

# DESIGN AND PERFORMANCE OF THE BUNCHER FOR NEW OPTICAL KLYSTRON AT UVSOR

Youhei Uematsu <sup>#,A)C)</sup>, Yoshifumi Takashima <sup>A)B)</sup>, Sou Sekita <sup>A)</sup>, Masahito Hosaka <sup>B)</sup>, Naoto Yamamoto <sup>B)</sup>, Masahiro Adachi <sup>C)</sup>, Jun-ichirou Yamazaki <sup>C)</sup>, Kenji Hayashi <sup>C)</sup>, Sei-ichi Tanaka <sup>C)</sup>, Masahiro Katoh <sup>C)</sup>, Heishun Zen <sup>D)</sup>,  
A) Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho. Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan  
B) Nagoya University Synchrotron radiation Research center, Furo-cho. Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan  
C) UVSOR facility, Institute for Molecular Science, Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585 Japan  
D) Institute of Advance Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, 611-0011 Japan

## Abstract

At UVSOR, a new optical klystron type undulator (O.K.) was installed. The O.K. consists of two APPLE-II type undulator and a buncher in between. The buncher was designed by using Radia. The measured spontaneous emission spectra agreed well with the simulation using the measured magnetic field of the buncher.

We report the detail of design and performance of the buncher, and outline of coherent light source using the O.K.

## UVSOR 新オプティカルクライストロンのための バンチャー電磁石の設計とその性能評価

### 1. はじめに

現在、分子科学研究所 UVSOR では、高調波やテラヘルツ光、FEL といった光源の開発を行っている。そのために電子蓄積リング内に新直線部を設け、2 台の可変偏光型アンジュレータを設置した。オプティカルクライストロンを構成するためにこの2つのアンジュレータの間に設置するバンチャー電磁石の設計と製作を行った。設計は3次元磁場計算コード Radia を使用した。このバンチャー電磁石の磁場とオプティカルクライストロンの自発光スペクトルを測定し、シミュレーションとの比較によって性能を評価した。

バンチャー電磁石設計の詳細とその性能評価、また本オプティカルクライストロンを用いたコヒーレント放射光源の概要について報告する。

### 2. オプティカルクライストロン

#### 2.1 バンチャー

バンチャー電磁石とは、磁場によって水平方向にバンプ軌道を形成する装置である。図1に示す様に、バンチャー部を通過する電子は自身の持つエネルギーによってそれぞれ異なった経路をたどり、行路差が発生する。これによってエネルギー変調が密度変調に変換され電子ビーム上にマイクロバンチが形成される。マイクロバンチした電子ビームが2台目のアンジュレータでコヒーレント光を放出する。

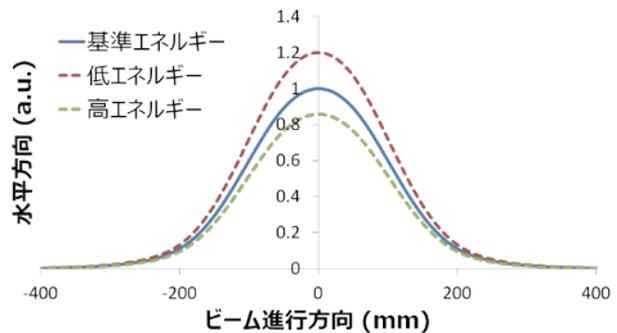


図1: バンチャー部でのエネルギーの違いによる軌道の変化例

バンチャーの強度を表す指標として、以下の式で与えられる  $R_{56}$  というパラメータを導入する。

$$\Delta l = R_{56} \frac{\Delta p}{p} \quad (1)$$

これはエネルギーの異なる電子の軌道長差を表す。

#### 2.2 オプティカルクライストロン

本オプティカルクライストロンは、2 台の可変偏光型アンジュレータと1台のバンチャー電磁石からなっている。

オプティカルクライストロンからの自発放射光は、バンチャー部において2台のアンジュレータで発生した自発放射光の位相がずれて干渉が起こるため、図2に例を挙げるような楕状のスペクトルとなる<sup>[1]</sup>。

<sup>#</sup> uematsu.youhei@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

