

## OBSERVATION OF CSR SPECTRUM FROM JAEA-ERL

Toshiharu Takahashi<sup>1,A)</sup>, Eisuke J. Minehara<sup>B)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>B)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>B)</sup>, Masaru Sawamura<sup>B)</sup>,  
Ryoji Nagai<sup>B)</sup>, Nobuhiro Kikuzawa<sup>B)</sup>, Hokuto Iijima<sup>B)</sup>, Tomohiro Nishitani<sup>B)</sup>, Shuichi Okuda<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University

2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494

<sup>B)</sup> Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

<sup>C)</sup> Frontier Science Innovation Center, Osaka Prefecture University

1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8531

## Abstract

The energy recovery linac (ERL) is able to generate high-power coherent synchrotron radiation (CSR) in the terahertz and the millimeter-wave regions, because it produces shorter bunches than usual storage rings and a higher current than conventional linacs. The spectrum of CSR has been measured at the JAEA-ERL in the wavenumber range from 0.5 to 15cm<sup>-1</sup>. The detected power was 2×10<sup>-4</sup> W/cm<sup>-1</sup> at 2.5 cm<sup>-1</sup> for the average beam current of 17.7 μA. When the infrared FEL was operated with the undulator in the ERL, the CSR spectrum was shifted to the longer wavelengths because of the energy broadening of the electron beam.

## JAEA-ERLにおけるCSRスペクトルの観測

## 1. 序論

コヒーレント放射光(CSR)は1989年に東北大核理工研ライナックで初めて観測されて以来、線型加速器でのビーム診断に利用されているほか、ミリ波・サブミリ波領域(最近ではテラヘルツ領域と呼ばれる)の新型光源として分光研究に使われている。最近、蓄積リングにおいてもCSR発生の基礎研究や分光利用を行う施設も増えており、テラヘルツ時間領域分光法を用いた分光研究の進展とあいまって、CSRは高輝度のテラヘルツ光源として注目されている。CSRについての解説はいくつかあるが、最近では文献[1]にCSRの歴史的経緯や研究の進展に関するレビュー記事がある。CSRに関する話題で最近特に注目を集めたのが、米Jefferson Lab.のエネルギー回収型ライナック(ERL)における、1 W/cm<sup>-1</sup>にも及ぶ大強度CSRの観測[2]であり、放射光研究者ばかりでなく、テラヘルツ領域の分光研究者にも大きなインパクトを与えた。

ERLは、X線自由電子レーザーと共に、X線領域における次世代の放射光源の候補として注目され、基礎研究が行われている。ERLの基本コンポーネントは入射器、超伝導ライナック、周回部、ビームダンプである。図1にERLにおけるエネルギーのやり取りの様子を描いた。入射器から超伝導ライナックに打ち込まれた電子は、加速空洞内に満たされたマイクロ波(RF)からエネルギーを受け取り加速される。ライナックを出て周回部を一周し、再び加速空洞に戻ってきた電子は、今度は減速位相に乗せられエネルギーを失い、そのエネルギーはRFパワーとして

加速空洞に戻される。従って、外部からわずかなRFパワーを補給するだけで大電流・高エネルギーの電子ビームを作り出すことができる。その点では、わずかなRF補給で電子を回し続ける蓄積リングと似ているが、ERLでは基本装置が線型加速器であり電子は周回部を一周するだけであるから、バンチは入射器の性能に依存し、蓄積リングに比べて元々バンチ長が短い、ビーム断面が真円に近いなどの特徴がある。また、ビーム性能は入射器だけのアップグレードで即応できるなどのメリットもある。

わが国においては、日本原子力研究機構に高出力赤外FELのためのERLが設置されている。赤外FELだけでなくテラヘルツCSRも利用に供することを目指し、CSRのスペクトルを観測するとともに、赤外FELを発振させた状態で、下流におけるCSRスペクトルがどう変化するかも併せて測定した。

