

# 可搬型 ミュオン源

栗木雅夫

広島大学大学院先進理工

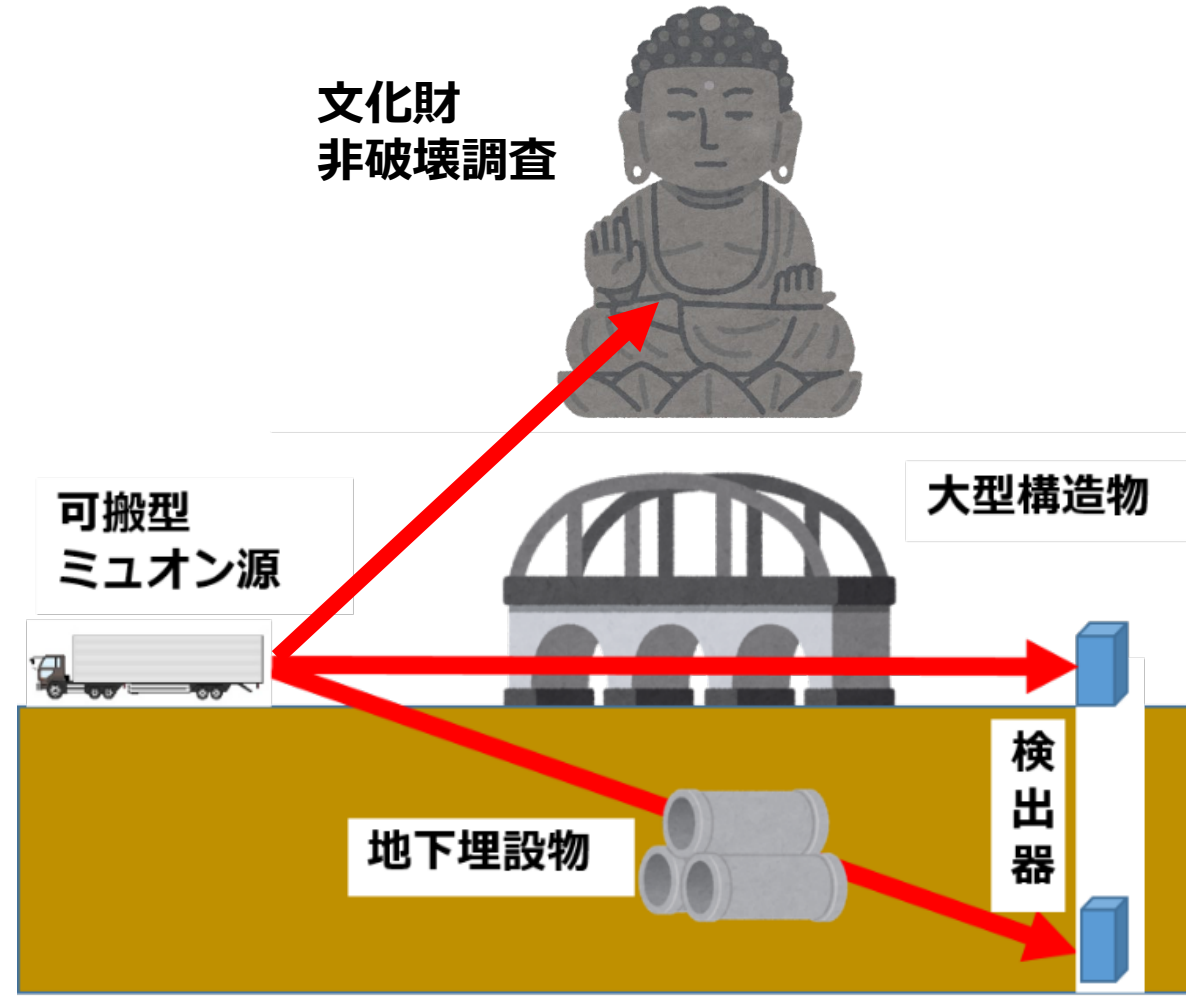


# Introduction

- ミュオンは質量が $105.6 \text{ MeV}/c^2$ の軽い粒子 (電子の207倍).
- 多くの場合、パイ中間子の崩壊で生成 :  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$ .
- 質量が重いため、電子に比べて制動輻射を起こしにくい。イオン化が主。
- 結果的に、電子に比べてミュオンは物質中の飛程が長く、大きな物体のイメージングに適している。
- ミュオン誘起 X-rayはエネルギーが高く、観測が容易。またエネルギーにより深さを制御できるため、深さ方向の分布を測定可能。

# 可搬型ミュオン源

- 現在は、天然ミュオン（レートが低い）、実験室での人口ミュオンが中心。
- 可搬型ミュオン源により、屋外でも高強度の人工的なミュオンビームが使えるようになる。
  - 非破壊検査：インフラ、貨物コンテナ、原子炉、その他の大型構造物。
  - ミュオン励起特性X線を利用した元素分析：文化財、美術品、歴史的遺物。



# ミュオンによる予防保全

- 世界的に1950年代から1960年代にかけて、社会インフラの整備が急激に進む。それらが耐用年数を迎えている。
- 国土交通省によると、21世紀半ばにはインフラ整備費用は年間6兆円に上ると予測。地方道、高速道路、鉄道、港湾などをふくめて10兆円程度か。
- 更新に必要な資金、人材、資材すべてが不足しており、一律の更新は不可能。状態を把握し、供用期限の延長、劣化の激しいものは優先更新。限られた資源で安全性と利便性の両立(**予防保全**)。
- 国土交通省は予防保全により、整備費用の30%から50%の縮減を見積もる。3兆円から5兆円の経済効果。
- ミュオン非破壊検査は予防保全の実現に貢献。



**ミネアポリス高速道路崩落事故**  
1967年開通、夜のラッシュ時に崩落事故が起こり、13人が死亡、145人が負傷した。

# 可搬型ミュオン源の構成

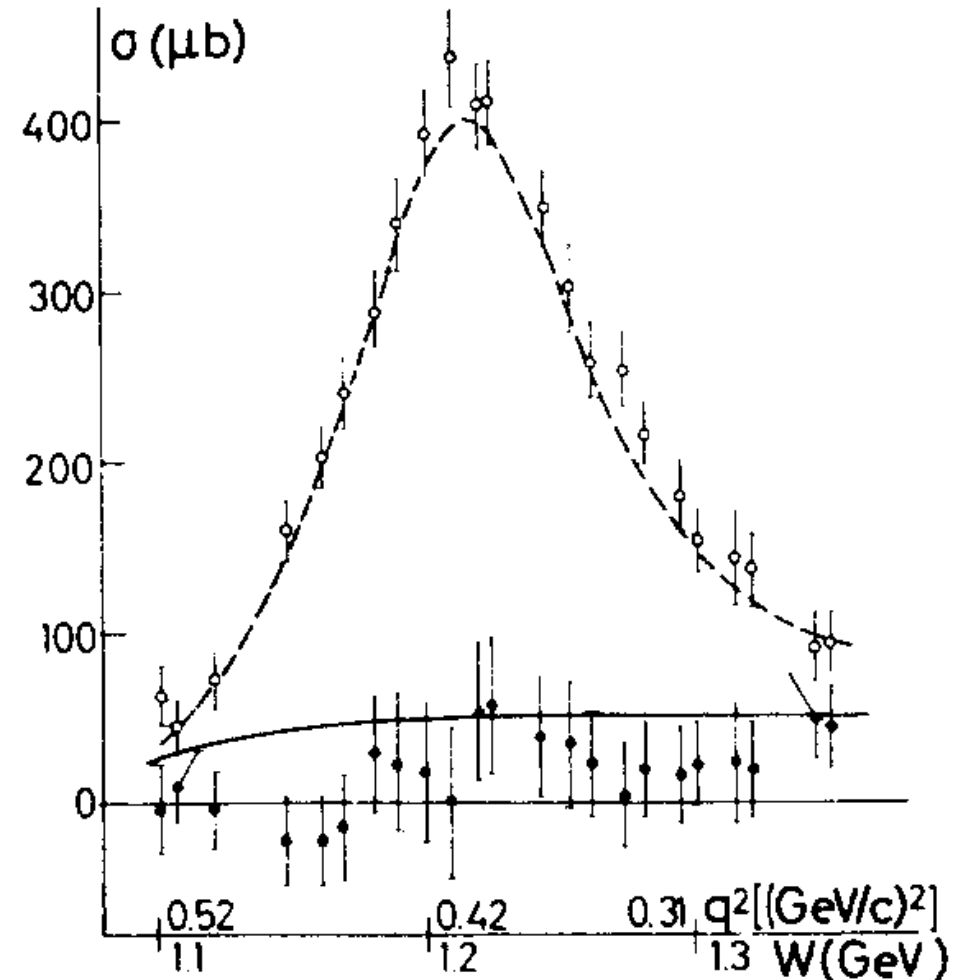
Muon Driver  
400 MeV 10 $\mu$ A  
Electron Accelerator

