

Suppression of Coherent Synchrotron Radiation in Metallic Shields. II*

Ryukou KATO[†], Toshiharu NAKAZATO, Masayuki OYAMADA,
Shigekazu URASAWA, Tatsuya YAMAKAWA, Masahiro YOSHIOKA

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, 982

Mikihiko IKEZAWA, Kimihiro ISHI, Toshinobu KANAI,
Yukio SHIBATA and Toshiharu TAKAHASHI

Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University
Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980

ABSTRACT

A suppression effect of coherent synchrotron radiation due to conducting boundaries was observed by using the Tohoku 300 MeV Linac. Electron bunches, whose energy was 50 MeV and longitudinal length was 1.65 mm, were bent by the magnetic field of 68.6 mT between a pair of finite parallel aluminum plates with a variable gap in a vacuum chamber. As the shielding gap became narrow, the intensity of coherent synchrotron radiation was enhanced at first and then drastically suppressed. The results can be qualitatively explained by the theory of suppression effect obtained by Nodvick and Saxon and applicable to the intense and short-bunched accelerators.

導体境界によるコヒーレント放射光発生 の 抑止効果 II

1. はじめに

抑止効果[1]とは真空ダクト等の導体境界の存在により、その内部で発生する放射光の長波長領域の強度が抑えられることである。バンチ長よりも長い波長領域では、電子はコヒーレントな輻射によりエネルギーを失うことが考えられる。バンチ長が十分短い場合には、この輻射損失は無視し得ない値になるはずである。ところが、1940年代のシンクロトロン放射光発見当初には、実際にはそのような輻射損失の存在を示す実験結果は得られていない。これを説明するために、加速器の真空ダクト内で発生する輻射場は、自由空間で発生する場と異なり、長波長領域での強度が抑止されるという効果が考えられた。

本研究ではこの効果に着目し、コヒーレント放射光[2, 3, 4]の発生領域のダクト形状を可変にして、境

界条件の変化に対するコヒーレント放射光強度の変化を測定した。この結果は昨年の本研究会で報告されている[5]。

今回は、この測定結果を Nodvick と Saxon により導かれた理論[1]と比較し、抑止効果理論の検証を行うとともに、抑止効果の特性をあきらかにする。

2. 抑止効果の理論

3次元空間(r, ϕ, z)内の $z = \pm a/2$ に無限に大きな平行金属板が置かれていると仮定する。このとき $z=0$ の平面上を軌道半径 R 、角速度 ω_0 で回転する電子バンチから輻射されるコヒーレント放射光の全強度 P_{coh} は次式で与えられる。

$$P_{\text{coh}} = N^2 \sum P_n f_n \quad \dots (1)$$

ここで、 N はバンチ内電子数、 f_n はバンチ形状因子(規格化されたバンチ内電子密度分布を Fourier 変換し 2 乗したもの)、 P_n は上記の条件で 1 個の電子が回転するときに放射する放射光の n 次高調波成分(角周波数 ω が基本角周波数 ω_0 の n 倍)の強度である。

* 本研究の一部は文部省科学研究補助金(課題番号 02740134, 03504001, 03640258)の援助によるものである。

[†] Present address: FEL Laboratory, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11.

$\beta (= \omega_0 R / c) \sim 1$ のとき、Nodvick と Saxon に
より導かれた P_n は MKSA 単位系で、以下のように
与えられる。

$$P_n = \frac{n \omega_0 e^2}{3 \pi^2 \epsilon_0 a} \left\{ \sum_{j=1,3,\dots}^{j < na / \pi R} (\xi_j / n)^4 \right. \\ \left. \times [K_{1/3}^2(\xi_j^3 / 3n^2) + K_{2/3}^2(\xi_j^3 / 3n^2)] \right\} \dots (2)$$

