

[13P-03]

High Gradient Air Core Cavity for Energy Compression of Long Bunch

Y. Iwashita^{*)}

Accelerator Laboratory, NSRF, Inst. For Chem. Res. Kyoto University
Gokanosho, Uji, Kyoto, JAPAN 611-0011

Abstrat

In order to achieve a smaller energy spread for secondary particles such as muons, so called phase rotation scheme is proposed: the energy spread is compressed by RF electric field after an appropriate length drift. Although longer drift time makes the final energy spread smaller, it requires very low RF frequency a few MHz. Because the secondary particles have short life time, high gradient electric field has to be generated. Cavities without ferro-magnetic load are described.

長いバンチのエネルギー圧縮を行うための高勾配空芯空洞

1. はじめに

ミュオンなどの2次、3次粒子のエネルギー拡がりを揃えるために、短バンチで発生させた粒子のエネルギー差による走行時間の広がりを利用してエネルギー圧縮を行うことが検討されている。最終エネルギー幅を減らすためには走行時間を大きくとる必要があるが、RFとしては数MHzという極めて低い周波数を要求される。ミュオンには寿命があるため、なるべく短時間でこの操作を完了する必要もあるため、高勾配であることも要求される。磁性体を用いれば共振周波数を下げるのは容易であるが、高勾配性と多少相反するところがあるため、そのような限界のない空芯の空洞で長いバンチのエネルギー圧縮を行うことを検討した。

2. 電圧波形

ミュオンは短パルスの高エネルギー陽子を標的に当てた際に大量に発生するパイオンの崩壊により得られるが、ここでは簡単に始めからミュオンが発生したとする。20 MeV ± 10 MeVの範囲のミュオンバンチの標的から30 m後方の時間構造を図1に示す。図中、太線がビームの構造であり、これを6.5 MHzと13 MHzの正弦波でフィットしてある。これによると、10 MVの振幅の6.5 MHz成分と、その約四分の一の振幅の13 MHz成分を重ね合わせることにより非線形性まで含めたエネルギー圧縮が可能なが判る。実際には陽子ビームのバンチ幅には幅があり、また、パイオンがミュオンに崩壊する際に運動量が広がり、時間構造は多少悪くなる。

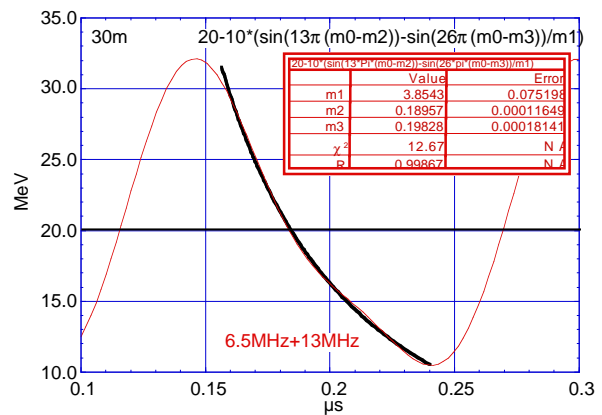


図1 30 m後方のミュオンバンチの時間構造

3. RF 空洞

高勾配を得るために磁性体を用いないとすると、単純な円筒空洞の直径はその波長程度となり、6.5 MHzでは35 mにもなる。さすがにこれでは大きすぎるので、何らかの方法で小型化することが必要になる。空洞を図2の様に等価回路で記述すると、空洞の共振時のインピーダンス Z_r は

$$Z_r = Q\omega_0 L = Q\omega_0 / C$$

となる。ここで $Q = \omega L / r$ である。Lは空洞のサイズでほぼ決まり、Cは電極の間の面積と距離できまるので、シャントインピーダンスを高くしながらサイズを減らすことは難しい。さらに、電極間の放電を避けるために、電極間隙あたりの電圧を一定にすると間隔を広げなければならない、Cを

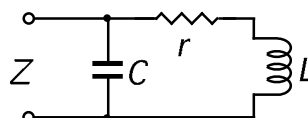


図2 空洞の等価回路

*) Y. Iwashita, 0774-38-3282, iwashita@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

大きくするのは面積を増やす方向になる。実際、6.5 MHzでのキルパトリック値は4.8 MV/mなので、後述のように1 MV/mを実現しようとすると、放電限界から、電極間距離は空洞長の1/5以上はないと厳しい。