Muon Target  
 $ep \rightarrow \Delta \rightarrow \pi \rightarrow \mu$

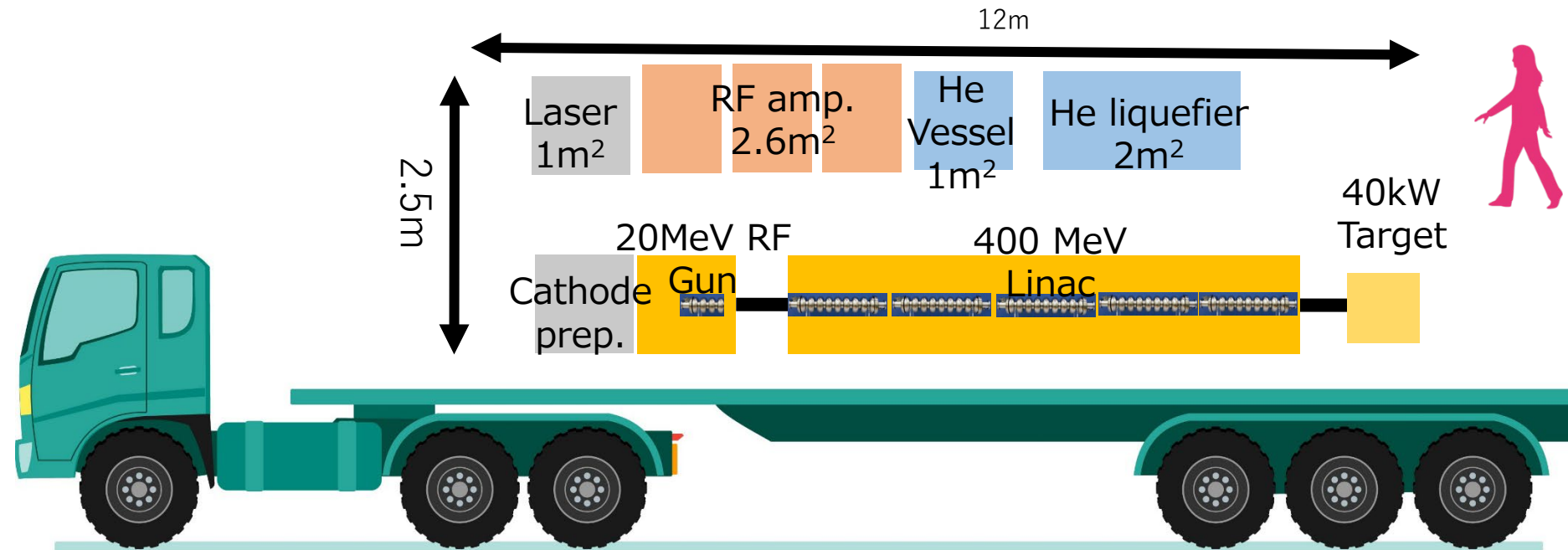
Muon Accelerator  
400 MeV

# ミュオン生成

- 可搬型を考えると、加速が容易な電子ビームでのミュオン生成が有利。
- 基本的にエネルギーが上がるほどミュオンの生成数は増えるが、Delta共鳴 (1232 MeV) を用いることで効率的なミュオン生成が可能。
- 電子ビームエネルギーの閾値は  $\sim 259$  MeV. 400 MeV あたりで効率的なミュオン生成。
- 100  $\mu\text{A}$  400 MeV 電子ビームを想定。



# ASLMG Advanced SC Linac Muon Generator

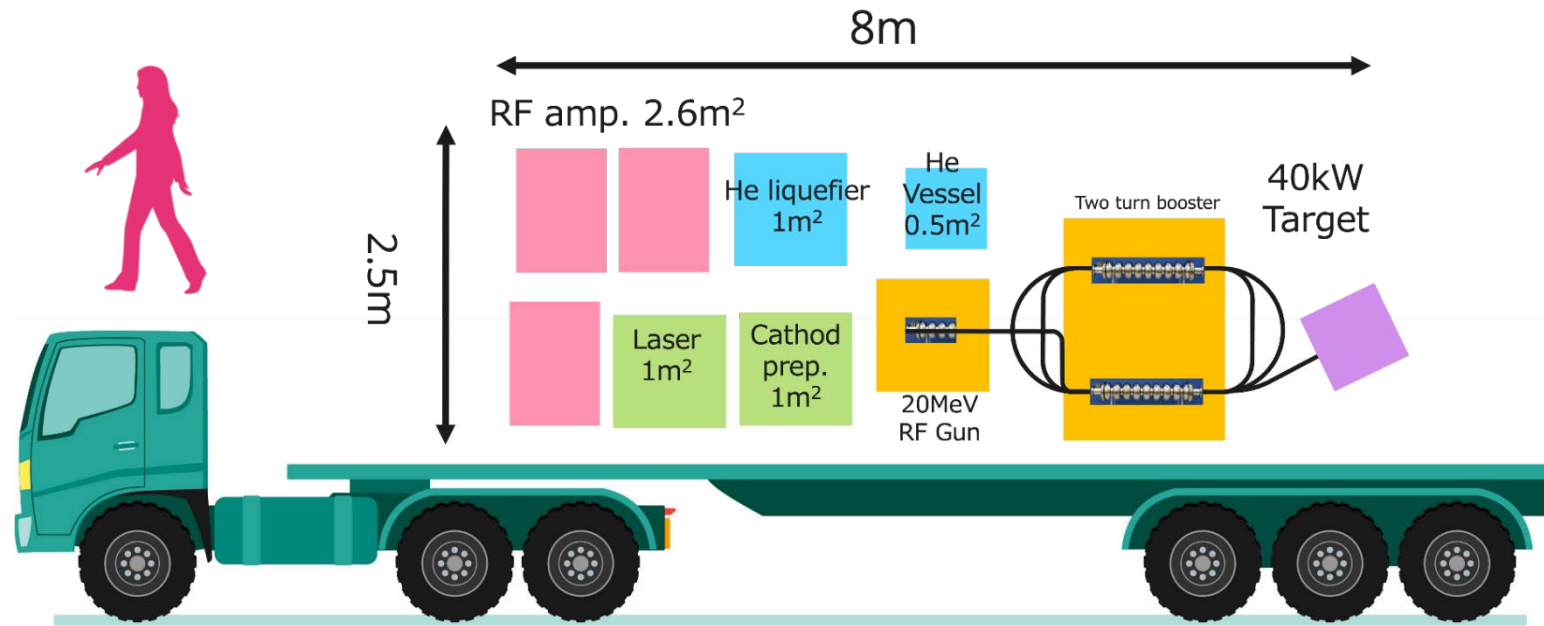


- 有効長5m の超伝導加速器を **80 MV/m** で運転すれば400MeV.
- この高い勾配は **Nb<sub>3</sub>Sn + 絶縁体の多層膜構造** により可能。
- まだ実証されていない技術。



# DSMMG

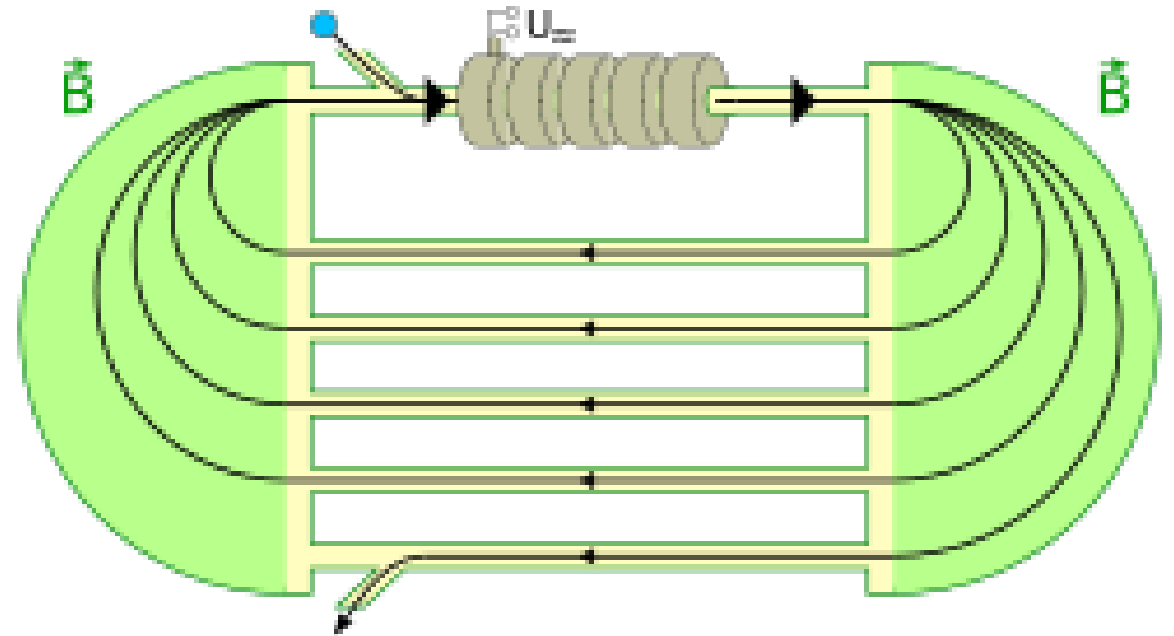
## Double-Sided Microtron Muon Generator



