核融合炉を目指した大電流負イオン源の開発

奥 村 義 和

(日本原子力研究所)

(1988年10月24日受理)

Development of a High Current Negative Ion Source for Fusion Application

Yoshikazu Okumura

(Received October 24, 1988)

Abstract

Negative ion based neutral beam injector is one of the most attractive heating system in future fusion reactors. In realizing the system, the crucial device which has to be developed is a high intensity negative ion source. Significant progress has been made on the negative ion source in these years. Among them, a few ampere negative ion beam were produced stably, while the divergence of negative ion beams becomes to be as low as < 10 mrad. We consider these results are demonstrating the potential of the negative ion source for the heating device in future reactors.

Keywords :

negative ion, high current, ion source, neutral beam injector, reactor, review, volume production,

1. はじめに

負イオンビームを用いた中性粒子入射加熱装置(NBI)は、核融合プラズマを高い効率で加熱できるのみならず、トカマク型装置において電流駆動や分布制御を行える可能性を持ち、将来の核融合炉用の加熱装置として極めて有望である。この加熱装置を実現するための鍵を握る機器は負イオン源であり、現在その開発が精力的に行われている。その結果、今では数アンペアの負イオンビームが安定に発生でき、またビーム発散角が10 mrad以下の極めて良い収束性を得られるまでになっている。これらの大電流負イオン源技術の進展は、夢物語であった負イオンビームNBIを現実のものとしつつある。

本稿では、まず負イオン源の必要性と負イオン生成の原理を概説した後に、最近の負イオン源開発の現状を紹介し、併せて今後の課題と展望を述べる。

2. 負イオン源の必要性

NBIは磁気閉じ込めの核融合プラズマを加熱する手段として、現在最も確立されたものであり、JT-60をはじめとする主要な核融合実験装置に於いて不可欠の加熱手段となっている。しかしながら、将来の核融合炉を考えた場合、NBIが直面している大きな問題が2つある。入射粒子のエネルギーが高くなった場合の効率の問題と、中性子等の放射線による放射化と損傷の問題である。

NBIにおいては、まず、水素または重水素のイオンを加速した後に中性化セルを通し、高速の中性粒子に変換して標的プラズマに入射する。問題のひとつは、このイオンから中性粒子への変換効率（中性化効率）である。現在稼動しているNBIは全て正のイオンを用いているが、この場合、図1に示すようにビームエネ

図1. 中性化効率のビームエネルギー依存性。正イオンの場合、高いエネルギーでは効率が殆ど零になるが、負イオンはガス中性化セルを用いた場合でも60%以上の効率が得られる。

ルギーとともにその中性化効率は急激に低下する。必要なビームエネルギーは標的プラズマの密度と大きさから決まるが、核融合炉で適切な入射エネルギー分布を得るためには核子あたり100 keV以上必要とされており、このとき、中性化効率は20%以下に低下してしまう。更に、トカマク装置においてNBIによる電流駆動を行おうとする場合には、核子あたり500 keV程度のエネルギーが望ましいが、そのような高いエネルギーに於いては中性化効率は殆ど零となってしまう。

効率の低下を防ぐひとつの方法は、中性化されなかったイオンのエネルギーを回収すること（荷電粒子回

収)であり、フランスのTORE SUPRAのNBIで実際に採用されている。最近の報告によれば、核子あたり100 keVのエネルギーのNBIで、2倍程度の効率改善が期待されるとの実験結果を得ている¹⁾。しかしながら、荷電粒子回収を用いたとしても入射パワーに比べてシステムを循環しているパワーが格段に大きくなり、NBIは複雑で高価なものになってしまう。

中性化効率の低下の問題に対する根本的な解決策は、1次イオンとして正のイオンの代りに負イオンを用いることである²⁾。図1に示すように負イオンの場合には、残留ガスとの衝突による通常の中性化セル(ガス中性化セル)の場合でも60%程度の効率を得られ、しかもエネルギー依存性が殆ど無い。更に、プラズマとの衝突による中性化セルを用いれば85%程度の効率が³⁾、またレーザー光による電子の光脱離を利用した光中性化セルでは⁴⁾、原理的に100%近い効率を得られる。中性化効率が高いことは、ただ単にシステム全体の効率を高めるばかりでなく、処理しなくてはならない残留イオンが大きく減ることを意味し、除熱機器や排気の観点からもNBIシステムを単純で安価なものとする。

NBIが直面しているもうひとつの大きな問題は、放射線である。NBIはプラズマ閉じ込め容器のすぐ近くに、ビームを入射するための大きな開口部を介して設置されるために、核融合プラズマからの高速中性子などの放射線に直接さらされる。このことはNBIの内蔵機器の放射線損傷を引き起こすばかりでなく、放射化のためにイオン源などの精密機器のメンテナンスを極めて困難なものとする。放射線の問題は別にしても、NBIは閉じ込め容器の近傍の大きな領域を占有し、核融合装置の設計を非常に難しいものとしている。実際、例えばJT-60装置ではトカマク本体の周囲は殆どNBIで覆われているが、実験炉で同様の設計を行うことは非現実的であろう。このことは、主要機器を遠く離れた別空に設置し、パワーを導波管により伝送できる高周波(RF)加熱装置と比較した時、NBIの最大の欠点であった。