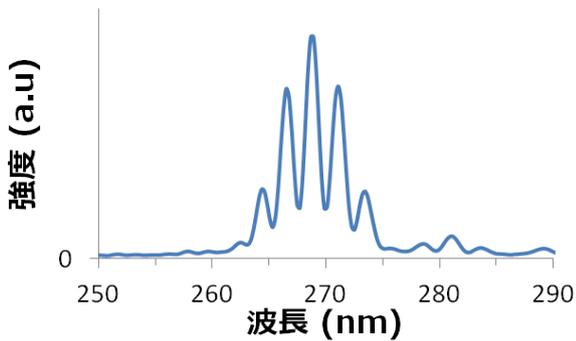


図2: オプティカルクライストロンからの自発放射光スペクトル(測定値)

オプティカルクライストロンからの自発放射光スペクトル強度は以下のような式であらわされる<sup>[2]</sup>。

$$\frac{dI}{d\omega d\Omega}(O.K.) = 2 \frac{dI}{d\omega d\Omega}(1 \text{ undulator})(1 + \cos \alpha) \quad (2)$$

$$\alpha = 2\pi(N + Nd) \frac{\lambda_R}{\lambda}$$

$\frac{dI}{d\omega d\Omega}(1 \text{ undulator})$  はアンジュレータ 1 台からの単位立体角、単位周波数あたりの自発放射光スペクトル強度である。バンチャ部での位相差がちょうど基準波長の整数倍の遅れするとき、オプティカルクライストロンからの自発放射光スペクトル強度は、1 台のアンジュレータからの放射光強度の 4 倍になることがわかる。

### 3. コヒーレント高調波の発生原理

図 3 に示すように、電子ビームとレーザーをオプティカルクライストロンで相互作用させることで、コヒーレント高調波を発生させることができる。

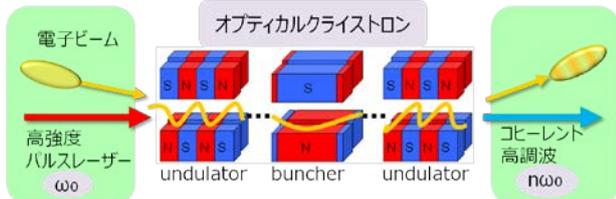


図3: 電子ビームとレーザー相互作用によるコヒーレント高調波発生

1 目目のアンジュレータ部において、電子ビームはレーザーの電場によってエネルギー変調を起こす。バンチャ部においてこのエネルギー変調は密度変調に変換され、マイクロバンチングを起こす。2 目目のアンジュレータ部でマイクロバンチングを起こした電子ビームから基準波とその高調波のコヒーレント放射光が発生する<sup>[1]</sup>。

### 4. バンチャ電磁石の設計

バンチャ電磁石は以下の設計条件を設定し設計を行った。

- 2 つのアンジュレータ間の限られた空間に設置可能であること。
- 様々な光源開発に対応するため、ビームエネルギー 600 MeV において  $R_{S6}$  の最大値 72  $\mu\text{m}$  を実現できること。
- コストを考慮し、コイル部分は間接水冷で使用できること。
- バンチャ部の軌道上において磁場積分が 0 になっていること。

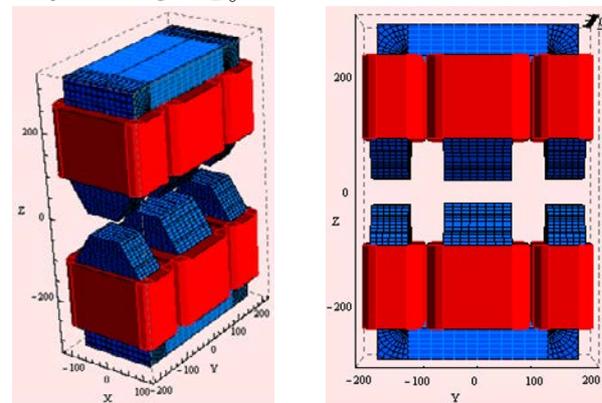


図4: 3次元磁場計算コード Radia によるバンチャ電磁石のモデル図

図 4 に示すようなバンチャ電磁石の 3D モデルを、3 次元磁場計算コード Radia<sup>[3]</sup>において作成し、3 次元的な発生磁場をシミュレーションすることで設計を行った。限られた空間内(長手方向およそ 50 cm ほど)において強い磁場を発生させるため、サイドポールの長手方向の長さを大きくすることで磁極長をより長くし、またポール先端をテーパ状にすることで、中心の磁束密度を上げている。(図 5)