- この方式はすでに確立された技術を基盤にしている。
- おまけに、前のASLMGよりも前兆を短くできる。
- 伝導冷却方式でも実現可能。

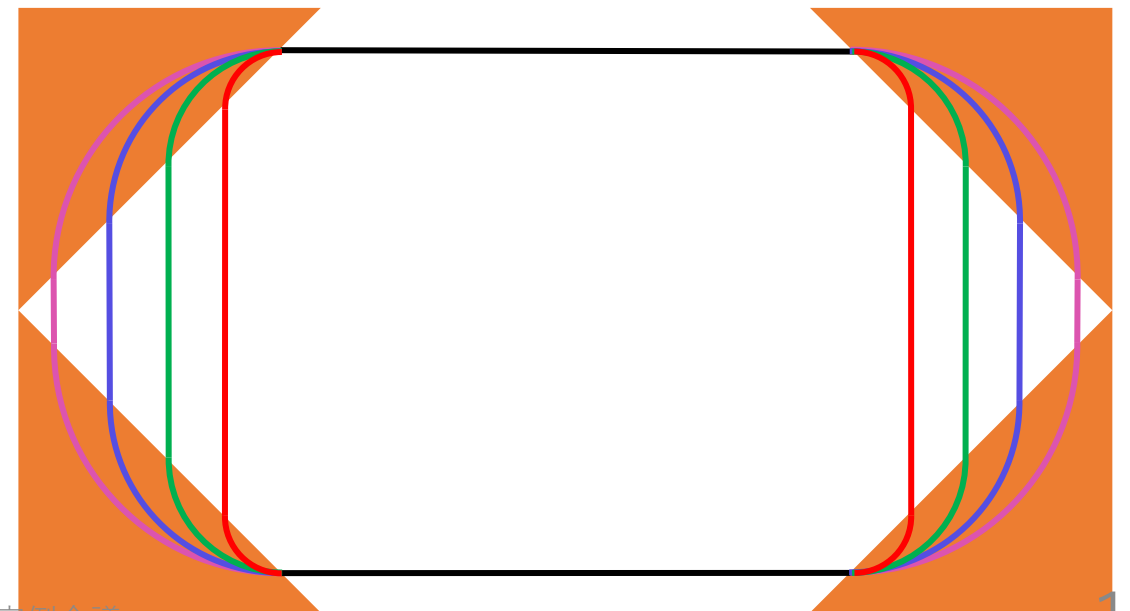
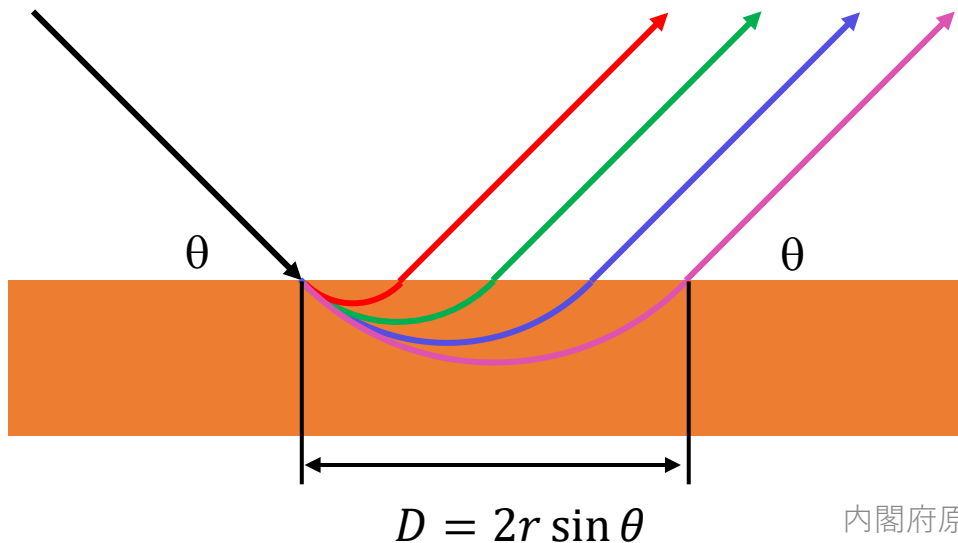
# What is Microtron ?

- 電子をRF空洞で加速しながら、二つの180°の偏向磁石で周回させる。
- エネルギーが増大するにつれて、軌道半径が大きく、周回軌道も長くなる。
- 各エネルギーでの周回軌道の長さが加速高周波の波長の整数倍ならば、電子は毎週加速される。
- 問題
  - 大きな磁石が必要
  - 真空チャンバー（ビームパイプ）で空間が埋め尽くされる。



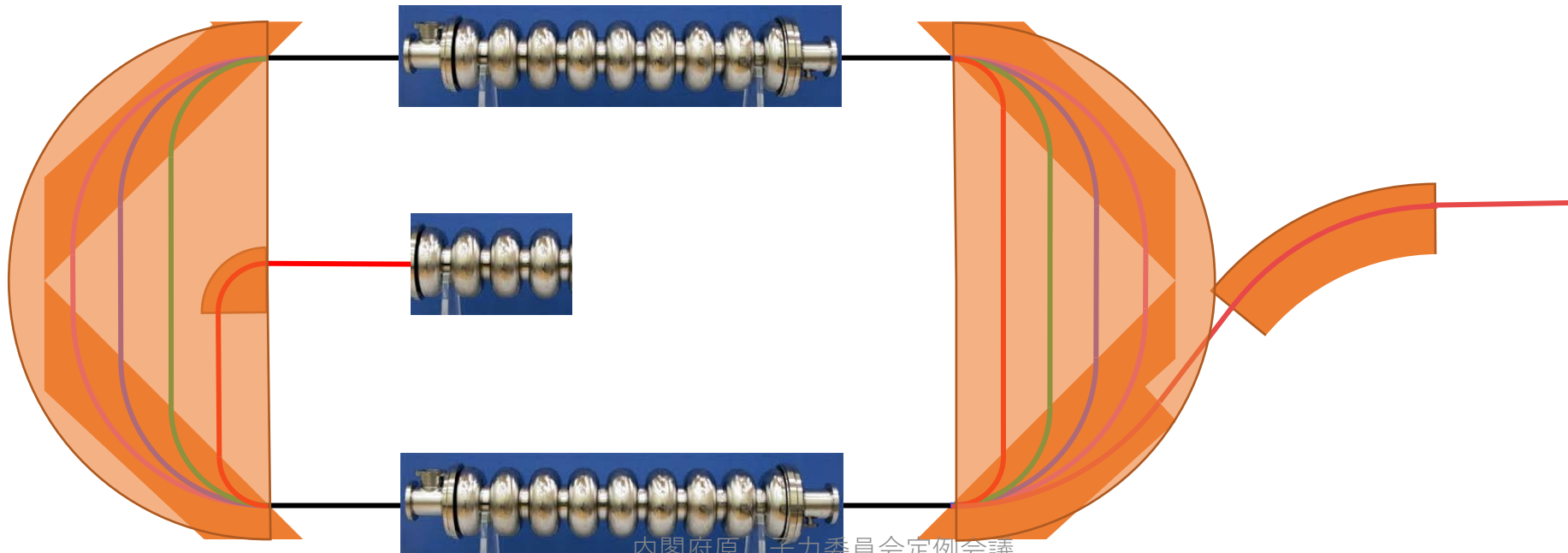
# Single-side bending

- 二重極磁石に斜めに入射し、同じ側に出射することを考える。
- どんなエネルギーでも、入射角と出射角は等しくなる。軌道はエネルギーにより平行にズレる。
- 90°まげる偏向磁場（入射角45°）を四つ組み合わせると、周回軌道が作れる。
- 二つの辺では全ての軌道は一致する、残りの辺ではエネルギーにより軌道がズレる。

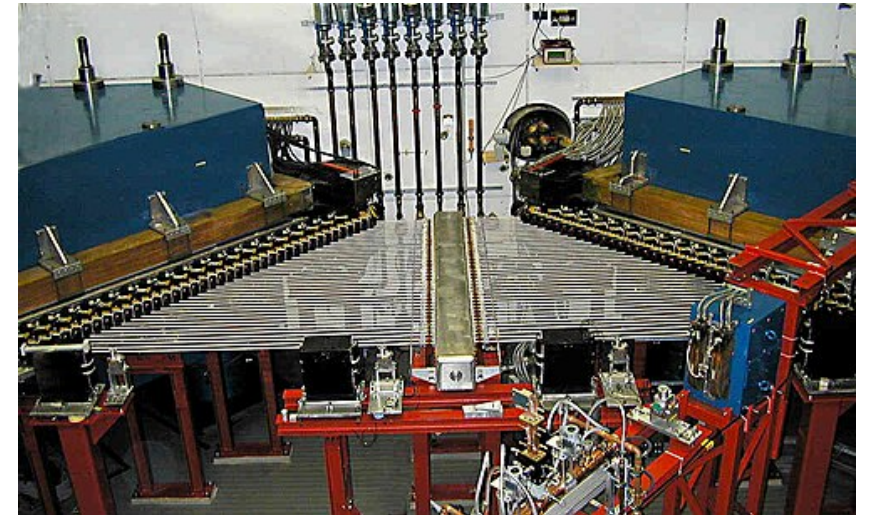
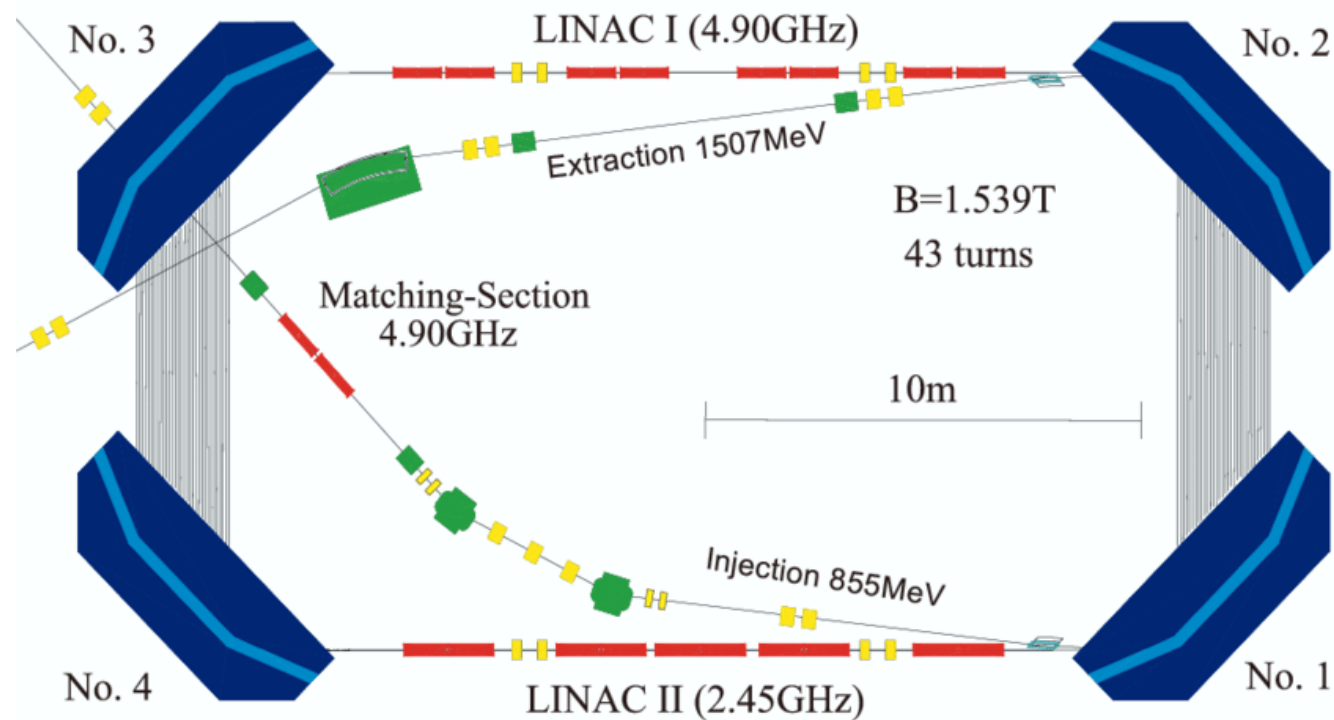


