

JAERI-Tech

2004-077



JP0550077



ダブルターゲットX線レーザー用高安定ターゲット装置の開発

2005年1月

助川 鋼太・岸本 牧・加道 雅孝

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

## ダブルターゲット X線レーザー用高安定ターゲット装置の開発

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター

助川 鋼太・岸本 牧・加道 雅孝

(2004年11月10日受理)

現在 X 線レーザー研究グループでは、ダブルターゲット方式を用いた高輝度・高空間コヒーレンスの X 線レーザーの開発を行っている。ダブルターゲット X 線レーザーは、X 線干渉計測や X 線スペckル計測などに応用される。ターゲットアライメント精度は、第 1 ターゲットから生成された種光を第 2 ターゲットに導入するために非常に重要である。要求アライメント精度を達成するためにターゲットアライメント装置の開発を行い、高精度及び高安定という点において新しいターゲットアライメント装置を設計、製作した。

ターゲット位置の安定性に関して、真空引きのターゲット真空容器の歪みによるターゲット位置変動は $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下、ポンプの振動によるターゲット位置変動は $4 \mu\text{rad}$ 以下であり、高い安定度を得られることを確認した。また、ターゲットアライメント装置の分解能はそれぞれ並進方向で $6 \mu\text{m}$ 、回転方向で $20 \mu\text{rad}$ 、安定度は $\pm 12 \mu\text{m}$ 、 $\pm 40 \mu\text{rad}$ であることがわかった。

## **Development of the High Stability Target System for Double-target X-ray Laser**

Kouta SUKEGAWA, Maki KISHIMOTO and Masataka KADO

Advanced Photon Research Center  
Kansai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto-fu

(Received November 10, 2004)

We have been developing an x-ray laser with high brightness and high spatial coherence using double targets scheme. The x-ray laser is applied to an x-ray interference measurement, an x-ray speckle measurement, and so on. Accuracy of the target alignment is very important in order to lead the seed light generated from the first target to the second target. An auto alignment system has been developed to achieve the required accuracy and the target chamber has been designed and fabricated in the viewpoint of high precision and high stability. The stability of the target position has been examined and achieved target movement less than 4  $\mu\text{rad}$  due to vibration of the pumping system and less than  $\pm 10 \mu\text{m}$  due to the deforming of the target chamber during evacuation. We have achieved the resolutions of the target alignment system as 6  $\mu\text{m}$  in direction of perpendicular of the target, 20  $\mu\text{rad}$  in rotation and the stability as  $\pm 12 \mu\text{m}$  and  $\pm 40 \mu\text{rad}$ , respectively.

Keywords: X-ray Laser, Spatial Coherence, Double Target, Target Chamber, Target Alignment System

## 目次

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1. はじめに                         | 1 |
| 2. 高安定ターゲット真空容器                 | 2 |
| 2.1 高安定ターゲット真空容器設計の指針           | 2 |
| 3. ターゲット安定性の評価                  | 3 |
| 3.1 ブレッドボード固定用光学定盤とブレッドボードの位置関係 | 3 |
| 3.2 真空容器内ブレッドボードと床との相対位置関係について  | 4 |
| 4. 高精度自動ターゲットアライメント装置           | 5 |
| 4.1 高精度自動ターゲットアライメント装置の概要       | 5 |
| 4.2 高精度自動ターゲットアライメント装置の制御方法     | 6 |
| 4.3 高精度自動ターゲットアライメント装置の動作テスト    | 7 |
| 5. まとめ                          | 7 |
| 謝辞                              | 8 |
| 参考文献                            | 8 |

## Contents

|   |   |
|---|---|
| 1. Introduction                                   | 1 |
| 2. High Optical Pointing Stability Vacuum Chamber | 2 |
| 2.1 Design Concept                                | 2 |
| 3. The Evaluation of the Target Stability         | 3 |
| 3.1 The Support Table vs. The Target Plate        | 3 |
| 3.2 The Target Plate vs. The Floor                | 4 |
| 4. The Auto Target Alignment System               | 5 |
| 4.1 Overview                                      | 5 |
| 4.2 Control System                                | 6 |
| 4.3 Demonstration                                 | 7 |
| 5. Conclusion                                     | 7 |
| Acknowledgement                                   | 8 |
| References  | 8 |

This is a blank page.

## 1. はじめに

X線レーザー研究グループでは、過渡的電子衝突励起 (Transient Collisional Excitation : TCE) 方式を用いてX線レーザーの開発を行っている。X線レーザーの開発は、X線干渉計測やナノスケールの観測のような物性研究などの応用研究を目的としている。TCE方式とは、超短パルスレーザーを用いてプリプラズマ (超短パルスレーザー光に約1 ns 先行してターゲットを照射する低強度プリパルスにより生成されたプラズマ) の電子温度を急激に上昇させ過渡的に高い増幅係数を得る方式である<sup>1)</sup>。

X線レーザーの空間コヒーレンスを上げるためには、増幅媒質として非常に狭い利得領域と且つ長い利得領域長さ (低いフレネル数) を必要とし、さらにX線増幅の空間的な均一性を向上させる必要がある<sup>2)</sup>。現在世界各国で行われているX線レーザー発生実験では、典型的な利得領域が直径 $\sim 50 \mu\text{m}$ 、利得長は6 mm $\sim 30 \text{mm}$ 程度と非常に小さく、実効的にフレネル数を下げるために多層膜ミラーを用いた折り返し増幅<sup>1)</sup>や、励起レーザー照射強度の均一性を確保するためにマスクを使って励起レーザー光の均一に近い強度部分のみを取り出してターゲットに線集光する方法<sup>2)</sup>などが行われている。しかしながらTCE方式のX線レーザーではX線増幅媒質中での利得時間が短いため、通常の方法では折り返し増幅が難しくフレネル数低減に限界があり、またプラズマ中の増幅利得が発生する領域に急峻な電子密度勾配が発生するので、X線が屈折を受け空間コヒーレンスが下がってしまうなどの問題がある。シングルターゲットを用いたTCE方式によるX線レーザーでは、短パルス幅 (数ピコ秒) で高輝度のX線レーザーパルスが得られる一方で、①ビーム広がり大きい、②ビームの空間プロファイルが汚い、③空間コヒーレンスが悪い、という問題を抱えており、X線レーザーを干渉計測や物性研究のプロープとして利用するためには、これらの問題点を改善する必要があった。

これらの問題を解決するため、X線レーザー研究グループでは、ダブルターゲットを用いて高い空間コヒーレンスを持つX線レーザーを発生させる研究開発を実施している。図1にダブルターゲットX線レーザーの概略図を示す。このダブルターゲットX線レーザーは、名前の通りターゲットを二つ用意し、第一ターゲットからのX線レーザーパルスを種光として、その波面のきれいな部分を第二ターゲット上に作った線状の均一プラズマ中に入射させ、第二ターゲットプラズマを空間フィルター及びX線アンプとして使って空間コヒーレンスの改善とX線増幅という二つの事を同時に達成した<sup>3)4)</sup>。

現在得られているX線レーザーのビーム拡がり角は $0.2 \text{ mrad}$ と非常に小さく、定常的に応用実験に用いるためには、これ以下のビーム位置安定性が必要である。ビームの出射方向はターゲットの設置位置により決定されるため、ターゲットのアライメント精度には高い精度が要求される。従来のアライメント方法では、ターゲット真空容器に取り付けられた監視モニターによる目視でのターゲット並進方向の位置決め、及びターゲットにレーザーダイオード (LD) 光を照射して遠距離位置における反射ビームスポット位置を目視で確認することにより回転角決めを行っていたため並進方向で $\pm 50 \mu\text{m}$ 、回転方向で $500 \mu\text{rad}$ 程度のアライメント精度であった。また、ターゲット真空容器の振動及び歪みによってターゲットの安定性

は約 0.15 mrad 程度変動するという問題があった。これらのことは、定常的な X 線レーザーの発振を妨げることになり、ビーム位置についてもショットごとに約 0.15 mrad 程度はふらつくという問題を生じる。

この問題を解決するため、ダブルターゲット X 線レーザー用高安定ターゲット装置の開発を行った。“ダブルターゲット X 線レーザー用高安定ターゲット装置”とは、ダブルターゲット X 線レーザーを発振させる「高安定ターゲット真空容器」及びダブルターゲットを自動でかつ高精度にアライメントを行う「自動ターゲットアライメント装置」の 2 つから構成される装置である。

本報告書では、ダブルターゲット X 線レーザー用高安定ターゲット装置を構成する、高安定ターゲット真空容器の概要と高精度自動ターゲットアライメント装置について報告する。