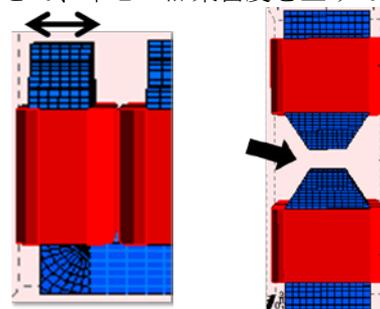


図5: バンチャ電磁石の形状工夫点

図 6 にバンチャ部の、Radia でのシミュレーションによる長手方向の縦磁場分布とエネルギー 600 MeV の電子ビームが通過した際のビーム軌道を示す。発生磁場はピーク部分で 0.4 Tesla 以上を実現している。また、バンパ軌道の形成がみられる。

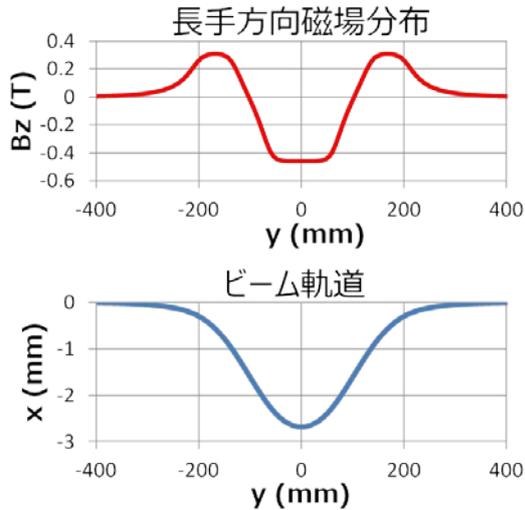


図 6: シミュレーションによるバンチャー部の発生磁場と電子ビーム軌道

エネルギーの異なる電子の軌道長差を表す  $R_{56}$  は以下の式を用いて、バンチャー部の磁場分布より算出することができる。

バンチャーの磁場による電子ビームの角度変化は式(3)であらわされる。

$$\theta = \frac{1}{B\rho} \int B_y dz \quad (3)$$

これより電子の軌道長は式(4)であらわされる。

$$l = \int \left( 1 + \frac{1}{2} \theta^2 \right) dz = z_0 + \frac{1}{2(B\rho)^2} \int \left( \int B_y dz \right)^2 dz \quad (4)$$

運動量に変化したときの軌道長の変化はこれより

$$\frac{dl}{d(B\rho)} = -\frac{1}{(B\rho)^3} \int \left( \int B_y dz \right)^2 dz \quad (5)$$

と表せ、式(1)に適用すると

$$\Delta l = \frac{-1}{(B\rho)^2} \int \left( \int B_y dz \right)^2 dz \frac{\Delta(B\rho)}{B\rho} = R_{56} \frac{\Delta(B\rho)}{B\rho} \quad (6)$$

となる。 $R_{56}$ の形に直し、

$$R_{56} = \frac{-1}{(B\rho)^2} \int \left( \int B_y dz \right)^2 dz \quad (7)$$

となる。式(7)から図 6 に示した磁場分布での  $R_{56}$  の最大値を求めると、 $67 \mu\text{m}$  であった。これは  $R_{56}$  の目標値である  $72 \mu\text{m}$  を達成していない。コイル部分の電流密度の限界によって目標値よりもおよそ 7 %ほど低くなってしまったが、今回の光源開発には十分な値であるため許容範囲であると判断した。

設計したバンチャー電磁石は 2011 年の年末に納品され、2012 年の 1 月に設置作業を行い、新オプティカルクライストロンの建設が完了している。(図 7)



図 7: 納品、設置したバンチャー電磁石

## 5. UVSOR 新 U1 オプティカルクライストロンの性能評価

オプティカルクライストロンからの自発放射光を測定することで、その性能評価を行った。自発放射光のスペクトルはバンチャー部での光に対する電子の遅れに応じて光の干渉が起こり、図 8 に示す様な楕状のスペクトルとなる。

