5-3 軽イオンビーム

糟 谷 紘 一

(東京工業大学大学院総合理工学研究科)

(1987年5月26日受理)

Light Ion Beams for Inertial Confinement Fusion Research

Koichi Kasuya

(Received May 26, 1987)

Abstract

As the efficiency to produce light ion beams is much higher than the lasers, they are expected to become the future energy drivers for the inertial confinement fusion. So, the main issues described here are their productions, transportations and target irradiations. The world top machine is now under operation to arrive at a mile stone to obtain 30 MV-4 MA singly ionized lithium beams in USA. Future prospects for such kind of light ion beams are also shown briefly.

Keywords :

light ion, beam inertial fusion, pulsed power machine, beam production, beam transport,

1. まえがき

レーザー光は収束が容易でかつ高出力であるから、現在までのところ慣性核融合用ドライバーとして、もっともその研究が進んでいる。ところがガラスレーザーをはじめとする固体レーザーは、そのビーム発生効率が低く、より高効率で短波長の KrF ガスレーザーなどの開発が期待されている。一方、軽イオンビームの研究は最近とくにその進展が著しく、上記よりさらに高効率のビーム発生と、より高効率の標的相互作用が期待でき、ビームの収束と輸送特性を改善できれば、これが将来の慣性核融合用ドライバーの筆頭候補になるものと推測される。

そこで本講座では、このような強力パルスイオンビーム装置の概要を明らかにするために、ビームの発生、輸送、標的照射などを平明に述べ、これらに関する今後の課題と展望を簡単に記述する。より詳細な内容について知りたい場合には、文献1～4を参照されたい。

2. 軽イオンビーム装置の現状

持続時間の短い高電圧・高電流パルスが発生するパルスパワー技術の進展により、これを多極管に印加して高出力の粒子ビームが発生する技術もきわめて進展した。歴史的には、当初研究された電子ビームから、現在では主に比較的質量数の小さい軽イオンビームを用いて、慣性核融合の科学実証実験を目ざした研究が進められている⁵⁾。また、標的爆縮の目的にはプロトンよりもリチウムの1価イオンを用いる計画が進行中である。

2.1 ビーム発生用パルスパワー装置

図5-3・1に、標準的なビーム発生装置の模式図を示す¹⁾。エネルギーの流れは右から左方向で、商用電源にて給電する直流充電器によりマルクス衝撃電圧発生器を充電する。この発生器内には多数のコンデンサが油づけになっており、充電時は並列接続で、充電後にトリガーパルスを入れてギャップスイッチを介して直列接続放電動作をさせることにより衝撃電圧を発生する。この出力パルスは一般に、 μs 程度の立上り時間を持つから、さらに短パルス化する必要があり、出力エネルギーは一度、中間蓄積部(同軸の水コンデンサ)に貯えられる。その後に数百nsの時定数で、電気エネルギーは波形形成部に移り、伝送部経由で10~100nsの時間幅の高出力パルスとなって、軽イオンビーム発生用ダイオードを励起する。成形部と伝送部も同軸の水コンデンサで、ダイオードは高真空室内に設置されるから、伝送部と真空室の間を仕切る水・真空インターフェースは、できるだけ低インダクタンスで高耐絶縁設計の必要があり、技術的にもっとも工夫を要する所である。

図5-3・1は給電用パルスパワー装置モジュールの模式図であったが、科学実証実験用装置では、これらのモジュールを10~数十台同時並列運転し、MJ~100TW級のビームを発生する。

図5-3・1 標準的な軽イオンビーム発生装置

米国のサンディア国立研究所では、世界最大のパルスイオンビーム装置 PBFA-II が稼動しているが⁹⁾、その 1 モジュールの模式図を図 5-3・2 に示す。後段と整合が取れて時間的に立上りのはやいパルスを得るために、波形成形部は 2 段がまえにし、その後に 2 分して、それぞれを同軸円筒形状より平行平板形状に変換するが、その際、片方は極性を反転し、ダイオード近くのディスク状給電部で電圧パルスを直列に足し合わせる。図には中間蓄積部以降が 2 系統示してあり、水・真空インターフェースより右側は、垂直軸（図中の垂直破線）のまわりに円筒対称で、水平面（図中の水平破線）をはさんで上下方向に対称となっている。したがって中間蓄積部以降をもう 2 系統加えて、図中の 3, 4, 5, 1', 2', 3' 端に接続することにより、5 と 1 および 5 と 1' 間に 4 倍電圧をかけることができる（1 と 1', 2 と 2', 3 と 3', 4 と 4' は、それぞれ同電位）。図中の表は、このようなモジュールの各部における電圧等の特性値を示したものである。これからパルスパワー電源のエネルギー効率は 32.4 % であることがわかる。

