レーザーオリジナル 3

オンライン計算機制御方式を用いた
レーザーによる孤立重水素プラズマ生成佐藤浩之助^{A)}・岡田 成 文^{B)}小越 澄 雄^{C)}・関 口 忠^{ABC)}

(1976年8月30日 受理)

Isolated Deuterium Plasma Production by Laser Beam
through On-Line Computer Control Technique.Kohnosuke SATO^{A)}, Shigefumi OKADA^{B)}, Sumio KOGOSHI^{C)},
Tadashi SEKIGUCHI^{ABC)}

(Received August 30, 1976)

A new system for directly producing impurity-free high-temperature deuterium plasmas within any type of magnetic containers has been constructed and operated, in which an on-line computer control technique is utilized to capture a falling deuterium ice-pellet by pulsed laser beam. Some experimental results on the fundamental properties of plasmas produced are presented.

1. はじめに

大出力レーザー光を物質に集光照射して作られるプラズマは、他の方法では得られない特徴を有しているが、この特徴あるプラズマと磁場との相互作用を研究し、ひいては制御核融合へのアプローチとしようという考え方が以前から提案されており、各国で小規模な予備実験が進められていた。しかしながら、このレーザープラズマの特徴を真の意味で発揮させるためには、ターゲットとなる物質を真空中に何らかの方法で“孤立”させた上で、これにレーザー光を集光照射する必要があるが、この“孤立させて集光照射する”という技術が、予測された以上に困難であることが徐々に判明し、各国とも思わしい成果を上げるに至らなかった。

以下に述べる内容は、東京大学関口研究室での数年の予備実験の結果¹⁾を基に、名古屋大学

プラズマ研究所(客員部門)において進めさせていただいた、「オンライン計算機制御方式を用いた、レーザーによる孤立重水素プラズマ生成」²⁾に関しての話である。現在は出力100J程度の5段増幅ガラスレーザーを用いて、イオンエネルギー600eV程度、イオン総数約 10^{17} コの重水素プラズマが生成されている。

2. システムの基本的条件及び性能

2.1 基本的条件及び概要

オンライン計算機制御を用いた、孤立重水素プラズマ生成システムを考えていく場合、まず初めに、系が有効に動作するための条件を明確にしておく必要がある。システムの処理時間及び誤差に関する必要条件としては、次の3点が挙げられる。すなわち、

$$(a) \quad T_{\text{fall}} > T_{\text{control}} = \sum \tau_i$$

$$(b) \quad |D_F - D_P| \geq \Delta x = \sum \Delta x_i$$

A) 名古屋大学プラズマ研究所 (464 名古屋市中種区不老町)

B) 東京大学理学部, C) 東京大学工学部 (113 東京都文京区本郷)

A) Institute of Plasma Physics, Nagoya University (Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464)

B) Dept. of Physics, University of Tokyo, C) Dept. of Electrical Eng., University of Tokyo (Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

$$(c) \quad |D_F - D_P| \geq v \Delta t = v \sum \Delta t_i$$

但し、 T_{fall} ：系が制御を開始してからペレットがプラズマ生成地点に落下してくるまでの時間

T_{control} ：系の処理所要時間

τ_i ：各処理での所要時間

D_F ：レーザー集光スポット径

D_P ：ペレット径

$\Delta x, \Delta x_i$ ：位置に関する総合及び各部分での誤差

$\Delta t, \Delta t_i$ ：時間に関する総合及び各部分での誤差

v ：プラズマ生成水平面でのペレット速度

これらの条件を十分満足するよう、各部分の機構を検討しつつ組み上げたものが、以下に述べる所の、孤立重水素プラズマ生成装置である。概略図を Fig. 1 に示す。

液体ヘリウムタンクを内蔵した固体重水素ペ

レット生成器が、真空容器の上部に取り付けられており、パイプ内で生成されたペレット（ $\sim 200\mu\text{m}$ ）は、適当な温度コントロールにより比較的静かに自由落下を開始する。システムとしては、ペレット検出系・軌道計算系・及び集光レンズ駆動系より成っており、これらの間の情報のやりとりの役をインターフェイスが受け持つ。

ペレットの検出法としては光学的手段を用いるのが最も適当と考えられるが、その中でもペレットの影を使う方法と、反射・屈折光などを使う方法とに大別される。検出のための光学系、ペレットのサイズ、自由落下の速度等、具体的な数値を用いて色々と検討を行なうと、後者の反射屈折光を用いる方法が多少優っていることが判明し、この方法を採用している。スリットは Fig. 2 のような“Z型”をしたものを用いており、これらと光電子増倍管により得られたパルス列は、インターフェイスでの波形処理の後、RUN

Fig. 1. Experimental arrangement, employing "on-line computer control" technique for capturing a freely falling deuterium ice-pellet by pulsed laser beam.

