出器へのノイズであったが、これについてもギャップ短絡試験において検出器が異常信号を検出しないことを確認した。

3.2 ビームモニターと入力パワーの評価

負イオン源では加速電流値に電子が含まれるため、入射パワーの評価が複雑となる。基本的にはカロリメータにおける測定を基に中性化効率、ビーム空間分布とパワーを求め、その結果からポート通過確率を推定し、真空度の測定から求めた再電離損失を補正して入射パワーを評価する。ただし、カロリメータの位置は焦点距離の1/2程度の場合にあり、イオン源の電極サイズがまだ空間分布に効いているのでビーム発散の評価は正確ではない。したがって簡易的には電源電流からテストスタンドにおける測定データを基に評価を行っているが、我々の場合は加速電源を2台のイオン源で共有していること

でイオン源間の差違を考慮しなくてはならない。別の評価法として、各ビームライン内には入射ポートを観測できるミラーを持ち、赤外線カメラによりドリフト管保護板の温度上昇や更には対向面にあるアーマプレート(armor plate)の温度上昇を観測しており、このデータも参考にしている。ビーム入射後のアーマプレート表面温度分布観測例をFig. 10に示す。この例はLHD磁場通電時にプラズマを生成せずにビームのみ短時間アーマプレートに入射して得られたものである。したがって再電離損失の影響も含めたネットのポート通過パワーの評価に適しているが、LHD真空容器形状はFig. 1に示したように三次元的であり受熱パワーの評価自身は複雑である。以上のようなデータを基に得られているポート通過パワーは現在電源出力値〔(引出電圧+加速電圧)×加速電流〕の30%程度である。

3.3 入射実験と運転条件

入射実験開始に当たっては、ドリフト管内でのビームブロッキングを心配したが、LHDではグロー放電洗浄

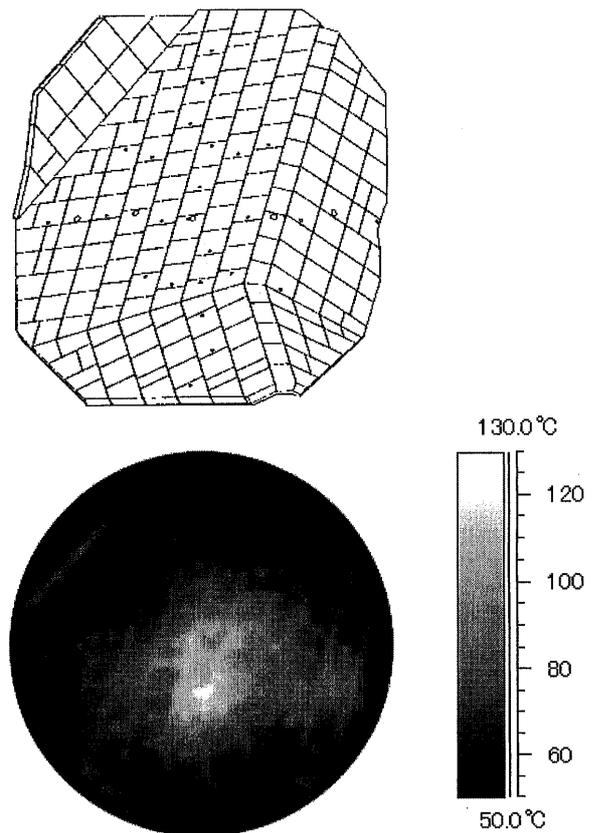


Fig. 10 A view of the armor plates (tiles) along the tangential port, and an observed temperature profiles after the beam injection.

をこの間積極的に行ったことが効を奏したと思われ、現状の1.5 MW, 1秒間の入射パワーレベルでは問題になっていない。1 MW, 10秒入射も行ったが、この時もドリフト部保護板の温度上昇は顕著なものではなかった。LHDの放電洗浄結果については別稿を参照されたい[12]。

NBIの運転サイクルは3分に1ショットを基準として、プラズマ電極温度を保持しセシウム効果を保持している。LHDは連続磁場通電を行っているので、基本的には3分間隔でプラズマ実験を行うことが可能であるが、現状ではショット後のアウトガス発生がまだ大きく、排気時間でショット間隔が決まっている。したがってNBIはプラズマショット間にコンディショニングを行いながらLHD側の実験条件が回復するのを待って入射を行っている。このパターンはビーム調整の観点からは都合がよいが、カロリメータなどの駆動機構に対しては当初設計以上の負荷となっている。

4. まとめと今後の課題

1998年9月末に開始されたLHDにおけるNBI加熱実験は、3週間の実験期間に3 MW, 1秒間(1号機+2号機), 1 MW, 10秒(2号機)のビーム入射を達成し、LHDにおいて予想されたプラズマ性能を確認した[13]。これはNBIの物理・工学設計が確かなものであったことも意味する。また、ビーム入射の順調な立ち上がりはテストスタンドにおける負イオン源の先行調整試験が済まされていたことが大きく、開発研究も含めて信頼性の高い試験設備を持つことの重要性を示している。今後はビームエネルギーを定格まで上げるべくイオン源を再調

整し、LHDが定格運転を行う第3サイクル実験に向けて準備を進める予定であるが、残された問題点として一番大きなものは加速電子成分の抑制による電源パワー効率の改善である。また、イオンビームの空間一様性もファイラメント配置とも絡んで改善されるべき問題である。このように改善項目は主として負イオン源にあるが、負イオンを用いたNBIシステムとしては、細部の改善点はあるものの、確立されたものと考ええる。

参考文献

- [1] A. Ando *et al.*, Phys. Plasmas **1**, 2813 (1995).
- [2] Y. Takeiri *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 2541 (1995).
- [3] Y. Takeiri *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **71**, 605 (1995).
- [4] Y. Takeiri *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 5236 (1995).
- [5] Y. Takeiri *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **68**, 2003 (1997).
- [6] O. Kaneko *et al.*, Fusion Eng. Des. **26**, 455 (1995).
- [7] O. Kaneko *et al.*, Fusion Energy 1996, **3**, 539 (1997).
- [8] R.K. Janev *et al.*, Nucl. Fusion **29**, 2125 (1989).
- [9] K. Tobita *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **32**, 429 (1990).
- [10] Y. Oka *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **69**, 920 (1998).
- [11] Y. Oka *et al.*, presented in 20th Symp. Fusion Technol. (Marseille 1998).
- [12] A. Sagara *et al.*, presented in 15th JSPF Annual meeting (Tsukuba 1998).
- [13] A. Iiyoshi *et al.*, presented in 17th IAEA Fusion Energy Conference (Yokohama 1998) IAEA-CN-69/OV1/4.