

## Laser circulation system for compact monochromatic hard X-ray source

F.Ebina<sup>1,A)</sup>, A.Fukasawa<sup>A)</sup>, F.Sakamoto<sup>A)</sup>, H.Ogino<sup>A)</sup>, M.Uesaka<sup>A)</sup>, K.Dobashi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> The University of Tokyo Nuclear engineering research Laboratory

2-22 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1188

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, JAPAN, 263-8555

### Abstract

We are going to develop a compact monochromatic hard X-ray (10-50 keV) source based on laser-electron collision using by the X-band (11.424 GHz) linac system. To enhance the luminosity of laser-beam collision, we adopt the technique of circulation of laser light. Pulse length of Q-switch Nd:YAG laser is shorter than RF-pulse length. This mean that most of electron bunch don't collide the laser light. Laser Circulation system (or ring laser system) is effective to increase the X-ray yield for the proposed system. The colliding laser light is bent by a mirror and its polarization plane is changed by a pockels cell. Laser light from Q-switch laser system and circulated laser light are merged by polarized beam splitter. Laser light can be collide with electron beam more times.

## 小型単色硬X線源用レーザー周回システム

### 1. はじめに

我々は、医療、生命科学への応用が期待される単色硬X線を、Xバンドライナックからの電子ビームとレーザーとの衝突によって発生させる装置を開発中である。

衝突によって発生するX線の量はルミノシティの計算から求められ、電子数（ビーム電流）、レーザーの光子数（レーザーエネルギー）に比例する。だが、導入予定のレーザーのパルス幅（10ns, FWHM）は電子ビームのパルス幅（10ps）と比べて短く、X線発生に寄与するのは全体のごく一部である。そこで我々は、レーザーの偏光を利用して光路の切り替えを行うことでレーザーを周回路中に閉じこめ、同一のレーザー光を繰り返し衝突点に入射するレーザー周回システム（レーザーサーキュレーションシステム）の導入を検討している。レーザー

周回システムの設計方針を定めるとともに、導入による効果を見積もった。

### 2. レーザー周回システム導入検討

#### 2.1 レーザー周回システム概要

レーザー周回システムの概要を図1に示す。レーザー光は入射レンズ群によって調整された後、偏光ビームスプリッターを透過して周回路に入射される。入射されたレーザー光は衝突点で電子ビームと衝突した後、 $\lambda/2$ 波長板を通過、このとき偏光面が $90^\circ$ 回転するため偏光ビームスプリッターで $90^\circ$ 反射され、再び衝突点へ導かれる。二度目以降の周回ではポッケルスセルにて偏光面を $90^\circ$ 回転させるように電圧を印可（ $\lambda/2$ 条件）するため、 $\lambda/2$ 波長板と合せて $180^\circ$ 回転することになり、偏光面は変化しない。こ