PBFA-II 装置では、上記のマルクス・モジュールを 36 台同時に運転し、ビーム発生用ダイオードに 4.32 MJ のエネルギーを 60 ns の時間幅で供給するから、平均電力は $7.2 \times 10^{13} \text{ W}$ (72 TW) となる。図 5-3・1 や図 5-3・2 には示していないが、出力部にはさらにパルス波形を急峻化するプラズマ・オープニング・スイッチ (Plasma Opening Switch) を設け、15 ns, 30 MV, 2.5 MJ の出力を得ることになっている。スイッチの予想動作効率が 57.9 % で、パルスパワー部の総合効率が 18.8 % となるが、現在までのところスイッチが予想通りに動いておらず、これが今後の課題の 1 つとなっている。

図 5-3・2 世界最大のパルスイオンビーム装置 PBFA-II のモジュール (米国・サンディア研究所)

2.2 パルスイオン・ダイオード

真空中に設けた陽極と陰極間に十分高い電圧をかけると、いわゆるダイオード電流が流れるが、その中身は陰極から陽極に向かって流れる電子電流がほとんどである。したがって透過形の陽極を用いると、このような方法で容易にハイパワーのパルス電子ビームを得ることができる。歴史的にも当初は、このような強電子ビームを用いて、慣性核融合実験を進めていたが、色々な事情があって、現在ではソヴィエト連邦内でのみ続いている模様である。アメリカ、西ドイツ、フランス、日本をはじめとするその他の国々では、ほとんどが、イオンビーム研究になっている。

上記のような電極配置でパルスイオンビームを効率よく引出すためには、(1)陽極近傍に局在する十分に高密度の陽極プラズマと、(2)陽陰極間における電子流の十分な抑制が必要で、このときイオンビームは透過形の陰極より引出され、陰極付近の電子で中和化され、高速のプラズマ流として放出される。(1)の目的のためには、陽極にパルスパワー電源により正の高電圧パルスをかけたと、陽極表面での電子のエネルギー付与や沿面放電などを、最適化する必要がある。(2)の目的のために、現在までに考案されたダイオードの基本形を図5-3・3に示す。

図5-3・3の(A)は反射形ダイオードで、陰極Cから放出される電子Eは、陽極Aを透過して往復運動をし、これにより電子電流が抑制されるとともに、Aの右側の電子停留点に仮想陰極V.Cを形成する。V.Cも1つの電極に数えて、これをとくに反射形3極管と呼ぶこともあり、陽極付近のプラズマから仮想陰極を通してイオンビームIが引出される。陽極プラズマを実陰極側に作らないで、仮想陰極側にのみ作るようにすれば、イオンビームの発生効率がよくなる。陽極薄膜の種類と厚さや構造、仮想陰極側ではなくて透過形の実陰極側にビームを引出す方法などに、工夫がみられる。低エネルギー(～100 keV)のイオンを長パル

図5-3・3 パルス軽イオン・ダイオードの基本形。(A) 反射形, (B) 収束電子流形, (C) 磁気絶縁形

ス($\sim \mu\text{s}$)で発生できるが、陽極薄膜の繰返し使用ができず、慣性核融合向きではない。

図5-3・3の(B)は収束電子流形ダイオードで、陽陰極間を流れる大電流による自己磁場により電子流が中心付近に収束し、電子の走行距離を長くしてイオンビーム発生効率を上げる形式である。陽極をプラスチック薄膜にして(A)図のような電子の往復も同時に利用する形式(ピンチリフレックス・ダイオードと呼ばれる)が多く研究されている。電流、出力、発生効率がそれぞれMA, TW, 数10%級の軽イオンビーム(H^+ , C^+ など)が発生されており、低インピーダンスのパルスパワー電源とポリエチレン等の炭化水素薄膜を用いると、容易に大電流ビームを発生できる。一方、繰返し動作ができないことや、後述の方式に比べてビームの発散角が大きいことなどの欠点があって、標的照射用に収束密度のできるだけ高いビームを発生する観点からは、慣性核融合用に最適のパルスイオンビーム・ドライバーとはいえない。