この問題に対する最初の解答は米国ローレンスバークレイ研究所(LBL)から提案された。これはTFF(Transverse Field Focusing)と呼ばれるビーム加速/輸送システムによってビームを収束しつつ曲げ、ビームラインのいくつかの曲がりによって放射線を遮蔽しようとするものである⁵⁾。実際にTFFを用いて80 keV、1 Aの負イオンビームを輸送する原理実験に成功しているが⁶⁾、構造の複雑さや運転の難しさなどから、現在は研究が中断されている。

1986年、別の提案が日本原子力研究所(原研)からなされた⁷⁾。それは直線状ではあるが極めて細長い管を通してビームを長距離輸送し、イオン源などのNBIの主要機器を遠く離れた別室に設置しようというものである。正イオンを用いたNBIでは、ビーム発散角が大きく、また空間電荷によるビーム発散が生じるためビームの長距離輸送は不可能であったが、負イオンの場合には後章で述べるようにそれが可能である。図2にこの概念を用いたNBIの設計の一例を示す。この方式は、

- ① 放射線損傷や放射化を軽減できる。
- ② 炉の近傍に大きな機器が無い。
- ③ 入射ポートが小さいため接線入射することが可能で電流駆動に使用できる。

④ NBI の磁気シールドが簡単である。

⑤ 排気容量が小さくて良い。

などの数多くの利点を持っている。更に、ビームの収束性が良いことを利用して入射ビームの空間的強度分布を変え、プラズマの分布制御を行うことも可能である⁸⁾。これらの利点のため、この方式は、原研で設計中の次期核融合実験炉 FER (Fusion Experimental Reactor) 用の NBI をはじめとして、国際協力で設計が行われている ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) や名古屋大学の次期大型ヘリカル装置用の NBI など、殆どの負イオン NBI の設計に採用されている。米国オークリッジ研究所 (ORNL) ではこの概念を更に進めた設計を行っているが、それは、高周波で加速した 8 MeV のビームを、直径 15 cm の管を通して 12 MW 入射しようという大胆なものである⁹⁾。

以上みてきたように、負イオンを用いた NBI は高い効率でプラズマを加熱できるだけでなく、高密度プラズマの電流駆動や分布制御を行え、将来の核融合炉の適合性も極めて良いなど、現在の NBI の直面する問題を全て打破する革命的な NBI といえる。この夢の NBI 実現のための鍵を握るのが大電流の負イオン源であり、その開発が待たれている。

図 2. 負イオンを用いた中性粒子入射装置の設計の一例⁽⁷⁾

3. 負イオン源

3-1 負イオン源に要求される性能

負イオンNBIを実現するために、一体どの程度の容量の負イオン源が必要であろうか？ 次期核融合実験炉では加熱及び電流駆動を行うために50 MW以上の入射パワーが必要とされる。エネルギーは、十分な電流駆動効率を得るために重水素で1 MeV程度が望ましい。中性化は最も保守的なガス中性化セルを用いるとして効率が60%、幾何学的効率やもろもろの効率を考慮して全体の効率は45%程度となろう。そうすると必要な負イオン電流は100 A以上となる。これを何台の負イオン源で分担するかは設計上のオプションであるが、シンプルな設計を行うためには、数台からせいぜい10数台で分担する必要がある。そこで10 Aから数10 Aクラスの負イオン源が必要という結論になる。

次に、必要な負イオン電流密度はどの程度であろうか？ あまりに電流密度が小さいと負イオン源は途方もなく巨大なものとなり、システムとして成立しない。正のイオンを用いたNBIに対して負イオンNBIが有利になるための電流密度の条件は、文献10)で考察されている。簡単に述べると、現在の正イオン源の電流密度が200-300 mA/cm²であるので、エネルギーが1桁上がり中性化効率が2-3倍に改善されるのを考慮すると10 mA/cm²の電流密度で負イオン源は正イオン源と同等となる。更に高い電流密度が得られればイオン源を小型化でき、より有利である。そこで多くの負イオンNBIの設計では20-30 mA/cm²の電流密度を目標としている。

3-2 負イオン生成法

前節で述べた性能を得られる可能性のある負イオン生成法に3方式ある。荷電交換法(Double Charge Exchange)、表面生成法(Surface Production)、及び体積生成法(Volume Production)である。しかしながら後述するように、NBI用の負イオン源の研究は現在では体積生成法が主流となっており、前二者については世界的に殆ど研究が行われていない。そこで本稿では体積生成法に絞って解説し、荷電交換法と表面生成法は簡単に紹介するにとどめる。負イオン源全般については別の解説論文¹¹⁾を参照されたい。

荷電交換法

最も古く、かつ最も理解の進んだ方式である。正のイオンビームをアルカリ金属の蒸気中を通すことにより正イオンに2個の電子を付加して負イオンを得る方法で、容易に大電流が得られる反面、構造が複雑であること、得られるビームの収束性が悪いこと、アルカリ金属の取り扱いが面倒であること等の致命的な欠点があり、現在ではわずかにソ連のクルチャフ研究所に於いて研究が続けられているだけとなった。記録としてはLBL研究所で10 keV、2.2 Aの水素負イオンビームを得ている¹²⁾。また、クルチャフ研究所では10 msecと短いパルスながら5.5 A、80 keVのビームを26 mA/cm²の電流密度で得ている¹³⁾。

表面生成法

正イオンや中性粒子を、セシウムで覆って仕事関数を低くした金属表面に入射すると、入射粒子自身あるいは吸着している粒子が表面で電子を得て負イオンの形で反射される。この負イオンを加速領域に導いてビームとする方式であって、LBL研究所では1.1 A、80 keVのビームを準定常的に得る事に成功して

