

L I N A C B A S E D P R I S M

岩下芳久¹、森田昭夫

京都大学化学研究所

〒611-0011 宇治市五ヶ庄

概要

高輝度ミュオン源の実現を目指すPRISMでは現在FFAGをベースに研究が進められている。これのバックアップスキームとしてLinac版のPRISM/Lを紹介する。これはキッカーなどを必要としないため、繰り返しを50GeVPSの周回周波数191kHzや究極にはRF周波数の1.91MHzにまで上げることができる。従って、マイクロバンチあたりのミュオン数を減らせるので、 μ -e変換などの稀崩壊現象の探索などに最適である。

1. はじめに

μ -e変換の稀崩壊現象の探索等を念頭に置きミュオンビームの高輝度化を図るPRISMではミュオンビームのスペックとして20MeV \pm 3%、強度 10^{12} /secを目標としている。現状のFFAGベースのPRISM(以下PRISM/F)のバックアップスキームとしてLinacをベース(以下PRISM/L)とした場合の特徴、問題点等について述べる^[1]。

ミュオンは3次粒子であるため、ビームとしての質が悪い。そこでいわゆる「位相回転法」により輝度を上げる。TOFとエネルギーの相関向上のため、バンチ長を伸ばす必要があり、必要な加減速周期が長くなる(~6MHz)。また、広いエネルギー範囲のため必要な加減速電圧が高く、かつ短寿命(2.2 μ s)のため、高勾配(~0.5MV/m)が要求される。

現在PRISMではPSからの陽子を短いバンチ幅(~6ns rms)を保ったまま遅い取り出しで持続時間0.1秒、繰り返し1kHzで取り出すことを想定している。遅い取り出しの持続時間を0.1秒程度とすると、これは、陽子スピル分の 10^{12} μ を百分の一ずつ出すことに相当する。従って測定系としては一バンチあたり 10^{10} μ に対応する必要がある。繰り返しに関する上限はSiO₂中での μ の寿命 τ_{μ^+} ~600nsからくる $1/(10\tau_{\mu^+})$ ~0.2MHzであり、50GeVPSの周回周波数(191kHz)に近い。

Linacでこのようなシステム(図)を構成すると、空洞のQ値(~ 10^4)から、Filling timeは1ms程度となる。従って、繰り返し1kHzでは、ビームのある期間はほぼCW運転となるため、50GeVPSの周回周波数約191kHzやRF周波数1.91MHzでも処理可能となる。191kHz, 100msの場合、一バンチあたりのミュオンは 0.5×10^8 となり、PRISM/Fと比べると二桁以上小さい。持続時間を10msまで下げれば平均消費電力はもう一桁近く下がる。

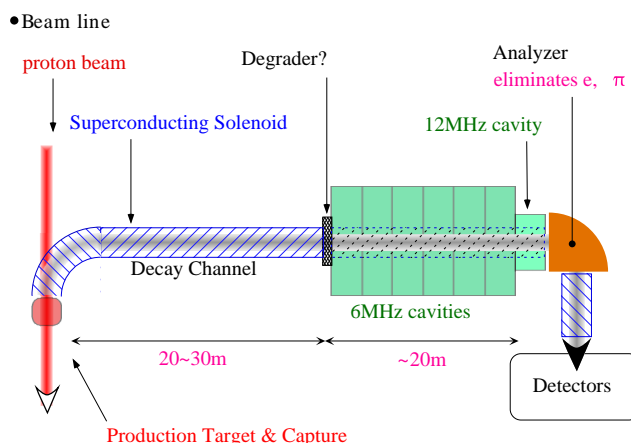


図1: Linac based PRISM

2. システム全般

図1では、生成標的後方へのパイオンを超伝導ソレノイドコイルにより輸送、ミュオンへと崩壊させる。「位相回転」後のパイオン($\tau_{\pi} = 26$ ns)の生存確率は 10^{-5} 程度あるので、これを減らすため再び輸送チャンネルを通すか、磁場を使った運動量分析等が必要である。得られるミュオンはエネルギー的には高輝度化されているが、横方向エミッタンスは依然大きいので、大アクセプタンスの分析器が必要である。