## 2. 高安定ターゲット真空容器

### 2.1 高安定ターゲット真空容器設計の指針

従来のターゲット真空容器において表 1 に示す問題があった。

この問題点の主要な原因として、表 2 に示す原因が挙げられる。

これらの問題を解決するために、ダブルターゲット X 線レーザー用高安定ターゲット装置の一部である高安定ターゲット真空容器を設計し、作製した。この高安定ターゲット真空容器設計の指針は、表 3 に示すとおりである。

図 2 に、ダブルターゲット X 線レーザー用高安定ターゲット装置の全体図を示す。

真空引きによる高安定ターゲット真空容器歪みを極力小さくするため、本体を円筒型（直径 545 mm）にした。また、ターゲットが設置される真空容器内のブレッドボードは厚さ 30 mm の鉄製で、4 本のステンレス製支柱（ $\phi 30$  mm）でブレッドボード固定用光学定盤に固定されている。このブレッドボード固定用光学定盤は、730x730 mm、厚さが 40 mm あり、ステンレスの比重  $7.98 \text{ g/cm}^3$  からこのブレッドボード固定用光学定盤の質量は約 170 kg となる。このブレッドボード固定用光学定盤と真空容器内のブレッドボードとの取り合いは呼び径 50 の相当のベローズで各 4 箇所設けられている。これにかかる真空時の力は約 792 N と見積もられるので、質量約 170 kg（重量としては約 1666 N）であるブレッドボード固定用光学定盤が真空によって持ち上がらない設計になっている。このブレッドボード固定用光学定盤は鉄製の角パイプを組み合わせて作った高剛性架台に固定されている。また真空容器本体はブレッドボード固定用定盤と分離した高安定ターゲット真空容器架台の上に取り付けられ、真空引きに伴う真空容器の歪みや移動が真空容器内部のブレッドボードに影響を与えないようになっている。ターボ分子ポンプは、ベローズを介して高安定ターゲット真空容器に接続されており、高安定ターゲット真空容器とは別に床にアンカー打ちすることによってターボ分子ポンプやスクロールポンプの振動が直接、真空容器に伝わらないようになっている。他の真空容器と高安定ターゲット真空容器の間もベローズで接続されており、高安定ターゲット真空容器と他の真空容器の間隔を固定するためのスタットボルトは使っていない。図 3 に、ガ



ラスレーザーの光軸高さに取り付けられているポートの詳細なレイアウトを示す。LD→ターゲット→ポジションセンサーというシンプルな光路をとり、かつガラス窓を透過する光が屈折の影響を受けないようにするため LD 光はポートのガラス窓に垂直に入射・出射するように設計している。図 4 に実際の高安定ターゲット真空容器の写真を示す。

### 3. ターゲット安定性の評価

ターゲット安定性を評価するためには高安定ターゲット真空容器内のブレッドボードの安定性を評価する必要がある。しかし、ブレッドボードは真空中にあるため、ブレッドボード単体での安定性を評価するのは困難である。そこでブレッドボード固定用光学定盤とブレッドボードの位置関係を測定することによりブレッドボードの挙動特性を測定する。また、ブレッドボードと床との相対的な位置関係を測定することにより総合的にターゲットの安定性を評価する。

高安定ターゲット装置開発で用いるレーザーダイオードは、Edmond 製の ビーム径  $\phi 1.1$  mm、ビーム拡がり角(全角)0.7 mrad、最大出力 0.95 mW、発振波長 635 nm、ポインティング精度  $<15'$  のコリメートタイプダイオードモジュールを使用している。また、ポジションセンサーは、浜松ホトニクス製のフォトダイオードを用いた位置検出素子であり、受光面寸法は 10x10 mm、 $\pm 5$  V のアナログ電圧を出力し、10  $\mu$ m の分解能を持つ。このような LD 及びセンサーを用いて以下の安定性評価を行った。

#### 3. 1 ブレッドボード固定用光学定盤とブレッドボードの位置関係

本高安定ターゲット真空容器において LD の光路によっては真空引き前後でのポジションセンサー出力に大きな変動が見られた。例えば図 5 の①のようにターゲットの代わりに 1 インチのアルミ平面ミラーをセットして PSD 出力を測ると真空引き前後で約 0.5 V (平行移動していると仮定すると 500  $\mu$ m に相当する) の出力変動がみられた。この出力変動の原因を解明するために、図 6 のように LD を全く独立した光学定盤上に設置し、それぞれガラス窓、アクリル窓表面に照射し、真空引き前後で LD 反射光の位置の変化を測定した。そのときの結果を表 4 に示す。真空引き後に動いた方向は図 6 中の矢印で示してある。この 3 つの矢印の向きから、真空容器本体は直進及び回転ではない、本体と独立した動きをしていることがわかる。したがって、PSD の出力変動の主な原因は、窓ガラスが真空によって受ける歪みであるといえる。この 3 箇所ポートは O リングで真空を保持する構造になっており、ガラス及びアクリル窓自身が歪むということと O リングが真空引きにより面間で固定されるまで変動すると考えられる。つまり、ガラス窓及び真空容器本体が真空引きによって位置変動を生じ、ガラス窓への LD 入射角が変わったためと考えられる。そこで、図 5 の②のように LD か

らターゲットへの入射角を変えることなく出射角がガラス窓に対して垂直になるようにして、PSD 出力を測った。その結果、PSD 出力は約 0.1 V となり、①の場合と比較して 5 分の 1 に減った。このことは、ガラス窓及び真空容器本体が真空引きにより変動してしまい、結果的にポジションセンサー出力変動が、LD のガラス窓に対する入射角変動の影響を大きく受けていることを表している。この結果をふまえて、図 7 に示すように入射ポート及び出射ポートに対して LD が垂直入射となるようにして測定を行った。LD はブレッドボード固定用光学定盤に固定し、PSD はそれとは独立した光学定盤上に固定してある。この結果、上下左右とも全く変動しないことがわかった。LD は、ガラス窓に対して垂直に入射あるいは出射すると PSD 出力変動が生じないことが確認された。

次に LD 及び PSD をブレッドボード固定用光学定盤上に固定しブレッドボードとブレッドボード固定用光学定盤の相対的な変位を測定した。このときの測定配置図を図 8 に示す。LD は、光学ガラス (BK-7) に対して垂直に入射し、ターゲットに照射する。ターゲットからの反射光は光学ガラスに垂直に入射させる。その後ポジションセンサーに受光し、真空引きを行い真空引き前後での LD ビームスポット位置の変化量を測定する。ここで、ガラス窓の裏面の反射率は数%であり PSD には受からないので測定に影響を及ぼさない。

そのときの測定結果を図 9 に示す。図 9 のグラフにおいて、横軸は真空引きを開始してからの経過時間を表しており、縦軸はターゲットからの LD ビームスポット位置を表している。グラフから変位量は水平方向及び上下方向ともに  $\pm 10 \mu\text{m}$  以内であることがわかる。ターゲットとブレッドボードは固定されているのでターゲット表面での反射光の変位はブレッドボードの変位であることと同義である。すなわちブレッドボード固定用光学定盤とブレッドボードの位置関係は  $\pm 10 \mu\text{m}$  以内の精度で非常に安定している。スクロールポンプからの振動の問題は、スクロールポンプとその架台の間に防振ゴムシートを数枚敷くことと、真空容器に接続されるすべてのベローズをスタットボルトで固定せずに使用することにより、上述の精度での安定性を確認しているため、真空引きによる真空容器の歪み及びポンプの振動がターゲットに与える影響はほとんどない。

### 3. 2 真空容器内ブレッドボードと床との相対位置関係について

ブレッドボード固定用光学定盤とターゲットは一体ものであることはわかったので、次にブレッドボード (ターゲット) と床との相対位置関係を調べる必要がある。そこで、図 10 に示すような測定を行った。

図 10 に示すように、ブレッドボード固定用光学定盤の 4 角に LD を 4 つ固定し、外側に向けて照射した。この状態で真空容器を真空引き前後でのレーザービームの変位を測定した。これは、ブレッドボード固定用光学定盤の変位を測定しているがターゲットの変位を観測していることと等価である。この測定の結果を表 5 に示す。

表 5 において水平方向についてターゲットは時計周りに (表 5 において、PSD に向かって右方向を + とした。) 数十  $\mu\text{rad}$  程度回転していることがわかった。また、上下方向については全体的に 20~30  $\mu\text{rad}$  程度浮き上がることがわかった。このような挙動を示すので鉛ブロッ

