

OBSERVATION OF COHERENT SYNCHROTRON RADIATION FROM THE JAERI ENERGY RECOVERY LINAC

Toshiharu Takahashi^{1,A)}, Eisuke J. Minehara^{B)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Masaru Sawamura^{B)}, Ryoji Nagai^{B)},
Nobuhiro Kikuzawa^{B)}, Hokuto Iijima^{B)}, Tomohiro Nishitani^{B)}, Shuichi Okuda^{C)}

^{A)} Research Reactor Institute, Kyoto University

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

^{B)} Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute

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

^{C)} 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 JAERI-ERL. The detected power was 2×10^{-5} W/cm² at 2 cm⁻¹ for the average beam current of 0.7 μ A. The power drastically increased and the spectrum was shifted to the shorter wavelengths by the unusual operation of the accelerator.

原研エネルギー回収型ライナックにおけるコヒーレント放射光の観測

1. 序論

コヒーレント放射光(CSR)は1989年に東北大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やミリ波・サブミリ波あるいはテラヘルツ領域の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の発生や利用を行うところが増えており、テラヘルツ領域分光の進展とあいまって、高輝度のテラヘルツ光源として注目されている。なお、CSRについての詳細は文献[1]に解説がある。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、 $1\text{W}/\text{cm}^2$ にも及ぶ大強度CSRの観測である。

ERLは、X線自由電子レーザーと共に、X線領域における新世代の放射光源の候補として注目されている。図1にERLの原理図を示す。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の下側には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、蓄積リングに比べてバンチ長が短い、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、日本原子力研究所に高出力赤外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、今回まずCSRのスペクトルを観測した。

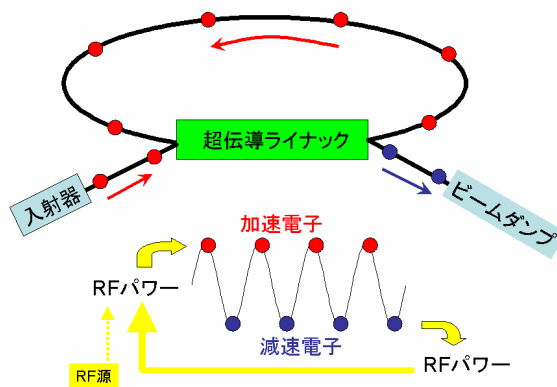


図1：ERLの原理を示す模式図

¹ E-mail: takahasi@rri.kyoto-u.ac.jp

2. 実験方法

実験は、日本原子力研究所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われた。電子線のエネルギーは17 MeV、バンチ繰返し10.4 MHz、マクロパルス幅30 μ s、繰返し10 Hz、EFLレーザー発振はさせず、偏向電磁石（軌道半径20 cm）からのシンクロトロン放射光を水平方向100 mrad、垂直方向87 mradの受光角で測定した。図2に実験の模式図を示す。コバルトガラスの真空窓W（厚さ4.5 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1200 mmの球面鏡M3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 μ mのタングステンワイヤーを25 μ 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変化させて重ね合わされた光は検出器D1で検出されインターフェログラムを得る。一方の透過光はそのまま変動モニター用の検出器D2に入る。2台の検出器は仕様は全く同じ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ので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。

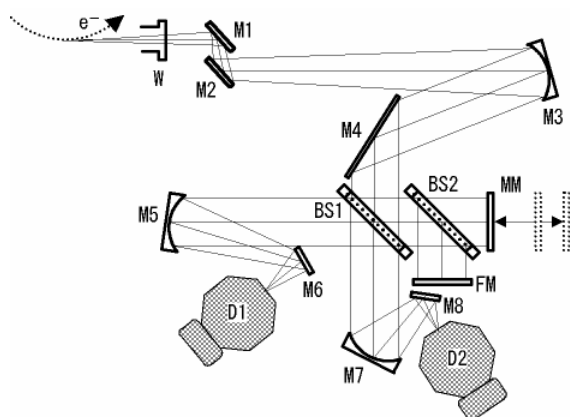


図2：実験装置の模式図。W：真空窓、M1, M2, M4, M6, M8：平面鏡、M3：球面鏡(f1200)、M5：球面鏡(f250)、M7：球面鏡(f306)、FM：固定鏡、MM：移動鏡、BS1, BS2：ビームスプリッター、D1, D2：Siボロメータ