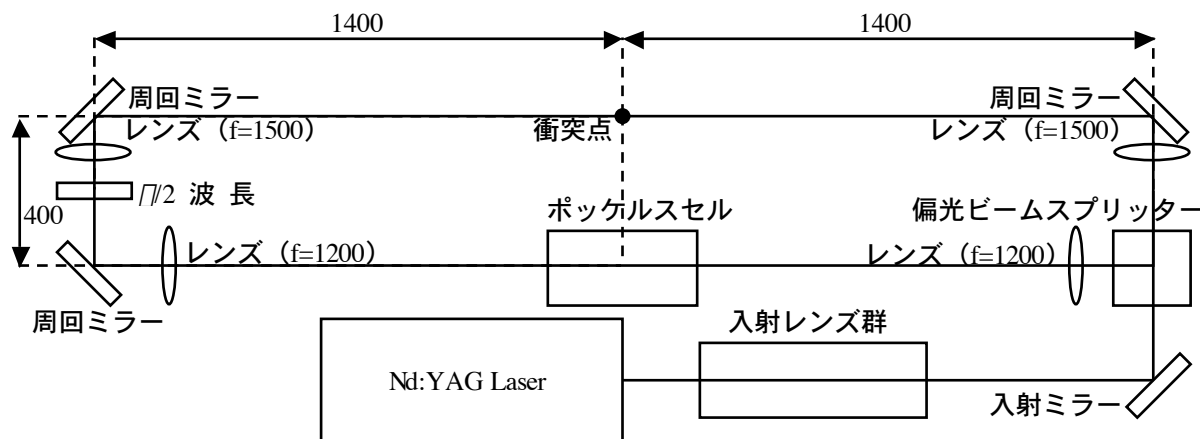


図1 : レーザー周回システム概要

<sup>1</sup> E-mail: ebina@utnl.jp

れによりレーザー光は常に偏光ビームスプリッターで反射され、周回路中に閉じこめられる。

## 2.2 X線発生量の見積り

単色硬X線を用いた撮像の種類と、撮像に必要な光子数を表1に示した。本研究の主要な目的の一つである経静脈血管造影には、 $10^{11}$  photons/secと、第3世代放射光源相当の光量が必要となってくる。

表1：撮像に必要な光子数

撮像の種類	光子数[photons/sec]
マモグラフィー (乳房撮像)	$10^6$
単色CT	$10^8$
Auger Cascade Therapy	$10^9$
経静脈血管造影	$10^{11}$

Xバンドライナックからの電子ビームとパルスレーザー (Q-switch Nd:YAG laser) との衝突を考える。電子ビームは運動エネルギー50MeV、電荷量20pC/bunch、パルス幅1ns、繰り返し10ppsで、レーザーは波長1064nm、エネルギー2.5J/pulse、パルス幅10ns (FWHM)、繰り返しは電子ビームと同じ10ppsである。ビームサイズ100μm (rms)としてルミノシティを計算した結果、X線発生量は $10^8$  photons/secであった。これはマモグラフィー等静止画像の取得には適用できるが、経静脈血管造影のようなリアルタイムでの動画取得には不十分な量である。

レーザー周回システムにおける見掛け上のエネルギー $I_N$ は以下の式によって表される。

$$I_N = \prod_{n=0}^N I_0 A^n = I_0 \frac{1 \square A^N}{1 \square A}$$

$I_0$ は入射レーザーの初期エネルギー、 $A$ は周回一周あたりの透過効率、 $N$ はレーザーパルスと電子ビームの衝突回数である。周回路中の光学機器の透過率、反射率から $A=0.9$  (90%)程度と見積もられ、電子ビームのパルス幅1ns、周回一周にかかる時間はおよそ21nsであることから $N$ は40以上である (図2参照)。以上から、周回によりレーザーのエネルギーはおよそ10倍、X線発生量は $10^9$  photons/secになると予想される。

将来的には周回路中にゲイン媒質を設置してレーザーのエネルギー損失を補填 ( $A=1$ が得られる)、5J/pulse以上のレーザーと組み合わせることで $10^{10}$  photons/secのX線発生を目指す。

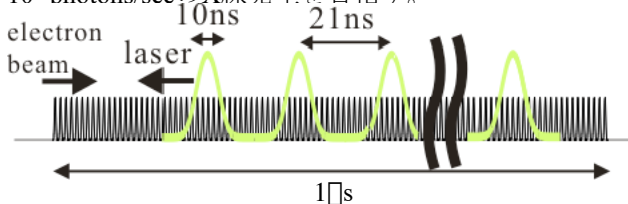


図2：レーザー周回による衝突の様子

## 3. 実証実験

### 3.1 概要

レーザー周回システムのビームラインへの導入に先立ち、レーザー光閉じこめの実証実験を準備中である。ビームラインへ導入するものと同じ光学系を構築し、比較的低エネルギー (50mJ/pulse程度) かつ視認性の高い (YAG二倍波、532nm) レーザーを用いて周回システムの測定、調整手法を確立する。