# Double-Sided Microtron

- 四つの $\pi/4$  single-sided bending magnetsにより、周回軌道を形成。
- 二つの直線部に超伝導加速空洞を設置。
- 周回軌道内部にRF電子銃配置可能。内側からの入射は容易。
- 磁石の質量、真空チャンバー容量が大幅に節約される。可搬型に最適。



# Mainz Double Sided Microtron MAMI C



# Microtron Condition

加速に従い、周回軌道長が変化するが、それが常にRF波長で量子化されていなければならない。

周回軌道長 $C$

$$C = 2L_s + 2\pi\rho + 4(R - \rho) = \frac{p}{eB} (2\pi - 4) + 4R + 2L_s$$

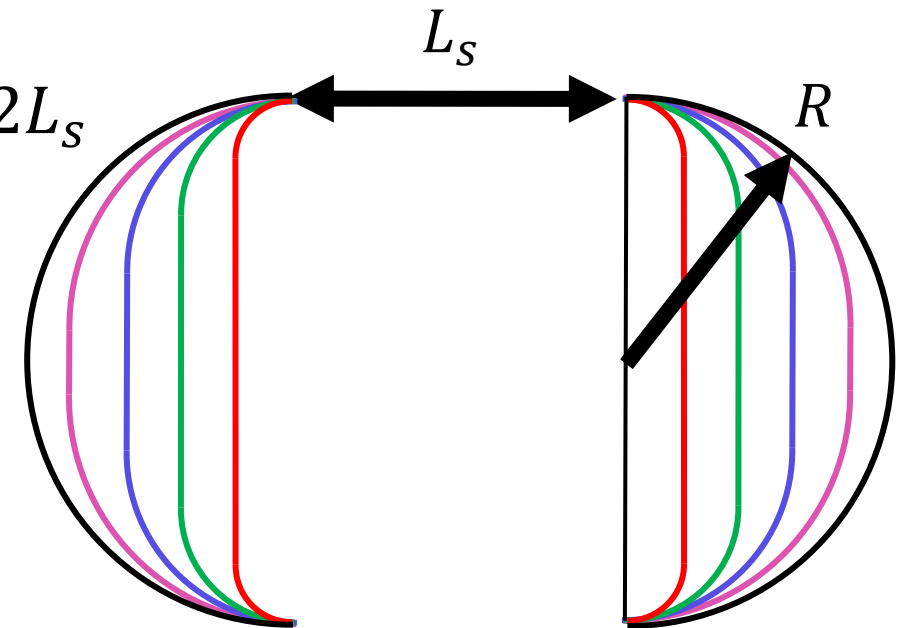
$R$ : 最大軌道半径

$\rho$ : 周回粒子の軌道半径

$L_s$ : 直線部長さ

一周あたりの軌道長の変化量

$$dC = \frac{dp}{eB} (2\pi - 4) = n\lambda$$



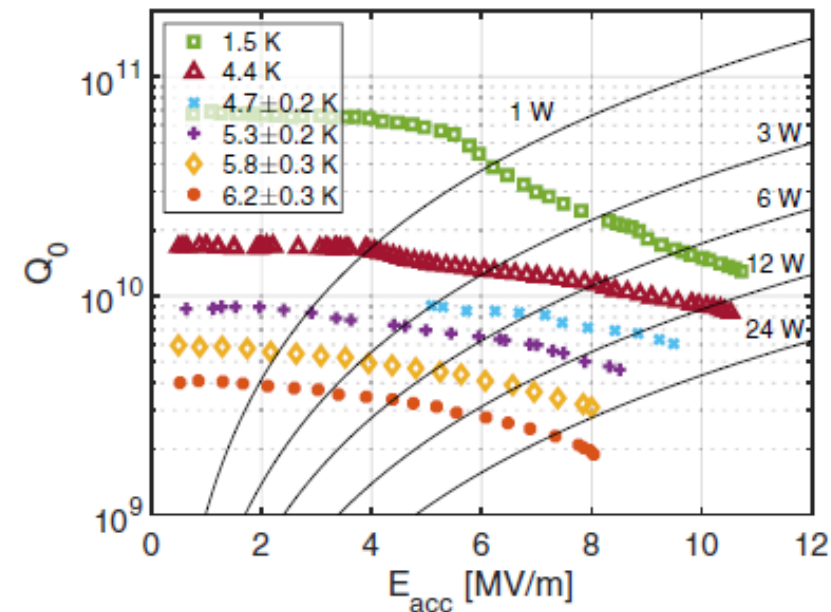
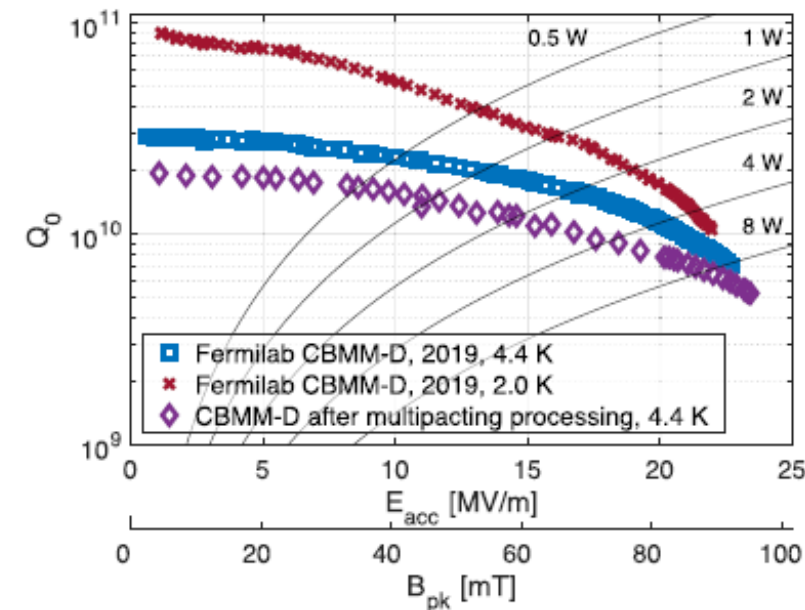
# Numerical Example

Parameter	Number	Unit
<b>B</b>	<b>1.336</b>	<b>T</b>
<b>cp (max)</b>	<b>400</b>	<b>MeV</b>
<b>R</b>	<b>1.0</b>	<b>m</b>
<b>dcp</b>	<b>41n</b>	<b>MeV</b>

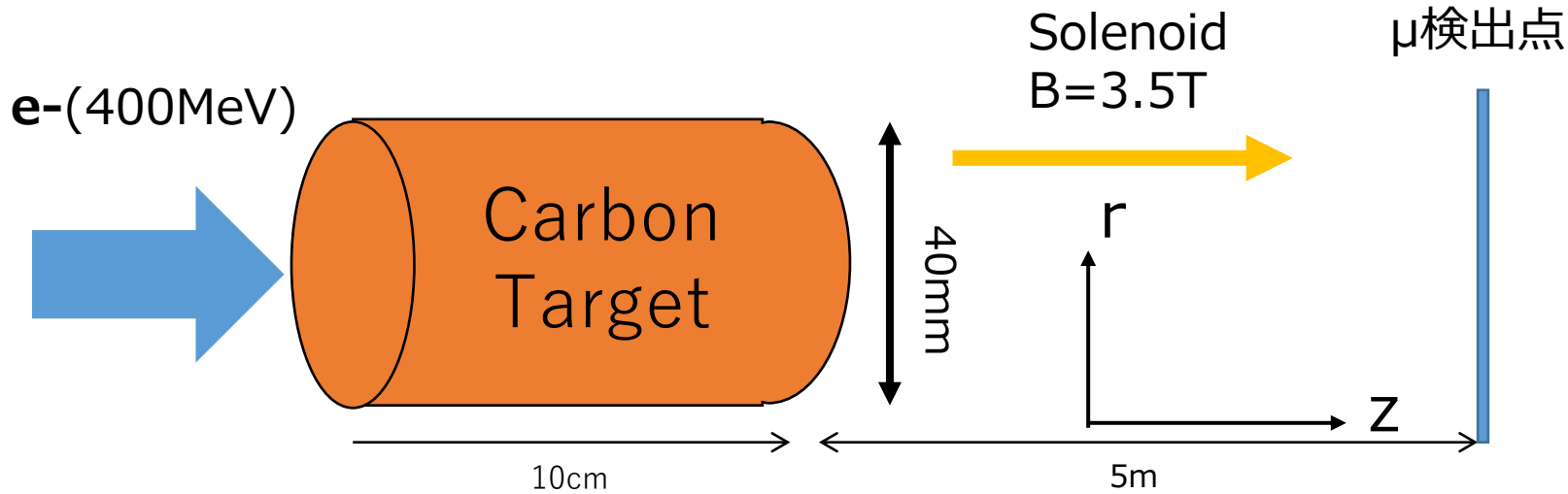
- 一周当たり  $dcp = 41n(\text{MeV})$ だけ加速されれば、周回軌道の差がちょうど波長の整数倍になる。
- 二つの空洞で41MeV加速するとすると、一本あたりの加速電圧は20.5 MeVが良い。