図5-3・3の(C)は磁気絶縁形ダイオード(Magnetically Insulated Diode, 略してMID)で、陽陰極間に紙面に垂直方向に磁場Bをかけ、陰極から出る電子に図のような経路を取らせることにより電子電流を抑制する形式のダイオードである。ダイオード電流による自己磁場を利用する方式もあるが、一般には外部励起磁場を用いる方がダイオードの動作領域を広く取ることができ、陽陰極配置や磁場配位も種々のものが研究されている。中でも多く用いられている磁気絶縁形ダイオードを図5-3・4に示す。(A)はビーム引出し形ダイオードで、水平軸のまわりに対称な構造を持ち、2つの同軸円筒状陰極の間の領域からリング状のビーム引出しが可能である。2つの同軸リング状コイルにパルス電流を流し、陽極基板金属の表皮効果を利用して、陽極表面に沿う径方向磁場Bを発生する。このとき、陽極に対向する両陰極エッジ付近を径方向に結ぶ電子シースによる仮想陰極の生成が重要である。比較的長距離にわたりビームを飛ばす必要のある将来のイオン源としては、この形式のMIDが最も有力である。図5-3・4(A)で電極等の幾何学的形状を曲面にし、水平方向のある位置にビームを収束することもできる。一方、ごく近い将来に科学的実証実験を試みる目的を第1優先順位とし、図5-3・4(B)に示す、たる形ダイオードの研究も進んでいる。垂直軸のまわりに回転対称の構造を持ち、リング状の陽極と、上下2方向から保持される円錐頭形の陰極、ならびに陰極内に設け

図5-3・4 各種の磁気絶縁形イオン・ダイオード。(A)ビーム引出形, (B)たる形, (C)平板形

た磁場コイル(上下各1個)から構成される。垂直軸の中心付近に、きわめて高輝度のビーム収束が可能で、上記のPBFA-II装置の1つ前の段階のPBFA-I装置(インピーダンスが 0.5Ω の負荷に20 ns, 2.5 MVのパルスがかかることができる)等を用いて、1動作当たり200~300 KJ(ただしビーム電圧が1 MV以上の軽イオン成分、陽極はプラスチック等)の H^+ , C^+ 等ビームを得、標的に収束して $\sim TW/cm^2$ 級の単位面積当たり電力を達成している^{6,7)}。以上とは少々趣を異にするが、図5-3・4(C)は平板形ダイオードで、紙面に垂直方向にある幅を持つ平板形の陽極のまわりを、レーストラック形の1ターン・コイルが取囲み、このコイルに電流を流して紙面に垂直方向の磁場Bを作るとともに、コイルの左側を透過形陰極として使用して、左方向にビームを取出す。これはMIDの基本形として、初期に重要な役割を果たしたが、現在はあまり使われておらず慣性核融合向きではない。

2.3 ビーム輸送と標的照射

上記のパルスイオン源で発生できるイオンビームは、収束後の高エネルギー密度を減少させることなく標的に輸送し、目的とする標的照射を実施する必要がある。このためには、ビームが引出された直後の陰極近くにメッシュを設けたり、ビーム引出し直後から標的までの距離の間に、適当な種類と圧力の希薄なガス室を設けるなどして、イオンに伴走する電子の補給を容易にし、ビームの電荷および電流中和を十分してやる必要がある。ダイオードにきわめて近い距離で標的照射をする、いわゆる科学的実証を第1目標にする実験では、これらの方法により、標的照射に必要な収束ビームエネルギー密度を得ることができそうである。