ここで $K_{1/3}$ と $K_{2/3}$ は、変形 Bessel 関数であり、
 $\xi_j = j \pi R / a$ である。

この P_n を $P(\omega)$ [Photons/electron/mrad/
1%BandWidth] に変換するには {} の外の係数を、

$$\frac{4 \times 10^{-5} \omega R}{3 \pi \omega_0 a} \alpha \quad \dots (3)$$

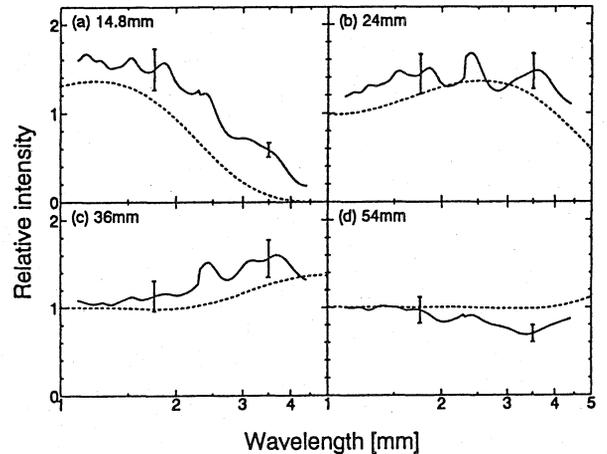
で置き換えればよい。ここで α は微細構造定数で
ある。この理論式を用いて計算された放射光強度の
変化を以下の図中に点線で示す。

3. 実験装置と方法

実験方法は前回[5]報告しているので、ここでは概
略のみを述べる。

放射光の発光点近傍には上下2枚のシールド板
(平行アルミ板・厚さ 1mm) がビームの軌道面に対
し平行・等間隔にセットされており、その間隔は遠
隔操作により可変である。偏向電磁石上で電子によ
り放出された放射光は受光角 70mrad の集光系を経て、
分光器に導かれる。分光器は偏光子型干渉計と回折
格子型分光器を用いた。これにより分光された放射
光は、液体ヘリウム温度に冷却されたシリコン・ポ
ロメーターにより検出される。また、集光系をでた
光が最初に焦点を結ぶ位置の近傍に、迷光カットの
ためのスリットを設けた。これは分光器に対し、設
計された光路外からの光の進入を防ぐためである。

実験条件はビーム・エネルギー 50MeV、エネル
ギー幅 0.2%、曲率半径 2.44m、パルス幅 2 μ sec、
パルス繰り返し 300pps、加速周波数は 2856MHz で、
電子は位相角で 5.5° にバンチしていると考えられ
ている。



第1図 偏光子型干渉計を用いて得られた相対スペクトル。
(a), (b), (c), (d) は各々シールド板間隔が、14.8, 24, 36,
54mm のときのスペクトル強度を間隔 81mm のときのスペク
トル強度で割った相対値を示す。実線が測定値、点線が理論値
である。

4. 測定結果

第1図は偏光子型干渉計を用いた測定結果である。
これはシールド板間隔を 36, 24, 18, 14.8mm (全
幅) で固定したときのコヒーレント放射光のスペク
トル強度を、シールド板間隔 81mm のときのスペク
トル強度で割った相対的なスペクトルの変化である。
図中の実線が測定値を、点線が理論値を示している。

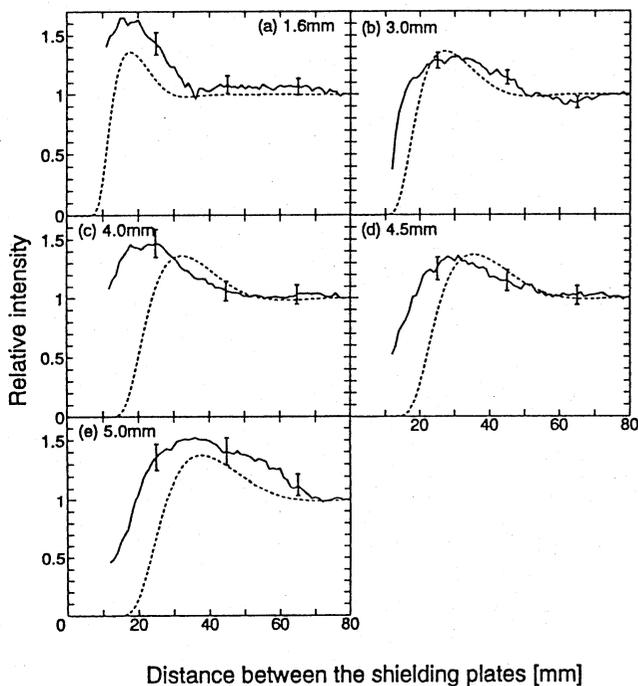
第2図は回折格子型分光器で行った測定結果であ
る。ここでは、波長を 1.6, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0mm
で固定し、シールド板間隔を連続的に変化させたとき
のコヒーレント放射光の強度変化を示している。
図中のデータはシールド板間隔全幅 80mm のときの
それぞれの波長の強度で規格化してある。図中の実
線は測定値を、点線は理論値を示している。