# Nb<sub>3</sub>Sn Cavity

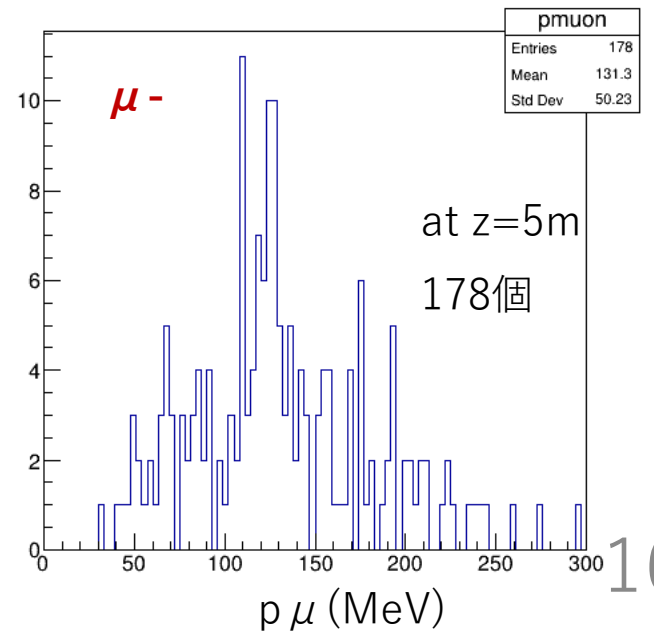
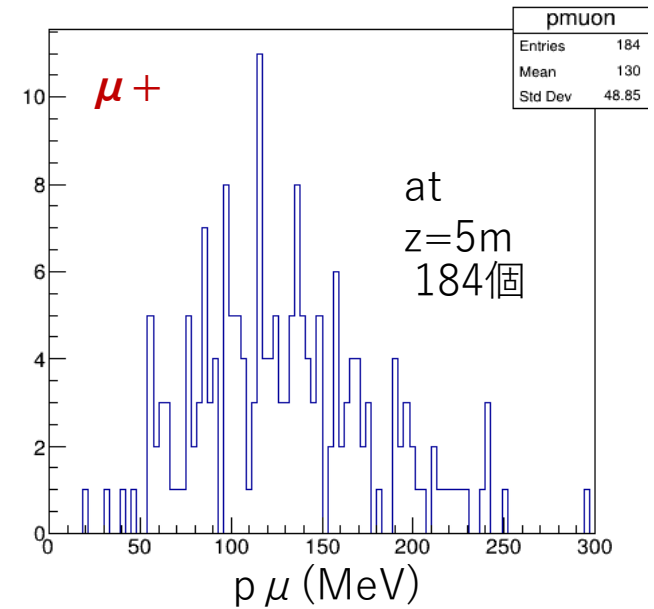
- Nb<sub>3</sub>Snは $T_c = 18\text{K}$ と、Nbの $T_c = 9\text{K}$ よりも高い転移温度をもつ物質。
- Nb表面にSnを蒸着してNb<sub>3</sub>Snを表面に形成。
  - Single cell : 24MV/m @ 4.4K
  - 9 cell : 10MV/m @4.4K.
- 2Kと4Kで遜色ない結果。
- 4 K運転 : カルノー効率 $\eta$ が2Kに比べて倍、圧力容器が不要。
- すでに24 MV/m実証済み。



# ミュオン生成

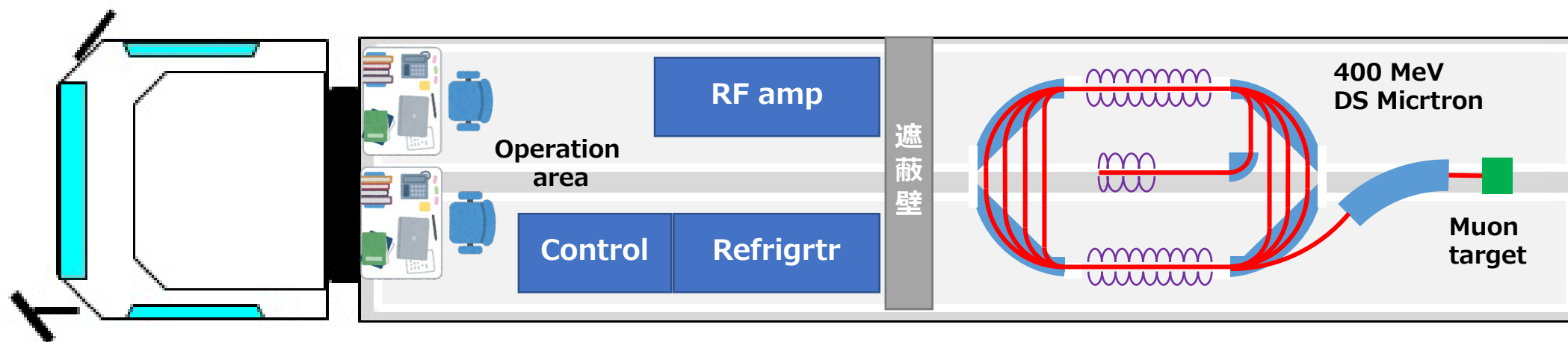


- 400 MeV、 $100\mu\text{A}$ の電子ビームをグラファイト標的に入射。
  - $8 \times 10^8$  400 MeV  $e^-$  GEANT4, Shielding.
  - $\phi 40 \times 100$  mm carbon target.
  - 5 m drift in 3.5 T solenoid field.
- $1.4 \times 10^8 \mu^+$  with  $100\mu\text{A}$  electron.
- $1.4 \times 10^8 \mu^-$  with  $100\mu\text{A}$  electron.



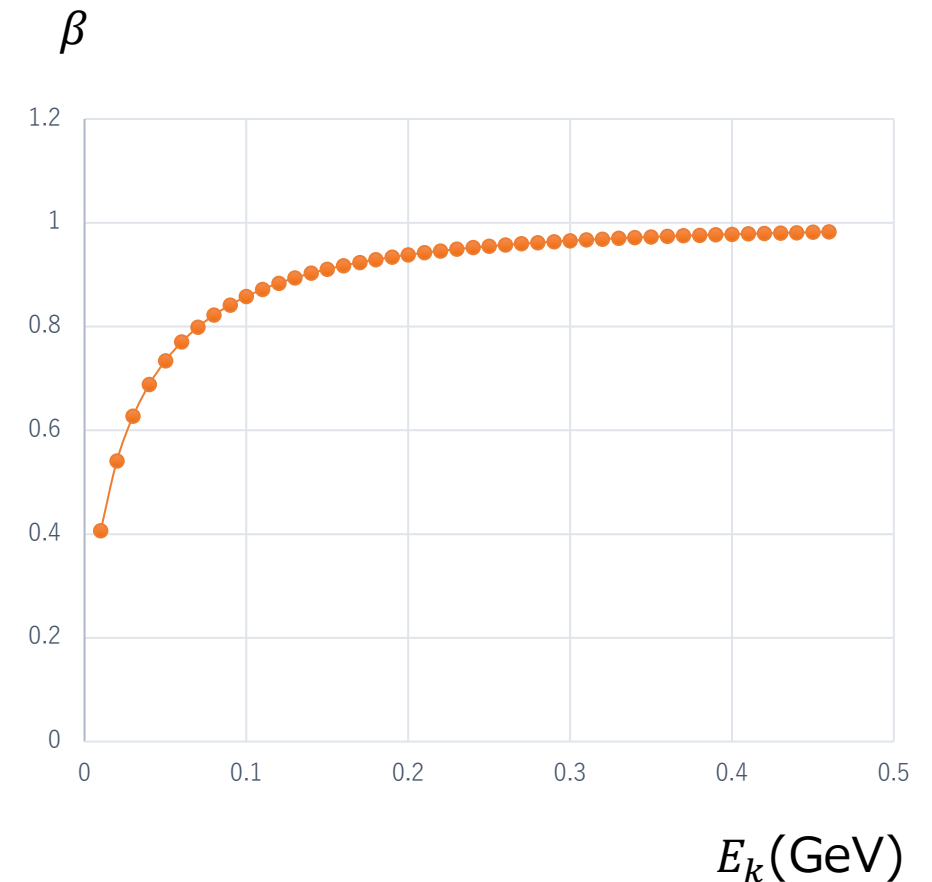
# Portable Muon Source

- 二台のTESLA空洞を20.5MV/mで駆動し、Double-sided Microtronで10周して100 $\mu$ A 電子ビームを414MeVまで加速。
- マイクロトロン軌道の幅は2.0m. 2.5m幅のトレーラーに搭載可能。



# ミュオンの再加速

- ミュオンは質量が重いので、加速する間、ローレンツ $\beta$ が徐々に変化する。
  - $\pi$ 粒子の崩壊ミュオン：4.1MeV運動エネルギー、 $\beta \sim 0.27$
  - 400 MeVまで加速すると $\beta \sim 0.95$
- 通常は構造の異なる RFQ、low  $\beta$  DTL、high  $\beta$  DTL、 $\beta = 1$  linacなどを並べる



# Microtron加速は可能か？

- 電子の場合、 $\beta$  は入射時にすでに $\sim 1$ .
- 同期条件は簡単に満たされる。

$$\Delta L = 2\pi\Delta\rho = \frac{\Delta\gamma\beta mc}{eB} \sim \frac{\beta mc}{eB} \Delta\gamma = \frac{\beta mc}{eB} \frac{eV}{0.511} = n\lambda$$

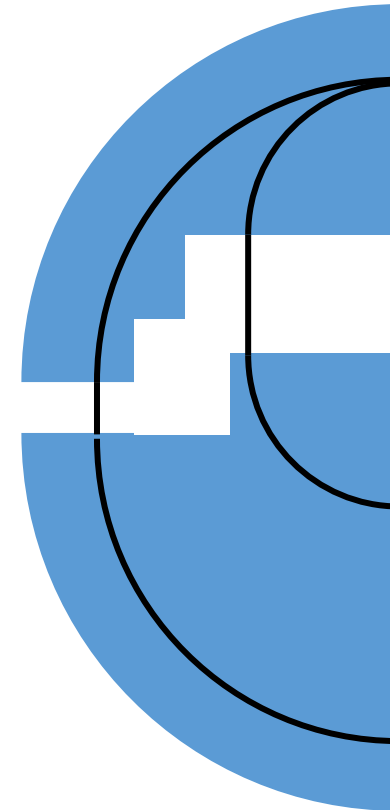
- ミュオンの場合

$$\Delta L = 2\pi\Delta\rho = \frac{\Delta\gamma\beta mc}{eB} = \frac{mc}{eB} \left( \beta + \frac{1}{\beta\gamma^2} \right) \Delta\gamma \neq n\lambda$$