20 \pm 10MeVのミュオンを生成標的から32mとばした後の時間とエネルギーの間の相関を図2の実線に示す(点線は前後 \pm 5nsの拡がり)。これに対応した加減速電圧波形は基本波に2倍高調波を加えることにより比較的良く近似合成でき、「位相回転」が実現できる。

一次粒子である陽子のバンチ幅が \pm 5nsあると、それだけでエネルギー拡がりが高エネルギー側では \pm 10%以上になる。実際には、 $\pi \rightarrow \mu$ の崩壊過程により相関は図2より悪くなるため、陽子ビームのバンチ幅はもっと短くすることが望まれる。

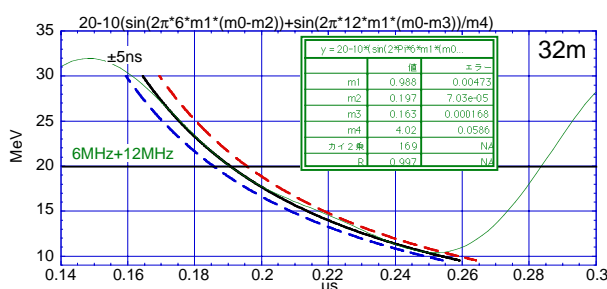


図2: Muon energy as a function of TOF. Fitted curve with 6MHz+12MHz sine waves is also shown.

¹E-mail: iwashita@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

3. 大気圧による空洞変形

空洞のQ値が高いので、大気圧などの空洞の変形に対して共振周波数が安定である必要がある。端板にかかる大気圧は直径9mとすると、単純計算で640tonであり、15cm厚の鉄の単純円板の最大変形量は42mmである。直径6mの場合は282tonで、最大変形量は8mmとなる。この変形量は端板の形を工夫したり、外部に補強材を設けて減らせるが、空洞設計時に考慮しておく必要がある。空洞を2~3連にして中間の隔壁中も真空にすれば、大気圧による影響は両端の端板だけになり、構造上簡単になるため、長さ方向のデッドスペースを減らすことができる可能性がある(図3)。端板の形については、真空隔壁と電気的端板とを分離する事も考えられる。大気圧の遅い変動は機械的チューナーを用いて対応できる。

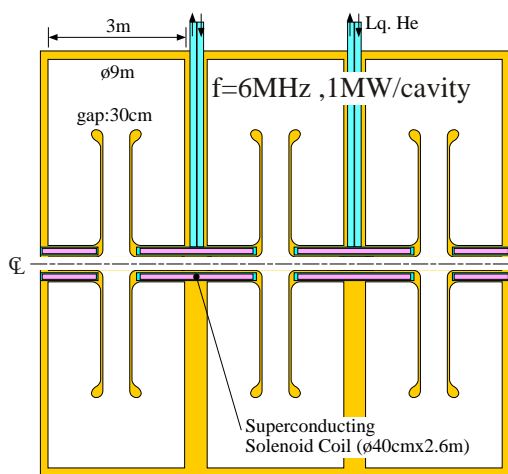


図3：3連空洞

4. 除熱

空洞内壁からの除熱は運転デューティーが低いときは問題にはならないが、徐々にデューティーを上げていくことを考えているので、前もって考えておく必要がある。空洞内壁でもっとも発熱密度が大きいのはドリフトチューブ上である。0.5MV/m時の電流密度はφ9m空洞の場合、13kA/mであるので、 $P_{max}=(13kA/m)^2 \times 0.5 \times 0.7m \Omega = 60kW/m^2$ となる。デューティーは最大30%なので、 $20kW/m^2$ 以下となる。この熱は銅の表面で発生するので、内部の冷却チャンネルまでの銅中の温度上昇を計算すると、 $\Delta T=(20kW/m^2)/(400W^{-1}K^{-1})=50K/m=0.5K/cm$ 程度であり、除熱は大きな問題とはならないであろう。外筒での電流密度はもう一桁下なので、発熱密度にすると二桁低く、除熱に関して障害は無いと考える。

