

# 日大パラメトリック X 線発生装置の概要

早川 恭史<sup>1</sup>、佐藤 勇、佐藤 和男、早川 建、田中 俊成、松原 洋一

中澤 裕之<sup>A)</sup>、横山 和枝<sup>A)</sup>、菅野 浩一<sup>A)</sup>、境 武志<sup>A)</sup>、石渡 謙一郎<sup>A)</sup>、猪川 弘康<sup>A)</sup>

中村 吉宏<sup>A)</sup>、中尾 圭佐<sup>A)</sup>、橋本 英子<sup>A)</sup>、藤岡 一雅<sup>A)</sup>、村上 琢哉<sup>A)</sup>

日本大学 原子力研究所 電子線利用研究施設

〒 274-8501 千葉県 船橋市 習志野台 7-24-1

<sup>A)</sup> 日本大学 理工学研究科 量子理工学専攻

〒 274-8501 千葉県 船橋市 習志野台 7-24-1

## 概要

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では新しいパルス X 線発生装置を開発し、そのためのビームラインを既存の 125 MeV 電子リニアックに設置した。これはパラメトリック X 線放射と呼ばれる現象を利用したもので、電子ビームを結晶性物質に照射することにより 100 MeV 程度のエネルギーで指向性のある単色 X 線の生成が可能である。この装置は実用性を考慮し、真空槽に収められた 2 台の結晶駆動装置によって構成されており、X 線取り出しポートを固定したまま X 線の波長を変えることが可能となっている。

また、本装置で得られることが期待される X 線の特徴の評価を数値計算によって行なった。

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では 125 MeV 電子リニアックを基盤とした波長可変な単色光源の開発を目指し、平面アンジュレータを用いて近赤外から可視領域までの自由電子レーザー (FEL) の研究を行ってきた。FEL に関しては、2001 年 6 月までに波長 1.5  $\mu\text{m}$  での発振を達成している<sup>[1]</sup>。しかしながら、加速器のエネルギーの制約から従来のアンジュレータを用いた方法では X 線領域をカバーすることは非常に困難である。そこでパラメトリック X 線放射 (PXR) と呼ばれる現象を採用することによって単色 X 線源を実現することを計画した<sup>[2]</sup>。これは相対論的な荷電粒子と結晶のような周期構造を持つ物質との相互作用で発生する電磁放射現象の一種で、数 10~ 数 100 MeV 程度のエネルギーの電子で指向性のある単色 X 線を発生させることが可能である<sup>[3]</sup>。この種のプロセスではビーム破壊が生ずるが、リニアックの場合はビーム使い捨てであるために実用化の妨げにはならない。LEBRA では 2000 年に新たな電子ビームラインとパラメトリック X 線発生装置の設計、開発に着手し、2001 年 3 月にはビームライン、X 線発生装置共に完成した。

当施設のリニアックは FEL 用に改良されたものであり、通常のリニアックに比べるとマクロパルスが長い、ビーム電流が大きい、エミッタンスが優れている、といった長所を持つ<sup>[4]</sup>。発生する PXR にもその特徴が反映され、輝度の高いパルス X 線源となることが期待

Table I: 電子線形加速器の仕様

加速周波数	2856 MHz
最大電子エネルギー	125 MeV
電子銃カソード	EIMAC Y646B
電子銃加速電圧	-100 kV
マクロパルス幅	20 $\mu\text{s}$
ビーム電流 (マクロ平均)	200 mA
繰り返し	12.5 Hz
ビームバンチ幅	3.5~10 ps
規格化エミッタンス	$20\pi \times 10^{-6}$ mrad
エネルギー分散	1 %