# 調整できないか？

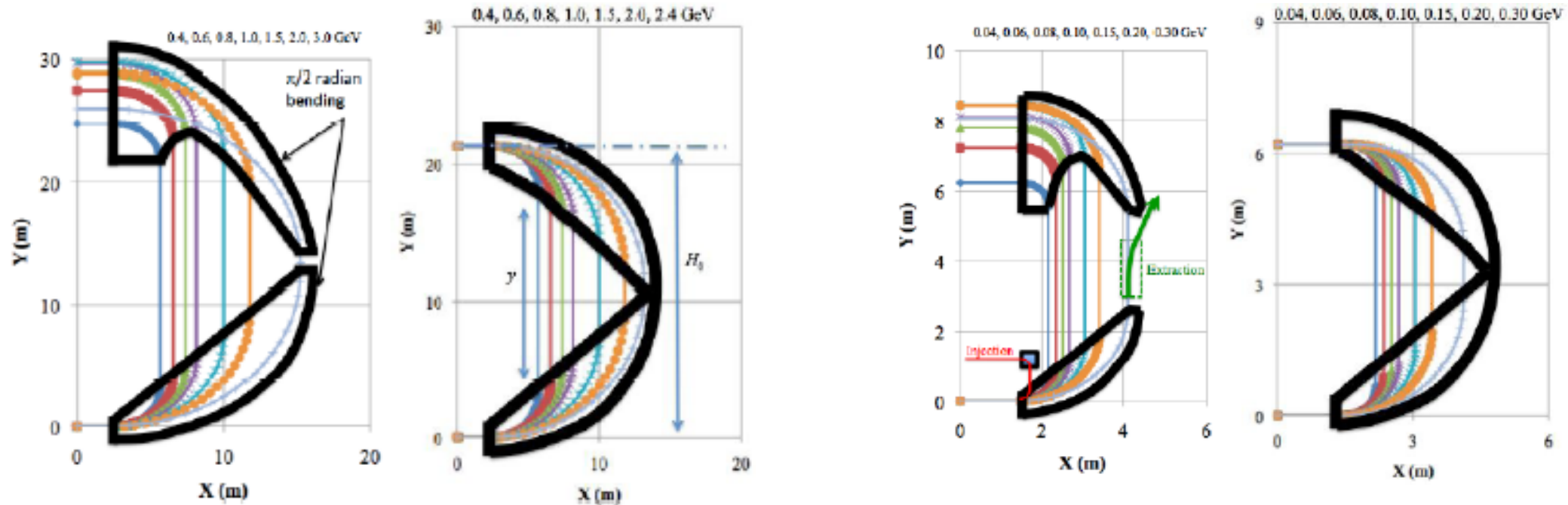
- 異なるエネルギーのミュオンは異なる軌道を通る。
- 各エネルギーのミュオン軌道を、二つの偏向磁石の距離を調節することで、波長との整数関係を維持する。
- そんなこと可能？

$$\begin{aligned}\Delta L &= 2\pi\Delta\rho = \frac{\Delta\gamma\beta mc}{eB} \\ &= \frac{mc}{eB} \left( \beta + \frac{1}{\beta\gamma^2} \right) \Delta\gamma + L_B(\gamma) = n\lambda\end{aligned}$$



# New Approach for Designing of High-Energy Circular Particle Accelerators

Eiji Nakamura<sup>1-4,\*</sup>



Drift length, $L_0$	5	[m]
Magnetic flux density, $B_0$	1	[T]
Revolution time in the case of same $B$ , $T_0$	313.42	[ns]
Magnetic flux density, $B_1$	0.9515	[T]
Vertical width $H_0$	21.3	[m]
Revolution time in the case of different $B$ , $T_1$	280.68	[ns]

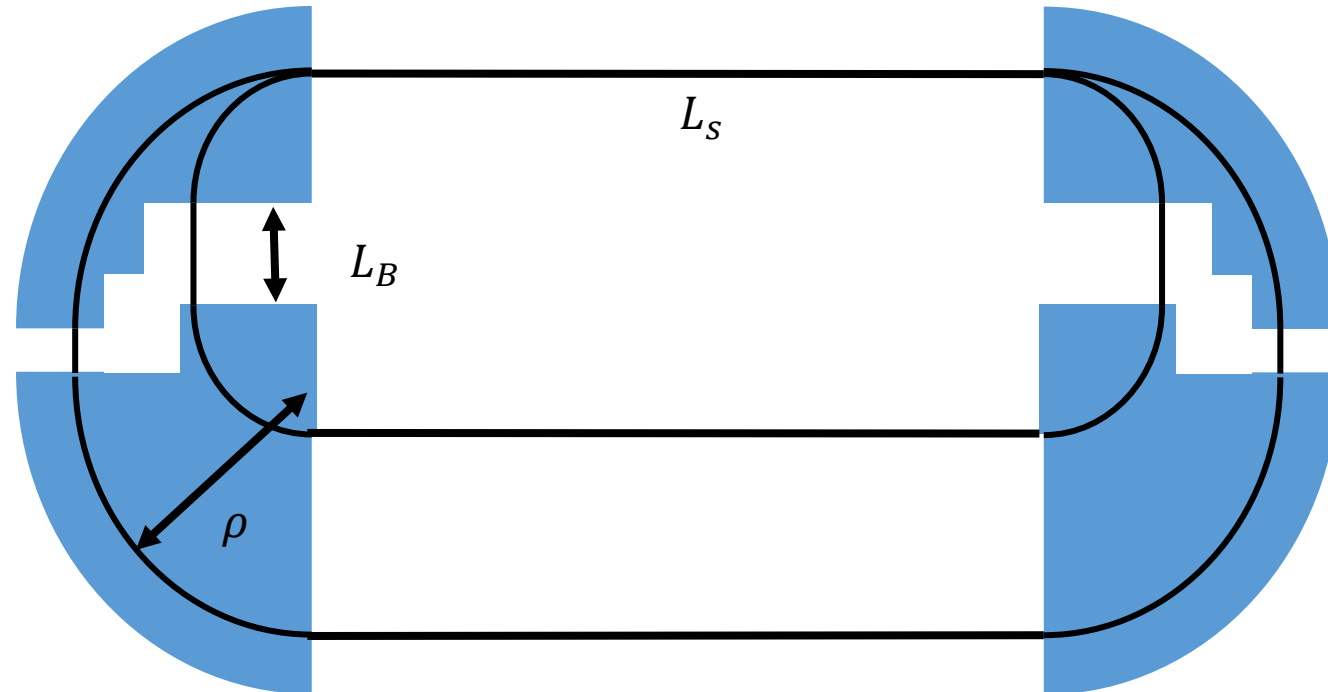
Drift length, $L$	3	[m]
Magnetic flux density, $B_0$	0.5	[T]
Revolution time in the case of same $B$ , $T_0$	97.013	[ns]
Magnetic flux density, $B_1$	0.5702	[T]
Vertical width $H_0$	6.2	[m]
Revolution time in the case of different $B$ , $T_1$	97.013	[ns]

# Varied Gap Microtron

マイクロトロンでの周回時間

$$\tau = \frac{1}{c\beta} (2\pi\rho + 2L_B + 2L_S)$$

- $L_B$  は90°偏向磁石間の距離（軌道ごとに異なる）
- $L_S$  は直線部の距離（定数）。



- 周回時間 $\tau$

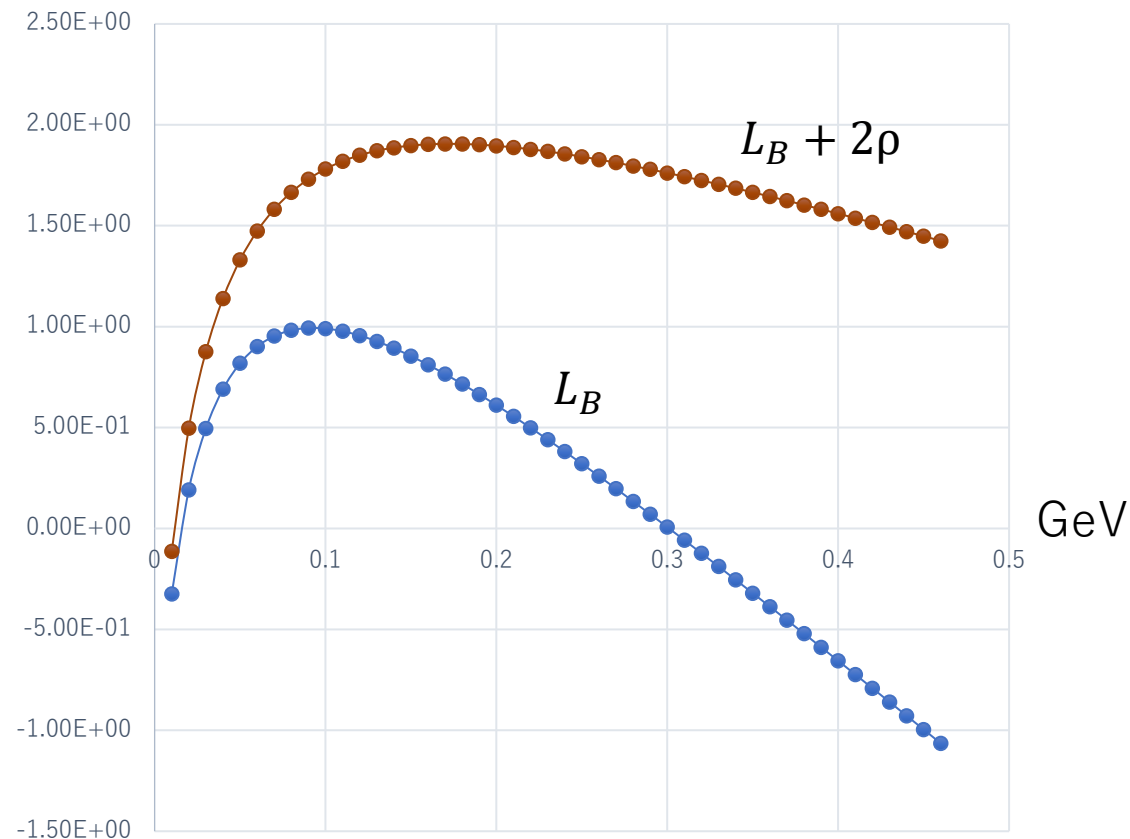
$$\tau = \frac{1}{c\beta} (2\pi\rho + 2L_B + 2L_S)$$