いる¹⁴⁾。しかしこの方式も、負イオンが表面から飛び出す際に横方向のエネルギーを持つことから本質的にビーム発散角が大きくなり、また表面現象を利用することから動作の安定性に欠けるなどの欠点がある。また、セシウム蒸気の一部が加速部に流入して高電圧の絶縁破壊を引き起こすなど、信頼性が要求される核融合炉用のイオン源としては問題が多い。

但し、この方式は比較的簡単に多種類の負イオンが生成できる方法であり、NBI 以外に用途は多い。

体積生成法

プラズマ中で進行する衝突、解離などのプロセスを通して負イオンを生成する方式である。この方法は、

- ① 構造が簡単でスケーリングが可能である。
- ② 動作が安定している。
- ③ 得られるビームの収束性がよい。
- ④ アルカリ金属を使用しないので取り扱いが簡単。

などの優れた特徴を有するが、これらは全てNBI用の負イオン源として好都合なものである。また、この方式の場合、正イオンNBIで培ったプラズマ生成技術がそのまま応用できる。このため現在では、この方式が世界の負イオン源研究開発の主流になっている。

しかしながら、問題点として

- ① 構造の簡単さとは裏腹に負イオン生成メカニズムが複雑であり、高い電流密度を得る事が困難である。
- ② プラズマ中で負イオンが生成されるため、それを引き出し、加速しようとする時、同時に存在する電子がより多く引き出され、加速されてしまうことがある。

次章以下では、体積生成法の原理とそれを用いた負イオン源について述べるとともに、これらの問題点を克服するために行われている研究開発の現状について述べる。

4. 体積生成型負イオン源

4-1 生成メカニズム

負イオンがプラズマ中で生成されることは古くから知られていた¹⁵⁾。しかし、この方式が脚光をあびるのは1977年にフランスのBacalらが通常のアーク放電において条件を選ぶと、正イオンの30%以上の大量の負イオンが存在することを見出し¹⁶⁾¹⁷⁾、かつ、それが広く認められて以来である。Bacalらが見出した負イオン密度は、当時知られていた負イオン生成過程で予想される値よりも2桁大きく、それを説明するために polar dissociation をはじめとしてさまざまな仮説が唱えられた。今日では、負イオンは次の二段階過程によって生成されると考えられている。まず、主に次の反応によって振動励起された水素分子が生成される。

次に振動励起された水素分子に低速の電子が衝突して付着解離 (dissociative attachment) することにより負イオンが生成される。

なお、振動励起レベルには量子化された13のレベルがあるが、主として負イオン生成に関与するのは $v = 6$ 以上のレベルの分子である。

この生成メカニズムを検証する興味ある実験が、最近 Leung らによって行われた¹⁸⁾。Leung らは水素放電中にキセノンガスを混入することにより放電電圧を水素の電離電圧以下に下げ、水素の正イオンの存在しないプラズマをつくった。そしてその中にも大量の水素負イオンが存在することを観測し、正イオンを経由しないプロセス (上記 (1) と (5)) が負イオン生成の主要なプロセスであることを示した。

一方、負イオンの損失メカニズムには

などがある。

ここで、負イオン密度に関する簡単なスケーリングの式を導いてみよう。NBI 用のイオン源として使用されるような高密度で高電離度のプラズマに於いては、上記の (1), (5), (7) のプロセスが支配的である。負イオンの生成と損失のレート方程式から負イオン密度は

$$n_- = n_v n_e \langle \sigma v \rangle_{DA} / n_+ \langle \sigma v \rangle_{MN} \quad (10)$$

で与えられる。ここで $\langle \sigma v \rangle_{DA}$ と $\langle \sigma v \rangle_{MN}$ は、それぞれ上記 (5) と (7) の過程の反応率である。また、振動励起分子の密度 n_v は

$$n_v = N_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{EX} \tau_v \quad (11)$$

で与えられる。ここで、 N_0 は水素分子の密度、 n_f は高速の電子密度、 $\langle \sigma v \rangle_{EX}$ は (1) の過程の反応率、そして τ_v は次の損失過程に対する振動励起分子の寿命である。

(11)式を(10)式に代入し、プラズマ中の正イオン密度と電子密度がほぼ等しい($n_+ = n_e$)と仮定すると

$$n_- = N_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{EX} \langle \sigma v \rangle_{DA} \tau_v / \langle \sigma v \rangle_{MN} \quad (14)$$

を得る。即ち、他のパラメータが一定とすると、負イオン密度は高速電子の密度、および水素分子密度に比例して増加する。アーク放電によりプラズマを生成している場合には、高速電子の密度はアーク電流に比例すると考えられるので、言い換えれば「負イオン密度はアーク電流とアーク放電圧力に比例して増加する」といえる。

以上の議論はきわめて粗いスケージングであって、正しくは上述の反応をはじめとするさまざまな反応過程を考慮する必要がある。詳細な議論はローレンスリバモア研究所(LLNL)のHiskesやKaro、山口大学の福政ら、慶応大学の小笠原らによってなされている。今日では、実験的に観測される負イオン密度を定性的に説明でき、また定量的にもおよそファクター2の範囲内で一致するまでになっている。Hiskesらは後述のタンデム方式の考察を進め、負イオン電流は、生成容器の特性長さに逆比例するという興味あるスケージング則を提唱した^{19) 20)}。福政らは、壁における水素原子の再結合や振動励起分子の損失に着目して議論を展開し²¹⁾、小笠原らはタンデム方式の最適化を行っている。

