

PHYSICAL DESIGN OF TEST PLATFORM FOR HIGH INTENSITY LASER ION SOURCE

Takeshi Takeuchi^{1A)}, Shinji Shibuya^{A)}, Jun Nakagawa^{B)}, Tetsuro Mochizuki^{B)}, Toshiyuki Maruyama^{B)}

Toshiyuki Hattori^{C)}, Noriyosu Hayashizaki^{C)}, Hirotsugu Kashiwagi^{D)}, Sadao Momota^{E)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation, 3-8-5 Konakadai, Inage-ku, Chiba, 263-0043

^{B)} Toyama Corporation, 4-13-16 Hibarigaoka, Zama-city, Kanagawa, 252-0003

^{C)} Tokyo Institute of Technology, 2-12-1-N1-25 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550

^{D)} Japan Atomic Energy Agency, 1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

^{E)} Kochi University of Technology, 185 Miyanokuchi, Tosa-yamada-cho, Kami-city, Kochi, 782-8502

Abstract

To utilize a laser ion source (LIS) for heavy ion physics and industry, research and development project of practical laser ion source was started on June 2009, funded by New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). We have designed and been manufacturing the LIS test platform which can overcome some problems for LIS practical application. Gaussian-coupled resonator Nd:YAG laser (650mJ@1064nm) was selected as a laser light source. With the use of this laser the power density is estimated in $4.5e+13$ W/cm², which can produce a number of full-strip charged carbon ions. The cylindrical carbon target with the screw-rotating target holder system was adopted as a long life target which enables 10⁵ laser shots to be used. The position accuracy by the motion of the screw-rotating target holder system was calculated of ± 0.1 mm. The whole length of designed LIS test platform is approximately 1.2 m wide and 2.5m long.

大強度レーザーイオン源テストスタンドの物理設計

1. 経緯と開発目的

レーザーイオン源 (LIS: Laser Ion Source) は、理研の研究によるプラズマ直接入射法 (DPIS: Direct Plasma Injection Scheme) への応用により、大強度多価重イオンビームの生成・加速に成功^[1]、さらに固体ターゲットから多価重イオンビーム生成を容易に、低コストで実現する重イオン源として期待されている。しかしながら、複雑な装置構造と長時間の安定継続運転への適用など産業利用への実用化に要する課題は多く抱えている。このようなLIS研究開発現況において、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託事業「SBIR技術革新事業：大強度レーザーイオン源の開発」が開始された。加速器エンジニアリング株式会社・株式会社トヤマの共同企業がこれを受託し、昨年6月から事前調査、今年3月より設計開発が行われている。

NEDO委託事業の目的は、DPISに用いるLISを実用化の際に問題となる課題を解決し、製品事業化の目処をつけることである。具体的な目標を以下に示す。

- 出力性能：重イオンビームの生成。炭素ビームの場合、ピーク電流5 mA、パルス時間幅1 μ s。パルス繰り返しは1Hz以上。

- 実用化：1ヶ月以上をメンテナンスフリーで運転可能。
- 応用機能：パルス毎にビーム強度を調整可能な機構を設ける。

本論文では上記目標を満たすべきテストスタンド装置の物理設計について報告する。

2. NEDO LISテストスタンド物理設計

真空チェンバー内の設置された固体ターゲットにパルスレーザーを集光・照射することで高密度多価チャージのイオンを含んだレーザープラズマが生成される。このプラズマから高電圧ギャップによりイオンをビームとして引き出す。以上がLISの原理である。レーザー生成プラズマ内のイオンの量とチャージ価は、集光するレーザーの固体ターゲット表面での面積当たりのパワー (W/cm²) に依存する。大強度で安定したプラズマおよびビームを生成するにはW/cm²の増大とパルス毎の高安定度が要求される。