一方、将来の慣性核融合炉の標的照射に上記のパルスイオンビームを用いる場合、ダイオードと標的間の数m程度をうまくビーム輸送する方法を確立する必要がある。現在考えられている方法の中で、もっとも研究が進んでいる方法は、ダイオードと標的を結ぶ中心軸に沿って大電流を流し、発生する方位角方向の磁場 B_θ によってイオンビームの軌道を軸付近に制限する方法である。その際、大電流路に沿ってできる放電プラズマによりビームの電荷と電流中和をするので、このような方法をプラズマチャネルによるビーム輸送という。プラズマの密度が濃すぎるとイオンビーム自身の衝突減衰がはげしくなり、逆にプラズマ密度が薄すぎると中和化が十分できなくなり、また、過渡的に生成するプラズマチャネルの半径がビーム入射時に大きくなりすぎて、ビーム径を小さく制限できなくなるから、プラズマチャネルの密度には最適値があり、 $10^{-6} \sim 10^{-4} g/cm^3$ と推定されている。

標的照射を行い十分な標的圧縮による核融合反応を起こすためには、このようなプラズマチャネルを数多く、同時に時間的ずれが少なく、所望の位置に、再現性良く生成する必要がある。このようなプラズマチャネルを生成するために、放電管壁による壁安定化放電や金属細線等に沿う細線瞬間蒸発放電、レーザー光電離を始動に用いる直線ピンチ放電などが研究されているが、将来とも使えそうな方式は最後のものである。

レーザー光電離で始動する直線放電によるプラズマチャネル生成実験の模式図を図5-3・5に示す。曲面形のダイオードから出るイオンビームは、プラズマチャネルの入口付近に収束入射させる。高真空のダイオード室と、主として希ガス等のある圧力充填したプラズマチャネル生成室との間は隔膜で仕切り、レーザー

図5-3・5 レーザ光で始動するイオンビーム輸送用プラズマチャネル

光は図の左から右方向に入射する。レーザー光電離によりできるプラズマが種プラズマとなって、チャネル部両端に設けたリング状電極間で、外付けのコンデンサーに蓄えた電荷により直線放電を起こさせる。主放電の電流 I_c のピーク値と立上り時間は数10 kA, 数 μ s 程度であるから、主放電の電流最大時刻に、時間的に2桁程度短パルスのイオンビームを打込むことになる。

主に利用する光電離機構としては、1光子による直接電離機構と、特定の原子励起準位に等しいエネルギーの光子を用いる共鳴飽和電離機構が有力である。これらのうちのどちらを採用するかによって、チャネルガスとレーザー光の種類がちがってくるが、将来のパルスイオンビーム核融合炉の有力な方式として、炉内壁付近にLi等の液体金属流が存在する場合を考える。その場合の直接電離用レーザーはエキシマー・レーザー等の紫外レーザーで、一方共鳴電離用レーザーは色素レーザーである。これらのレーザー光によるプラズマチャネルの光始動の過程は、最近かなり明らかになって来たが⁸⁾、始動後のチャネルを用いてのビーム輸送の研究はこれからである。

以上のほか、光電離の代わりにレーザー光エネルギーの吸収によるガスの希薄化を始動に用いる方法があり、こちらの方でむしろパルスビーム輸送を試みた例もあるが、分子ガスの赤外光吸収によるガスの加熱膨脹を基本とするから、有力な炉形式に必要なもの以外の追加の異種分子ガスをかなりの分圧で必要とするし、同時に炉ガスの、高温度に対応する分子の解離や炉ガス精製循環システムへの負担増などを考慮すると、全体として、レーザー光電離法の方が将来性があると考えられる。

つぎにビームによる標的照射の研究では、先行するレーザーほどビームの収束エネルギー密度(時間、空間とも)が上がっておらず、したがって標的内でかなりの圧縮率が得られるようなイオンビームによる標的爆縮は行われておらず、標的照射の諸基礎過程の研究が実施されているにすぎない。そこで現段階では、標的爆縮については、別項の計算機シミュレーション等を参照し、近い将来に実施予定のサンディア研究所等の実験にそなえなければならない。

3. 今後の課題と展望

パルス軽イオンビームがレーザーに追いつき追い越すために、今後、何をどう進めるべきかという問題は、多くの要素を含み、色々の意見があつて、仲々むづかしい問題である。不確定要素が多く、紙数も残り少ないから、以下では、もっとも重要で、かなり多数の人々が異論をはさまないと思われる項目について、簡単に述べる⁹⁾。

パルスパワー電源装置について最近問題となっているのは、ダイオードに供給するパルスの急峻化を達成するためのプラズマ・オープニング・スイッチで、従来の電圧・電流レベルで得られている急峻化の結果がPBFA-II レベルで容易には得られていないことである。もちろん、この方面をさらに発展させることは急務であるが、これ以外の方法も模索する必要がある。