現在、主要な反応過程の断面積は殆ど手中にあるが、振動励起分子と負イオンの損失過程がいまだに明確になっていない。特に水素原子がそれらに及ぼす効果については、水素原子の密度が不明なこともあって良くわかっていない。実験的にこれらの効果を調べ、理論に反映させることが必要であろう。

4-2 アンペア級負イオン源

二段階過程(1)と(5)のそれぞれに対する最適の電子温度は大きく異なり、また、それらの中間のエネルギーの電子は負イオンの損失過程(6)に対して大きな反応率を持つ。そこで、負イオン密度を高める最も良い方法は、プラズマを二つの領域、即ち、振動励起分子の生成領域と負イオンの生成領域に分け、それぞれの領域に於て、それぞれの反応過程に最適な電子のエネルギー分布をつくりだしてやる事である。この方法は、「タンデム方式^{19) 20)}」と呼ばれ、殆ど全ての負イオン源はこの方式を採用している。

ここでタンデム方式の体積生成型負イオン源について、その構造と実際の基本的特性を、原研のアンペア級負イオン源を例に見てみよう。図3にその断面図を示す。この負イオン源は、現在世界で最も高い負イオンビーム電流値(3 A, 50 keV)を得ているものである。

プラズマは、24 cm × 48 cmの広さで15 cmの深さを持つ矩形の多極磁場プラズマ源で生成される。タンデム方式の負イオン源の特徴として磁気フィルターを持っているが、これは永久磁石を挿入した数本の水冷構造のパイプを一定の間隔をおいて並べたものであって、横方向の磁場を発生し、プラズマを2つの領域(放電室と負イオン生成室)に分けている。フィラメントから飛び出した高速の電子はこの磁場を横切る事が出来ず、放電室に閉じ込められる。一方、プラズマ中の低速電子は正イオンとともに拡散によって負イオン生成室に集められ²²⁾、その結果、負イオン生成室の電子温度は1 eV程度と付着解離反応(5)に最適の温度とな

図3. アンペア級負イオン源(原研)の断面図。3 A, 50 keV の水素負イオンビームを発生することが出来る。

る。高速電子との衝突で生成された振動励起分子は、磁場の影響を受けることなく負イオン生成室に流れ込み、そこで負イオンが生成される。

生成された負イオンは、5枚の多孔型の電極により静電的に引き出され、加速される。電極には14 cm × 36 cmの領域に11.3 φの孔が253個あけられている。

4-3 負イオン源の基本的特性

負イオン密度に関する簡単なスケーリング(14)式から、負イオン電流はアーク電流に比例すると考えられる。実際に、アンペア級負イオン源においてその関係をみたのが図4である。このときガス圧及びアーク放電電圧は一定に保たれている。予想されるように負イオン電流はアーク電流とともに増加するが、高いアーク電流においては負イオン電流は飽和する傾向にある。この飽和は、最初原研において発見され²³⁾、英国カラム研究所やLBL研究所でも確認されている²⁴⁾。この飽和の原因は以下のように説明されている。即ち、プラズマ密度が濃くなっていくに従って分子の解離が進み、水素原子やプロトンの比率が大きくなってくる。それらは(8)や(12)の過程によって負イオンや振動励起分子を破壊する。また、負イオン生成室の電子温度が上昇してくるために(6)の過程によって負イオンの損失が増える。

図4. 負イオン電流のアーク電流依存性。負イオンはアーク電流とともに増加するが、次第に飽和する傾向にある。

図5は負イオン電流のガス圧依存性である。(14)式から予想されるようにガス圧とともに負イオン電流は増加するが、あるガス圧で飽和し、それ以上では減少する。この原因は主として水素分子との衝突(9)で負イオンが損失してしまうからである。ここで注目したいのは、最大の電流値を与えるガス圧(最適ガス圧)がアーク電流とともに増えていることである。言い換えれば、高い電流値を得るためにはガス圧を高くする必要がある。これは負イオンNBI設計の観点からは、大きな問題である。なぜなら、ガス圧が高くなると処理すべきガス流量が増えて必要な排気容量が大きくなるばかりでなく、加速部での圧力が高くなって負イオンが加速途中で中性化され、損失してしまうからである。実際、アンペア級負イオン源においては、加速途中で失われている負イオンの割合は引き出された負イオンの45%に達する事がわかっている²⁵⁾。エネルギーを高めるために加速部が長くなれば損失量は更に増大する。高い電流密度を保ったまま如何にガス圧を下げるかは、今後の大きな課題である。

なお、ここに述べたアンペア級負イオン源の電流値は、加速されたビームをイオン源から遠く離れた位置で熱的に測定したものである。その値が3 Aということから逆算すると、引き出し面では5 A以上の負イオンが得られていると考えられ、ガス圧を下げる事が出来れば更に高い電流値が得られる可能性がある。

次に、タンデム方式の有効性について述べておこう。小型のアンペア級負イオン源においては、フィルター磁場を外部からの電流によって作り出すことが試みられた²⁶⁾。これは、2列の直線状のソレノイドコイルを