2.1 プラズマ生成用レーザー

光源 (レーザーロッド) は理想的な点光源ではないので実際のレーザー光学系は初等的な幾何光学では表せず、図1のように集光される。図1から、

¹ E-mail: aec2g@nirs.go.jp

ターゲット面上でより大強度のW/cm²を得るには集光径が最も小さいウエストに位置するDiffraction Limit: d₀をターゲット面に合わせる必要がある。d₀は以下の式で表される。

$$d_0 \approx \frac{4 \lambda F}{\pi D} M^2 = \frac{4 \lambda}{\pi \theta_0} M^2$$

ここでM²は回折を考慮に加えたガウシアン光学理論で導入される物理量で、光源である光増幅器の共振器構造に依存する。M²と共振器構造の一般的な関係を表1に示す。従来のほとんどのLISで用いられている安定共振器レーザーの場合はエネルギー変換効率が良く、容易に高出力エネルギーを得ることが可能であるが、M²はガウシアン共振器よりも3倍以上大きくなる(集光照射面積では約10倍)。つまり数Jouleの高エネルギーレーザーに対応したトランスポート光学系を用いてフォーカスさせても集光径を小さくできない。一方、ガウシアン共振器レーザーでは一般的で入手・取扱容易な光学素子に対応したエネルギー出力でも集光径が小さいのでW/cm²値では高出力安定共振器レーザーに相当するパフォーマンスを得ることができる。

我々は市正品であり比較的安価でC⁶⁺イオン生成実績のあるガウシアン共振器型フラッシュランプ励起QスイッチNd:YAGレーザーをプラズマ生成用レーザーとして採用した。レーザーエネルギーは650 mJ @ 基本波(λ=1064 nm)、2倍波(λ=532 nm)では325 mJのピーク値で時間幅は約5~7 nsを有する。このレーザーを用いレンズ焦点距離:fを100 mm、レンズ入射ビーム径:Dを20 mm、M²=3、パルス時間幅を7 nsという条件では、集光径:12 μm、照射面積当たりのパワー:4.5e+13 W/cm²を達成することが出来る。炭素の場合、e+13 W/cm²以上で生成されたプラズマ中にフルストリップC⁶⁺を確認されている[2]。

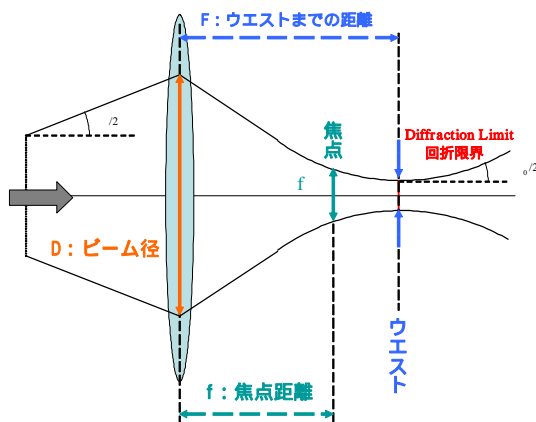


図1. レーザー集光領域の描像。実際には焦点位置とウエストとの間の距離は極小。差異があることを誇張するため図では大きく表現されている。

表1. 共振器構造の違いによるエネルギー効率、M²の一般的特性

	M ² 値	エネルギー効率
安定共振器	10以上	90%以上
ガウシアン共振器	~3	約80%

2.2 ターゲットチェンバーとレーザー光学系

レーザープラズマ発生部となるターゲットチェンバーは内径450mm、高さ約400mmで真空内部に高電圧ステージ(最大:+50kV)を設けることでシステムの安全性と小型化を意図している。このシステムの場合、高圧ステージ上のターゲットからレーザーにより生成されたプラズマが膨張し、高圧ステージとGNDであるチェンバー内壁を短絡させる危険性がある。プラズマによる短絡を防止するため高圧ステージのプラズマ発生中心から直接GNDが見えないように防護カバーが取り付けられている。高圧ステージ内部は上下分割壁の隙間から真空排気される。