ク（1個あたり約8 kg）をブレッドボード固定用光学定盤上に8つ置いて（鉛ブロック設置箇所は図10を参照）再度同じ測定を行った。その結果を表6に示す。

表6において水平方向についてターゲットは動かないことがわかった。上下方向については図10における位置②-位置③を軸にして約4  $\mu\text{rad}$ 程度上下するという結果を得た。鉛ブロックを設置することでターゲットの変動量が低減される理由は次のように考えられる。図10において中心Oから支柱までの距離は約160 mmであり、この支柱の1個にかかる力は約196 Nとなる。一方、中心Oから鉛ブロックまでの距離は約355 mmであり、中心Oと支柱の延長上に2つの鉛ブロックが載っているとみなせば質量は16 kg（重量としては156.8 N）となる。これらの力のモーメントを考えると鉛ブロックのモーメント（55664 N $\cdot$ mm）の方が支柱のモーメント（31360 N $\cdot$ mm）よりも大きいことがわかる。このことから、ブレッドボード固定用光学定盤の重さはまだ不十分ではあるが、鉛ブロック等のおもりを追加することでターゲットの変動量は低減されることがわかった。

#### 4. 高精度自動ターゲットアライメント装置

現在得られているX線レーザーのビーム拡がり角は0.2 mradと非常に小さく、定常的に応用実験に用いるためには、これに比べて十分高いビーム位置安定性が必要である。ビームの出射方向はターゲットの設置位置により決定されるため、ターゲットのアライメント精度が安定性確保の鍵となる。ビーム位置安定性を現在のビーム拡がり角以下にするためには、第二ターゲットにおける利得領域は直径30  $\mu\text{m}$ 程度である<sup>5)</sup>ことから、第一ターゲットの並進及び回転位置ともにこの領域内に合わせなければならない。従って、並進方向については30  $\mu\text{m}$ 、回転方向については第一と第二ターゲットの間の距離が20 cmであるから150  $\mu\text{rad}$ の精度が必要である。従来のアライメント方法では、ターゲット真空容器に取り付けられた監視モニターによる目視でのターゲット並進方向の位置決め、及びターゲットにLD光を照射して遠距離位置における反射ビームスポット位置を目視で読み取ることにより回転角決めを行っていたため、その精度は並進方向で約100  $\mu\text{m}$ 、回転方向で約1 mrad程度であった。これを改善するためにレーザーダイオードとポジションセンサーを用いた高精度自動アライメント装置の開発を行った。

この章では前章で述べた高安定ターゲット真空容器に高精度自動ターゲットアライメント装置を導入して、その装置の評価を行う。図11に今回開発した高精度自動ターゲットアライメント装置の写真を示す。

##### 4.1 高精度自動ターゲットアライメント装置の概要

図12に高精度自動ターゲットアライメント装置の概略図を示す。本装置は、2つのターゲット、ターゲットを駆動する電動ステージ(駿河精機製自動X軸ステージ:KS101-20MS2CRG3、自動回転ステージ:KS401-60-2-CRG3)、各4台のLD、PSDから構成される。1つのターゲットに対して2つのLDを照射し、その反射光をそれぞれPSDにて受光し、ターゲット位置を検出

する。1 つめのレーザーは、並進方向の位置を決めるためであり、LD を斜めからターゲット面に照射し PSD で受ける。もう一方のレーザーは回転方向を決めるレーザーである。PSD からのアナログ出力信号 (±5V) は、AD コンバータ(インターフェイス社製 PCI-3176)によってコンピュータ(富士通製 FMV-600W)に取り込まれ演算処理 (使用ソフト : NATIONAL INSTRUMENT 社製、LABVIEW) したのちターゲットを所定の位置まで並進および回転駆動することによりターゲットのアライメントを行う。

## 4.2 高精度自動ターゲットアライメント装置の制御方法

図 13 にターゲット制御系概略図を示す。本システムは、1 つのターゲットに対して 2 つの PSD 出力値から所定の位置への駆動量を得ることが目的である。そのためには、ターゲット位置に対する PSD 出力値特性を知る必要がある。そこで、ターゲットが並進方向に  $x$  mm 駆動したときの PSD の出力値を  $F_{he}(x, \theta)$  V、回転方向に  $\theta$  deg 駆動したときの出力値を  $F_{ka}(x, \theta)$  V とおく。まず、回転  $\theta$  を 0 deg に固定し並進  $x$  を数 mm ずつ変えていく。そのときの並進および回転 PSD 出力値を図 14 に示す。図より並進  $x$  をパラメーターとする場合、並進  $x$  に対する PSD 出力値は線形である。次に、並進位置を 0 mm とし、回転位置を数度ずつ回転させたときの並進用および回転用 PSD 出力値を図 15 に示す。回転  $\theta$  をパラメーターとする場合については PSD 受光面が  $10 \times 10$  mm の平面であるため、回転角  $\theta$  に対する PSD 出力値は線形にはならない。しかし、本システムのターゲット回転角がとり得る範囲は  $-0.2 \sim +0.2$  deg であり、LD の反射光としては  $-0.4 \sim 0.4$  deg となる。また、回転中心から PSD までの距離は約 35 cm であるため、この範囲内に対しては十分線形であるとしてよい。ここで、 $F_{he}(x, \theta)$ 、 $F_{ka}(x, \theta)$  はそれぞれ以下の式で表すことができるものと考ええる。

$$\begin{pmatrix} F_{he}(x, \theta) \\ F_{ka}(x, \theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $a_1 \sim c_2$  は任意の実数。

式(1)を変位  $x$ 、 $\theta$  について解けば所定の制御量を求めることができる。そのためには各係数を決定する必要がある。図 14、15 において最小二乗法を用いて直線式を算出する。N 個のデータ  $(x_i, y_i)$  があり、求めたい直線式を

$$Y = Ax + B \quad (2)$$

とおくと、残差の二乗和  $S$  は次式となる。

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - Ax_i - B)^2 \quad (3)$$

上式(3)の  $S$  が最小となるような  $A, B$  を探せばよい。すなわち、

$$\begin{aligned}\frac{\partial S}{\partial A} &= \sum_{i=1}^N 2(y_i - Ax_i - B)(-x_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial B} &= \sum_{i=1}^N 2(y_i - Ax_i - B)(-1) = 0\end{aligned}\quad (4)$$

を A, B について解けばよい。すると、

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & N \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{pmatrix}\quad (5)$$

を得る。これで直線式(2)における A, B が求まった。つまり、これらの値は式(1)における各係数  $a_1 \sim c_2$  に対応するため、 $a_1 \sim c_2$  の値も決定される。したがって、式(1)を並進  $x$  および回転  $\theta$  について解くことが可能となり、次式を得る。

$$\begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} b_2 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{he}(x, \theta) - c_1 \\ F_{ka}(x, \theta) - c_2 \end{pmatrix}\quad (1)'$$

ただし、 $\Delta = a_1 b_2 - a_2 b_1$  である。

式(3)において、 $F_{he}(x, \theta)$  および  $F_{ka}(x, \theta)$  に所定の値を入力することにより、式(1)'から位置  $x$ 、 $\theta$  を算出し、電動ステージに駆動量が送信されターゲットを駆動する。このようなプロセスで第一ターゲット及び第二ターゲットについてそれぞれ行うことによりターゲットアライメントが可能となる。式(2)~(5)の最小二乗法で得られる直線式を第一ターゲットを例にとり図 14 および図 15 に示しておく。

### 4.3 高精度自動ターゲットアライメント装置の動作テスト

前節の図 14 および図 15 における直線からアライメント装置としての感度を求めると、並進方向については、ターゲットが  $1 \mu\text{m}$  駆動すると  $0.001717 \text{ V}$  出力することがわかる。これは、 $1 \text{ V}$  あたり  $582.411 \mu\text{m}$  に相当する。PSD の最小分解能は  $0.01 \text{ V}$  であるから、並進方向のシステムの感度は、 $5.8 \mu\text{m}/0.01 \text{ V}$  となり、約  $6 \mu\text{m}/0.01 \text{ V}$  を得る。同様に回転方向についても約  $20 \mu\text{rad}/0.01 \text{ V}$  を得る。ここでは第一ターゲットを例にとっているが第二ターゲットに関しても第一ターゲットの幾何学的な配置と対称的に設計されているので感度としては第一ターゲットとほぼ同じである。

次に、前節の計算に基づいて、実際にターゲットを駆動し、制御を行った。図 16 に入力値に対するターゲット位置実測値誤差を示す。図 16 から、並進および回転方向について主に  $-0.02 \text{ V} \sim 0.02 \text{ V}$  に多く分布していることがわかる。つまり、本アライメント装置の安定度としては、並進方向で  $\pm 12 \mu\text{m}$ 、回転方向で  $\pm 40 \mu\text{rad}$  となる。