5. 空洞本体、及び内表面処理

日本の道路事情では3.5mを越える構造物は道路を運搬することが難しい。このため、ガスタンクなどのように現地で建設(組み立て)できるような

構造にする必要がある。しかしながら、原研東海などのように海に面したサイトでは海上輸送が考えられるので、造船技術を応用しドックで製作し、浮かべて運搬できる。ちなみに、日本の潜水艦の直径は約10mである(タンカーはもっと大きい)。

内壁の電導率は大きい方が好ましいが、空洞全体を銅で作ることは強度や、コストの面で問題があるので、基本的には鉄(CrMo鋼等)で構成する(特に外筒)。外筒や、端板内表面には銅板によるライナーを張り付けるか、メッキを考えている。メッキの場合、寸法が極めて大きいため、全体が入るようなメッキ槽がない。そこで、組み立てたのち、メッキ槽を使わない刷毛を使ったメッキをする事を考えている。ドリフトチューブやその近傍の端板部分は非磁性体が好ましいので、その部分の構造体にはステンレスを用い、表面は冷却配管を取り付けた銅板で覆うような構造にする。

6. 真空排気

この空洞は1セルあたり190m³の容積がある。このクラスの真空槽としては電子ビーム溶接用の真空槽がある。これは16x4x4~240m³の容積を持ち、40kl/sの拡散ポンプでa few hoursで10⁻⁴torrまで引いている。PRISM/Lではクライオポンプを使うことを考えていて、CRYO-U30Hだと70kl/s(H₂O)、28kl/s(N₂)と言うスペックを持っている。

7. 超伝導ソレノイド

空洞のドリフトチューブ中にも超伝導ソレノイドコイルを装備するので、空洞中での捕捉磁場は崩壊/輸送チャンネルの延長と考えられる。ギャップでの磁場低下の許容量は要検討であるが、必要ならば電極傘内へのコイル追加により、磁場低下を補償することも考えられる。

ソレノイドコイル同士には大きな磁気力ががかかるため構造的にはこれに耐える必要がある。この力を推定すると、磁場B=4T、コイルの径を60cmとした場合、磁束m=1.1Wbとなり、 $H=B/\mu_0 \approx 3.2 \times 10^6 [A/m]$ としてmH=3.7x10⁶[N] ~3.7x10⁵[kgf]=370[ton]の力がかかる。これは集中加重となるので、一様加重となる大気圧よりは係数が大きくなり、直径9mの場合、大気圧とコンバラである。定常運転時は両端のコイル以外は前後でバランスしているはずなので、力はそれほど問題にはならないと思われる。3章での議論と同様にしてソレノイドコイルの機械的支持を電気的端板と絶縁しておくことは空洞の変形などの配慮に対して有用であろう。

8. 高周波電源

高周波電源はその出力の大きさから1MW級の真空管が必要になる。この真空管のサイズも上述の空洞サイズからすると十分小さいが、従来のようにケーブルでパワーを供給する方式ではなくて、直接加

速空腔を真空管の負荷にするような結合方法を検討したい。この部分は直流電源部分と、真空管アンプ部分に分けられる。真空管アンプ部分をフルスペックで製作しておけば、直流電源部分は最初小さく作っておいて、出力デューティーがあがるにつれ徐々に上げてゆくようにできる。

9. 計画

PRISM/LはRFとしてはかなり低い周波数でかつ高電圧発生が必要であり、巨大な空芯の空腔の製作に関してはR&Dが必要である。このため、次のように3段階程度に分けて考える。各段階でミュオンビームでの実験が行えれば理想的である。

1) μ PRISM/L

6MHzのモデル空腔として高調波用12MHz空腔を先に製作する。この空腔を使うと、エネルギー幅を半分に減らした、 20 ± 5 MeVの「位相回転」ができる。空腔サイズは半分になるがそれでも3ないし4.5mという直径になり十分大きいので、この空腔の製作を通して6MHz空腔の製作に関するノウハウを得る。高周波電源および、その結合方法のR&Dもここで行う。