### 3.2 方針

この実験の目的は、ポッケルスセルを用いたレーザー光の閉じこめを確認、定量的な評価を行うとともに、衝突点におけるレーザー光のサイズ、位置、光軸の傾きを、独立かつ周回の条件を崩さずに調整する手法を確立することである。周回の条件とは、衝突点における上記のパラメータが周回によって変化しないことを指している。

平行なガウスビームを収束した場合、衝突点でのスポットサイズ $\square_0$ は、

$$\square_0 = M^2 \frac{\square f}{4 \square \square_f}$$

と表される。ここで、 $f$ は集束レンズから衝突点までの距離、 $\square$ はレーザー光の波長、 $\square_f$ はレンズ上でのビームサイズ、 $M^2$ は理想的なガウスビームからのずれを表すパラメータで、Nd:YAGレーザーでは経験上 $M^2=2\sim3$ 程度である。これにより、入射レーザー光のサイズを調整することで、衝突点におけるビームサイズを独立に操作することが可能である。例えば $M^2=3$ の場合、 $\square_0=100\mu\text{m}$ 、 $f=1500\text{mm}$ であるから、 $\square_f=3.7\text{mm}$ となるように入射光を調整すれば良い。

収差を考慮しなければ、レンズに入射した並行光はレンズ上の位置にかかわらず一点に収束される。レンズの中心から $r$ だけ離れた位置に入射レーザーの中心がある場合、レンズの焦点距離を $f$ とすると、焦点においてレーザー光の光軸は $rf$ だけ傾いている。このことから、入射レーザーの位置を動かすことで衝突点での光軸の傾きを独立に操作できる。光学機器のサイズにもよるが、 $\pm 10\text{mrad}$ 程度の範囲で調整が可能である。

スポットの位置はミラーの角度によって調整できるが、ミラーを動かすと光軸の傾きも同時に変化し、周回の条件が崩れてしまう。そこで、本実験では一旦周回の条件を満たした後のスポット位置の調整を、ミラーを使わずに衝突点を挟む2枚のレンズの位置を同時に動かすことによる。光軸に垂直な平面内で収束レンズを動かせば、焦点の位置を調整することができる。このとき衝突点後方のレンズを同じ量動かせば、集束レンズ入射時の光軸の傾きは光軸によって変化しないので、周回条件を崩すことなくスポット位置のみを独立に操作できる。スポット位置調整の分解能はレンズ移動距離の分解能と一致し、 $10\mu\text{m}$ 以下のオーダーでの調整が可能となる。

調整範囲はレンズ移動のストロークと一致するが、光軸の傾きが変わらぬよう微調整に留めておくのが無難である。

### 3.3 進行状況

現在実験に必要な物品の手配を行っており、実験の開始は9月上旬となる見込みである。実験開始までには収差、光学系の誤差による影響についても評価する必要がある。

## 4. まとめ

小型単色硬X線源へのレーザーサーキュレーションシステムの導入を検討し、X線発生量の見積を行った。周回によるエネルギー損失を補填しない場合で、レーザーのエネルギーは10倍、X線発生量は

$10^9$  photons/secとなる見込みである。

レーザー周回システムの光学系の設計は、衝突点におけるビームの状態を周回の条件を崩さずに操作することを目標として行った。現在低エネルギーのレーザーによるレーザー周回実証実験を準備中であり、9月上旬には実験を開始できる見込みである。

## 参考文献

- [1] K.Dobashi, et al., "X-bandリニアックを用いた小型硬X線源" Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Aug. 1-3, 2003
- [2] Y.Suzuki, et al., "A New Laser Mass Spectrometry for Chemical Ultratrace Analysis Enhanced with Multi-Mirror System (RIMMPA)" ANALYTICAL SCIENCE 2001, VOL.17 SUPPLEMENT