

陽電子捕獲部用 S バンド大口径加速管の検討

紙谷 琢哉¹

高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

陽電子ビーム生成部において陽電子強度を大幅に向上させる一つのアイデアとして、ディスク内径の大きい L バンド加速管を使用して横方向アクセプタンスを拡げるやりかたが一般的に提唱されている^[1]。

この論文では、別のアプローチとして S バンド加速管でディスク内径を大きくして、L バンド加速管並の開口径と加速電界を得る方法について検討した。

ディスク内径 (2a 寸法) を現在の約 2 倍の 40mm にしても高周波パワー還流型構造の併用により、12 MV/m 程度の加速電界を出せることがわかった。

1. はじめに

陽電子ビーム生成の一般的なスキームは以下のようなものである。まずタングステンなどでできた金属標的を高エネルギー (数百 MeV~数十 GeV) の電子ビームで照射する。標的内では、電子が電磁シャワーを起こして二次粒子として陽電子が生成される。この陽電子は標的中での多重散乱の影響で大きな角度広がりを持っているので、収束系の横方向アクセプタンスに整合するように、非常に強く短いソレノイド磁場で角度広がりが小さくなるように変換する。この陽電子ビームは大きなエネルギー広がりを持っているため、下流の Q マグネットによる収束系に引き継げるようなエネルギーになるまでは、エネルギーアクセプタンスの大きい長いソレノイド磁場によって収束する。

将来、電子陽電子衝突型の高ルミノシティ加速器やリニアコライダーなどを建設する際には、現在よりも格段に大きな強度の陽電子ビームが必要になる。これを実現するための一つの方法は、一次電子の粒子数を増やすことであるが、ある本質的な限界に直面する。それは、標的金属が一次電子ビーム照射によりパルス的に加熱されることが繰り返されることから起きる熱疲労破壊である。これが起きる限界は、標的内で損失されるビームパワーの体積密度で決まることが SLAC でのビームテストにより分かっている^[2]。本質的なのは、一次電子の粒子数ではなく、ビームパワーなので、粒子数を減らして代わりにビームエネルギーを上げることで解決にならない。ビームパワーの体積密度を下げるには、一次電子ビームの入射スポットサイズを大きく拡げるこ

とが有効であるが、収束系で捕獲される陽電子の割合が減ってくるという問題がある。

このように一次電子側の増強に限界があるために、必然的に、陽電子の捕獲部の効率を上げて、陽電子強度を強くすることを考えなければならない。捕獲部のソレノイド収束系の横方向位相空間アクセプタ

ンスは、 $U = \frac{1}{2} e B_s a^2$ と表される。ここで、 B_s はソレノイド磁場の強さであり、 a は加速管やビームダクトの開口半径である。このアクセプタンスを大きくしたいと思ったとき、ソレノイド磁場値をこれ以上上げるのは困難であるが、開口半径を大きくすることは比較的容易に実現できる。また、アクセプタンスは a の 2 乗に比例するために効果が大きい。

NLC, CLIC などの陽電子源の設計案^[1]では、この陽電子捕獲部の加速管に L バンド構造を用いることを提唱している。これは、L バンド加速管 (たとえば 1.5 GHz 帯) では、高い加速電界 (20 MV/m 以上) と大きいディスク内径 (典型的には $2a = 40\text{mm}$) を実現することが比較的無理なく可能であるためである。L バンド加速管では、同じバンチ長に対する位相広がりが小さくなるために、縦方向のアクセプタンスの点でも有利になる。

しかし、より現実的な問題として、KEK 電子陽電子ライナックの増強を想定すると、既存の S バンドの高周波源の設備をなるべく有効利用したい。そこで S バンド加速管でディスク内径を大幅に大きくする可能性について検討する。基本的なアイデアは、ディスク内径が大きくなると加速電界は下がるが高周波パワーの減衰も小さいので、これを入口側に還流してパワーを積み上げることによって加速電界をそれなりの強さまで上げられないか、ということである。還流により実効的パワーを高くすることは、各種コンポーネントのハイパワー試験で使われるレゾナントリングなどで一般的に使われるテクニックであり、また核燃料サイクル機構の電子ライナックでは還流型加速管が実際の運転に使われている^[3]。