## 5. まとめ

従来のターゲット真空容器の諸問題を解決するために、ダブルターゲット X 線レーザー用高安定ターゲット装置を設計・製作した。このダブルターゲット X 線レーザー用高安定ター

ゲット装置のターゲット安定性評価を行った。その結果、ターゲットの安定性に関して、真空引きによるターゲット位置変動は、 $\pm 10 \mu\text{m}$  以下、ポンプの振動によるターゲット位置変動は、 $4 \mu\text{rad}$  程度であり、非常に高安定であることが確認された。

高精度自動ターゲットアライメント装置の制御可能な最小分解能は、並進方向で  $6 \mu\text{m}$ 、回転方向で  $20 \mu\text{rad}$  である。また、位置決め精度は、それぞれ  $\pm 12 \mu\text{m}$ 、 $\pm 40 \mu\text{rad}$  である。ダブルターゲットに求められるターゲットのアライメント精度は、並進方向で  $30 \mu\text{m}$ 、回転方向で  $150 \mu\text{rad}$  であることから、高精度自動ターゲットアライメント装置はその要求を満たしている。以上のことから、ダブルターゲット X 線レーザー用高安定ターゲット装置は、ダブルターゲットのアライメントにおいてターゲット安定性及びアライメント精度の観点から有効であることが確認された。

## 謝辞

本報告書をまとめるにあたって、多大な助言等をいただきました原研関西研究所光量子科学研究センターの長島章氏に深く感謝いたします。また、本開発を行うにあたって、多大な助言等をいただきました X 線レーザー研究グループの皆様感謝いたします。

## 参考文献

- 1) M.Kado, et al., The International Society for Optical Engineering, vol.3886; 2000; p.278-84.
- 2) 河内哲哉「X 線レーザーの基礎」、プラズマ・核融合学会誌, 第 77 巻第 2 号, 2001 年 2 月
- 3) M.Tanaka, et al., Opt.Lett.28, (2003),pp.1680-1682
- 4) M.Nishikino, et al., Phys. Rev. A 68, (2003) 0681802R
- 5) M.Nishikino, et al., Proceedings of International conference on X-ray lasers 2004 (to be published)