図5. アーク電流を変化させた場合の、負イオン電流の放電ガス圧依存性。アーク電流の増大にともなって、必要なガス圧は高くなる。

プラズマ中に挿入し磁気フィルターとしたものであって、自由に磁場の強さを変化できる。実験で得られた負イオン電流とフィルター磁場の関係を図6に示す。磁場を強くするとともに負イオン電流が増大している。図6には、放電室と負イオン生成室で測定された電子温度も同時に示すが、フィルター磁場とともに、負イオン生成室の電子温度が下がり、1 eV程度の電子温度になった時に負イオン電流が最大となっていることがわかる。フィルター磁場が余りに強いと負イオン生成室のプラズマ密度が低下し、電流は減少してくる。この様にプラズマを「タンデム化」する事によって、負イオン生成率を数倍に高めることが可能である。

図6. 負イオン電流のフィルター磁場依存性。放電室と負イオン生成室の電子温度も同時に示す。負イオン生成室の電子温度が1 eV程度の時、負イオン電流が最大値となる。

5. 負イオン源開発の現状

現在、体積生成型の負イオン源を開発している主な研究所としては原研²⁷⁾の他、名古屋大学プラズマ研究所²⁸⁾、山口大学²⁸⁾、英国カラム研究所²⁹⁾、米国LBL³⁰⁾、オークリッジ研究所(ORNL)³¹⁾、ブルックヘブン研究所(BNL)³²⁾、フランスのエコールポリテクニク³³⁾、オランダのFOM研究所などがある。また、高エネルギー加速器への応用を目指して米国ロスアラモス研究所³⁴⁾、CERN、カナダのTRIUMF³⁵⁾、高エネルギー研究所(KEK)などで研究が行われている。これまでのところ開発の焦点は負イオン生成とその引き出し、電子抑制に置かれ、大電流化や負イオンビームの加速/輸送の研究は今後の課題となっている。

5-1 負イオン生成

負イオン生成率を高めるため、さまざまな改良研究がなされている。それらを列挙すると

- ① プラズマ生成容器の形状の最適化^{23) 36)}
- ② 磁気フィルターの位置、強さの最適化³⁰⁾
- ③ 磁気フィルターの構造の最適化²⁶⁾
- ④ プラズマ生成容器の壁の材質の最適化^{28) 37)}
- ⑤ 負イオン生成室への低速電子の入射³⁸⁾
- ⑥ 重い質量のガスの混入³⁹⁾
- ⑦ 入射水素ガスの熱解離⁴⁰⁾
- ⑧ カソード(フィラメント)材質、形状の最適化

などがある。現在までの結果をまとめると、NBI用のイオン源として興味のある高密度プラズマに於いては、①、②、③によって負イオン生成率は数倍高められ、また、その他の方法によっては数%から数十%改善される可能性があるといえる。

小型の多極磁場型プラズマ源を用いて、非常に高い負イオン電流密度が、カラム研究所($160\text{mA}/\text{cm}^2$)とLBL($240\text{mA}/\text{cm}^2$)で得られている⁴¹⁾。しかしながら、それらはNBI用のイオン源として使用するには余りにガス圧が高く、また極めて小さな孔($1\text{mm}\phi$)からのビーム引き出しである。NBI用のイオン源として使用できるガス圧のもとで、また、ある程度の大きさの孔を用いた場合の負イオン電流密度は、LBLにおいて $17\text{mA}/\text{cm}^2$ ⁴²⁾、カラム研究所で $27\text{mA}/\text{cm}^2$ ⁴³⁾、原研では $22\text{mA}/\text{cm}^2$ である²⁵⁾。いずれも多極磁場型のプラズマ源を用いて得られた値である。

ユニークな負イオン源が名古屋大学で開発されている。ホローカソード放電で生成した円筒状のプラズマを、外部磁場と一対の磁石の組合せによって、シート状に変換し、その周辺部から負イオンを引き出そうというものである。シート状のプラズマ部には高速の電子が多く、また、周辺部には磁場を横切った低速の電子が集められる事から、このイオン源も「タンデム方式」に基づいているといえる。現在までに、 $19\text{mA}/\text{cm}^2$ の電流密度で 0.2A 、 4.5keV の負イオンを得ている²⁷⁾。また、名古屋大学では、反射型シートプラズマと呼ばれるシート状のプラズマを用いた負イオン生成の研究も行われている⁴⁴⁾。

表1. 負イオン源開発の現状

形 式	研 究 所	H ⁻ 電流値	パルス幅	エネルギー	電流密度
荷電交換型	LBL Kurchatov	2.2 A(D ⁻)	70.3 sec	10.5 keV	12 mA/cm ²
		5.5 A	10 msec	80 keV	26 mA/cm ²
表面生成型	Novosibirsk	1.1 A	0.3-0.8 msec	25 keV	180 mA/cm ²
	LBL	1.1 A	30 sec	80 keV	5.5 mA/cm ²
体積生成型	Culham	0.055 A	30 sec	90 keV	27 mA/cm ²
	LBL	0.1 A	0.4 sec	100 keV	15 mA/cm ²
	ORNL	0.08 A	0.1 sec	16.4 keV	27 mA/cm ²
	BNL	0.02 A	1 msec	6 keV	25 mA/cm ²
	Nagoya	0.2 A	DC	4.5 keV	19 mA/cm ²
	JAERI	3 A	0.1 sec	50 keV	12 mA/cm ²