現在、KEK ライナックで使用されている加速管はのスペック^[4]は、S バンド 2856MHz、 $2\pi/3$ モード準定電界進行波型で、大多数は 54 セル構造で $2a=19.7\sim 24.9\text{mm}$ 、陽電子ターゲット直後の 2 本のみ 27 セル構造で $2a=27.0\sim 25.0\text{mm}$ であり、典型的なシャントインピーダンスは、 $58\text{M}\Omega/\text{m}$ である。

¹ E-mail: takuya.kamitani@kek.jp

2. 加速電界の算出

2.1 算出式

進行波加速管の各セルに誘起される電界強度を求めるために、加速管パラメータ間の以下のような関係式を用いる^[5]。単位長さ当りに消費される高周波パワー dP/dz は次のような式で与えられる。

$$\frac{dP}{dz} = \omega \frac{P}{v_g Q} \quad (式1)$$

ここで、 P は高周波のパワー、 ω は周波数 ($2\pi \times 2856\text{MHz}$)、 Q は加速管の Q 値、 v_g は群速度である。加速管の電界強度 E_0 は、単位長さ当りのシャントインピーダンス r_0 を用いて、

$$E_0 = \sqrt{r_0 \times \frac{dP}{dz}} = \sqrt{\omega \frac{r_0 P}{v_g Q}} \quad (式2)$$

と表すことができる。一般的な定電界型加速管では、各セルで電界強度が一定となるようにディスク内径を変えていくが、今回検討する加速管では、ディスク内径を一定に保ちたいので、定インピーダンス型となり、 r_0 、 v_g 、 Q は定数となる。各セルで異なるのは、パワー P のみである。

N 番目セルでのパワーは式1できまる減衰率より、

$$P_N = P_{in} \left(1 - \frac{\omega}{v_g Q} dz \right)^{N-1} \quad (式3)$$

で与えられる。ここで、 P_{in} は入力高周波パワーであり、10 MW と仮定している。また dz は、1セルの長さ (34.99mm) である。これと式2を用いると、各セルでの電界強度が求められる。

2.2 SUPERFISH による計算

加速管の特性パラメータの算出には、SUPERFISH version 4.12 を用いた。ディスク内径 $2a$ を 20~45mm まで変えたときの Q 、 v_g 、 r_0 の変化を図1、2、3にそれぞれ示す。各 $2a$ 寸法値に対して、共鳴周波数が 2856MHz になるように $2b$ 寸法値は調整してある。計算は 1.5 セル又は 6 セルのモデルで行い、 v_g は空間高調波モードの分散曲線から求めた。

$2a = 20\text{mm}$ は、現在 KEK 電子陽電子ライナックで使用されている S バンド加速管の典型的な値である。これを、例えば L バンド加速管なみの $2a = 40\text{mm}$ に広げたときに Q 値はあまり変わらないが、群速度が 8 倍近く大きくなり、シャントインピーダンスは約半分になることがわかる。