RCNP等のリングサイクロの加速空腔は高さ3m幅4m以上、軸長1m程度(くさび形)なので、軸長が短いとはいえ同程度のサイズである。これは50mm厚のSUS製の壁の内側に銅のライナーを張っていて、大気圧に対しては前後の真空チェンバーから支えている。周波数は30~50MHzと高いが、250kW CWで最大500kVを発生させている^[2]。

「位相回転」のための一次ビームとしてはPRISMではパンチ幅の短いビームを要求する。このための取り出しとしてはPRISM/FではRFバケット数を100に上げて一つずつ1kHzで速い取り出しを行い、取り出すことにしている。PRISM/Lではselected RF Knock Outによる遅い取り出しを検討している。これは、通常のRF-KOでは常時かけておくKOキック信号を特定のバケットのみに与え、全取り出し期間の1/8の時間をかけて周回周波数で取り出し、全て終わったら次のバケットに処理を移すということを繰り返すものである。まだ実例はないため、実証実験をここか次のフェーズで行う。

2) miniPRISM/L

上記空腔のロングパルス運転化をめざす。空腔の冷却、アンプの強化などの開発を行う。

3) フルスペックPRISM/L

6MHz空腔を6台、12MHz空腔を1台ないし、2台用いる。1MV/mにできるなら3m長の空腔3台程度で実現できるが現段階では0.5MV/mで考える。システムとしては、50GeV PSのRF周波数約2MHzで出てくるビームまで受け付ける。エネルギー幅は 20 ± 10 MeV。

10. 概算コスト

概算コストは以下のように算出できる。

加速電圧 V (今の場合10MV)、空腔のシャントインピーダンスを Z [Ω/m]、全長を L とすると全所要電力 P は $P = V^2 / (ZL)$ で与えられる。また、長さあたりの空腔のコストを C_{cavity} [¥/m]、出力あたりのアンプのコストを C_{amp} [¥/W]とすると、全コスト C_{total} は

$$C_{total} = L \cdot C_{cavity} + P \cdot C_{amp}$$

と書ける。これにさきの P を代入し、その最小値を求めると長さ

$$L = V \sqrt{\frac{C_{amp}}{C_{cavity} Z}}$$

で最小値

$$C_{total} = 2V \sqrt{\frac{C_{amp} C_{cavity}}{Z}}$$

をとることがわかる。ここで、 $V = 10$ MV、 $Z = 0.5$ M Ω/m 、コストの係数として大きめの値を使い、 $C_{cavity} = \text{¥}0.5$ 億/m、 $C_{amp} = \text{¥}1$ 億/MWを代入すると、 $L = 20$ m、 $C_{total} = 20$ 億円という数字が出る。全電圧以外は平方根でしか利かず、誤差伝搬は少ないので大きくは変わらないとは言えるものの、 C_{cavity} と C_{amp} がそれぞれ半分になれば全体も半分になるので、このあたりの数字の精度はもっと上げる必要がある。

11. 最後に

このような大型の空腔も、リングサイクロ等で使われている空腔のサイズを考えるとそれほど桁外れではない。むしろ、空腔とも書くようにドリフトチューブ中に入れる超伝導ソレノイドコイルなどを除くと中はがらんだので、高価な臍物(磁性体コア)で詰まった空腔より、シンプルであるといえる。ただ、製作経験が無いので、その製作技法、技術に関してはR&Dは必要ではある。

一つの方向としては大気圧に耐える強度を持たせる機械的構造と電氣的構造を分離し、たとえば空腔本体を建物と一体化させ、鉄筋コンクリートで構造的に自立させ、中を比較的薄い構造で、電氣的に閉じるという方法も考えられる。コンクリートの内側を直接低真空(1torr程度?)に引けばその中では大気圧は問題にならないはずで、空腔としては自重に耐えればよい。超伝導ソレノイドコイルなども鉄筋コンクリートの壁から支持するようにする。このため、(海底)トンネルやダムなどの土木技術のサーベイも行う必要がある。

参考文献

- [1] Y. Iwashita "High Gradient Air Core Cavity for Energy Compression of Long Bunch", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2000, p.288-2
- [2] T. Saito, et al., "Initial Operation of the RF System for the RCNP Ring Cyclotron", The 8th Symp. on Accelerator Science and Technology, 1991, Saitama, Japan, p.111