

## WAKE FIELD ANALYSIS FOR LOW GRADIENT TWRR ACCELERATOR STRUCTURE IN PNC

Tōyama S. and Takahashi H.\*

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation(PNC)

4002 Narita, Oarai-machi, Ibaraki-ken 311-13 Japan

\*Brookhaven National Laboratory,

Upton NY 11973 USA

### ABSTRACT

A high power CW electron linac has been developed so as to accelerate 10 MeV-100 mA beam, and its injector section has been completed in 1995 at PNC. It is essential for higher beam acceleration to reduce the beam instability caused by the space charge effect and the beam-cavity interaction. Both are important for PNC linac, because an accelerator with a high beam loading generally has a low accelerating gradient. Especially, the beam-cavity interaction is dominant in a high energy acceleration. In this paper, the beam induced fields for the regular section with PNC accelerator structure are examined by means of a numerical wake field analysis. The dependence of the parasitic fields are estimated with a single bunch beam. The BBU start current is discussed in the relationship of the wake potential to the space charge parameter presented by the envelope equation.

### 動燃低電界TWRR加速構造のウェイクフィールド解析

#### 1. はじめに

近年の電子ライナックの動向は、高電荷の単バンチ加速に加えて、アメリカを中心にFEL等で大電流CWの加速器の開発が行われており、平均電流の高いRFライナックが出現しつつある。動燃では、核変換等原子力分野への応用の要素開発として、10 MeV-100 mAの大強度CW電子線形加速器の開発を行っている。電子銃、チョッパ、プリバンチャ、バンチャ、及び第1加速管からなる3.5MeV入射部が1995年に完成し、施設検査の後、入射部の機能試験が行われている<sup>1)</sup>。10 MeVライナックとしての完成は1997年を予定している。本加速器の特徴は、構造的には進行波還流型加速管(TWRR)を採用したこと、特性としては減衰が小さい低電界型であることが挙げられる。前者は低ランニングコストや保守容易性のためであり、後者は大電流の効率的加速を目的とする。電子ライナックのビーム不安定性は一般には、100 keV程度までの低エネルギー部では空間荷電効果、高エネルギー部では現在ウェイクフィールドによるとされている。低電界加速構造では、縦方向の収束性が弱くなり、将来型のリニアコライダの様にマイクロウェーブ不安定性やビーム分解能の劣化を起しやすい。更に横方向の外乱では、加速構造を長く通過することによるビームエミッタンスの

劣化やビーム消失を生じる可能性がある。光源として大強度ライナックを設計する際にはこれらのビーム品質は今後重要になると考えられる。

本発表では、以上に述べた現象の中でも重要な高エネルギー部の加速で重要なウェイクフィールドによるビーム発散を、動燃で設計された加速構造のレギュラ加速管の形状で数値的に評価した。このために ABCI<sup>2)</sup> 及びMAFIA T3<sup>3)</sup> コードを用いて、縦方向及び横方向ウェイクフィールドのビームバンチ長依存性や空洞依存性を解析した。更に、得られた電磁界の強度をビームの空間荷電パラメータを基にビーム軌道を包絡線方程式で比較して発散の様子を調べた。以上の検討は単バンチが加速構造を通過した際に受ける正味の変化を示し、与えられたビーム品質での加速電流の空洞励起を評価するもので、バンチ-バンチ相互作用は含まれていない。

#### 2. 計算

縦方向及び横方向のウェイクフィールド $W$ は

$$W_{\parallel} = -\frac{1}{Q} \int dz E_z(r, \theta, z, (z+s)/c),$$

$$W_{\perp} = -\frac{1}{Q} \int dz (E_{\perp} + c \times B)(r, \theta, z, (z+s)/c)$$

で表わされる。ここで、 $Q$ 、 $s$  はバンチの電荷、バ

ンチ座標である。またビームが受けるロスファクタ  $k_0$  及び励起電圧  $\Delta V$  は、

$$k_{0\parallel} = -\frac{1}{Q} \int ds \lambda(s) V_z(s),$$

$$k_{0\perp} = -\frac{1}{Q^2} \int ds \lambda(s) V_{\perp}(s),$$

$$\Delta V = 2Q k_{\parallel}$$

で表される。ここで  $\lambda$ 、 $V$  は電荷分布及びウエイク電圧であり、 $\parallel$ 、 $\perp$  は縦、横方向成分を表わす。

計算に使用されたビームと加速管のパラメータを表1に示す。加速管の典型的な寸法は、 $a = 50$ 、 $b = 90$ 、 $t = 8$  及び  $D = 24$  mm であり、実機とはほぼ等しい。バンチ形状は、 $z$  軸上にガウス分布した針金状とした。計算では2つのコードで単極( $m=0$ )、双極( $m=1$ )の両成分を計算した。