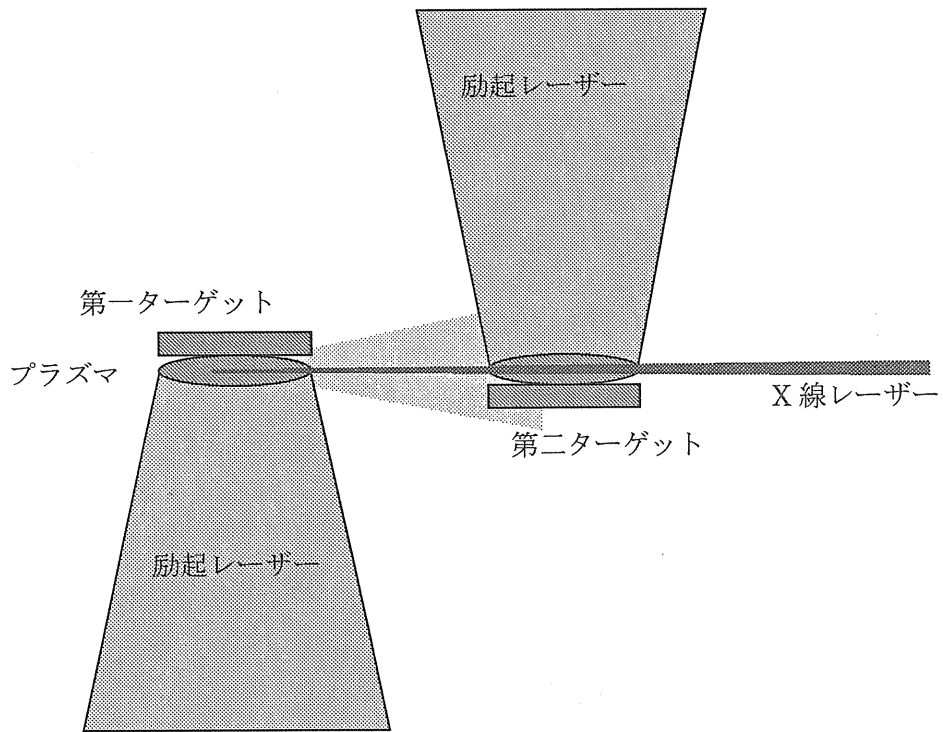


図1 ダブルターゲット X線レーザー概略図

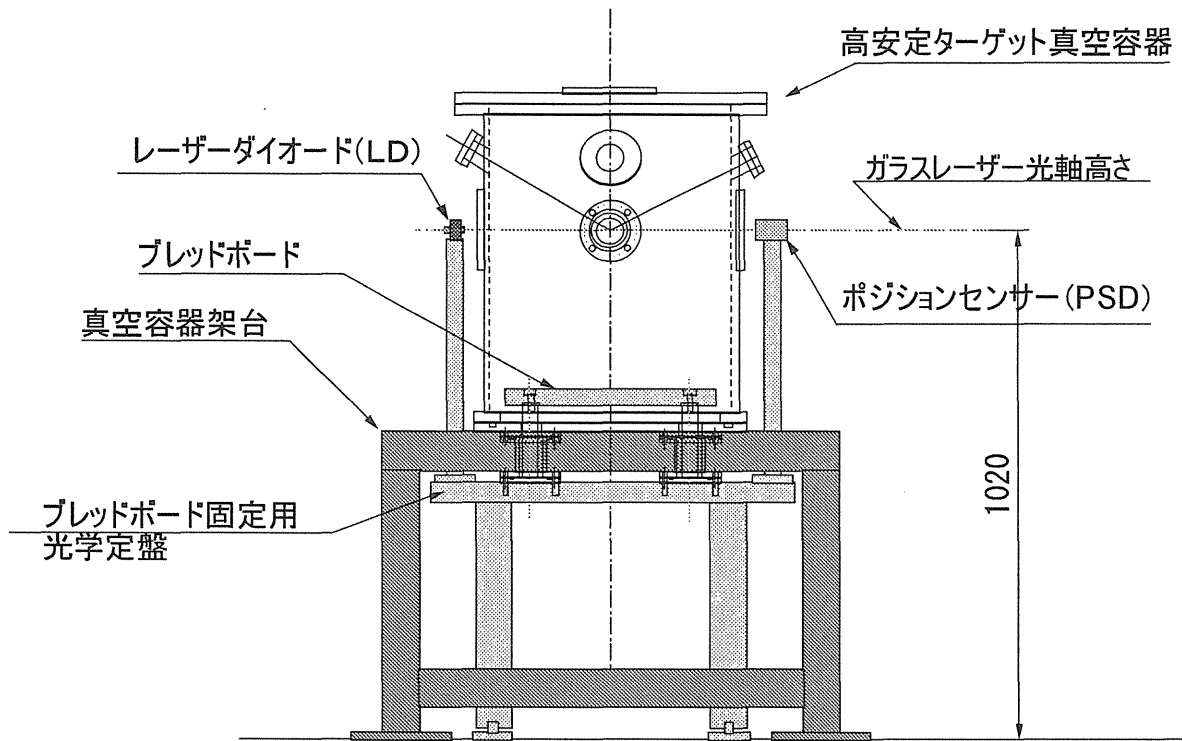


図2 ダブルターゲット X線レーザー用高安定ターゲット装置全体図



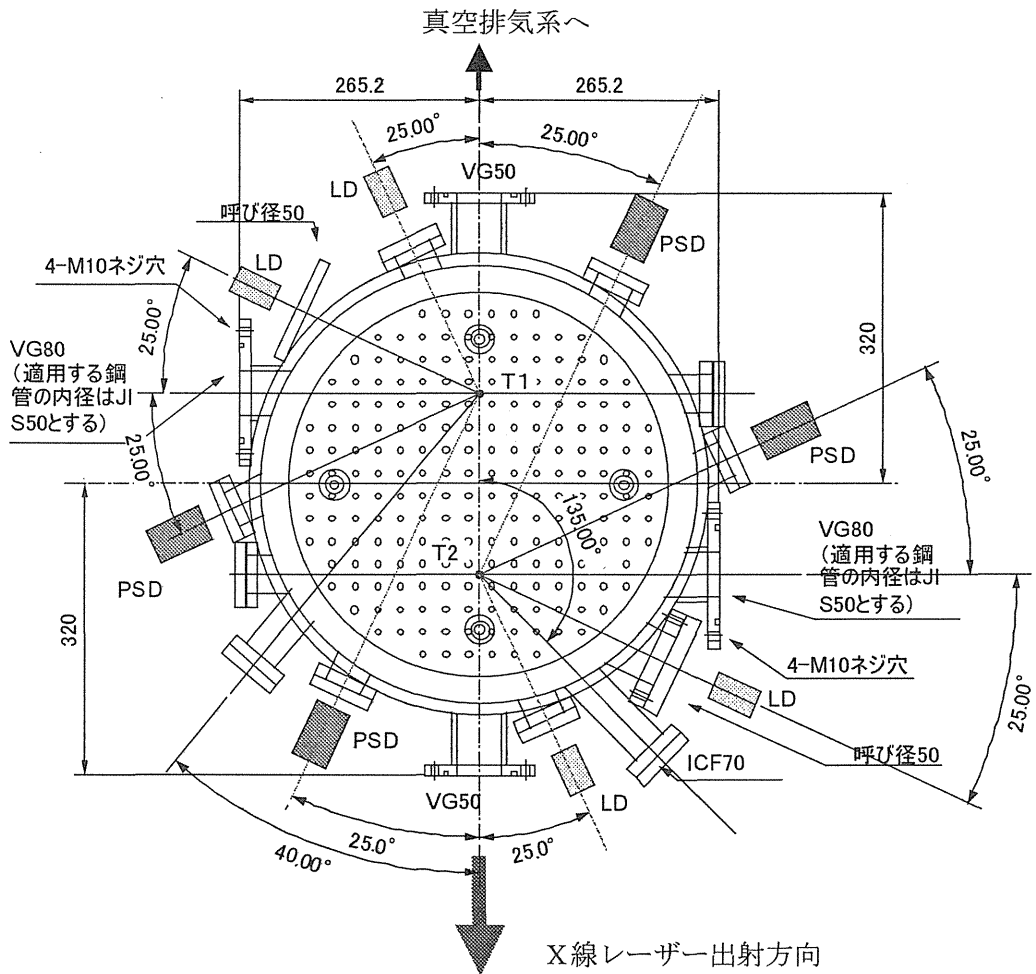


図3 ガラスレーザー光軸高さに取り付けられたポートのレイアウト

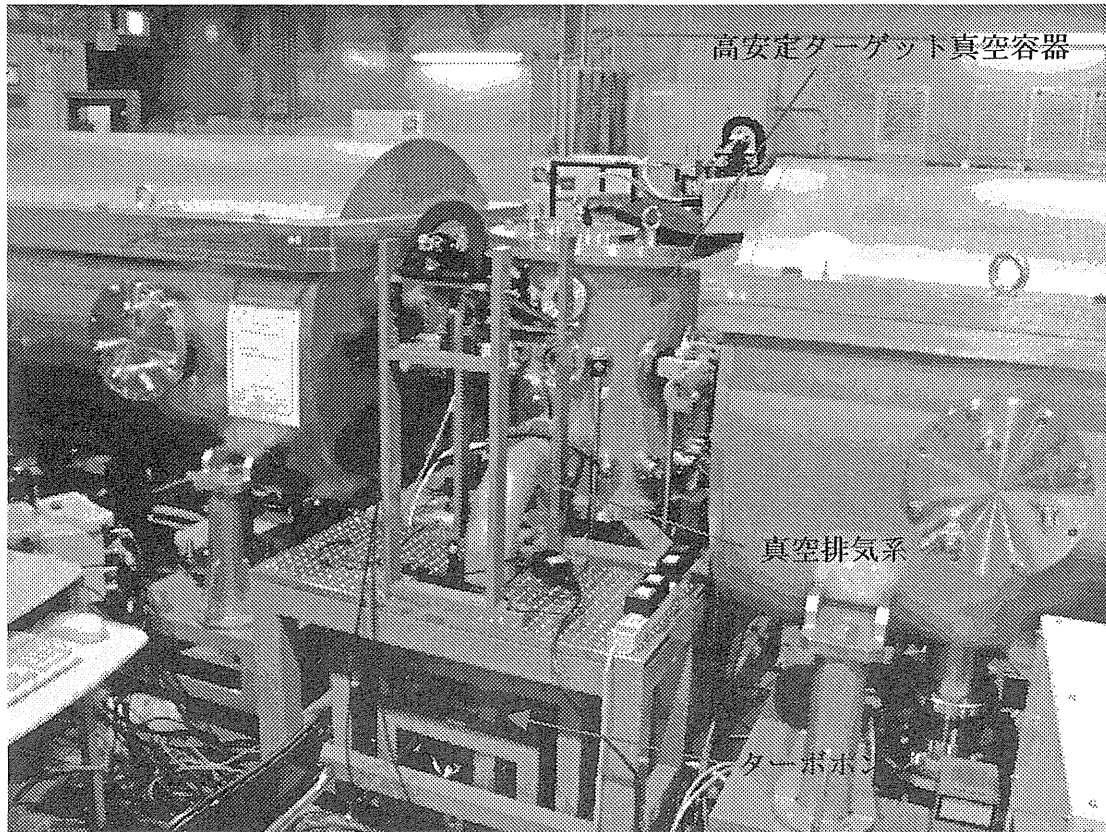


図4 高安定ターゲット真空容器

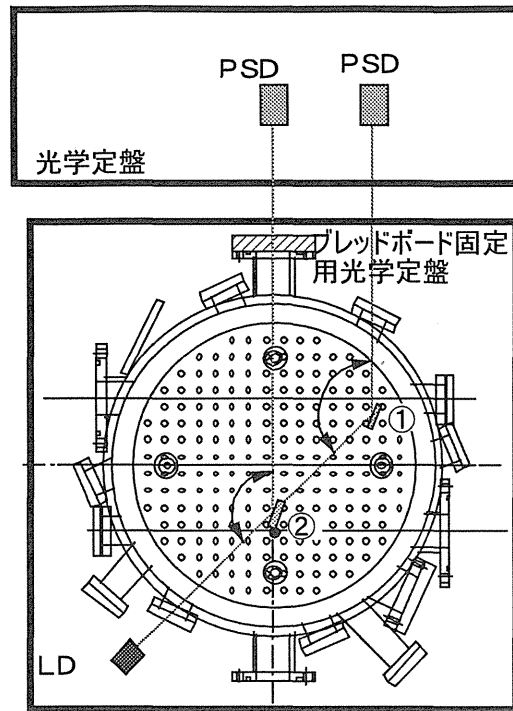


図5 ガラス窓に対するLD入射角の影響  
①、②はターゲットの安定性評価用アルミミラーである。

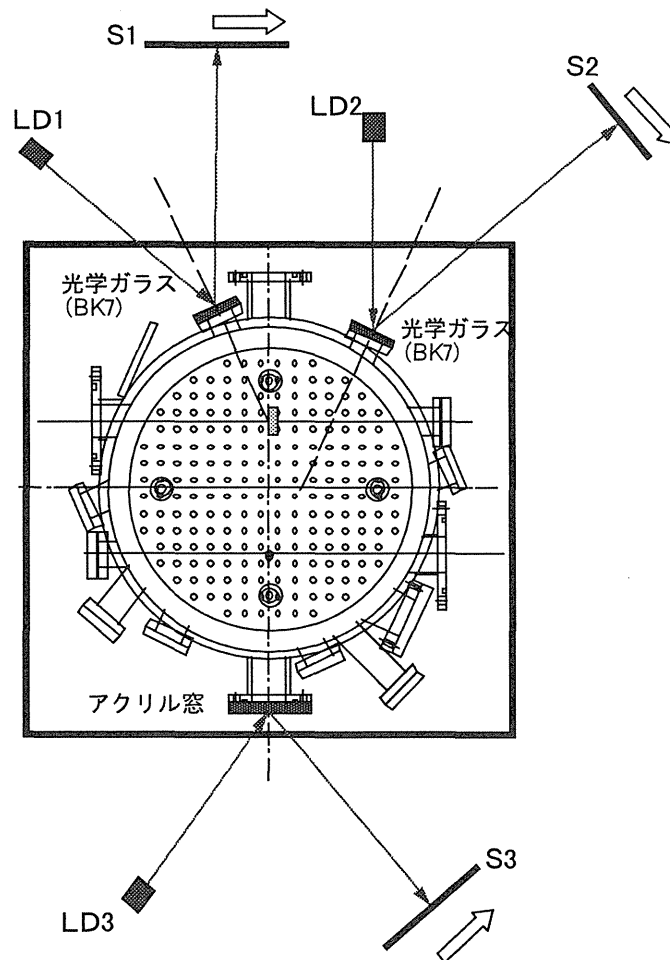


図6 ガラス窓の変位測定

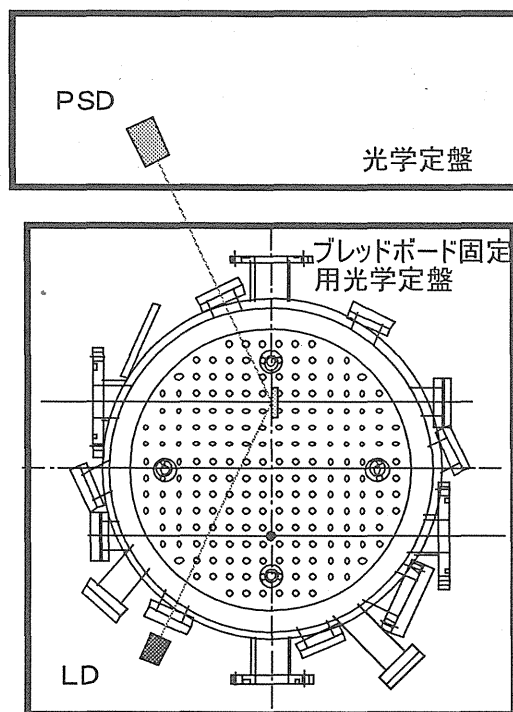


図7 床に対するターゲット変位測定配置図

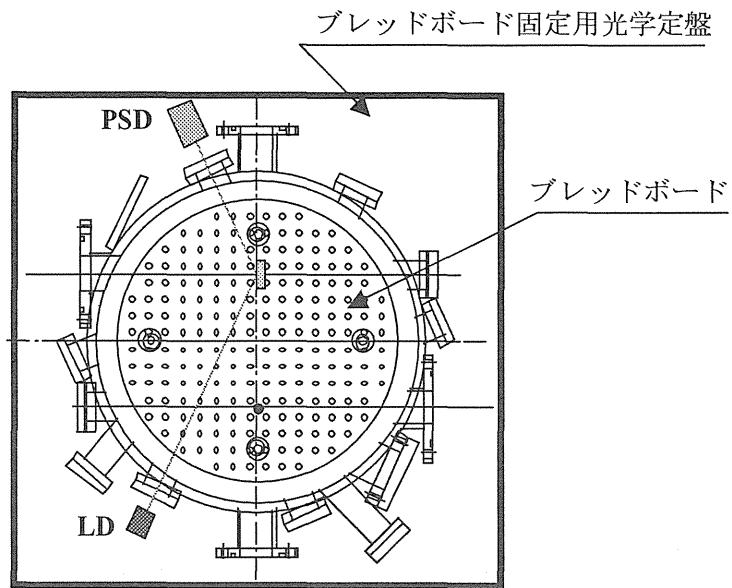


図 8 ターゲット変位測定配置図

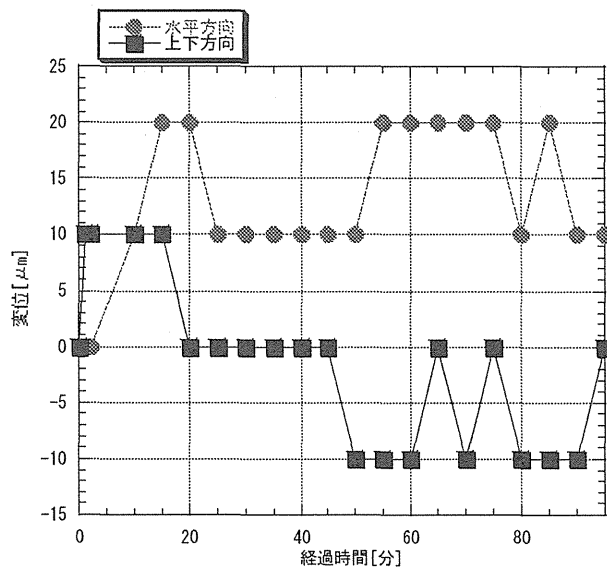


図 9 ターゲット変位測定結果

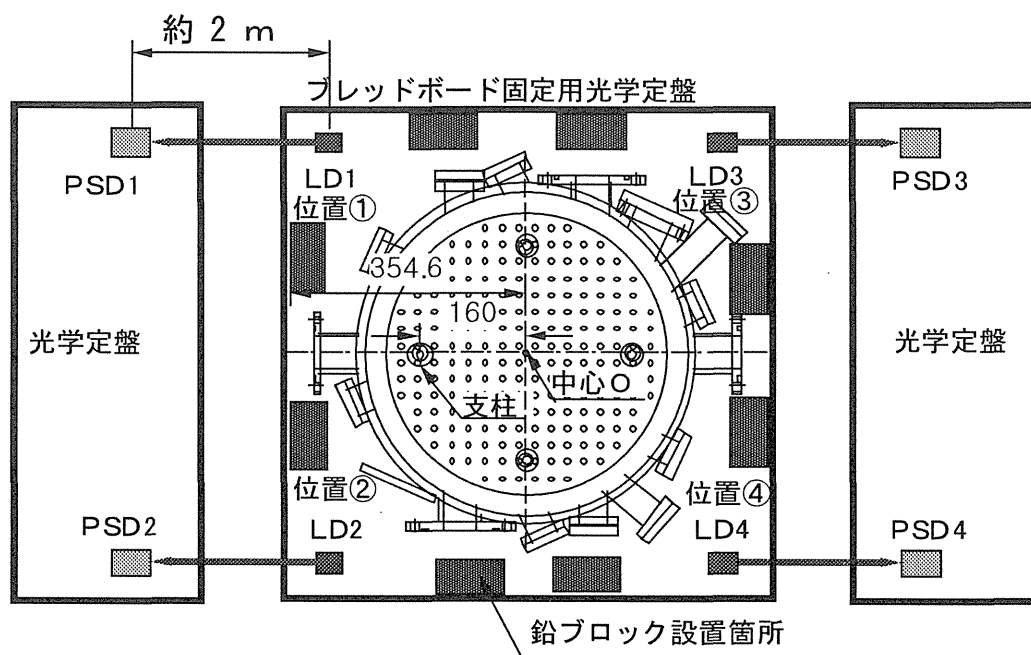


図 10 ブレッドボードと床との相対位置測定図

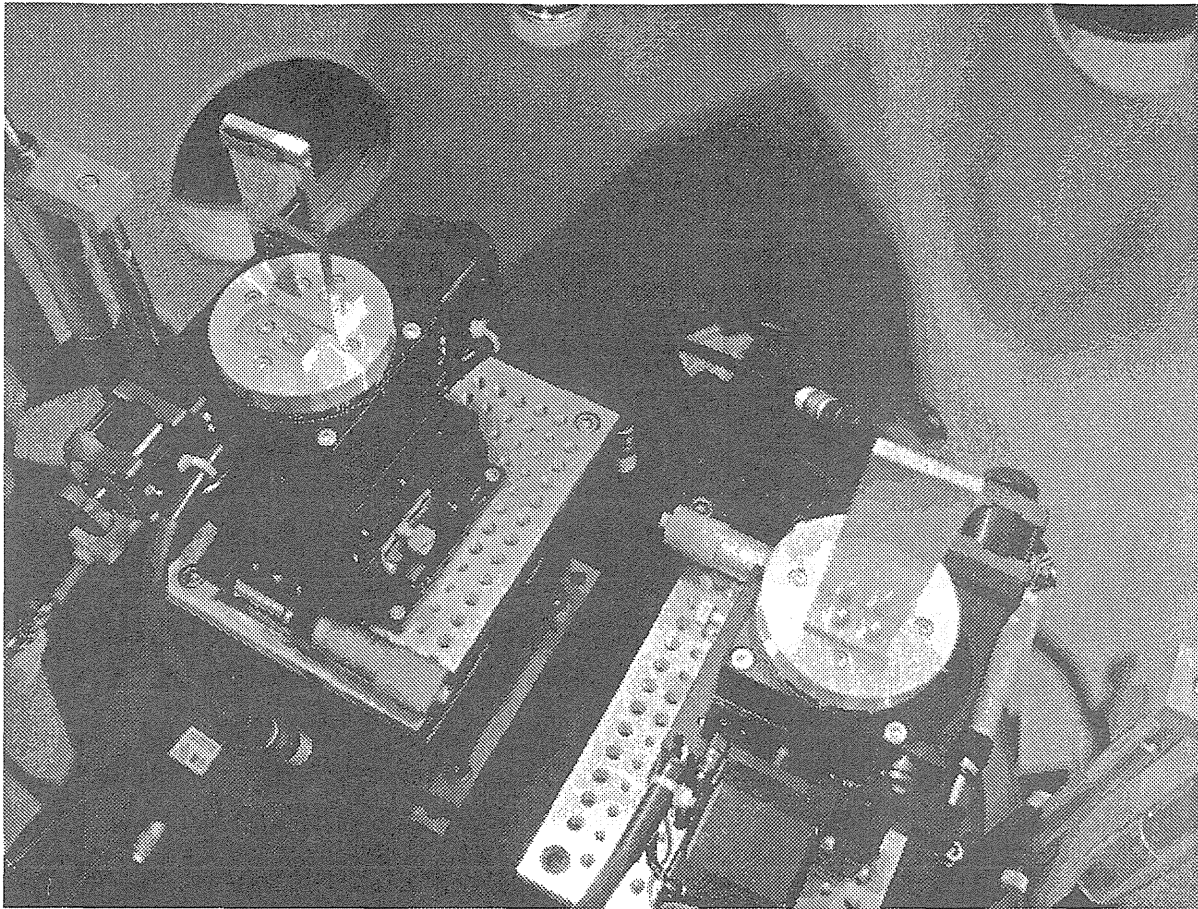


図 11 高精度自動ターゲットアライメント装置

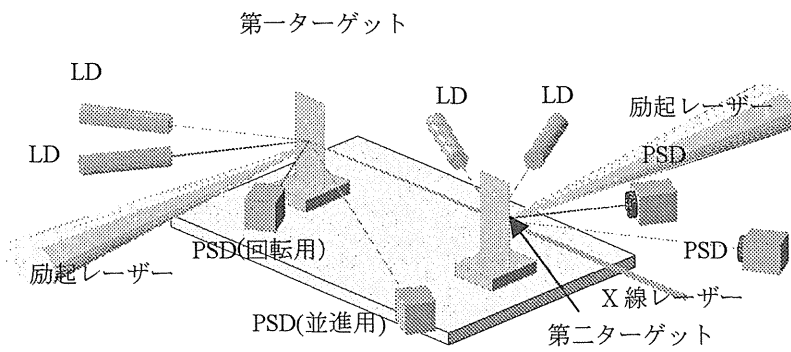


図 12 高精度自動ターゲットアライメント装置概略図