CERNの反陽子リングでは200 μsの短時間であるが、9.5 MHzで直径2.3 m、長さ2 mの空洞を2台使いそれぞれ0.5 MV、計1 MV発生させていることが報告されている[1]。シャントインピーダンスは約150 kΩ/mである。エネルギー圧縮されたミュオンがカウンター実験に供されることを考えると、動作モードはほぼCWとなり、シャントインピーダンスはできるだけ高くないと消費電力量が膨大になる。ミュオンの寿命や、空洞の建設コストを考えると、全長10~20 m程度にしたいため、1 MΩ/mはないと、10 MV発生させるのに10 MW程度の電力が必要になる。これらを総合して空洞の形状を決めると、図3の様になる。単体空洞の長さは3 mで、6.5 MHzでは直径が9 m以上になり、13 MHzで4.5 m程度が必要となる。この形状ではドリフトチューブ中にスペースがあり、集束用の超伝導ソレノイドコイルなどを入れることができる。表に空洞のパラメーターを示す。ここでは平均電場勾配が1 MV/mの時に最大表面電界がキルパトリック値を大幅に越えないように電極間距離などを決めたので、消費電力が多めになっている。直径9 mの場合で、3 m長の空洞を3台使って10 MW程度必要となる。13 MHzの方は電圧が約1/4で、電力は1割以下となり、ここでの議論では問題にはならない。発熱面密度はドリフトチューブ上で最大となり、26 W/cm²となる。この熱除去が困難な場合や、高周波電力を減らしたい場合は平均電場勾配を半分にして空洞の数を倍に

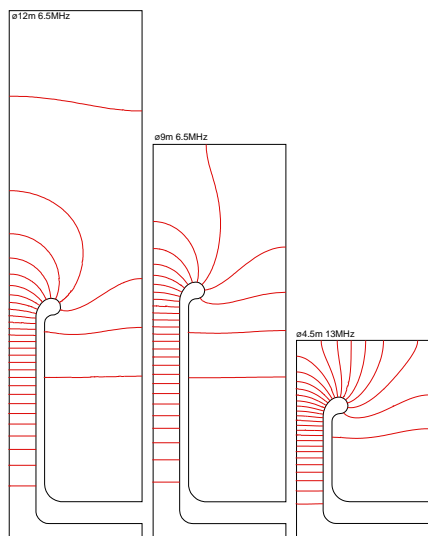


図3 空洞の形状 左二つは6.5MHz 右は13MHz

	Units	φ12m	φ9m	φ4.5m
Frequency	MHz	6.5	6.5	13
Shunt Impedance	MΩ/m	1.2	0.9	1.5
Q		32000	28000	32000
Voltage	MV	3	3	3
Power	MW	2.5	3.1	2
Stored Energy	kJ	2.0	2.3	0.8
E _{max}	MV/m	6.4	6.4	6.7
H _{max}	kA/m	23	27	19
P _{max}	MW/m ²	0.8	1.2	0.8
τ	ms	1.6	1.4	0.8
Diameter	m	12	9	4.5

表1 空洞のパラメーター

すれば、空洞あたりの電力を1/4にでき、全体の電力を半分にする。このあたりの按配は空洞コストとアンプコストの評価に精度が必要で、今後の進展によるところが大きい。

上記6.5 MHz空洞で一台あたり1.5 MV (0.5 MV/m) 発生させ、計6台使い、キックとドリフトのみの簡単なシミュレーションを行った(図4参照)。横軸はターゲット発生時点からの経過時間で、各空洞の出口での分布を示している。完全に最適化できていないにも関わらずほぼ5%幅に入っている。直径9 mで考えると、13 MHz空洞一台で1.4 MWとして、総電力6 MW程度となり、アンプの効率などを含めると、10 MW程度と試算される。

4. PRISM/L

現在PRISM (Phase Rotated Intensified Slow Muons) としてFFAGを使って20 ± 10 MeVのミュオンの位相回転を行う研究が進められているが、上記のスキームはLinac版のPRISM/Lとして位置づけられる。計画としては段階を踏むために次のように3段階程度に分けて考えることを検討している。

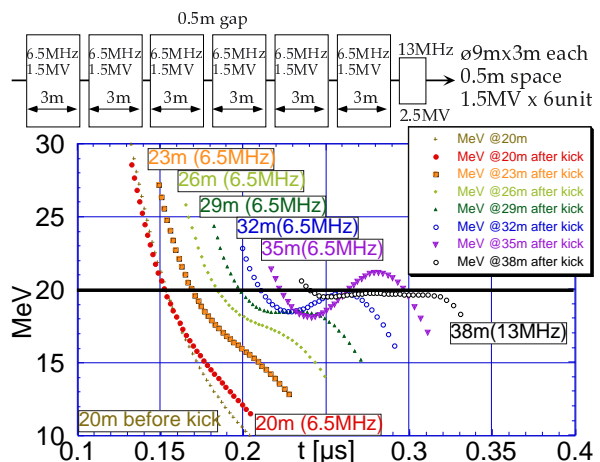


図4 6 + 1台の空洞によるエネルギー圧縮

1) μ PRISM/L

エネルギー幅を半分に減らして、20 MeV \pm 5 MeVとし、13 MHz 空胴一台にする。また、一次粒子として 12GeVPS の γ 遷移時での fast extraction による短パルスビームを用いる。パルスオペレーションになるので、ミュオンのピーク強度は高くなるが、JHF の強度と比較すると桁外れでは無かろう。RF としては繰り返し 0.3 Hz、ピークパワー 2.5 MW、パルス幅 1 ms 程度になる。デューティーは 10^{-3} 以下。

2) miniPRISM/L

上記空胴の CW 運転化をめざす。空胴の冷却、アンプの強化などの開発を行う。12GeVPS の遅い取り出しを用い、周回周波数約 900 KHz のビームを用いる。出力ビームの時間幅がどこまで狭くできるかはまだ不明。デューティは 30% 程度。