ORNLでは、表面生成型イオン源を改造したVITEXと呼ばれるシート状のプラズマ源から27 mA/cm²の電流密度で80 mAの負イオンビームを得ている³¹⁾。

表1に、荷電交換型、表面生成型とともに、それらの値をまとめておく。

5-2 負イオン引き出し

負イオン密度は、そのまま引き出される負イオン電流に比例する訳ではない。プラズマ電位は一般に壁に対して正であるために、負イオンは静電的にプラズマ体積内に閉じ込められる。そこで問題は、この電位障壁を越えて如何に負イオンを引き出すかである。Bacalらは、引き出される負イオン電流は、一枚目の電極（プラズマ電極と呼ぶ）の電位をアノードに対して数ボルト、プラスにバイアスする事によって増大することを見出した⁴⁵⁾。レーザーによる負イオンの光解離の手法を用いてこの現象を調べた結果、バイアスによって電極への負イオンのドリフト速度が増し、電極近傍での負イオンの密度が増大するためである事が判った。Leungらも同様の効果を観測している⁴⁶⁾。

しかしながら、原研のアンペア級負イオン源、及びカラム研究所では、プラスにバイアスした際の電流値の増加は観測されない。逆に、名古屋大学のシートプラズマでは負にバイアスした際に良い結果が得られている。京都大学の神保は、これらの違いは引き出し面における磁場の存在によると考えている⁴⁷⁾。即ち、磁場が存在することによって電子の運動が抑制される結果、壁とプラズマ電位の関係が変化し、負イオンの引き出しメカニズムが異なるのであろう。

いずれにしろ、負イオンの引き出しメカニズムに関しては未知の部分が多く、今後の研究が待たれる。

5-3 電子抑制

体積生成型負イオン源の問題点として、大量の電子が負イオンとともに引き出されてしまうことがある。負イオンが電子と同じ密度だけ存在するとしても、電子の方が軽いので40倍以上も多く引き出されてし

まい、そのうちの一部分が加速部に流入したとしても大きな加速損失を引き起こす。そこで、如何に電子を抑制するかは、負イオン生成以上に大きな問題であった。

Leung らは、プラズマ電極をプラスにバイアスすることが電子の抑制に効果があることを見出した⁴⁶⁾。この効果は、磁気多極プラズマ源を用いた全ての負イオン源において確認されている。原研のアンペア級負イオン源においては、電極をアノードに対し数Vバイアスする事によって引き出される電子の量を1桁以上減らす事が出来る。

バイアスにより、電子の量を減少させたとしても、なお負イオンの数倍以上の電子が引き出されてしまう。これらの電子を加速される前に処理するために、原研⁴⁸⁾、カラム研究所²⁴⁾、LBL⁴²⁾などの負イオン源では磁場を用いた電子抑制を行っている。まず、電子を負イオンとともに数kVないし十数kVで一旦引き出し、電極中に埋め込んだ小型で強力な永久磁石がつくる磁場によって電子の軌道を曲げて2枚目の電極にあてる。負イオンの軌道は殆ど曲がることなく直進し、加速領域で加速される。しかし、これによっても完全には電子を抑制することが出来ない。というのは、電子が2枚目の電極に衝突した際に、自分自身が反射、あるいは2次電子を叩きだし、それらの電子が加速領域に漏れ出してしまうからである。そこで、原研では、電子抑制電極と呼ばれる電極を2枚目の電極の下流に設置し、これに2枚目の電極に対して負の電圧を印加することによって、静電的にも電子を抑制している⁴⁸⁾。

これら、多段階の電子抑制によって、電子の量は格段に減少し、アンペア級負イオン源においては、加速領域に到達する電子の量を負イオンの10%以下に抑えることが可能である。

5-4 大電流化

単一の孔からのビーム電流は、空間電荷による制限から0.1A程度が最大となる。さらに電流を増やすためには多孔型の電極を用いる事が必要となる。しかし、多孔型電極を用いた本格的なビーム加速は、未だ原研でしか行われていない。多孔型の電極を用いた場合に問題となってくるのは、

- ① 負イオン密度の空間的均一性
- ② ガス排気効率の劣化による中性化損失の増大
- ③ 負イオンの枯渇
- ④ プラズマ源の大型化
- ⑤ 電極の冷却、機械的構造
- ⑥ 電極の放電破壊に対する対策

などがある。②のガス排気効率の劣化というのは、多孔型電極の場合に、電極の側面からガス排気できないために生じる問題である。これらのうち、④、⑤、⑥については従来の正の大型イオン源の技術を一部転用できるが、①、②、③は新たな問題である。

原研では、1985年に0.1Aの負イオンビームを得て以来⁴⁸⁾、1986年には1.2A⁴⁹⁾、1988年には3Aの電流を得ており、大電流化に関する基本的問題をほぼ解決したといえる。しかし、NBI用には更に大型の

負イオン源が必要であり、今後、技術的に解決しなければならない問題は多い。

5-5 ビーム加速

負イオンNBIでは、必要なビームエネルギーは重水素で500keV以上、十分な電流駆動を行うためには1 MeV以上が望ましい。かつ、2章で述べた魅力的なNBIの設計を行うためにはビーム発散角が数mrad以下であることが必要である。

大電流ビーム加速の記録としては、DCX IIのイオン入射装置で600keV、0.1Aの水素イオンを、またJT-60の能動粒子線源で200keV、3.5Aのヘリウムイオンを加速した例がある⁵⁰⁾。しかし、大電流の負イオンを高エネルギーまで加速する試みは未だなされていない。