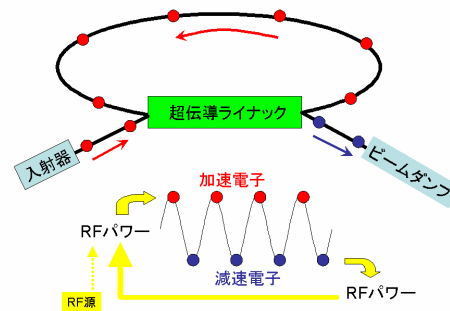


図1: ERLの原理を示す模式図

<sup>1</sup> E-mail: takahasi@rri.kyoto-u.ac.jp

## 2. 実験方法

実験は、日本原子力研究機構エネルギー回収型超伝導ライナック自由電子レーザー施設で行った。この加速器の概略図を図2に示す。アンジュレータに

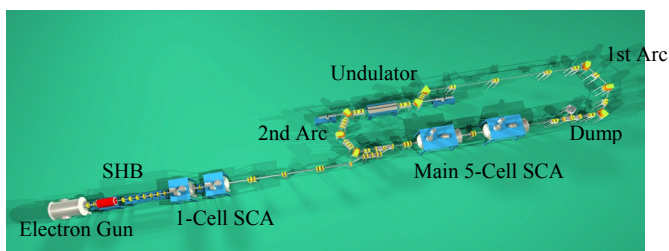


図2：JAEA-ERLの概略図

おいて赤外FEL発振させた時のCSRの変化が観測できるよう、2nd ARC部の偏向電磁石（軌道半径20 cm）にCSR観測用の光学系を設置した。電子ビームのパラメータは、エネルギーは17 MeV、バンチ繰返し20.8 MHz、マクロパルス幅230  $\mu$ s、繰返し10 Hzであり、平均電流は17.7  $\mu$ A、マクロパルスピーク電流は7.7 mAであった。設置した分光装置の模式図を図3に示す。本来この光学系は80 mradの受光角でCSRを集光するよう設計されているが、CSRの強度が非常に大きく検出器が飽和してしまったため、やむを得ずミラーの一部をマスクし、受光角を37 mradに制限して測定を行った。合成石英の真空窓W（厚さ8.2 mm）から大気中に取り出されたコヒーレント放射光は、焦点距離1500 mmの球面鏡M2で平行光束にされ、光学定盤に設置されたMartin-Puplett型フーリエ干渉分光計に導かれる。この干渉計は、ビームスプリッターとして直径10  $\mu$ mのタングステンワイヤーを25  $\mu$ m間隔に張ったワイヤーグリッドを使用した偏光分割方式の干渉計である。最初の偏光子BS1で反射と透過の2方向に分割し、反射光はビームスプリッターBS2、移動鏡MM、固定鏡FMからなる干渉計部へ導かれる。移動鏡により光路差を

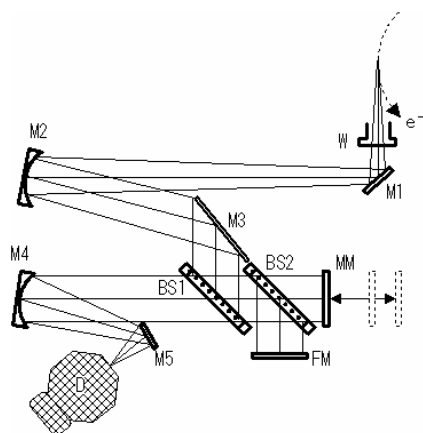


図3：実験装置の模式図。W: 真空窓、M1, M3, M5: 平面鏡、M2: 球面鏡(f1500)、M4: 球面鏡(f410)、FM: 固定鏡、MM: 移動鏡、BS1, BS2: ビームスプリッター、D: Siボロメータ

変化させて重ね合わされた光は検出器Dで検出されインターフェログラムを得る。昨年報告した実験[3]ではマシンの状態が万全でなく、CSR強度が不安定であったため、BS1の透過方向にインターフェログラム補正用の検出器を用いたが、今回はCSRが安定に測定できたため、検出器は一台のみ使用した。検出器は液体ヘリウム冷却のSiボロメータであり、ミリ波検出用に内部のパーツが大きいサイズに変更された特注品を用いている。光強度が十分大きいため検出器付属のプリアンプは使用せず、ロックインアンプを用いてマクロパルスのタイミング信号と同期した信号のみを増幅した。