3) フルスベック PRISM/L

6.5 MHz 空胴を 6 台、13 MHz 空胴を 1 台ないし、2 台用いる。デューティーは 30%。JHF 50 GeV リングの周回周波数 250 kHz 程度を想定。エネルギー幅は 20 ± 10 MeV。

5. Comb Pulse Energy Compression

上記のように低い周波数で高電界、高効率を得るには巨大な空胴が必要となる。実際にはエネルギー圧縮空胴の前にはターゲットから出てくるパイオンの捕獲と、ミュオンへの崩壊走路が必要で、ここの効率が最終的に得られるミュオンの数を決める。もし、ファクター 3 程度の減少をエネルギー圧縮空胴で許すことが可能なら、図 5 に示すような波形の利用が考えられる。これは上記 6.5 MHz + 13 MHz 波形を 100 MHz + 300 MHz で振幅変調をかけたもので、次の式で表現できる。

$$\left(\sin(\omega t - \phi_1) - \frac{1}{4} \sin(2\omega t - \phi_2) \right) \left(\cos \omega_c t - \frac{1}{6} \cos 3\omega_c t \right)$$

ここで、 $\omega = 13 \pi$ [M rad/s]、 $\omega_c = 200 \pi$ [M rad/s] である。搬送波にも高調波を混ぜて方形波に近づけている。これは三角関数の積和変換の公式を使うと 8 種類の周波数成分の重ね合わせ表現できる。13 MHz 空胴は電圧も $1/4$ と小さいのでそのまま作るとすると、6.5 MHz のみで搬送波に変調をかけて次のように表現できる。

$$\begin{aligned} & \sin(\omega t - \phi_1) \left(\cos \omega_c t - \frac{1}{6} \cos 3\omega_c t \right) \\ &= \frac{1}{12} (-\sin(\omega t - 3\omega_c t - \phi_1) + 6 \sin(\omega t - \omega_c t - \phi_1) \\ & \quad + 6 \sin(\omega t + \omega_c t - \phi_1) - \sin(\omega t + 3\omega_c t - \phi_1)) \end{aligned}$$

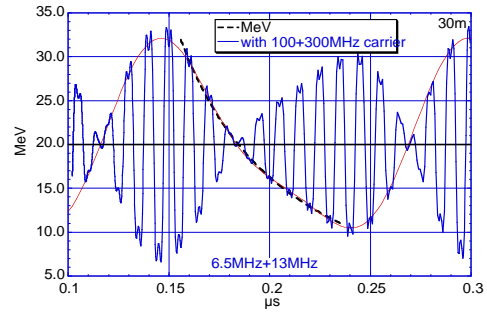


図 5 振幅変調によるエネルギー圧縮波形

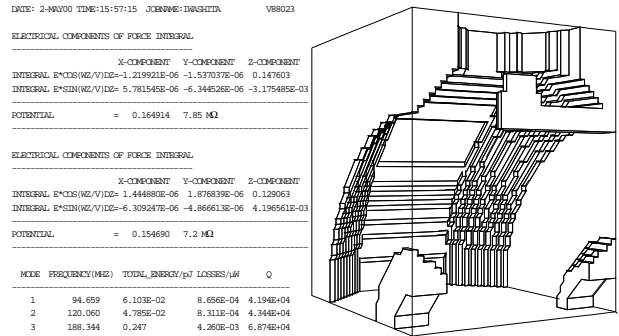


図 6 Double Frequency Cavity

これだと四つの成分の和で実現できるので、13 MHz 空胴と合わせても 5 種類の周波数ですむ。この方法は波の干渉を利用しているので、それぞれの空胴が有限の長さを持ち、粒子が感じるべき位相がずれすぎるとうまくいかない。このため、単一空胴で $100 \text{ MHz} \pm 6.5 \text{ MHz}$ の共振を持った図 6 の様な空胴の利用が考えられる。図の例ではまだ周波数の追い込みが完全ではないが周波数が高いため、どちらの周波数でも $7 \text{ M}\Omega$ 程度のシャントインピーダンスが得られそうで、高電界や低コストも期待できる。得られたビームはすでにバンチ化されているので、後に加速する場合に有利である。

落としてしまう粒子数を減らすために崩壊走路の中間点に図 7 の様な $2\omega_c$ の電圧波形でプリバンチしてやれば収集効率を上げることができる。これは 5 つの周波数成分で合成する事ができる。

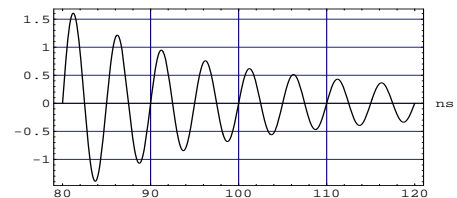


図 7 Modulated Buncher Waveform

6. 参考文献

- [1] J. Boucheron, R. Garoby, D. Grier, M. Paoluzzi, F. Pedersen, "A 1 MV 9.5 MHz SYSTEM FOR THE CERN ANTIPROTON COLLECTOR", Proc. of EPAC90, p.958