- $L_B$  を調整して $\tau$  を一定にする。

$$L_B = \frac{c\beta}{2} \tau_0 - \pi\rho - L_S$$

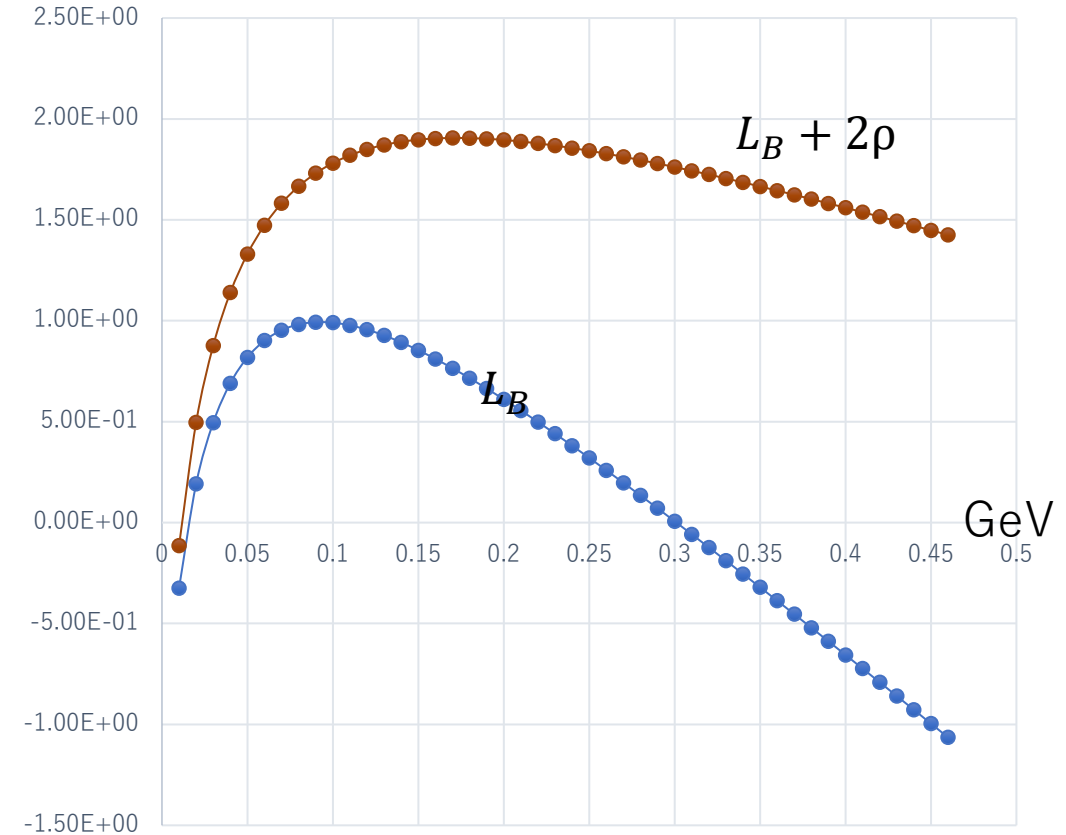
$\tau = nT$  ならば、ミュオンは加速される。

- $L_B$  はマイナスになれないから、この方式で20MeV~300MeVあたりまで加速可能。



# Issues on Varied Gap Microtron

- 直線部の軌道間隔は50cmから2mまで分布している。
- 磁石の面積は大きくなる。真空チャンバーもたくさん必要。
- 可搬型にするのは厳しい。
- 軌道を同じにできないか？



# AHVGM

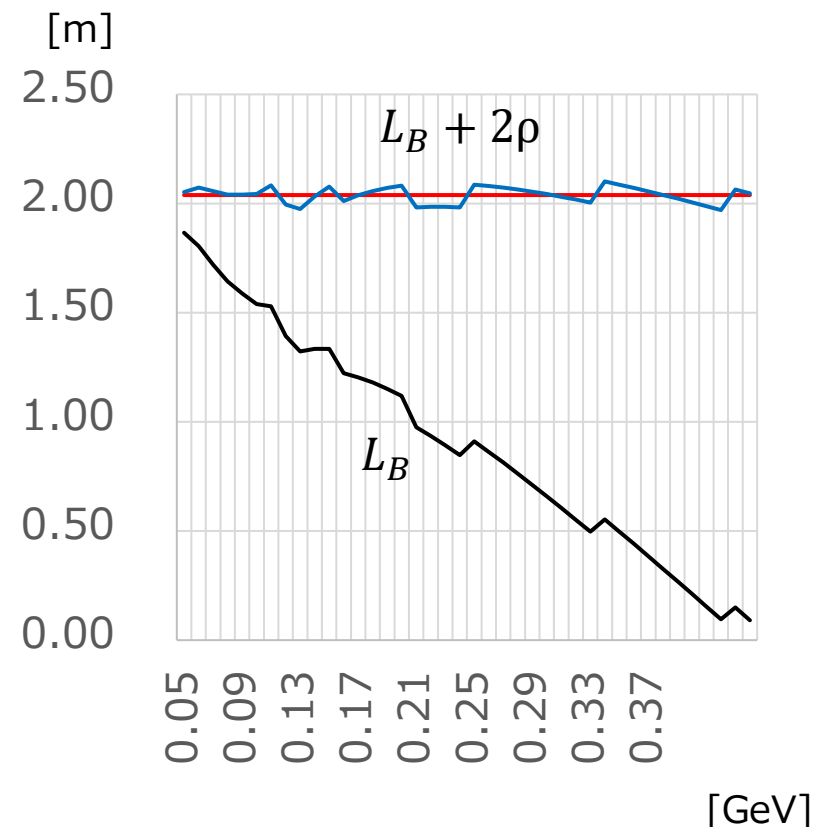
## Arbitrary Harmonic Varied Gap Microtron

- 周回時間を同じにする必要はない。
- 周回時間が、RFの周期で量子化されていれば良い。調和数を調整代に使う。

$$L_B = \frac{c\beta}{2} \tau_0 + \frac{n\lambda}{2} - \pi\rho - L_s$$

$n$  は整数.正でも負でも良い。

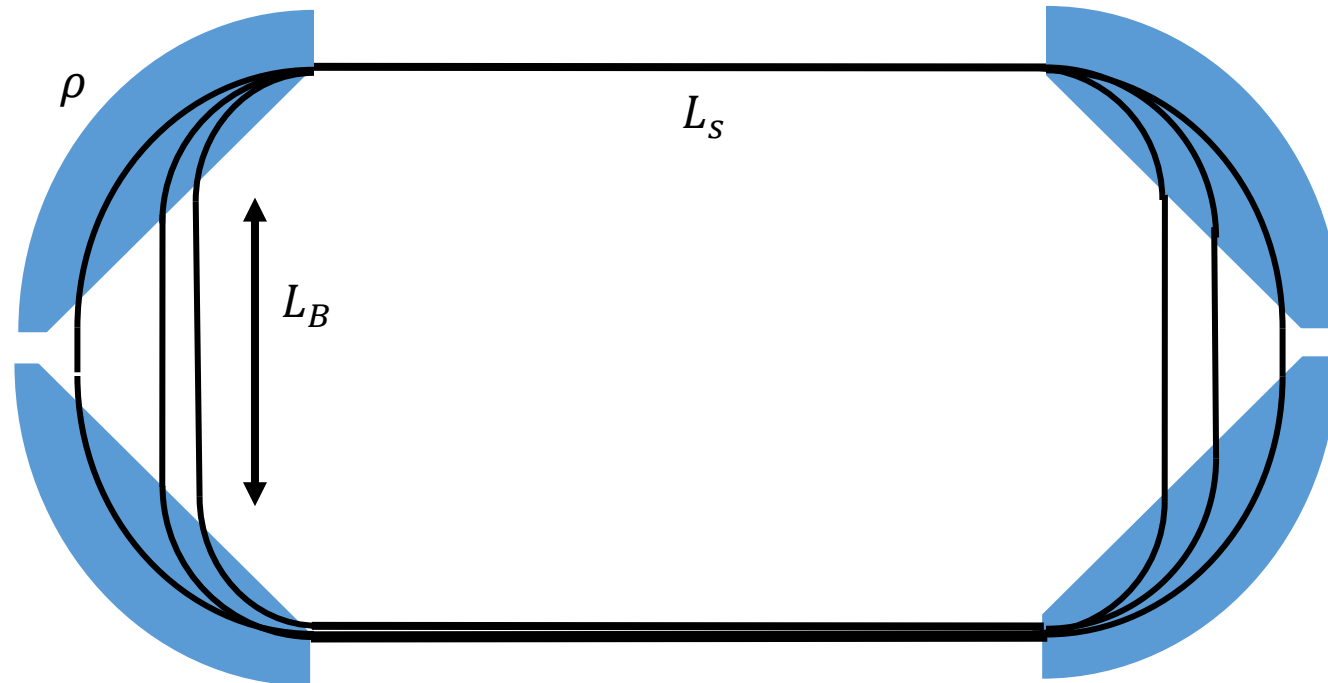
- この自由度を使うと、 $L_B + 2\rho$  (二つの直線部の間隔) をほぼ定数にできる。
- 330~400MeV程度まで加速可能。(初段加速に依存)