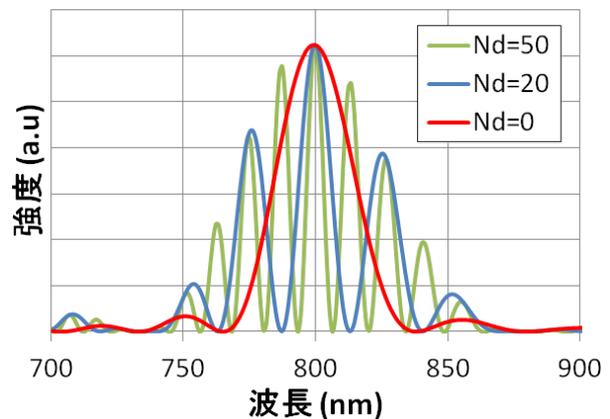


図 8: バンチャー強度による自発放射光スペクトルの変化例(計算値)

$Nd$  はバンチャー部での位相の遅れ分の波数

バンチャー電磁石の電流値を変化させていくことで、2 つのアンジュレータからの自発放射光の位相差を変化させていき、そのスペクトルの変化を測定した。それをシミュレーションと比較することで、バンチャー電磁石が設計通りの働きをしていることを確かめた。

表 1 に実験条件を、図 9 に実験時のセットアップを示す。オプティカルクライストロンより発生した自発放射光を下流に設置されたモニター系にて測定した。リングはシングルバンチで 1 mA 以下の低電流で運転を行った。アンジュレータの共鳴波長は 800 nm に設定し、その時のアンジュレータギャップは 25.25 mm であった。モニター系は光源より 9 m 離れており、4 つのミラーによって光軸を調整した。測定には浜松ホトニクス分光器 PMA-50 を

使用した。バンチャー電磁石はセンターポールの励磁電流値を 0 A から 23 A まで 1 A 刻みで上昇させていき、その都度スペクトルの測定を行った。

表 1: 実験条件

電子ビーム	
エネルギー広がり	0.00034
ビームエネルギー	600 MeV
蓄積電流	1 mA
アンジュレータ	
全長	1.056 m
周期長	0.088 m
周期数(N)	10
モニター系	
分光器	浜松ホトニクス PMA-50
ミラー	アルミミラー

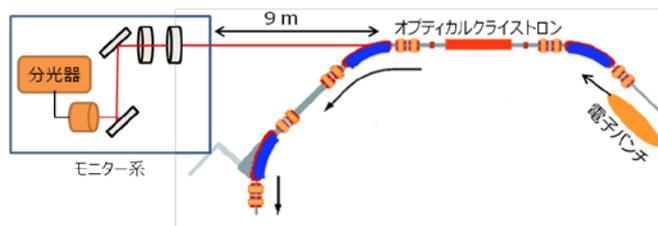


図 9: 実験セットアップ

図 10 に測定したスペクトルを示す。バンチャー電磁石を励磁していくと、スペクトルの櫛状のピーク間の間隔が狭まっていくことがわかる。これによってバンチャー部分が正常に機能していることが確認された。

測定した自発放射光スペクトルと SPECTRA<sup>[4]</sup>によるシミュレーションスペクトルの比較を行った。計算では、バンチャー電磁石とアンジュレータの磁場は Radia の結果を使用した。ビームパラメータは UVSOR におけるビームエネルギー600 MeV のものを使用した。

測定したスペクトル形状に近い形状のスペクトルを、予想される測定パラメータのずれの範囲内でシミュレートしたものから探し、比較した結果を図 10 に示す。このシミュレーションスペクトルは、ビームエネルギー607 MeV で、検出角度 0.6 mrad で測定した場合のものである。実際の測定においてもこの程度のパラメータのずれは起こりうるものと考えている。

高電流値ではスペクトル形状が良く一致しており、低電流側ではピーク波長などがずれてきている。

完全に一致しないのはいくつかの原因が考えられ、ひとつはバンチャー電磁石の残留磁場。また、実際のアンジュレータでは磁場調整後も計算での磁場に対して、多少の誤差が生じている。また、アンジュ

レータとバンチャーとの間に磁場の干渉が発生し、計算通りの磁場が出ていない可能性もある。図 11 はセンターポールの励磁電流に対しての  $R_{56}$  の変化を表したグラフである。測定値の  $R_{56}$  はスペクトルの櫛状のピーク間隔より求めた。変化の傾向はシミュレーションと測定値共に同様であるが、測定値にはオフセットが存在している。これは実際のバンチャー電磁石の残留磁場が存在していることを反映していると考えている。