## 3. 実験結果

### 3.1 CSRスペクトル

観測されたスペクトルを図4に丸印で示す。横軸は波数（波長の逆数）で表し、縦軸は光の強度を0.1%バンド幅あたりのワット数で表している。このスペクトルは輝度ではなく受光角37 mradで取り込んだフラックスである。また縦軸の強度は、擬似的に4000 Kの黒体放射とみなすことができる高圧水銀灯(100 W)を光源として同一の光学系で測定し校正した。0.5~15  $\text{cm}^{-1}$ の範囲でスペクトルが得られており、2.5  $\text{cm}^{-1}$ 付近で $1.6 \times 10^{-6}$  W/0.1%b.w. ( $6.4 \times 10^{-4}$  W/ $\text{cm}^{-1}$ )の強度である。5  $\text{cm}^{-1}$ 付近から短波長に向かって急激に強度が減少しており、10  $\text{cm}^{-1}$ 付近に小さな山が見える。青色の実線は古くから光源として使われている高圧水銀灯の強度を表しており、赤色の破線は、バンチが半値全幅4 psのガウス分布と仮定したときの計算値である。5  $\text{cm}^{-1}$ 付近の落ちはほぼ測定結果と合っているが、10  $\text{cm}^{-1}$ 付近の構造を説明できない。つまり、実際のバンチは単純なガウス

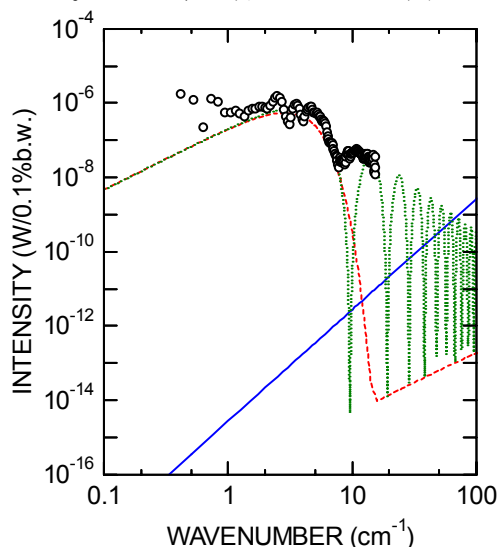


図4：観測されたCSRスペクトル（丸印）。実線は高圧水銀灯のスペクトル強度。破線は4 psのガウス分布のバンチ、点線は3.5 ps(FWHM)の三角形のバンチを仮定した場合の計算値。

分布ではないことがわかる。なお、緑色の点線は半値全幅3.5 psの三角形分布のバンチを仮定した時の計算値であるが、非ガウス分布の場合には高調波成分のためにスペクトルが短波長に伸びる。

なお、今回10 cm<sup>-1</sup>付近に観測されたような小さな構造は、線型加速器を使ったコヒーレント回折放射の観測で同様の報告がある[4]。

### 3.2 バンチ内電子分布の計算

CSRのスペクトル形状は、バンチ形状因子 $f(\nu)$ を介して、バンチ内電子分布 $S(x)$ を反映する形になる[5]。従って観測されたスペクトルをもとにバンチ形状因子を計算し、そこから次式のようにバンチ内電子分布を求めることができる[6]。

$$S(x) = 2 \int_0^{\infty} \sqrt{f(\nu)} \cos[2\pi\nu x - \psi(\nu)] d\nu \quad (1)$$

位相成分は、ある程度広い波長領域でスペクトルが得られていれば、Kramers-Kronigの関係を使って(2)式のように計算できる。

$$\psi(\nu_0) = -\frac{\nu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\ln[f(\nu)/f(\nu_0)]}{\nu^2 - \nu_0^2} d\nu \quad (2)$$

この方法で求めたバンチ形状を図5に実線で示す。横軸は軌道方向の長さと同時に時間でも示してある。縦軸は規格化されたバンチ内電子分布を表す。10 cm<sup>-1</sup>付近のスペクトル構造がバンチ形状とどう関連しているのか調べるため、バンチ形状因子でこの構造を無視した場合の計算結果を点線で示した。両者を比較すると、図中矢印で示した部分の微細構造に現れていることがわかる。