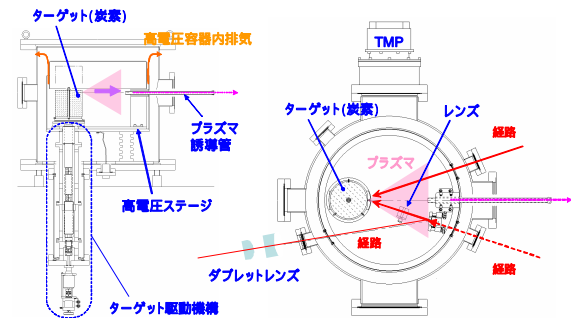


図2. LISターゲットチェンバーとレーザー光トランスポート経路

ターゲット表面でレーザー集光径をより小さくするため最終フォーカスレンズは焦点距離f=100 mmを採用した。これはターゲットチェンバー内高電圧ステージ上に設置される。実際には、ターゲット表面で最適な集光条件を得るために最終フォーカスレンズを軸方向に微調整する必要があるが、真空中でかつ高電圧ステージ上であり調整毎に大気開放の必要があり、非常に困難な作業である。我々は1組の平凹、平凸レンズを大気中に設置することでビームエキスパンダーを構成し、集光位置を軸方向に微調整可能となるよう設計した。なおターゲットへのレーザー光トランスポート経路は3つ用意した。

チェンバー内のミラーには誘電体多層膜の高反射率ミラー(99%以上)が設置されるが、プラズマがミラー表面を汚染また固体融解によるドロップレットのデブリが付着すると高反射率コートは効果が消失してしまう。デブリ付着を防止するためレンズ・ミラー汚染防止機構を設計した(図3)。ミラー=ターゲット集光点の光軸上に透明フィルムを上下か

ら通すことでレンズとミラーを防護し、汚れたフィルム面は大気側からの回転導入機構により巻き取る構造となっている。

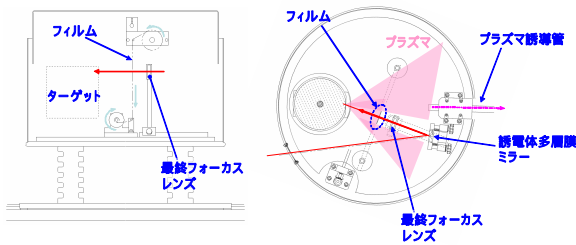


図3. レンズ・ミラー汚染防止機構

2.3 ターゲットと駆動装置

レーザー集光照射によりターゲット表面が削られるので、パルス毎に新しい面をレーザー集光点にセットする必要がある。我々は丸棒形状のターゲットを螺旋上に駆動させることでターゲット丸棒円周にレーザーを集光照射させる回転昇降駆動機構を設計した。丸棒ターゲットのサイズは100mm × 100mmLで集光点の熱融解により生じるクレーターを0.2 mm とすると約78.5万回で1日8時間として1Hz運転で1ヶ月弱のレーザーパルス照射に耐えうる。

前項で述べられたように W/cm^2 がレーザープラズマおよびイオンビームに大きく影響するので駆動によるターゲット表面の位置ズレ許容量を算出する必要がある。Diffraction Limit (回折限界) : ϕ_0 を $X=0$ とし軸方向のズレ : X とするとビーム半径 : r_x は以下の式で表される。

$$\omega_{\Delta x} = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \Delta x}{\omega_0^2} \right)^2}$$