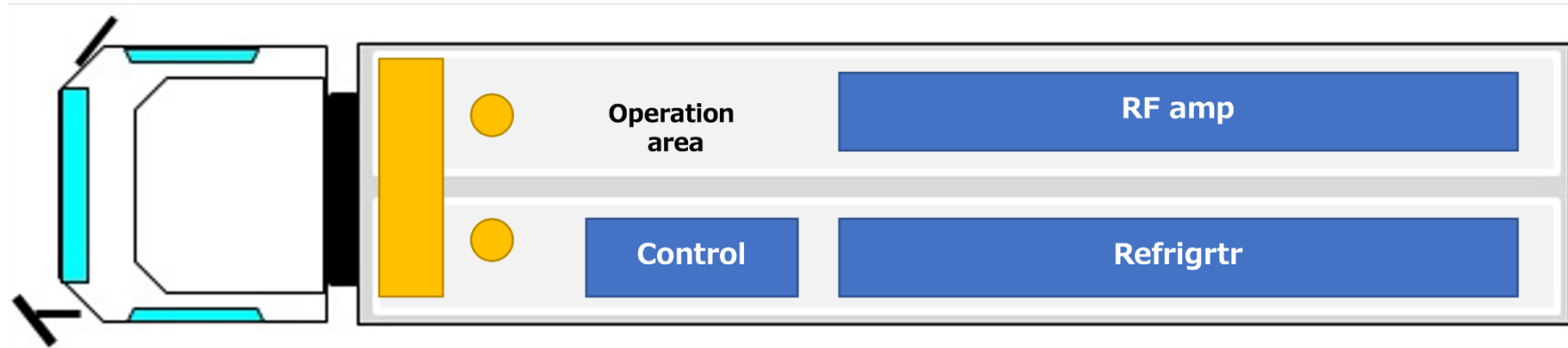
# AHVGM

## Arbitrary Harmonic Varied Gap Microtron

$$L_B = \frac{c\beta}{2}\tau_0 + \frac{n\lambda}{2} - \pi\rho - L_S$$

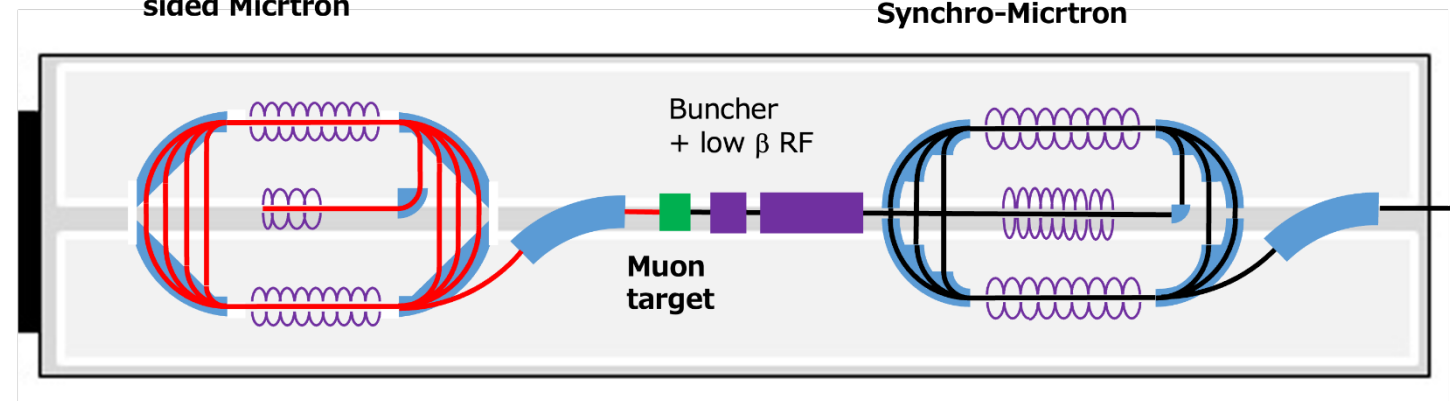


# 可搬型ミュオン源



400 MeV Electron Double-sided Micrtron

400 MeV Muon Double-sided Synchro-Micrtron



# 400MeVミュオン

- ミュオンの電離損失(Bethe-Bloch)~MP

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) \sim 2 \text{ MeV} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

- コンクリート密度: 2.3 g/cm<sup>3</sup>
- 400MeVミュオンの飛程は85cm(80~95cm程度)
- 1m程度のコンクリート構造物の検査が可能。

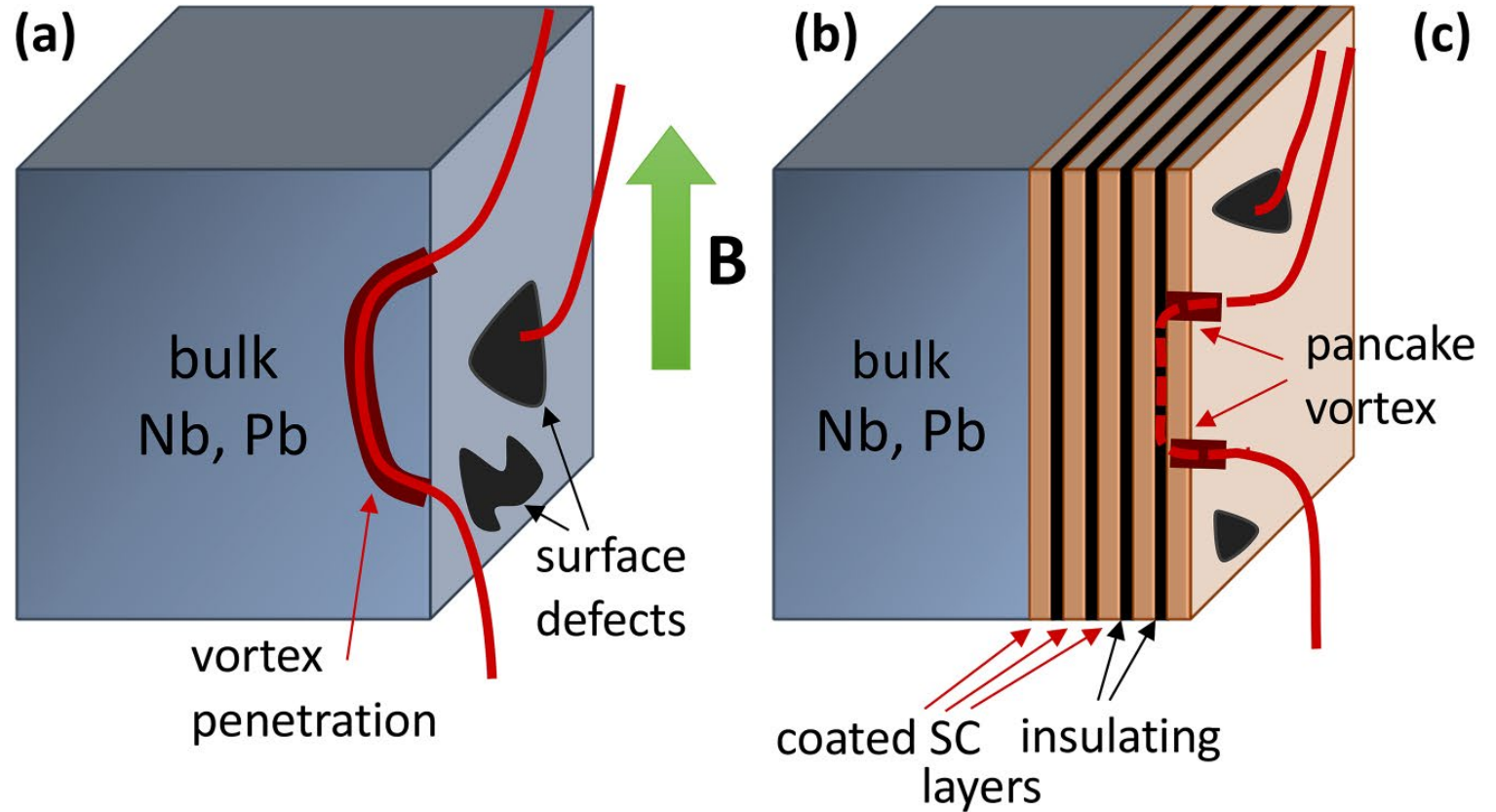
# まとめ

- ミュオン再加速を含めた可搬型ミュオン源について検討した。
- DSMMG:車載型Double-sided Microtronでコンパクトなミュオン生成が可能。
- グラファイト標的で $1.4 \times 10^8$ の $\mu^+\mu^-$ が生成可能。
- AHVGMで400MeV程度までミュオンの加速可能。
- さらなる加速は力技になってくる。強い磁場でのマイクロトロン加速、あるいは超伝導ライナック。

# Back Up

# 薄膜超伝導体

- $B_{sh}$  を超える表面磁場での磁束の侵入が超伝導破壊の元凶。これを何らかの方法で抑えることができれば、より高い電場で運転可能。
- 表面ポテンシャル（磁束を超伝導体外部に押し出す力）を利用して実効的にバルクNb上での磁場を抑える。
- $S'-I-S$  薄膜構造により、内部に侵入した磁束は、 $I-S$  界面で押し戻される。
- 表面の薄膜超伝導体  $S'$  は、より臨界磁場の高い物質で構成するのが良い。



# S'-I-S構造の臨界磁場

- S'-I-S構造により、大幅に高い表面磁場が可能に。
  - NbN : 240 mT
  - MgB<sub>2</sub>: 300 mT
  - Nb<sub>3</sub>Sn: 400 mT
- これらの超伝導体にTesla空洞のE/B比を適用すると、
  - (Nb  $B_p=200$  mT)
    - NbN : 57 MV/m
    - MgB<sub>2</sub>: 71 MV/m
    - Nb<sub>3</sub>Sn: 95 MV/m