加速器の分野においては、静電加速の限界は500keV、1A程度であるというのが常識である。これは、加速された電子および、それが発生するX線が引き起こす放電破壊などの問題があるからである。しかし、NBIのイオン源によって加速器の常識が次々とくつがえされてきた事を考えると、静電加速にも十分な可能性があると見える。LBLではESQ(Electro-Static Quadrupole)と呼ばれる強収束静電加速システムの検討が開始されている⁵¹⁾。

高周波加速は、更に高いエネルギーにおいて必要になると思われる。1 MeV程度では、加速効率を考えると有利とはいえない。また、現在までに0.1A以上のビームを加速した例も無い。

5-6 ビーム光学

体積生成型負イオン源で発生されたビームは、本質的にビーム発散角が小さい。これは、前述の生成過程において、振動励起分子と負イオンのエネルギーレベルがほぼ等しいため、付着解離反応で負イオンが持つ運動エネルギーが小さいためだと考えられる。ORNLにおいてはエミッタンス測定によって、負イオン温度は0.5 eVと推測している³¹⁾。原研では負イオン源の加速電源の極性を変えることによって正のイオンを引き出し、ビーム発散角を比較した。その結果、負イオンの発散角は水素の正のイオンよりも小さく、解離反応を経ないで生成されるヘリウムイオンと同等であることが判った⁵²⁾。ヘリウムイオンではJT-60の能動粒子線源において3 mrad(200keV)という発散角を得ており⁵⁰⁾、負イオンもエネルギーを高めれば同様の発散角を得られる可能性がある。また、カラム研究所では負イオンを90keVまで加速し、ビーム発散角5mrad以下という結果を得ている。

5-7 ビーム輸送

負イオンNBIにおいては、高真空の管を通してビームを長距離輸送する必要がある。その際、問題となるのはイオンが自分自身の空間電荷によって互いに反発し、発散してしまうことである。この効果は、原研において調べられ、負イオンは正のイオンと比較して空間電荷によって発散しにくいことが判った⁵²⁾。ビームは残留ガスと衝突しビームプラズマをつくるが、負イオンの場合には、その電荷を中和するビームプラズマ中の正イオンの保持時間が長いためである。ビームドリフト領域にアルゴンやキセノンなどの重いガスをごく少量混入することによって、空間電荷による発散は更に抑えられる。

6. 今後の課題と展望

負イオンNBIのために、大電流で高エネルギーの負イオン源が必要である。このうち、大電流化については最近の体積生成型負イオン源の進展により、ある程度目処がついたといえる。現在のままのスケールングでいっても、10 Aクラスの負イオン源は大きな障害なく実現可能であろう。今後は、更に電流密度を高めるとともに、カソードの開発など定常化を目指した研究も進める必要がある。

大電流化について残された問題は、重水素と水素の同位体効果である。LBL やカラム 研究所での初期的な実験結果によると、重水素の場合、水素と同じ条件で運転すると、得られる電流密度は $1/\sqrt{2}$ あるいは $1/2$ に減少するという結果を得ている。重水素に対して負イオン源を最適化することにより、どの程度の負イオン電流密度が得られるのかを、早急に調査研究する必要がある。

高エネルギー加速は、今後の大きな課題である。静電加速により、1 MeVで何十アンペアというビームを加速できるということを原理的に実証するためには、少なくとも1 アンペアのビームを数百 keV に加速する必要がある。しかし、現在、世界にその試験を行える実験装置が無い。小電流で高エネルギー加速の研究を開始する必要があるのは勿論であるが、核融合炉への大きなステップを踏み出すためには、アンペア級の高エネルギー試験装置が必要であろう。

7. おわりに

およそ15年前、プラズマを加熱するために開発が開始されたNBI用の正イオン源は、従来の加速器用のイオン源の常識を根底から覆した。即ち、従来大電流といっても μA , mA であった電流値は今や数10 Aを越え、MW級で定常運転の可能なイオン源の技術が確立されて、JT-60等の現在の大型核融合装置で20 MWを越える入射加熱を可能にしたばかりでなく、工業的にも半導体製造や材料開発などの先端産業に広い応用分野を開拓した。

そして今、同様の技術革新が負イオン源において起こりつつある。負イオン源は現在、約10年前に正イオン源が立っていた位置にある。今後、開発の手順を誤ることなく、精力的、組織的に研究を発展させていけば、将来の負イオンNBIで必要とされる1 MeV, 10 A以上の負イオンビームを得る事は夢ではないと考えられる。