仮に、導体境界によるコヒーレント放射光発生の
抑止効果が存在しないとすると、第1図、第2図に
示される相対強度は常に1になるはずである。測定
結果は明らかに抑止効果の存在を示している。こ結
果は、Nodvick と Saxon の理論により予測される強
度変化と傾向的にはほぼ一致している。

また図に示されているように、シールド板による
影響は、放射光強度を減少させるのみならず、波長

とシールド板間隔の関係によっては、放射光強度を増加させることがわかった。

さらに、(2)式から得られる抑止された放射光のスペクトルと Schwinger[6] により導かれた自由空間での放射光の理論スペクトルの差をとり、数値積分すると零になることが解った。これは電子がインコヒーレントな放射光として失う全エネルギーは境界条件の有無によって変化しないということを示している。しかし、(1)式に示されるように、角周波数 $\omega (=n\omega_0)$ のコヒーレント放射光強度はバンチ形状因子 f_n に依存するため、 $f_n \sim 1$ となる角周波数領域全体にわたって、インコヒーレントな放射光強度が抑止されている場合には、電子がコヒーレント放射光として失う全エネルギーは大きく減じられることになる。



第2図 回折格子型分光器を用いて得られたコヒーレント放射光強度とシールド板間隔の関係。(a), (b), (c), (d), (e)は各々、波長 1.6, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0mm のときの強度変化。放射光強度は間隔 80mm のときの強度で規格化されている。実線が測定値を、点線が理論値を示している。

5. 本研究のまとめ

本研究により以下の事が明らかになった。

- 1) 導体境界の変化によりコヒーレント放射光の強度は増減することが確認された。
- 2) この強度変化はNodvick と Saxon の理論により導かれる結果と定性的に一致している。
- 3) インコヒーレントな放射光による全エネルギー損失は境界条件により変化しない。

この抑止効果の研究は、リニア・コライダーのバンチ圧縮アーク部でのコヒーレントな放射光損失の抑止や、長波長領域の光源利用を目的とする大型の円形加速器の偏向部のダクト形状の設計に有益であると考えられる。

参考文献

- [1] J.S.Nodvick and D.S.Saxon, Phys. Rev. **96**, 180 (1954).
- [2] T.Nakazato, M.Oyamada, N.Niimura, S.Urasawa, O.Konno, A.Kagaya, R.Kato, T.Kamiyama, Y.Torizuka, T.Namba, Y.Kondo, Y.Shibata, K.Ishi, T.Ohsaka and M.Ikezawa, Phys. Rev. Lett. **63**, 1245 (1989).
- [3] Y.Shibata, K.Ishi, T.Ohsaka, H.Mishiro, T.Takahashi, M.Ikezawa, Y.Kondo, T.Nakazato, M.Oyamada, N.Niimura, S.Urasawa, R.Kato and Y.Torizuka, Nucl. Instr. & Meth. **A301** 161 (1991).
- [4] K.Ishi, Y.Shibata, T.Takahashi, H.Mishiro, T.Ohsaka, M.Ikezawa, Y.Kondo, T.Nakazato, S.Urasawa, N.Niimura, R.Kato, Y.Shibasaki and M.Oyamada, Phys. Rev. **A43** 5597 (1991).
- [5] R.Kato, M.Oyamada, S.Urasawa, T.Nakazato, S.Niwano, Y.Umetsu, T.Yamakawa, M.Ikezawa, Y.Shibata, K.Ishi, T.Tsutaya, T.Takahashi and T.Kanai, Proc. of the 17th Linear Accelerator Meeting, 297 (1992).
- [6] J.Schwinger, Phys. Rev. **75**, 1912 (1949).