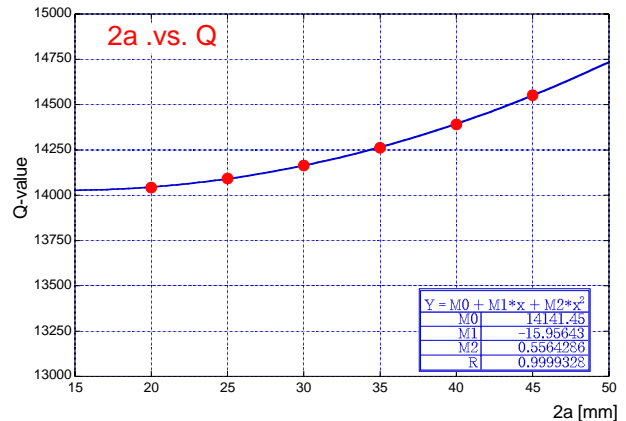


図1：2a - Q 曲線

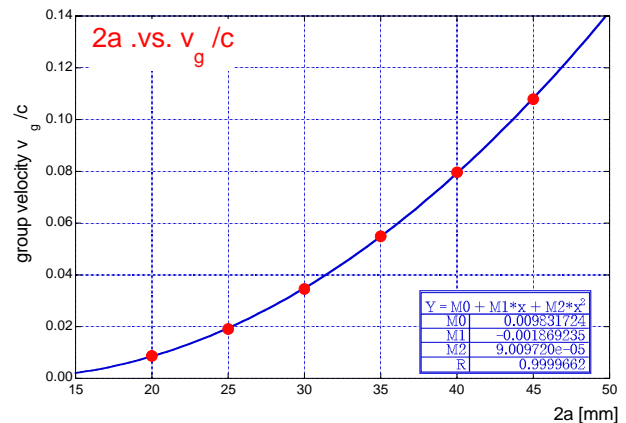


図2：2a - v_g 曲線

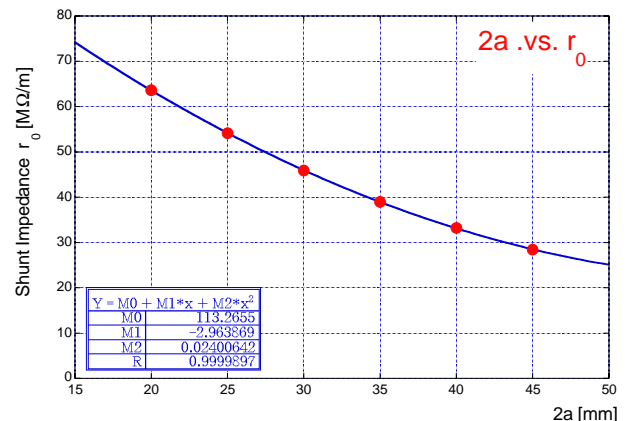


図3：2a - r_0 曲線

2.3 還流型加速管

式2において $P = P_{in}$ として、第1セルの電界強度を求め、その $2a$ 寸法依存性を示したのが図4である。 $2a = 40\text{mm}$ になると、群速度の高さとシャントインピーダンスの低さを反映して、加速電界は $2a = 20\text{mm}$ のときの4分の1に下がってしまう。

しかし、群速度が非常に高いということは、高周波パワーが加速管全長を通り抜けたときの減衰が小さいということであり、全入力パワーの 10%程度し

か減らない（通常 50%）。また、同時に充填時間が短い（80nsec）ということであり（通常 500nsec）、短い時間のうちに大部分の高周波パワーが出口側カップラーから出てくるといことである。そこで、これを導波管を通して還流させ、方向性結合器でクライストロンからの入力パワーと合流させて入口カップラー側に入れることを考える。導波管を通るときの減衰は小さい（4m 長で 2%）ことと、導波管部での群速度は加速管内に比べて大きいので、加速セル内の高周波パワーが減衰する前に効率良く還流パワーを積み上げていけると思われる。

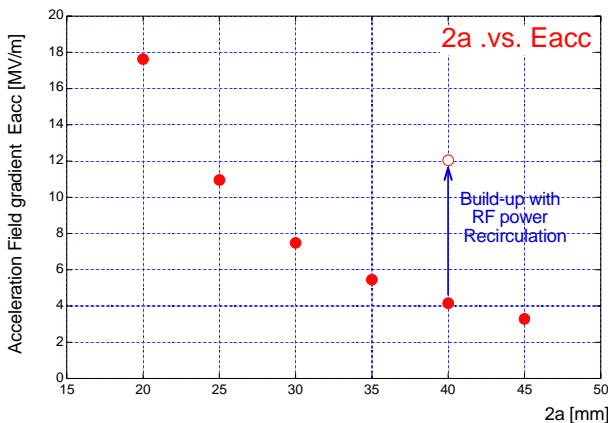


図 4：2a - E₀ 曲線

式 3 における計算で、還流してくるパワーの寄与もたし算して、パワー積み上げにより電界強度が上昇する様子を示したものが図 5 である。当初、4MV/m 程度であった電界強度が、2μsec 間の積み上げにより 12MV/m まで上がっていくのがわかる。この結果を先の図 4 中にも白丸の点で示したが、パワー還流を行うことにより、大きなディスク内径の加速管でも通常の S バンド加速管と遜色ない程度の加速電界を達成できることがわかる。