3. 実験結果

3.1 光強度モニターの効果

実験を行った時期が、加速器の長期停止からの復

帰直後だったため、加速器の調整を十分に行えないまま測定せざるを得なかった。そのため、ビーム電流すなわちバンチ内電子数が不安定で、コヒーレント放射光の強度も大きく時間変動していた。図2(a)は変動モニター用検出器で測定された光強度を示す。横軸は移動鏡パルスステージのパルス数であり光路差に対応している。また、一回の走査時間は約5分である。理想的に光源が安定していれば図2(a)は横一直線になるはずである。しかし今回のようにビームが不安定な状況では、図2(b)のようにインターフェログラムにその変動が重畳し、そのフーリエ変換で与えられるスペクトルを正確に求めることができない。そこで、図2(a)を用いてインターフェログラム図2(b)を補正したのが図2(c)である。きれいに干渉図形が復元されており、モニター系が有効に働いていることがわかる。

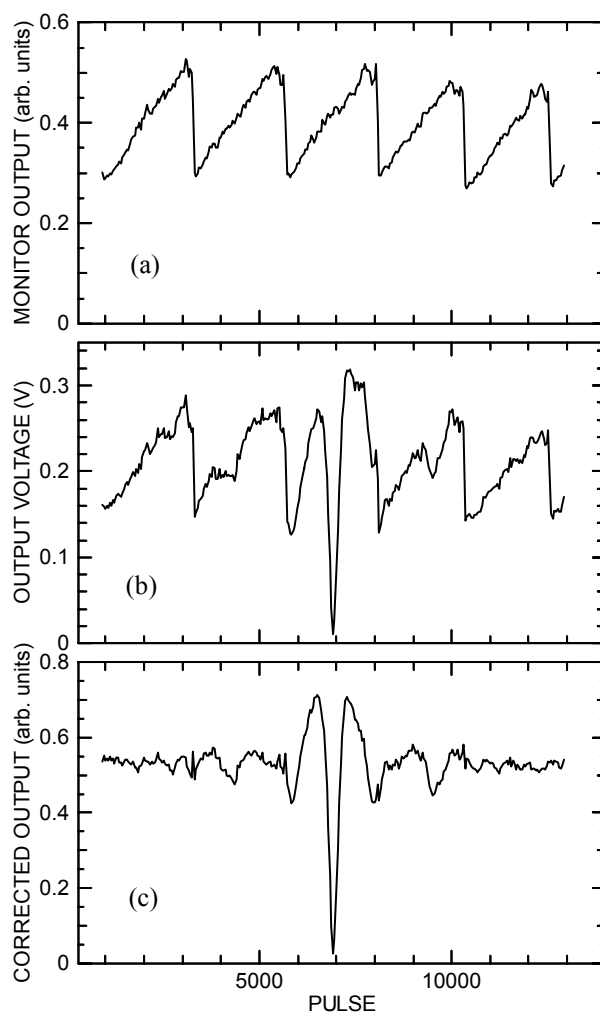


図4：変動モニターによる光出力の補正。(a)変動モニター用検出器の出力、(b)インターフェログラム用検出器の出力、(c)補正されたインターフェログラム。

3.2 CSRスペクトル

前節の方法で復元したインターフェログラムをフーリエ変換して求めたスペクトルを図5に示す。波数 5 cm^{-1} (波長 2 mm) から長波長側に向かって立ち上がり、 1 cm^{-1} 付近にピークのあるスペクトルになっている。破線は、軌道方向のバンチ内電子分布がガウス分布をしていると仮定したときの計算で、半値全幅を 9 ps としている。この測定に際してのビーム調整は、できるだけ損失無く電子が回るよう、また回収率が高くなるように行っている。この時の平均ビーム電流は $0.9 \mu\text{A}$ 、マクロパルスのピーク電流で 3 mA であった。