できる。このリニアックの仕様を Table I に、新ビームラインと PXR 発生装置の概略図を Fig. 1 示す。

## 2. PXR 発生装置の基本構成

PXR は結晶による X 線 Bragg 回折の入射 X 線を高エネルギー荷電粒子に置き換えたジオメトリで生ずる放射現象で、放出される X 線のエネルギーと方向は Bragg 回折と同様に結晶面への入射角度 (Bragg 角) で決まる。この特性から、ゴニオメータに取り付けられた結晶の回転により X 線の波長を選択可能にすることが期待できるが、発生する X 線の放出方向が波長によって変化することも考慮しなければならない。現実的な波長可変 X 線源として機能するためには、X 線の取り出しポートが固定されなければならない。このことから、もう一度結晶を用いて X 線を対称に反射することにした。PXR は通常の X 線回折とは異なり入射角度に対し若干非対称な角度に強度のピークがあり、それに伴う波長のずれがあるために 2 番目の結晶をターゲット結晶とは独立に制御し、それを補償してやる必要がある。また、ターゲット結晶の回転に追従するためには並進移動しなくてはならない。これらを考慮して設計、製作された PXR 発生装置が Fig. 2 である。電子ビームで直接照射されるターゲット結晶は第 1 ゴニオメータに、反射用の結晶は第 2 ゴニオメータにそれぞれマウントされる。第 2 ゴニオメータは並進移動が可能となっている。これらは共に高真空対応で、真空槽に収められて使用される。第 2 結晶で反射された X 線射は、Fig. 1 にあるように電子ビームラインから 200 mm 離れたラ

<sup>1</sup> e-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

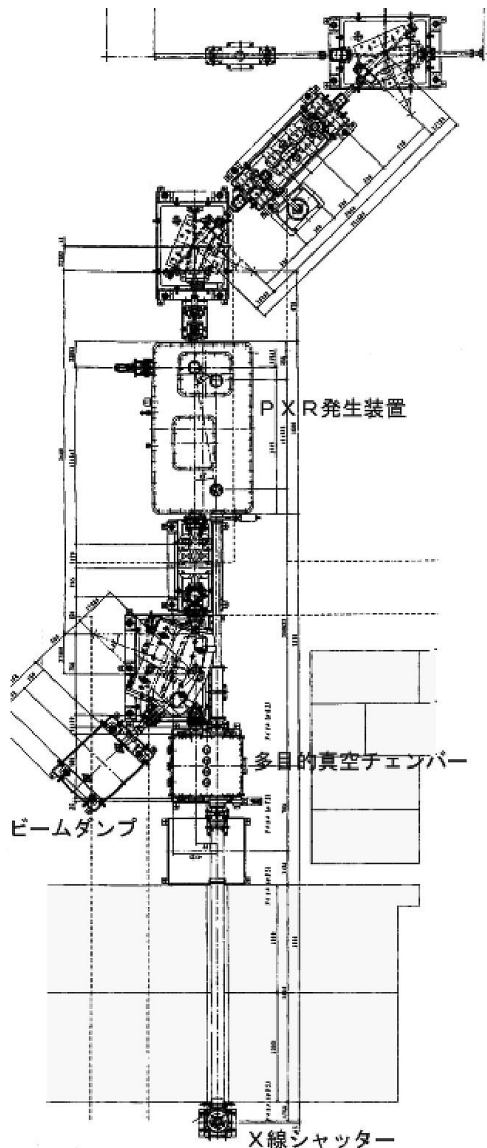


Figure 1: 新ビームラインと PXR 発生装置

インに沿って遮蔽壁を通過して実験室に運ばれる。X線をターゲットや上流のダクト等から来る $\gamma$ 線ストリームと分離して輸送するという点もこのジオメトリーの長所である。また、わずかに非対称を持たせて反射させるため、基本反射と高次反射の分離が容易である。

電子ビームはターゲット結晶を通過する際に発散が大きくなり、ビームロスの結果として線量や放射化の増加を招く恐れがある。これを防ぐため、真空槽の内部のターゲット結晶の直後に電子ビーム収束のための4極永久磁石を設置した。

### 3. 結晶駆動装置の仕様

PXR 発生装置の主要部分は2台の結晶駆動装置、すなわちゴニオメータであり、これによって生成されるPXRの特性が決まる。第1ゴニオメータは真空用モータで駆動される回転3軸と大気から動力導入されるビームラ