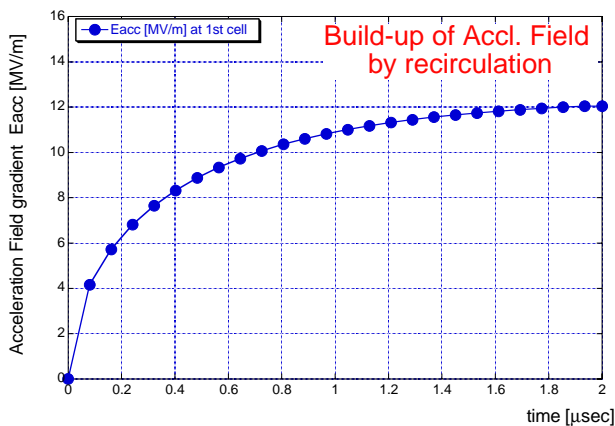


図 5：高周波パワー積み上げによる電界強度上昇

また一般的に定インピーダンス型加速管では下流側にいくほど電界強度が下がるが、このようにディスク内径の大きい加速管にすると減衰率が低いので、

最上流側と最下流側のセルの電界強度を比較しても 5% しか変わらず、KEK ライナックで使用されている通常の準定電界型とほぼ同程度の電界強度の一様性を達成している。（図 6）

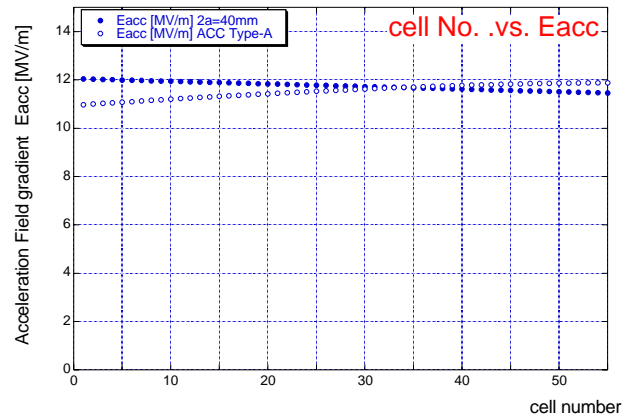


図 6：加速管内各セルでの電界強度分布

3. まとめと今後の課題

陽電子捕獲部用加速管について、横方向位相空間アクセプタンスを向上させるために、通常の S バンド加速管の代わりにディスク内径を大幅に大きくした加速管を使用することを検討した。ディスク内径を現在の 2 倍大きくすると、そのままでは加速電界強度が 4 分の 1 に下がってしまうが、パワー減衰率が小さく充填時間が短い特性を活かして、高周波パワーを入口側に還流させてパワーの積み上げを行うことにより通常の S バンド加速管と遜色ない 12MV/m の加速電界を達成できることがわかった。また、定インピーダンス型であるにもかかわらず、5% 程度の電界強度一様性を持つこともわかった。

今後、表面電界強度などの問題がないかなどについて、さらに詳細な検討が必要である。

謝辞

KEK の山口誠哉氏と三菱重工業名古屋航空宇宙システム製作所の五十嵐康仁氏からは、有益な助言を多くいただきました。感謝いたします。

参考文献

- [1] The NLC Design group, "Zeroth-order design report for the Next Linear Collider", SLAC report 474, May 1996.
T. Kamitani, L. Rinolfi, "Positron production for CLIC", CLIC Note 465, 2000
- [2] S. Ecklund, "Positron target material tests", SLAC-CN-128, 1981.
- [3] H. Oshita, et al., "大強度 CW 電子線形加速器用加速管の大電力試験", ライナック研究会, 1993, KEK
- [4] I. Sato, et al., "放射光入射器増強計画", KEK Report 95-18, March, 1996, p144
- [5] Y. Igarashi, et al., "KEKB 入射器増強用加速ユニットの高周波特性", KEK Report 98-12, January, 1999, p129