この式と前掲のガウシアン共振器型フラッシュランプ励起QスイッチNd:YAGレーザーの仕様から X とターゲット表面での W/cm^2 値が得られる(図4)。

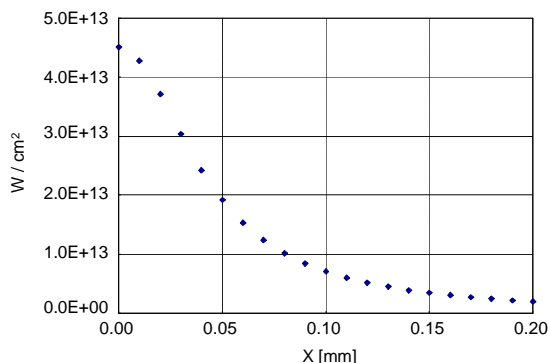


図4. ターゲット表面 ($X=0$) の回折限界からの軸方向のズレ : X と W/cm^2

X が約0.1mm以上になると W/cm^2 値は約1桁下がることになる。 W/cm^2 値の1桁減少は生成プラズマおよびその内部イオンの総量・チャージ価に大きく依存する[2]。それゆえレーザーパルス毎に回転移動するターゲット円周面の中心軸・ビーム軸方向に関する位置ズレがプラズマ・イオンビームの繰り返し安定度に悪影響を与える。我々は位置ズレ許容量に0.1mm以下と制限を設け、ターゲット回転昇降駆動機構を設計した(図2)。回転駆動軸心精度を ± 0.05 mm以内、ターゲット円周面の加工精度は 100 ± 0.04 mm、また炭素ターゲットは高密度・高純度黒鉛(20ppm以下)を採用した。

2.4 引き出し電極系

図2,3に示されているプラズマ誘導管は高電圧ステージと同電位で、下流に位置するアインツェルレンズの第1電極(接地電位)とのポテンシャル差によりイオンビームが引き出される(図5)。接地電位となる両端の電極は内径60mm、長さ30mmとし中間電極は最大+50kV印加で内径は80mm、長さ70mmである。端部形状は空間電荷効果を考慮した三次元イオンビームシミュレーション計算をもとに設計した。ポテンシャル形状を変化し透過効率を調整するためにアインツェルレンズは軸方向に移動可能な設計とした。

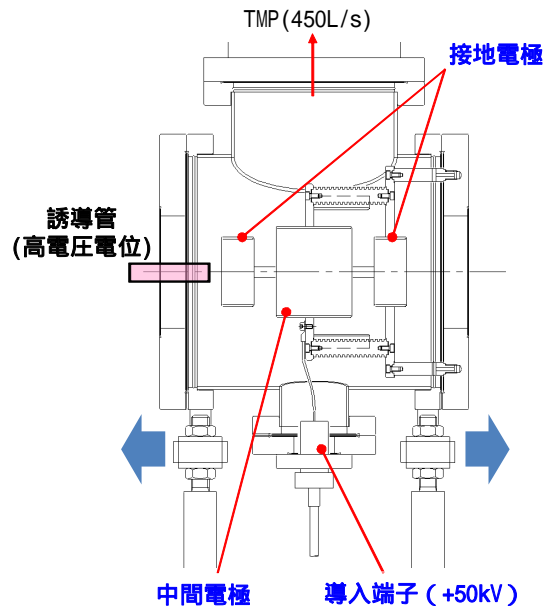


図5. アインツェルレンズ。
誘導管側がビーム上流

プラズマ誘導管は約500mmの長さで内径は10mmとした。さらにプラズマ誘導管の長さおよびビームダクト変換および下流チェンバー平行移動の機能を設けてプラズマフライト距離を可変にした。つまり膨張によるプラズマ密度と出力ビームパルス幅をコントロールすることが可能。

2.5 分析・測定系

測定についてはイオン電流値、価数分布、エネルギー分析などの諸特性を、レーザープラズマ（高電圧OFF）と高電圧引き出しイオンビームに対して実施する。

レーザープラズマについては、ターゲット表面から垂直に発生し膨張するプラズマの内部イオン電流値、チャージ価数を測定する。前者についてはプラズマファラデーカップ、後者については静電分析デフレクターで分析する。

プラズマファラデーカップ（図6）は密閉のコリメータ管内にカップとサプレッサー電極（MAX: -5kV）が設置されている。入口コリメータ径とサプレッサー間のポテンシャル差によりプラズマからイオンのみをコリメータ管内に引き出し、カップで検出する。カップ、サプレッサー電極ともに50mm。またポテンシャル形状整形のためにサプレッサー電極にはメッシュを張っている（取替え可能）。