Fig. 2. Z-shaped slit

状態で待ち受けている CPU へ割り込みがかけられる。こうすることにより CPU 処理時間を短縮できる。軌道計算及びプラズマ生成予定水平面での空間・時間に関する予測計算が終わると、結果が再びインターフェイスに送り込まれる。

これらの情報の内、先ず位置に関するものが高速ステップモーター駆動系に送られ、わずかな遅延の後駆動指令が出される。レーザー光集光点の移動は、ステップモーターによって集光レンズを駆動させる方法をとっている。他にも、例えばミラー・プリズム等の角度を振る方法とか、別のアプローチによる方法が考えられるが、レーザー光の強度、必要な移動距離、必要な応答速度及びそれに対する負荷（素子の重量）等々を考慮すると、集光レンズの移動がこの目的には一番適していると考えられる。

インターフェイスからの指令により集光レンズの駆動が完了すると、移動完了信号がインターフェイスに戻され、CPU はいつでもレーザートリガー信号を出せる状態となり、軌道計算からの予測された時刻がやってくるとレーザーが発射されることになる。

2.2 性能

システム全体を動作させてプラズマを生成する前に、まずこのシステムは果して前述の基本条件を満足しているかどうか、という点を確認

めておく必要がある。

条件(a), すなわち処理速度が十分速いかどうかつまりペレットが落下してくるまでに処理が終わっているかどうかという点は、比較的容易にチェックできる。設計の段階では、やってみなければ分らない点*を多小含んではいるが、実際やってみると、

$$\tau_c \cong 2 \text{ ms}$$

$$\tau_l \cong \begin{cases} 0.94S & \text{ms} \quad (0 \leq S < 20) \\ 0.39S + 4 & \text{ms} \quad (20 \leq S \leq 80) \end{cases}$$

$$\tau_t \cong 1 \text{ ms}$$

となる。但し、 τ_c , τ_l , τ_t は各々、軌道計算、レンズ駆動、及びレーザー発振に要する時間、また S は、ステップモーターの駆動ステップ数である。現在の実験状況（落下距離=35cm, 第2検出器の水平面からプラズマ生成水平面までの距離=15cm）では、 $T_{\text{fall}} \cong 65 \text{ ms}$ であり、レンズ駆動の距離が最大 ($x = \pm 4 \text{ mm}$, $S = 80$) の場合でも、

$$T_{\text{fall}} > T_{\text{control}}$$

は十分満足されている。なおこの条件は、ペレットの落下距離を大きくとればとる程容易に満足されることになるわけで、このシステムが大型の磁気閉じ込め装置に適用し得ると言われて

* 例えば計算処理速度

Fig. 3. Errors of anticipated values in position from No.1 and 2 detectors' information compared with No.3 detector's one as to various targets. Abscissa: Position of pellet at No.3 detector's level (x_3 :mm). Ordinate: Errors (Δx_3 : μ m). [A] Alcohol droplet: $\Delta X=250\mu$ m, [B] Glass pellet: $\Delta X=188\mu$ m, [C] Glass pellet with heavy material: $\Delta X=152\mu$ m, and [D] Hg droplet: $\Delta X=53\mu$ m.

いる要因の一つとなっている訳である。

次に条件(b)(c)であるが、これを確かめる方法として模擬ペレットを落下させてみる方法が考えられる。模擬ペレットによるテストの場合、実験頻度及び容易さを考えると大気中でのテストが望ましいが、この際問題となるのが空気抵抗である。Fig. 3に示すように、各種の模擬ペレットをテストしてみた結果、Hgの液滴が一番望ましいことが判明した。検出系において特殊な“Z型スリット”を採用しているため、もし空気抵抗が効いていれば検出及び計算による位置の誤差はペレット通過水平位置(x)に依存し、結果として標準偏差も大きくなる。Hgの場合の偏差約 50μ mという値は、スリット巾が 200μ mである事を考えると十分小さな値と言え、またこの系の設計時の予想誤差*ともかなり近い。

これらの事を大気中で確認した上で、キセノンのペレットを真空中で落下させ系全体のテストを行なった。キセノンの約200コのペレットに関する結果は、ほぼ予想された通りで総合誤

* 検出系レンズの収差、各検出器の水平度、波形処理計算処理等に由来する誤差。ステップモーターも1 step 当り 50μ mで動作させる設計。なおFig. 4に示すように、 x (水平方向位置) 及び t (時刻) に関しての誤差は、

$$\begin{aligned}\Delta x_3 &= \Delta x_3^D + \Delta x_3^C + \Delta x_3^L \\ &= \Delta x_3^A + \Delta x_3^L \\ \Delta t_3 &= \Delta t_3^D + \Delta t_3^C + \Delta t_3^L \\ &= \Delta t_3^A + \Delta t_3^L\end{aligned}$$

である。

x_i^R : Real value at i -th detector
 x_i^D : Detected value at i -th detector
 x_3^A : Anticipation value of x_3
 x_3^L : Driven position of focus lens

Fig. 4. Diagram of errors through processing.