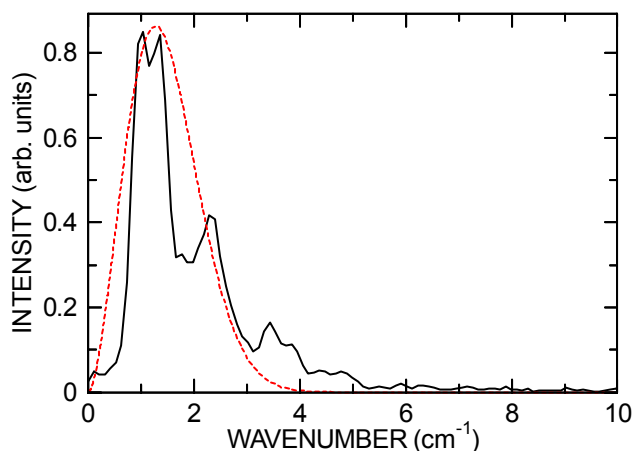


図5：通常のビーム調整でのCSRスペクトル。破線はバンチ長 9 ps (FWHM) のガウス分布を仮定した計算値。適当な倍率を掛けて重ねてある。

次に、加速位相などの運転パラメータを変更するなど、CSRの光強度が大きくなることを考えてビーム調整を行った場合のスペクトルを図6に実線で示す。点線は、通常のビーム調整時のスペクトル(図5)を比較のため並べて描いたものである。平均ビーム電流は図5の時より小さい $0.7 \mu\text{A}$ であったにもかかわらず、強度で約10倍増強し、さらにスペクトルのピークが短波長にシフトしていることがわかる。破線は、バンチ長 5 ps (FWHM) のガウス分布を仮定した計算値であり、最初の 9 ps に比較すると半分程度のバンチ長になっているが、実際のバンチ形状がガウス分布とは限らないため、バンチ内に密度変調が起こるなど、バンチ形状そのものが変化した可能性もある。厳密に調べるには、短波長側(高波数側)のスペクトルをより精密に測定する必要がある。

なお図5、図6とも観測されたスペクトルに周期的な構造が現れているが、その周期から、真空窓が平行平板であることによる干渉であると考えられる。

ここで示したスペクトル強度の絶対値を求めるた

め、擬似的に 4000K の黒体放射とみなすことができる高圧水銀灯 (100W) を光源として、同一の光学系で測定した。その結果を使ってCSRの強度校正を行った結果、図6の 2.4 cm^{-1} ピーク位置で $2 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$ という値を得た。

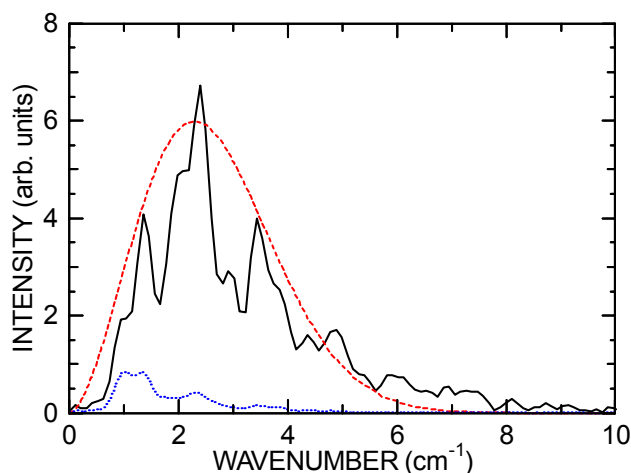


図6：CSR強度が大きくなるようビーム調整したときのCSRスペクトル。破線はバンチ長 5 ps (FWHM) のガウス分布を仮定した計算値。適当な倍率を掛けて重ねてある。点線は図5に示したスペクトルを比較のため並べたものである。

4. 結論

国内唯一のERLであるJAERI-ERLでCSRの観測を行い、ミリ波領域で高強度のスペクトルを得た。今回測定されたCSRの強度は、通常の線型加速器や蓄積リングでこれまでに観測されているものと同程度であるが、加速器の状態が万全ではなかったことを考えればやむを得ない。この放射強度であれば、分析光としての分光研究への利用にとどまるが、本来の性能(マクロパルス幅 1 ms 、ピーク電流 5 mA)による運転を行えば、放射強度は今回より100倍程度大きくなるため、励起光としての利用も可能になるであろう。また、運転条件の違いによるCSRスペクトルの短波長化に関して、ストリークカメラによるバンチ長測定を行い、CSRの結果と比較することも必要である。

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).