表1 ウエイクフィールド計算のパラメータ

アイリス( $a$ )	90 (mm)
ボア( $b$ )	50 (mm)
ディスク厚( $t$ )	8 (mm)
周期長( $D$ )	24 ~ 64 (mm)
単バンチ電荷( $Q$ )	80 (pC)
バンチ長	0.3 ~ 200 (mm)
ビーム変位	0 ~ 30 (mm)

### 3. 計算の結果

#### 3.1 単空洞

2.5 mmバンチ長でのウエイクフィールドを図1に示す。最大ウエイクフィールドのバンチ長依存性を図2に示す。単バンチでの縦方向誘導電圧は50V程度で、1.3MV加速RF内の位相角5度バンチの分

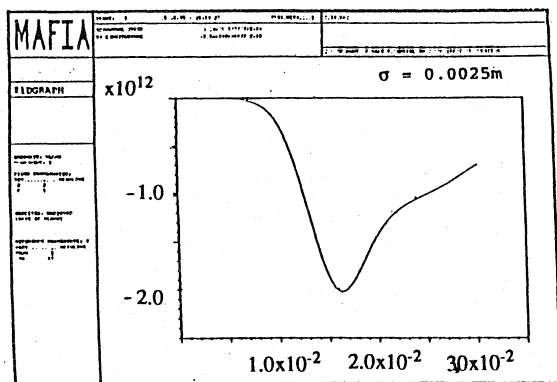


図1 単空洞でのウエイク電圧

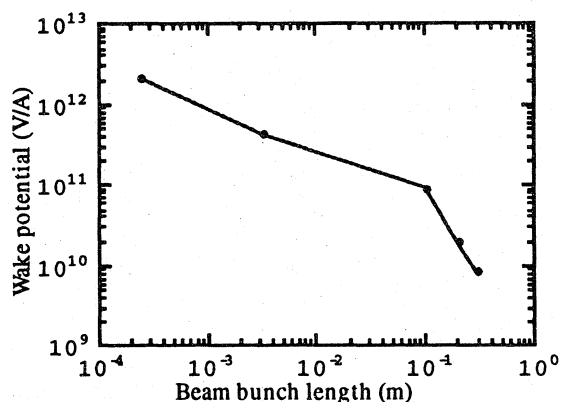


図2 ウエイク電圧のバンチ長依存性

散5kVに較べ十分に小さく縦方向の不安定性はビーム電流が現在の100倍程度まではほぼ問題は無い。

MAFIA によるビームの軸ずれに対するロスファクタと励起電圧の計算結果を表2に示す。1cm 変位のバンチ長0.3 cmビームに生ずる横方向励起電圧はおよそ200V であり、ビームパイプ内で換算し6 kV/m である。この電界強度は相対論的粒子の場合、SLCで観測されている値や、SSCの設計値に較べて十分低い。同様にエネルギー分散も変位が1cm 以下では殆ど無視出来、実際にはより細いビームを形成することになるので、現状のエミッタンスで単空洞の問題は生じないと考えられる。

表2 空洞励起の単バンチの変位依存性

変位(cm)	ロスファクタ(V)*	励起電圧(V)**
$\sigma = 1$ cm		
0.5	-17.4	112.0
1.0	-61.0	10.0
2.0	-243.8	420.0
3.0	-548.4	630.0
$\sigma = 0.3$ cm		
0.5	-56.8	89.9
1.0	-199.9	168.8
2.0	-798.0	338.9
3.0	-1792.5	511.0

\* 縦方向、単バンチ規格化。 \*\* 横方向。

#### 3.2 加速管

単空洞の重ね合わせであるPNC 加速管に対し ABCIで計算したウエイクフィールドと結合インピーダンスの例を図3に示す。使用したパラメータ

は表1の単空洞を15連結したものである。図3の横方向結合インピーダンススペクトルに見られる様に、1.9 GHz に基本波の強いピークが見られる。結合空洞ではアイリス径変化により周波数分布が変化するが、今回の解析では強度変化は少ない。還流型加速構造の共鳴は1.25GHzの整数倍であるので、ビームバンチ長が3.3 から10 cm の際は、その領域に共鳴が無いのでビームを偏向させる強い共鳴は起こらないと予想される。偏向電圧はABCIにより単バンチで-2.2 kV でこれは通常のコライダから得られる100 kV に較べて小さいことが分かる。