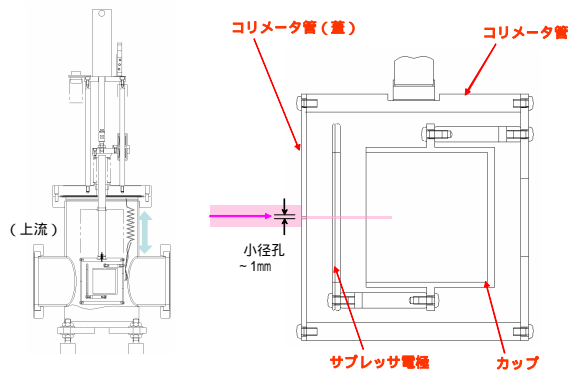


図6．プラズマファラデーカップ

静電分析デフレクターを図7に示す。曲率半径:150mm、ギャップ:5mmで耐圧は±5 kV、上下流に手動水平スリットを設けた角形状チェンバーで設計した。さらに上流には横5mm×縦20mmのコリメータプレートを設置固定し、ターゲット集光点でのプラズマ発光が下流の2次電子増倍管へ侵入しないように配慮した。下流には2次電子増倍管あるいは小型のファラデーカップが取り付け可能となっている。

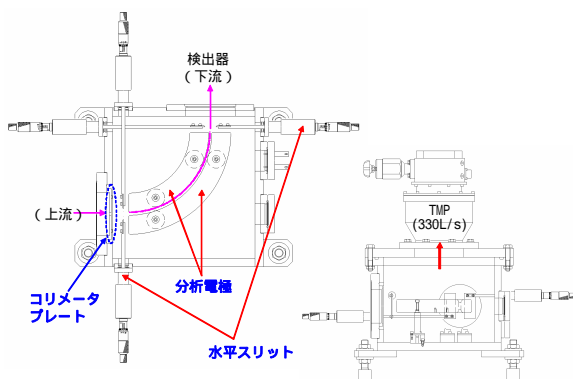


図7．静電分析デフレクター

引き出したイオンビームについては、コリメータ管入口蓋を取り外したプラズマファラデーカップでビーム電流値を、偏向電磁石によって分析を行う予定である。

3．まとめと今後の予定

DPISに用いるLISを実用化する際に問題となる課題を解決し、製品事業化を目指したLISテストスタンドの検討を行った。図8に装置全体図をまとめとして示す。測定分析機器も含めて2500mm×1250mmテーブルに収まるよう構成した。

今後の予定として、2010年9月に全機器立ち上げ調整と計測制御システム系の構築、11月までに炭素プラズマイオンのデータ取得・評価を、年内までに引き出しイオンビームのデータ取得・評価を予定している。その後はレーザーQスイッチ遅延や集光径に依存したビーム強度変調調査、他の金属イオン試験とターゲット寿命評価試験を考えている。

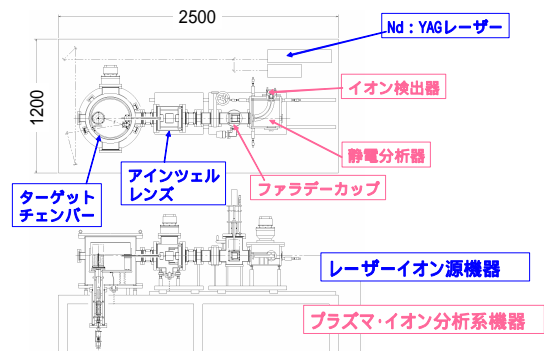


図8．LISテストプラットフォームの全体図

参考文献

- [1] H. Kashiwagi, et al., Rev. Sci. Instrum., 77, 03B305 (2006).
- [2] K. Sakakibara, Master thesis, Tokyo Institute of Technology.