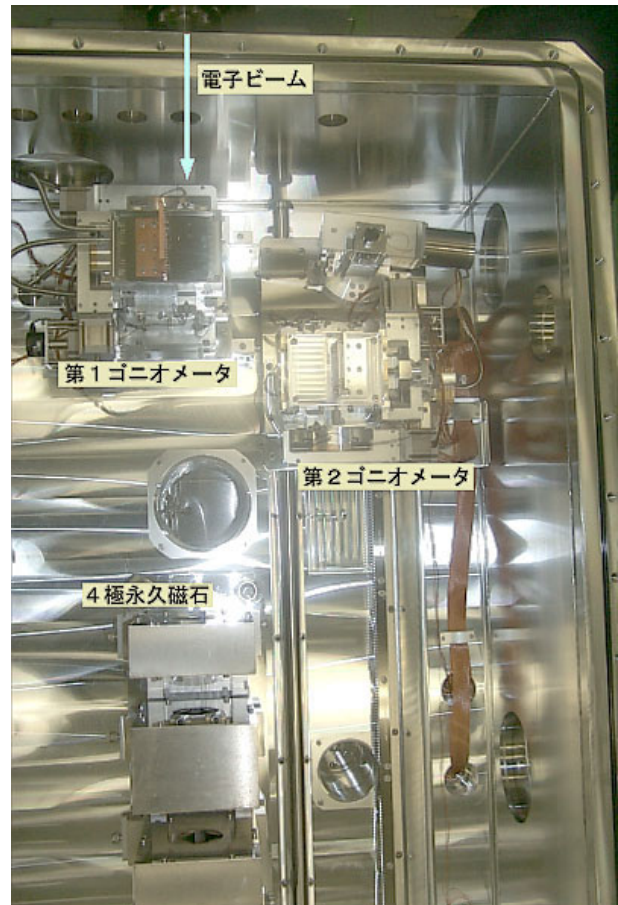


Figure 2: PXR 発生装置の写真。2台のゴニオメータで構成されている。第2ゴニオメータは並進移動が可能となっている。

イン退避用並進移動(X)の計4軸、同様に、第2ゴニオメータは真空用モータ駆動の回転3軸と長距離並進移動(Y)、手動のビームライン調整用並進移動(X)の計5軸を持っている。高さに関しては電子ビームラインに機械的に合わせるという思想であり、動的な調整はしないことにした。Table IIがこれらのゴニオメータの仕様である。

この装置でカバーできる Bragg 角の範囲は第2ゴニオメータの並進移動の駆動範囲で制限され、 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ である。また、装置は加速器本体室に置かれているので、PXRの波長制御に必要な軸はモータでリモート制御可能となっている。リモート制御はイーサネットを利用して行なう予定である。

### 4. 期待される PXR の特性

実際に得られる X 線の特性はターゲット結晶の種類や結晶面に依存する。大電流の電子ビームを照射することを考慮すると、ダイヤモンドやシリコンの単結晶が強度、熱特性などの点から適していると思われる。コストと品質の面から、ターゲット結晶及び反射用結晶共にシリコン単結晶を使用することにした。Table IIIは、使用する結晶面と本装置によってカバーできる X 線エネルギーの範囲である。

Table II: ゴニオメータの仕様

軸	駆動範囲	分解能
第1 ゴニオ		
X	+5 ~ -65 mm	4 $\mu$ m
$\theta_x$	$\pm 10^\circ$	52.4 $\mu$ rad
$\theta_y$	$\pm 10^\circ$	35 $\mu$ rad
$\theta_z$	0 ~ 35 $^\circ$	11.6 $\mu$ rad
第2 ゴニオ		
X	$\pm 5$ mm	1 mm/rev
Y	-10 ~ +1030 mm	5 $\mu$ m
$\theta_x$	$\pm 10^\circ$	52.4 $\mu$ rad
$\theta_y$	$\pm 10^\circ$	35 $\mu$ rad
$\theta_z$	0 ~ 35 $^\circ$	11.6 $\mu$ rad

Table III: 結晶面と PXR のエネルギー範囲

使用結晶面	第1 結晶回転角 (5 ~ 30 $^\circ$ )
Si ( 111 )	3.95 ~ 22.6 keV
Si ( 220 )	6.46 ~ 37.0 keV
Si ( 333 )	11.9 ~ 67.9 keV