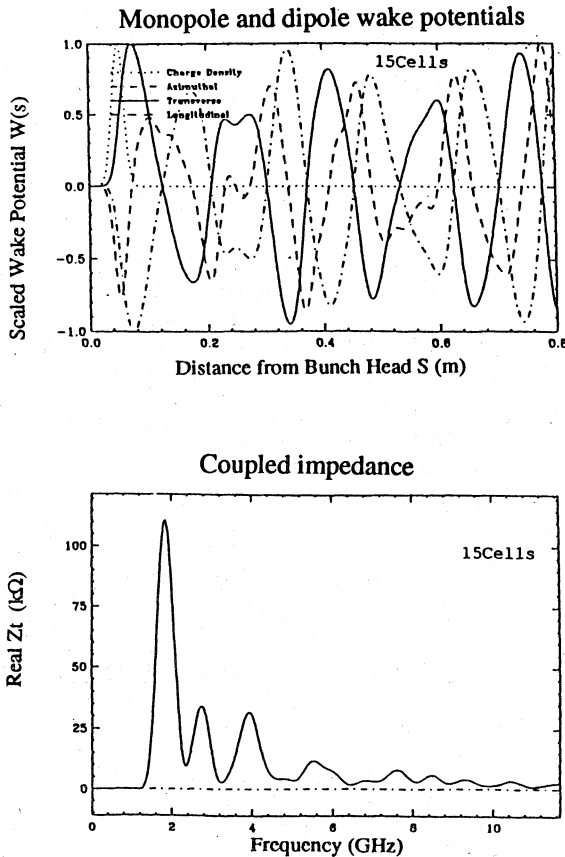


図3 PNC加速構造のウエイクフィールド及び結合インピーダンス

以上の様な加速構造内の電磁界の効果はビーム電荷から生ずる空間荷電効果と同様な働きがある。よって、包絡線方程式の空間荷電パラメータを比較することにより、ビームの発散を調べることが可能である。空間荷電効果パラメータ $\xi$ <sup>4)</sup>は電子ビームの場合は、

$$\xi = \frac{4e^2 r_0 \lambda(s)}{\beta^2 \gamma^2}$$

で表わされ、ここで $e$ 、 $r_0$ 、 $\lambda(s)$ は夫々素電荷、古典電子半径、バンチ密度で、 $\beta$ 、 $\gamma$ は速度、エネルギー因子である。これは非加速ビームに対する式で

ある。各加速器に対する $\xi$ を参考にし、規格化されたビームエンベロープは数値的に求められる。今回は簡単な数値計算には安全評価が出来る円筒荷電分布を仮定した。PNC 加速器の場合電流が0.1 A なので、 $\xi$ は $10^{-12}$ 程度になり、これは図5に示す様に加速管長のドリフト空間でビームがおおよそ1.5 倍に膨れるのに $\xi$ が $10^{-10}$ であることより、現在の50倍程度の5A 程度まで加速出来ることを示す。ビームの膨れは10 MeV では非常に小さい。

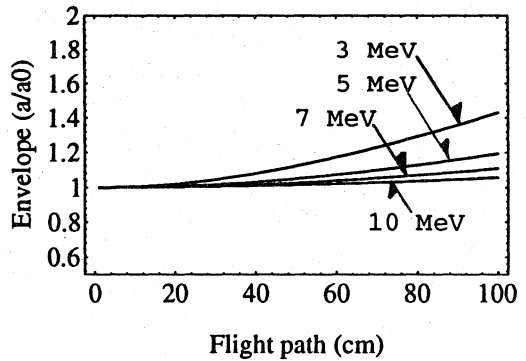


図5 規格化ビームエンベロープ

#### 4. まとめ

加速構造内の誘導電磁界計算結果により、PNC 加速器の運転では、縦横成分のウエイクフィールドは低電界加速管のRFバケットで大きな外乱にはならない。TWRR に対する寄生電磁界の共鳴は今のところ見られない。加速電流を増加する際に、ビームの膨れの形で現われるビームの運動から、凡そ5A までビームが加速出来る。変位とバンチ長が1cm 以内のビームでは縦成分の寄与が大きいのでマイクロウエーブ不安定性が初めに生ずる可能性があるのでシンクロトロン運動に注意が必要である。

実際のビーム加速では、縮退的BBU に対応する、誘導電磁界と後続ビームの相互作用や、単バンチ内のヘッド-テイル効果の評価によって、より現実的なBBU 開始電流を予想出来る。これについては、今回得られたデータを基に解析を進め実験と比較する予定である。

#### 参考文献

- 1) e.g. 江本等; "STATUS OF PNC HIGH POWER CW ELECTRON LINAC", Proc. of this meeting
- 2) Y.H.Chin, "User's guide for ABCI Version 8.8", LBL-35258 (1994)
- 3) MAFIA group, "MAFIA(\_320) The ECAD System", (1994)
- 4) A. W. Chao, "Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators", John Wiley & Sons, Inc., (1993)