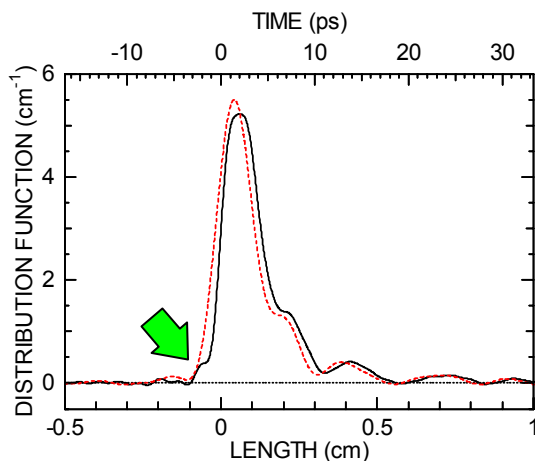


図5：観測されたCSRスペクトルから計算したバンチ内電子分布（実線）。点線は10 cm<sup>-1</sup>付近のスペクトルの構造を無視した場合。

### 3.3 赤外FEL発振時のCSRスペクトルの変化

JAEA-ERLには発振波長22 μmの大出力赤外FEL装

置が挿入されている。これを発振させることによりバンチが密度変調を受け、ミリ波領域に観測されたCSRスペクトルが短波長側に伸びることが予想される。結果を図6に示すが、予想とは逆にスペクトル分布が長波長側にシフトし、強度も弱くなっている。これはバンチ長が伸びたことを示している。ビームオプティクスから検証した結果、FELで生じたバンチの密度変調は2nd Arc部まで保存されず、さらにエネルギー幅の増大(～10%)によりバンチ自体が伸びることがわかった。

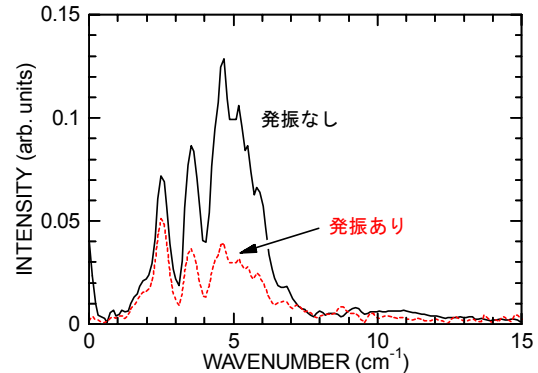


図6：通常のCSRスペクトル（実線）と赤外FELを発振させた場合のCSRスペクトル。

## 4. 結論

国内唯一のERLであるJAEA-ERLでCSRの観測を行い、ミリ波サブミリ波領域で高強度のスペクトルを得ると同時に、スペクトル形状からバンチ内電子分布を解析した。また、既設の大出力赤外FELを発振させた状態でのCSRスペクトルは、マイクロバンチングの効果は現れず、逆にエネルギー広がりにより長波長側へシフトする結果となった。今後は、周回リングの他の場所でCSR観測に最適なポートを調査するとともに、分析光としての利用、あるいは励起光としての利用も進める予定である。

## 参考文献

- [1] 高橋俊晴, “コヒーレント放射光”, 加速器 2, 11-19 (2005).
- [2] G. L. Carr, *et al.*, “High-power terahertz radiation from relativistic electrons”, *Nature* **420**, 153 (2002).
- [3] T. Takahashi, *et al.*, “Observation of coherent synchrotron radiation from the JAERI energy recovery linac”, *Proc. 2nd Annual Meeting Part. Acc. Soc. Japan*, 498 (2005).
- [4] Y. Shibata, *et al.*, “Observation of coherent diffraction radiation from bunched electrons passing through a circular aperture in the millimeter- and submillimeter-wavelength regions”, *Phys. Rev. E* **52**, 6787 (1995).
- [5] K. Ishi, *et al.*, “Spectrum of coherent synchrotron radiation in the far-infrared region”, *Phys. Rev. A* **43**, 5597 (1991).
- [6] R. Lai and A. J. Sievers, “On using the coherent far IR radiation produced by a charged-particle bunch to determine its shape: I Analysis”, *NIM A* **397**, 221 (1997).