ビームの収束と高輝度化については、これまでに一応の目安は得られているが、再現性良く確実な方法が得られているかという点、まだまだ疑問の余地が多く、同時にレーザー光電離始動のプラズマチャネルによる強パルスイオンビーム輸送も、今後の課題である。

さらに重要なことはビームの高純度化で、従来の炭化水素系陽極からのビーム純度はあまりにも低すぎるから、クライオ陽極上の凍結純物質を用いる方法(低温陽極イオン源)¹⁰⁾とか、高純度 Li イオン源の研究をさらに進める必要がある。その際、ビームのターン・オン時間(高電圧パルスがダイオードにかかってからビームが発生するまでに要する時間)を極力短くする方法とか、ダイオードのインピーダンス制御(ダイオード内の電子の量や動きを制御して、ビーム電圧・電流等を最適化する方法)について、十分研究する必要がある。さいわい、クライオ陽極イオン源については主に東京工業大学等で、また Li イオン源については主にサンディア研究所等で、現在精力的に研究が進められている。

さらに、前節でも述べたが、レーザー核融合級の高輝度イオンビームによる標的爆縮と、その後の科学実証実験も、極力早い時期に実現させたい項目である。

最後に、以上の説明は、多くの場合について単発動作の範囲にとどまっております、今後は繰返しあるいは高繰返し動作下でのビーム発生、輸送、標的爆縮の実施をめざし、諸々の努力をする必要がある。そのためには技術的にも大躍進を必要とするから、桁ちがいの研究投資(マンパワー、ハードウェア、ソフトウェア全ての面で)を期待したい。

4. あとがき

パルスイオンビームによる慣性核融合の特徴は、ビームエネルギー当りのコストは低い、全体的にみてリスク(成功しない確率が幾分高い)であるといわれている。慣性核融合の科学的実証レベルまではガラスレーザー等のレーザーで到達できそうであるが、その先がレーザー(現在開発中のより高い効率の新形レーザーを含む)で読めれば、それに越したことはないが、もしそうでないなら、日本でも世界最大級のパルス軽イオンビーム装置を開発したく、それをどこでどのように開始するかが問題である。現在進行中のサン

ディア研究所の努力にほとんど頼るのも1つの方法であろうが、内外の経済・外交情勢を少しでも早期に良い方向に持っていくためにも、この方面にも、しかるべき、必要十分な手当がなされることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 糟谷紘一, 堀岡一彦: 応用物理 52 (1983) 774.
- 2) 中井貞雄, 田島輝彦, 今崎一夫ほか19名: 軽イオンビーム慣性核融合レビュー (文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究 (核融合) 第3班「炉心制御の基礎」総括班, 1984) p. 1.
- 3) S. Humphries, Jr.: Nucl. Fusion 20 (1980) 1549.
- 4) C. Deutsch: Ann. Phys. 11 (1986) 1.
- 5) J. VanDevender, G. Barr *et al.*: Proc. 6th Int. Conf. High-Power Particle Beams, (C. Yamanaka, ed., Instit. Laser Eng. Osaka Univ., Osaka, 1986) p. 43.
- 6) J. Maenchen, C. Ruiz *et al.*: Proc. 6th Int. Conf. High-Power Particle Beams, (C. Yamanaka, ed., Instit. Laser Eng. Osaka Univ., Osaka, 1986) p. 85.
- 7) D. Johnson, R. Leeper *et al.*: J. Appl. Phys. 58 (1985) 12.
- 8) K. Kasuya, K. Horioka, H. Tamura *et al.*: Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, Vol. 7 (H. Hora and G. Miley, ed., Plenum Publishing Corporation, New York, 1986) p. 631.
- 9) J. VanDevender: to be published in Nucl. Fusion, Supplement as the Proc. 11th IAEA Int. Conf. Plasma Phys. Contr. Nucl. Fusion Res. (Paper No. IAEA-CN-47/B-II-4, Manuscript distributed during the Conf. in Kyoto, Nov. 1986).
- 10) 糟谷紘一, 堀岡一彦, 高橋 努: 核融合研究 53 (1985) 135.