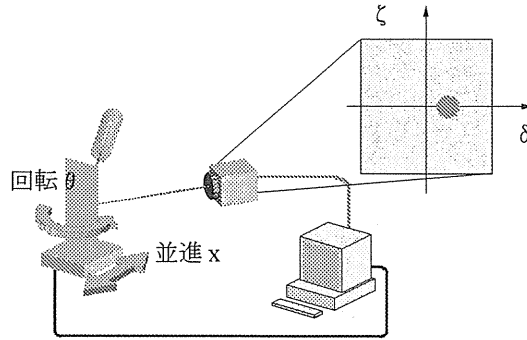


図 13 ターゲット制御系概略図

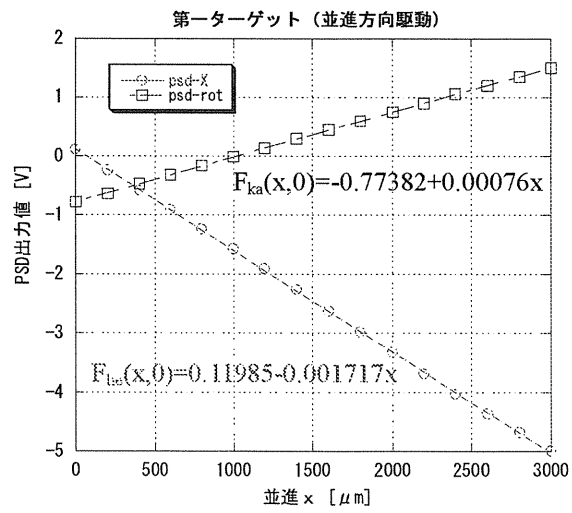


図 14 並進位置に対する P S D 出力値



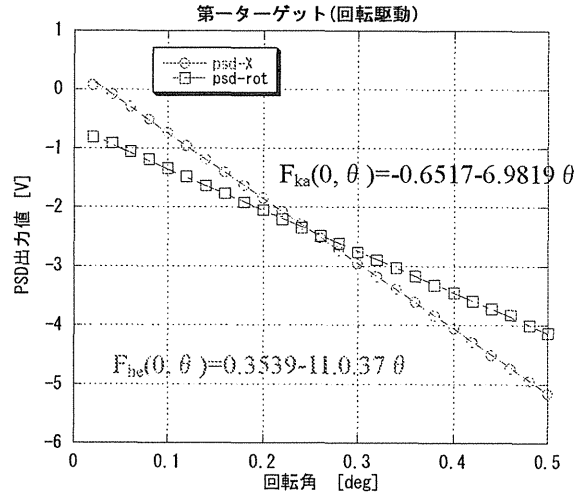


図 15 回転位置に対する PSD 出力値

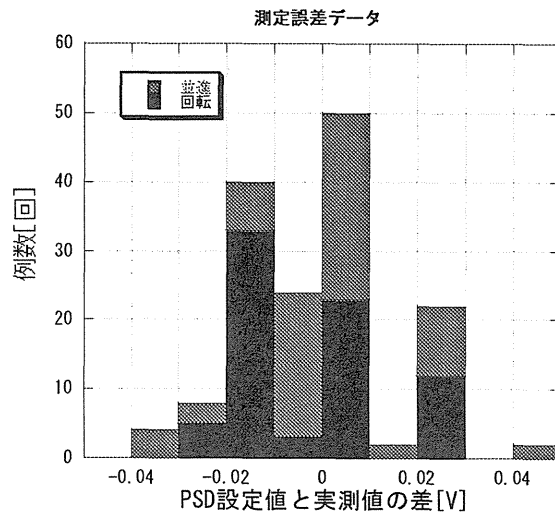


図 16 入力値に対する実測値誤差

表1 従来のターゲット真空容器の問題点

| 問題点             | 問題点の具体的な事項  |
|-----------------|---|
| ①真空による歪み        | 真空引きに伴うターゲットの床面に対する位置の約 0.15 mrad 程度の変動   |
| ②スクロールポンプ等による振動 | スクロールポンプやターボポンプの振動に起因するターゲットの約 40 $\mu\text{m}$ 程度の振動及びポジションセンサー (PSD) の出力変動の発生 |

表2 従来のターゲット真空容器の問題点に対する原因

| 問題点             | 原因  |
|-----------------|---|
| ①真空による歪み        | <ul style="list-style-type: none"> <li>ターゲット真空容器内壁が薄いため、真空引きをすると真空容器本体が大きく歪む。</li> <li>ターゲット真空容器を床上に固定する定盤の剛性に問題があり、アンカー打ちの効果がない</li> </ul>   |