差は $\sim D_p / (2 \sim 3)$ 程度におさまっており、実験の要求から言って条件は十分満足されている。

なお、時間とともにペレットの初期の位置及び速度がどのような変化をするかを示したのが、Fig. 5である。これらから、オンライン計算機制御を行なうことの必要性が推察できる。

3. プラズマ生成

このシステムが総合的に確実に動作するかど

Fig. 5. Time history of fluctuations of pellets as to position and initial velocity.

うかは、前節での誤差の問題に加えて、鉛直軸の軸合せ、レーザー光と連続参照光との軸合せ、レーザー光集光点と鉛直軸との合致等々の問題があり、最終的にはペレットにレーザー光を照射して、プラズマの再現性を確かめる必要がある。

予測計算の結果の内、空間または時間に関して意図的にある量 ($\Delta \tau_a$, Δx) だけずらせる事に

より、プラズマの生成率及び生成されたプラズマのイオンエネルギーがどう変化するかを示したのが、Figs. 6, 7である。Fig. 6 のフラットな部分及び立上りの部分からわかるように、200～300 μm のペレットに対してレーザーを700 μm 程度の集光径で照射した場合、誤差は小さく、数百 μm の範囲にわたって α (プラズマ生成率) = 1であり従って中心を狙えば確実に生成できる

Fig. 6. Overall probability of successful plasma production

(a)

(b)

Fig. 7. Reproducibility of ion energy of plasma produced,

(a) vs. the intentional deviation in laser-triggering time, ($\Delta Z = v\Delta\tau_d$) and (b) vs. the intentional deviation in space.

ことが判る。また、Fig. 7は中心領域で、生成されたプラズマのイオンエネルギーの再現性が良いことを示している。Fig. 8に、生成されたプラズマの発光積分写真及びレーザー光透過焼付パターンを掲げた。

(a)

(b)

Fig. 8(a) Time-integrated photograph of plasma light.

(b) Burned pattern of the laser light in the presence of plasma produced.

今後このシステムを用いて、プラズマの温度・等方性などが、レーザーパラメーター等によってどのような特性を示すかを調べていく必要があるが、一部既に得られている結果を Figs. 9, 10 に示す。なお、イオンコレクター・軟X線等の測定から、現在イオンエネルギー約600eV、イオン総数約 10^{17} コの重水素プラズマが得られている。

Fig. 9. Ion velocity (energy) distribution of laser-produced deuterium(D) and xenon (Xe) plasmas with a single laser beam irradiation; For D, $W_L \sim 70$ J, $\tau_L \sim 20$ ns, $\bar{E}_i \sim 630$ eV; for Xe, $W_L \sim 20$ J, $\tau_L \sim 20$ ns and $\bar{E}_i \sim 2.5$ keV. The three curves are normalized so as to contain the same total particle number.

Fig. 10. Spatial anisotropy of freely expanding laser-produced D-plasma for a single laser-beam irradiation for the same conditions as in Fig. 9; E_i : ion energy per particle, N_i : particle number; #1, #2, ... denote ion-collector, located 16 cm apart from the plasma origin, by which the data have been taken.

4. おわりに

世界各国でも一時試みられ、技術的困難のために放棄されてきた“レーザーによる孤立重水素プラズマ生成”が、このオンライン計算機制御方式を導入することにより、比較的再現性良く行なえることとなった。

この方法の特徴の一つは、ペレット落下距離が長くとれるという点にある。どこまで落下距離を大きくできるかは制御精度ともかかわるが、ペレット生成地点から検出地点までを長くとれば、数mにすることも可能と考えられる。精度に関しては、検出を行なう位置を考慮することにより、比較的容易に、

$$\Delta x \text{ and } v\Delta t \leq D_P/5$$

程度にする事は可能と考えられている。

この研究の初期に有益な議論をしていただいた、東京大学工学部、田中英彦助教授、桂井誠助教授、実験に際し協力して下さい、東京大学理学部須藤滋氏、工学部辻博史氏、及び技術面で長期間助力して下さい、名古屋大学プラズマ研究所技官、深川東洋志氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) M. Tanimoto, A. Kitsunezaki and T. Sekiguchi; J. Phys. E 5 (1972) 27.
- 2) K. N. Sato et al.; Proc. of 9th Symposium on Fusion Technology (June 14-18, 1976, Garmisch-Partenkirchen).