電子ビームエネルギー 100 MeV、結晶面 Si(111)(実効厚さ 1 mm) の場合の X 線エネルギーと分散、積分強度を Bragg 角の関数として表したのが Fig. 3 である。また、ビーム発散 1 mrad、Bragg 角 21.48 $^\circ$  (X 線エネルギー 5.4 keV に相当) という条件で得られる PXR のプロファイルを計算すると Fig. 4 のようになる。これは  $1/\gamma$  の広がりを持つ PXR を第2 結晶で反射することによって得られる X 線ビームであるため、その形状は第2 結晶の角度に強く依存する。

Figure. 4 において強度のピークでの PXR 散乱確率は  $2 \times 10^{-7}$  [photon/e $^-$  mrad $^2$ ]、エネルギーの分散は  $\Delta\hbar\omega/\hbar\omega \sim 0.03$  % 程度と見積もられる。リニアックのデューティーとバンチ長を考えると、理想的には平均で  $6 \times 10^7$  [photon/s mrad $^2$ ]、ビームバンチのピークで  $8 \times 10^{12}$  [photon/s mrad $^2$ ] の輝度が期待できる。X 線集光ミラーの使用によってさらに強い強度を得られる可能性もある。ただし、PXR は水平方向に波長のグラデーションを持つため、集光の方法によってはエネルギー分散が犠牲となってしまう。

## 5. 今後の計画と課題

ビームラインの設置と PXR 発生装置本体の製作は完了するに至ったので、今後は実験的に本装置の性能の検証を行ない、X 線源としての特性を確認していく。このプロセスはこの線源を実用化し応用研究に利用可能とするには不可欠な作業である。

応用研究として、まずはタンパク質構造解析と微小部 X 線回折が計画されている。そのための X 線集光ミラーシステムの設計がなされており、X 線ビームラインに導入される予定である。

将来的な課題として本装置のパルス光源としての特徴を生かせる測定システムを整備する必要がある。具体的にはビームとの同期測定が可能な MSGC や高速な

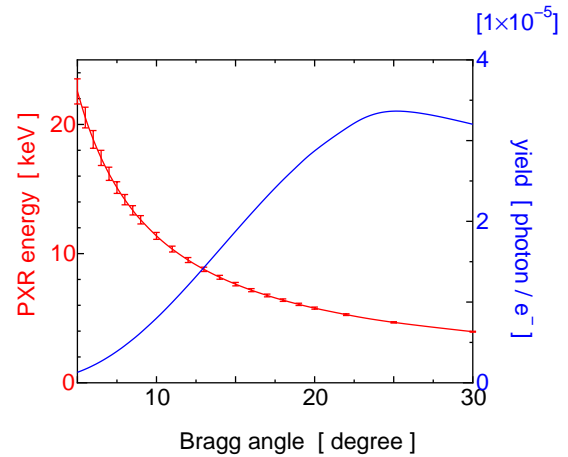


Figure 3: Si(111) の場合の、Bragg 角と PXR のエネルギー、強度との関係。

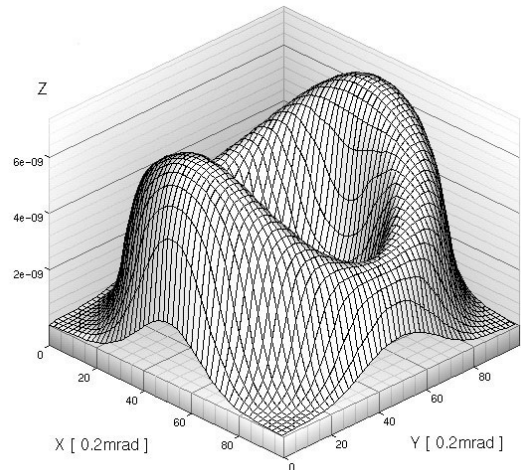


Figure 4: 得られる X 線プロファイルの例 (X 線のエネルギーは 5.4 keV)

多素子 APD の導入が考えられる。特に後者のようにピコ秒オーダーの時間分解が可能な計測系は、パルス構造に柔軟性のあるリニアックの特徴を生かした時間構造解析への応用を可能にする。このような点からも、より高度な測定システムの開発と導入が望まれる。

## 参考文献

- [1] I. Sato et al., Proc. of this Meeting.
- [2] Y. Hayakawa et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, p. 391 (1999)
- [3] A.V. Shchagin et al., Phys. Lett. A **148**, p. 485 (1990)
- [4] I. Sata et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, p. 37 (1999)