| ②スクロールポンプ等による振動 | <ul style="list-style-type: none"> <li>他の真空容器とターゲット真空容器の間のベローズが縮まないように入っているスタットボルトを介して、コンプレッサーポンプその他の真空排気装置からの振動がターゲット真空容器に伝わってくる。</li> <li>ターゲット真空容器本体・定盤の剛性不足及び定盤固定のためのアンカー打ちの不完全により、床の振動を大きく拾う。</li> </ul> |

表3 従来のターゲット真空容器の問題点に対する指針

| 問題点             | 指針 (対策)  |
|-----------------|--|
| ①真空による歪み        | <ul style="list-style-type: none"> <li>アンカー打ちなどで安定をはかるという発想をやめ、自らの重さで安定化させる。</li> <li>真空引きによる真空容器や定盤等の歪み発生がターゲットホルダー位置に影響しないような真空容器構造にする。</li> </ul> |
| ②スクロールポンプ等による振動 | <ul style="list-style-type: none"> <li>真空装置などの振動源をターゲット真空容器からできるだけ分離する。</li> <li>他の真空容器や床面などとの接続箇所を極力減らす。</li> </ul>                                 |

表4 ガラス窓の影響測定結果

|                | S1   | S2   | S3   |
|----------------|------|------|------|
| 各スクリーンでの変位(mm) | 13   | 3    | 6    |
| 距離 (m)         | 10.2 | 5.8  | 4.5  |
| 変位量(mrad)      | 0.64 | 0.25 | 0.66 |