参 考 文 献

- 1) M. Fumelli, F. Jequier and J. Pamela : *Proc. 15th Symp. on Fusion Engineering, Utrecht* (1988), B-43.
- 2) K. H. Berkner, R. V. Pyle and J. W. Stearns : *Nuclear Fusion* **15** (1975) 249.
- 3) K. H. Berkner *et al.* : *Proc. 2nd International Symp. on the Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1981) 291.
- 4) J. H. Fink : *Fusion Technology* **6** (1984) 548.
- 5) W. S. Cooper : *Proc. 3rd International Symp. on the Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1983) 605.
- 6) J. W. Kwan *et al.* : *Proc. 4th International Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1986) 507.
- 7) 柴田猛順, 堀池 寛, 松田慎三郎, 小原祥裕, 奥村義和, 田中 茂 : *核融合研究* **56** (1986) 124.
- 8) S. Yamamoto *et al.* : *Proc. 11th International Conference on Plasma Phys. and Controlled Nuclear Fusion Research, Kyoto* (1986) Vol. 3 267.
- 9) W. R. Becraft *et al.* : *Proc. 12th Symp. on Fusion Engineering, Monterey* (1987) 1164.
- 10) C. Jacquot : *Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Beam Heating, Culham* (1987).
- 11) K. W. Ehlers : *J. Vac. Sci. Technol. A1* (1983) 974.
- 12) E. B. Hooper, P. Poulsen and P. A. Pincosy : *J. Appl. Phys.* **52** (1981) 7027.
- 13) V. V. Kuznetsov *et al.* : *Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Beam Heating, Grenoble* (1985) 110.
- 14) J. W. Kwan *et al.* : *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 831.
- 15) K. W. Ehlers : *Nucl. Instrum. & Methods* **32** (1965) 309.
- 16) E. Nicolopoulou, M. Bacal and H. J. Doucet : *J. Phys.* **38** (1977) 1399.
- 17) M. Bacal and G. W. Hamilton : *Phys. Rev. Lett.* **42** (1979) 1538.
- 18) K. N. Leung and W. B. Kunkel : *LBL-Report 23157* (1987).
- 19) J. R. Hiskes and A. M. Karo : *J. Appl. Phys.* **56** (1984) 1927.
- 20) J. R. Hiskes, A. M. Karo and P. A. Willmann : *J. Appl. Phys.* **58** (1985) 1759.
- 21) 福政 修, 佐伯節夫 : *核融合研究* **56** (1986) 409.
- 22) A. J. T. Holmes : *Rev. Sci. Instrum.* **53** (1982) 1523.
- 23) Y. Okumura, H. Horiike, Y. Ohara and T. Shibata : *Japan Atomic Energy Research Institute Report JAERI-M 84-098* (1984).
- 24) A. J. T. Holmes and M. P. S. Nightingale : *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 2402.
- 25) K. Watanabe *et al.* : *Proc. 12th Symp. on Fusion Engineering, Monterey* (1987) 302.
- 26) T. Inoue *et al.* : *Proc. 7th International Conference on Ion Implantation Technology, Kyoto* (1988) 22.
- 27) J. Uramoto : *Proc. 4th International Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1986) 319.
- 28) O. Fukumasa and S. Saeki : *J. Phys. D : Appl. Phys.* **20** (1987) 237.
- 29) A. J. T. Holmes *et al.* : *Rev. Sci. Instrum.* **58** (1987) 223.
- 30) K. N. Leung, K. W. Ehlers and R. V. Pyle : *Rev. Sci. Instrum.* **56** (1985) 364.
- 31) W. K. Dagenhart *et al.* : *Proc. 4th International Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1986) 366.
- 32) K. Prelec : *Proc. 3rd European Workshop on the Production and Application of Light Negative Ions, the Netherlands* (1988) 27.
- 33) M. Bacal and F. Hillion : *Rev. Sci. Instrum.* **56** (1985) 2274.
- 34) R. L. York *et al.* : *Rev. Sci. Instrum.* **55** (1984) 681.
- 35) K. R. Kendall *et al.* : *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 1277.
- 36) Y. Okumura, H. Horiike, H. Inami, Y. Ohara and T. Shibata : *Proc. 9th Symp. on Ion Source and Ion Assisted Technology, Tokyo* (1985) 121.
- 37) K. N. Leung, K. W. Ehlers and R. V. Pyle : *Appl. Phys. Lett.* **47** (1985) 227.

- 38) K. N. Leung, K. W. Ehlers and R. V. Pyle : *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 321.
- 39) K. N. Leung, K. W. Ehlers and R. V. Pyle : *Rev. Sci. Instrum.* **56** (1985) 2097.
- 40) K. N. Leung, S. R. Walther and W. B. Kunkel : *Proc. 3rd European Workshop on the Production and Application of Light Negative Ions, the Netherlands* (1988) 33.
- 41) K. W. Ehlers, K. N. Leung, R. V. Pyle and W. B. Kunkel : *Proc. 4th International Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1986) 282.
- 42) J. Kwan *et al.* : *Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Beam Heating, Culham* (1987).
- 43) R. McAdams, A. J. T. Holmes, A. F. Newman and R. King : *Proc. 3rd European Workshop on the Production and Application of Light Negative Ions, the Netherlands* (1988) 15.
- 44) T. Kuroda, K. Sakurai, Y. Oka and O. Kaneko : *Proc. 4th International Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1986) 289.
- 45) M. Bacal, F. Hillion and M. Nachman : *Rev. Sci. Instrum* **56** (1985) 649.
- 46) K. N. Leung, K. W. Ehlers and M. Bacal : *Rev. Sci. Instrum* **54** (1983) 56.
- 47) 神保光一 : *核融合研究* **55** (1986) 311.
- 48) Y. Okumura *et al.* : *Proc. 11th Symp. on Fusion Engineering, Austin* (1985) 113.
- 49) Y. Okumura *et al.* : *Proc. 4th International Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL* (1986) 309.
- 50) T. Itoh *et al.* : *Proc. 4th International Symp. on Heating in Toroidal Plasmas, Rome* (1984) 1081.
- 51) O. A. Anderson *et al.* : *Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Beam Heating, Culham* (1987).
- 52) Y. Okumura *et al.* : *Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Beam Heating, Culham* (1987).