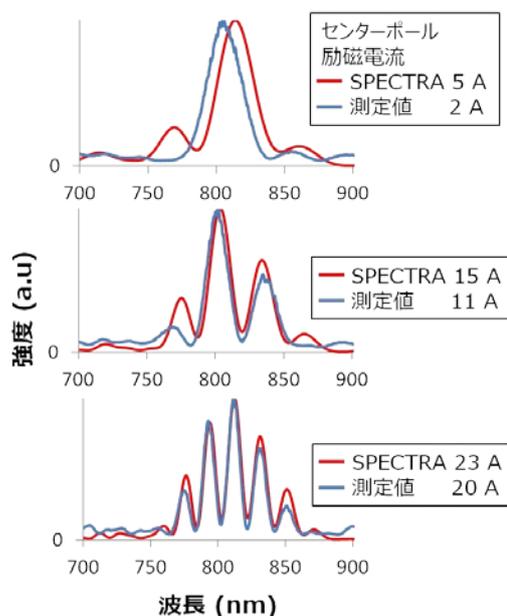


図 10: 測定値とシミュレーションスペクトル

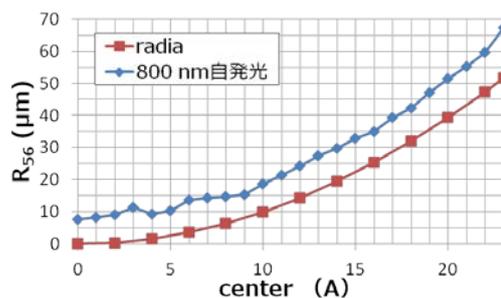


図 11: 励磁電流による  $R_{56}$  の変化

オプティカルクライストロンからの自発放射光の基準波長におけるのスペクトル強度は、2 台のアンジュレータ間の位相差が波長の整数倍であるとき最も強くなる。図 12 の青線は励磁電流の変化によって周期的に強いピーク強度が発生している様子を SPECTRA でシミュレーションしたものである。縦軸はアンジュレータ 1 台からの自発放射光ピークに対しての強度比である。

図 12 の赤点は測定値である。オフセットを考慮し、励磁電流値を 1 A 高電流側にずらしてプロットしている。シミュレーションのような周期的なピー

ク強度の変化を確認することが目的であったが、測定数の少なさよりこれは低電流側でしか確認できなかった。次回の測定では励磁電流値の刻みをさらに細かくとり、この周期性を確認できるようにしたい。

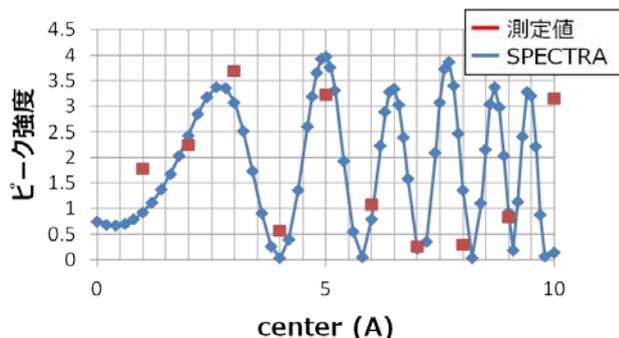


図 12 ピーク強度周期性

## 6. まとめ

UVSOR の新 U1 オプティカルクライストロンのためのバンチャー電磁石の設計と、その性能評価を行った。バンチャー電磁石の設計には 3 次元磁場計算コード Radia を使用しての発生磁場シミュレーションを中心に行った。設定した設計条件を満たした設計を行い、納品、設置を行いオプティカルクラ

イストロンの構成を完了した。オプティカルクライストロンからの自発放射光を測定し、また測定スペクトルをシミュレーションと対応させることで、概ね目標の磁場が発生できていること確認した。

今後は再度自発放射光の測定を細かく行うとともに、本オプティカルクライストロンを用いたコヒーレント高調波発生実験を行う予定である。

## 謝辞

UVSOR におけるコヒーレント光源開発実験ステーションの建設と立ち上げは「文部科学省量子ビーム基盤技術開発プログラム」のもとに行われています。

## 参考文献

- [1] Sverker Werin, “Undulator physics and coherent harmonic generation at the MAX-lab electron storage ring” LUNTDX/(NTMX-1002)/1-207/(1991)
- [2] P.Elleume , JOURNAL DE PHYSIQUE Colloque C1,supplement au n<sup>o</sup>2,Tome 44,fevrier 1983
- [3]<http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia/>
- [4] <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/>