表 5 ブレッドボードと床との真空引き前後での相対位置測定結果

| LD の位置 | 水平方向の変動 (PSD に向かって右を+) | 上下方向の変動             |
|--------|------------------------|---------------------|
| 位置①    | +4.7 $\mu$ rad         | 上方向に 14 $\mu$ rad   |
| 位置②    | +8.3 $\mu$ rad         | 上方向に 41.6 $\mu$ rad |
| 位置③    | +24.5 $\mu$ rad        | 上方向に 16.3 $\mu$ rad |
| 位置④    | +8.3 $\mu$ rad         | 下方向に 12.5 $\mu$ rad |

表 6 ブレッドボードと床との真空引き前後での相対位置測定結果 (鉛ブロック追加後)

| LD の位置 | 水平方向の変動 (PSD に向かって右を+) | 上下方向の変動             |
|--------|------------------------|---------------------|
| 位置①    | $\pm 0$ $\mu$ rad      | 上方向に 4.76 $\mu$ rad |
| 位置②    | $\pm 0$ $\mu$ rad      | $\pm 0$ $\mu$ rad   |
| 位置③    | $\pm 0$ $\mu$ rad      | 下方向に 8.19 $\mu$ rad |
| 位置④    | $\pm 0$ $\mu$ rad      | 下方向に 4.16 $\mu$ rad |

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量     | 名称     | 記号  |
|-------|--------|-----|
| 長さ    | メートル   | m   |
| 質量    | キログラム  | kg  |
| 時間    | 秒      | s   |
| 電流    | アンペア   | A   |
| 熱力学温度 | ケルビン   | K   |
| 物質質量  | モル     | mol |
| 光度    | カンデラ   | cd  |
| 平面角   | ラジアン   | rad |
| 立体角   | ステラジアン | sr  |

表2 SIと併用される単位

| 名称      | 記号        |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', "   |
| リットル    | l, L      |
| トン      | t         |
| 電子ボルト   | eV        |
| 原子質量単位  | u         |

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

| 倍数         | 接頭語  | 記号    |
|------------|------|-------|
| $10^{18}$  | エクサ  | E     |
| $10^{15}$  | ペタ   | P     |
| $10^{12}$  | テラ   | T     |
| $10^9$     | ギガ   | G     |
| $10^6$     | メガ   | M     |
| $10^3$     | キロ   | k     |
| $10^2$     | ヘクト  | h     |
| $10^1$     | デカ   | da    |
| $10^{-1}$  | デシ   | d     |
| $10^{-2}$  | センチ  | c     |
| $10^{-3}$  | ミリ   | m     |
| $10^{-6}$  | マイクロ | $\mu$ |
| $10^{-9}$  | ナノ   | n     |
| $10^{-12}$ | ピコ   | p     |
| $10^{-15}$ | フェムト | f     |
| $10^{-18}$ | アト   | a     |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量             | 名称     | 記号                 | 他のSI単位による表現                             |
|---------------|--------|--------------------|---|
| 周波数           | ヘルツ    | Hz                 | $\text{s}^{-1}$                         |
| 力             | ニュートン  | N                  | $\text{m} \cdot \text{kg} / \text{s}^2$ |
| 圧力, 応力        | パスカル   | Pa                 | $\text{N} / \text{m}^2$                 |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール   | J                  | $\text{N} \cdot \text{m}$               |
| 工率, 放射束       | ワット    | W                  | $\text{J} / \text{s}$                   |
| 電気量, 電荷       | クーロン   | C                  | $\text{A} \cdot \text{s}$               |
| 電位, 電圧, 起電力   | ボルト    | V                  | $\text{W} / \text{A}$                   |
| 静電容量          | ファラド   | F                  | $\text{C} / \text{V}$                   |
| 電気抵抗          | オーム    | $\Omega$           | $\text{V} / \text{A}$                   |
| コンダクタンス       | ジーメンズ  | S                  | $\text{A} / \text{V}$                   |
| 磁束            | ウェーバ   | Wb                 | $\text{V} \cdot \text{s}$               |
| 磁束密度          | テスラ    | T                  | $\text{Wb} / \text{m}^2$                |
| インダクタンス       | ヘンリー   | H                  | $\text{Wb} / \text{A}$                  |
| セルシウス温度       | セルシウス度 | $^{\circ}\text{C}$ |   |
| 光度            | ルーメン   | lm                 | $\text{cd} \cdot \text{sr}$             |
| 照射度           | ルクス    | lx                 | $\text{lm} / \text{m}^2$                |
| 放射線量          | ベクレル   | Bq                 | $\text{s}^{-1}$                         |
| 吸収線量          | グレイ    | Gy                 | $\text{J} / \text{kg}$                  |
| 線量等量          | シーベルト  | Sv                 | $\text{J} / \text{kg}$                  |

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称       | 記号           |
|----------|--------------|
| オングストローム | $\text{\AA}$ |
| バーン      | b            |
| バル       | bar          |
| ガリ       | Gal          |
| キュリー     | Ci           |
| レントゲン    | R            |
| ラド       | rad          |
| レム       | rem          |

$$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 u の値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- E C 関係理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

## 換算表

| 力 | N (= $10^5$ dyn) | kgf      | lbf      |
|---|------------------|----------|----------|
|   | 1                | 0.101972 | 0.224809 |
|   | 9.80665          | 1        | 2.20462  |
|   | 4.44822          | 0.453592 | 1        |

粘度  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g} / (\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度  $1 \text{ m}^2 / \text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2 / \text{s})$

| 圧 | MPa (= 10 bar)           | kgf/cm <sup>2</sup>      | atm                      | mmHg (Torr)           | lbf/in <sup>2</sup> (psi) |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 力 | 1                        | 10.1972                  | 9.86923                  | $7.50062 \times 10^3$ | 145.038                   |
|   | 0.0980665                | 1                        | 0.967841                 | 735.559               | 14.2233                   |
|   | 0.101325                 | 1.03323                  | 1                        | 760                   | 14.6959                   |
|   | $1.33322 \times 10^{-4}$ | $1.35951 \times 10^{-3}$ | $1.31579 \times 10^{-3}$ | 1                     | $1.93368 \times 10^{-2}$  |
|   | $6.89476 \times 10^{-3}$ | $7.03070 \times 10^{-2}$ | $6.80460 \times 10^{-2}$ | 51.7149               | 1                         |

| エネルギー・仕事・熱量 | J (= $10^7$ erg)          | kgf·m                     | kW·h                      | cal (計量法)                 | Btu                       | ft·lbf                    | eV                       |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
|             | 1                         | 0.101972                  | $2.77778 \times 10^{-7}$  | 0.238889                  | $9.47813 \times 10^{-4}$  | 0.737562                  | $6.24150 \times 10^{18}$ |
|             | 9.80665                   | 1                         | $2.72407 \times 10^{-6}$  | 2.34270                   | $9.29487 \times 10^{-3}$  | 7.23301                   | $6.12082 \times 10^{19}$ |
|             | $3.6 \times 10^6$         | $3.67098 \times 10^5$     | 1                         | $8.59999 \times 10^5$     | 3412.13                   | $2.65522 \times 10^6$     | $2.24694 \times 10^{25}$ |
|             | 4.18605                   | 0.426858                  | $1.16279 \times 10^{-6}$  | 1                         | $3.96759 \times 10^{-3}$  | 3.08747                   | $2.61272 \times 10^{19}$ |
|             | 1055.06                   | 107.586                   | $2.93072 \times 10^{-4}$  | 252.042                   | 1                         | 778.172                   | $6.58515 \times 10^{21}$ |
|             | 1.35582                   | 0.138255                  | $3.76616 \times 10^{-7}$  | 0.323890                  | $1.28506 \times 10^{-3}$  | 1                         | $8.46233 \times 10^{18}$ |
|             | $1.60218 \times 10^{-19}$ | $1.63377 \times 10^{-20}$ | $4.45050 \times 10^{-26}$ | $3.82743 \times 10^{-30}$ | $1.51857 \times 10^{-22}$ | $1.18171 \times 10^{-19}$ | 1                        |

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
 = 4.184 J (熱化学)  
 = 4.1855 J (15°C)  
 = 4.1868 J (国際蒸気表)  
 仕事率 1 PS (仏馬力)  
 = 75 kgf·m/s  
 = 735.499 W

| 放射能 | Bq                   | Ci                        |
|-----|----------------------|---------------------------|
|     | 1                    | $2.70270 \times 10^{-11}$ |
|     | $3.7 \times 10^{10}$ | 1                         |

| 吸収線量 | Gy   | rad |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

| 照射線量 | C/kg                  | R    |
|------|-----------------------|------|
|      | 1                     | 3876 |
|      | $2.58 \times 10^{-4}$ | 1    |

| 線量当量 | Sv   | rem |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

ダブルターゲットX線レーザー用高安定ターゲット装置の開発



古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています