

Flavor Physics Workshop 2022

J-PARC muon g-2/EDM 実験に向けた ミュオン加速器高速部の開発

名古屋大学 鷺見一路

飯嶋徹、居波賢二、茨木優花、須江祐貴、四塚麻衣（名大）、
惠郷博文、大谷将士、齊藤直人、三部勉、吉田光宏（KEK）、
近藤恭弘、守屋克洋（JAEA）、竹内佑甫（九大）、
中沢雄河（茨大）、安田浩昌（東大）





目次



- J-PARC muon g-2/EDM 実験
- ミューオン線形加速器高速部
- 円盤装荷型加速管の高周波設計
- ビーム光学系の設計
- まとめ



ミューオン 異常磁気能率・電気双極子能率

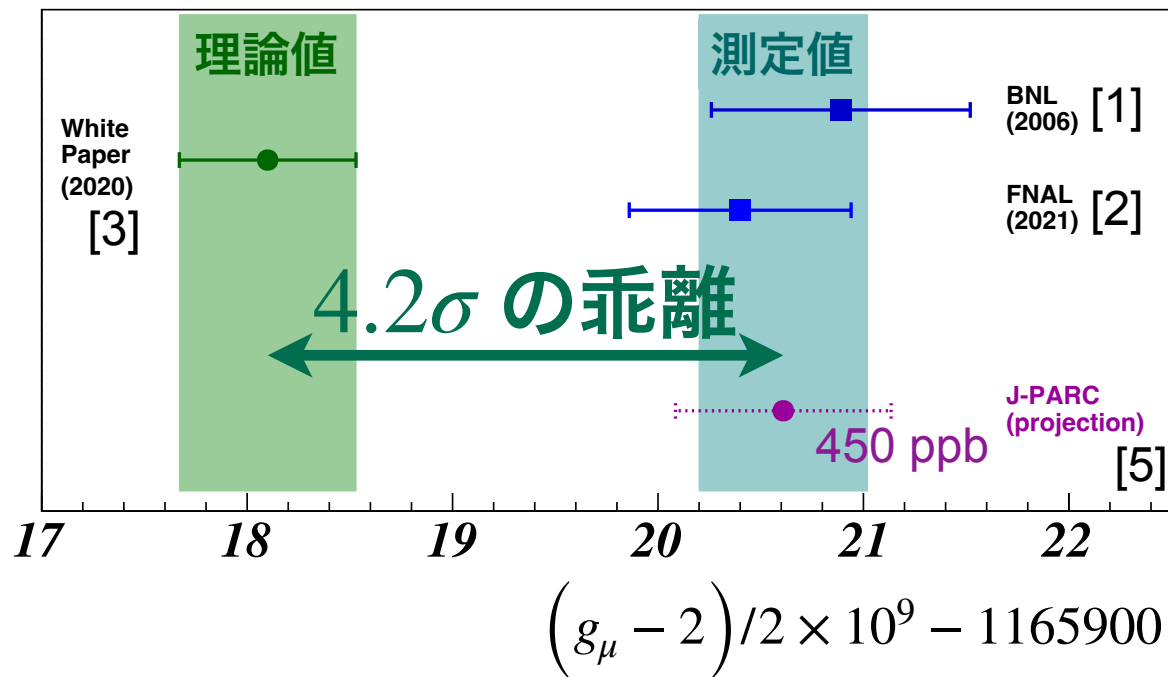


ミューオンスピン \vec{s} と電磁場 \vec{E}, \vec{B} の相互作用ハミルトニアン (静止系):

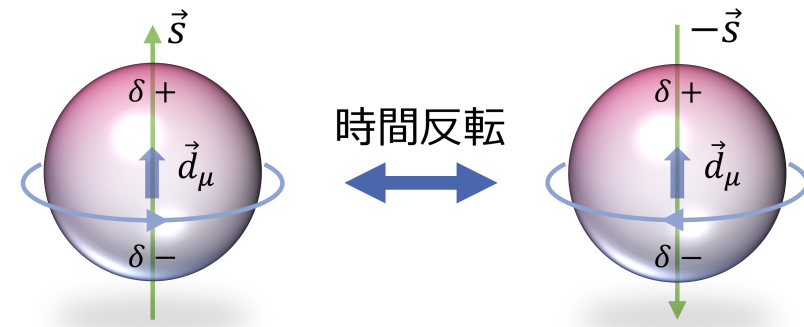
$$H = -g_\mu \frac{e}{2m_\mu} \vec{s} \cdot \vec{B} - d_\mu \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} \cdot \vec{E}$$

m_μ : ミューオン質量

異常磁気能率 g-2



電気双極子能率 EDM



時間反転対称性を破る未観測の物理量

$$|d_\mu| < 1.8 \times 10^{-19} \text{ e cm (95 \% C.L.) [4]}$$

$$\rightarrow \text{感度} \sim 1.5 \times 10^{-21} \text{ e cm (J-PARC projection) [5]}$$

加速ミューオンを用いた新手法による精密測定 @ J-PARC

[1] *Phys. Rev. D*, vol. 73, p. 072003, 2006.

[2] *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, p. 141801, 2021.

[3] *Phys. Rep.*, vol. 887, pp. 1-166, 2020.

[4] *Phys. Rev. D*, vol. 80, p. 052008, 2009.

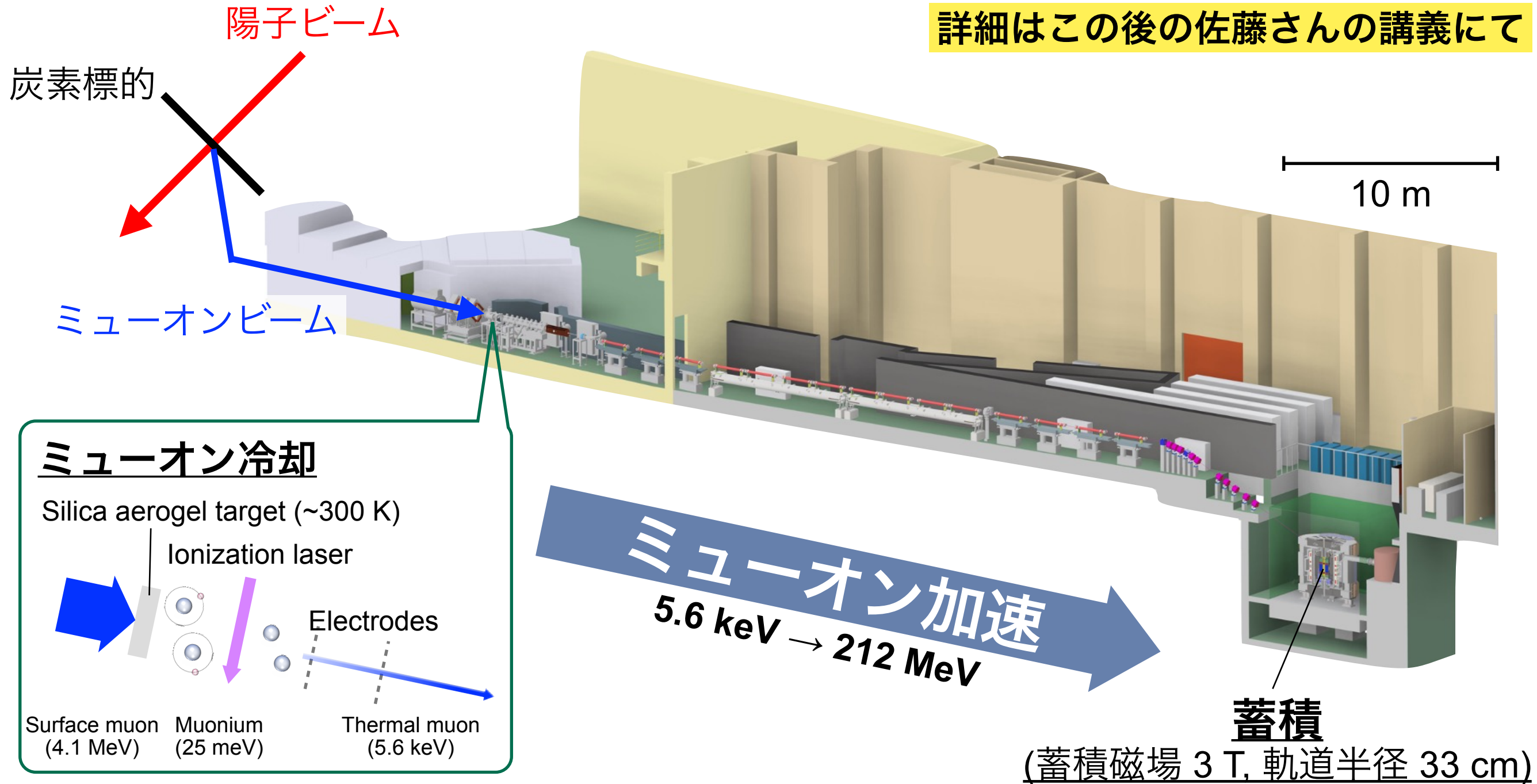
[5] *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2019, p. 053c02, 2019.



Muon g-2/EDM experiment @ J-PARC

Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2019, p. 053C02, 2019.

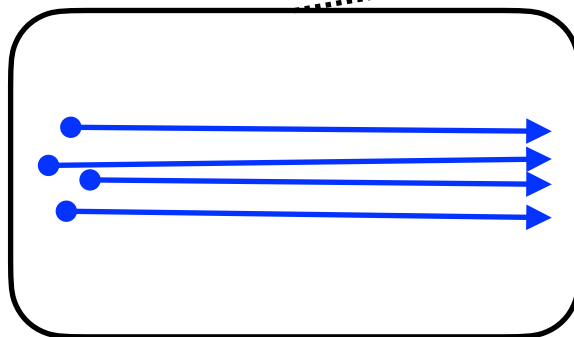
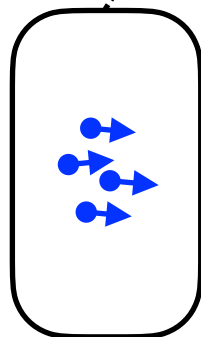
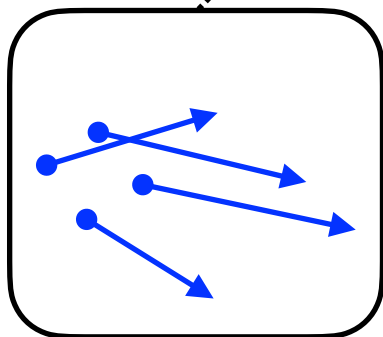
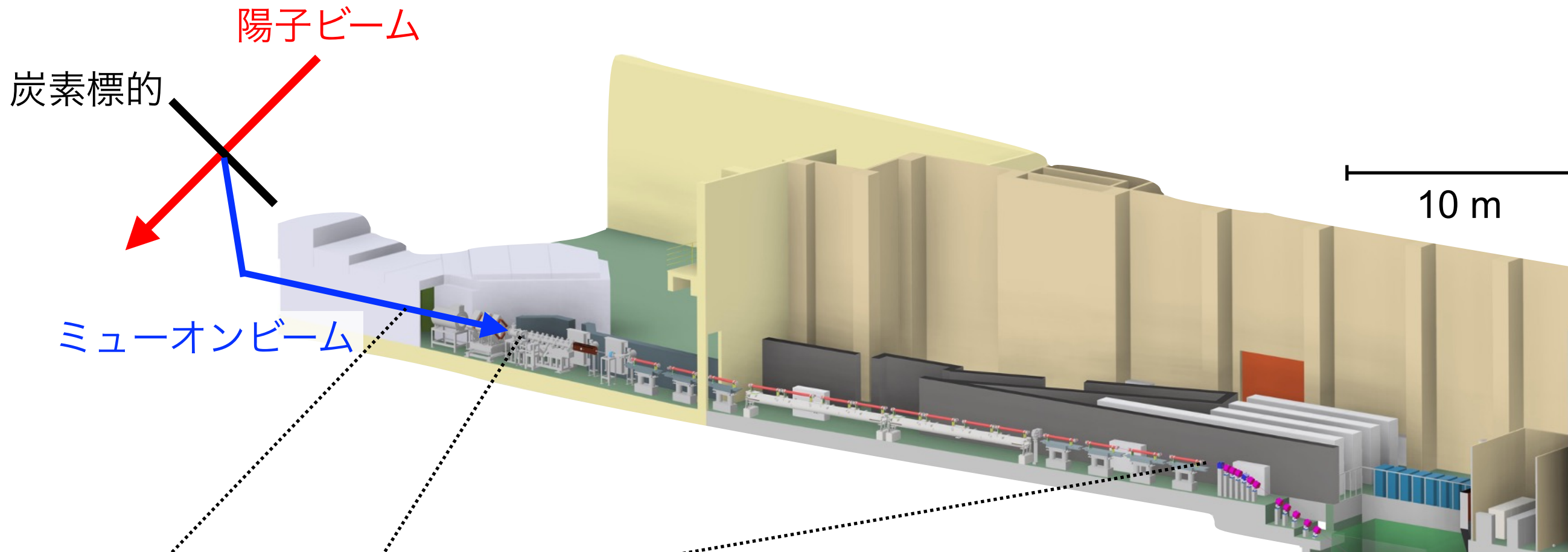
詳細はこの後の佐藤さんの講義にて



蓄積したミュオンのスピン歳差運動周波数を測定



Muon g-2/EDM experiment @ J-PARC



ビーム品質への要求

運動量 p の分散:

$$\Delta p / p < 0.1 \% \text{ (RMS)}$$

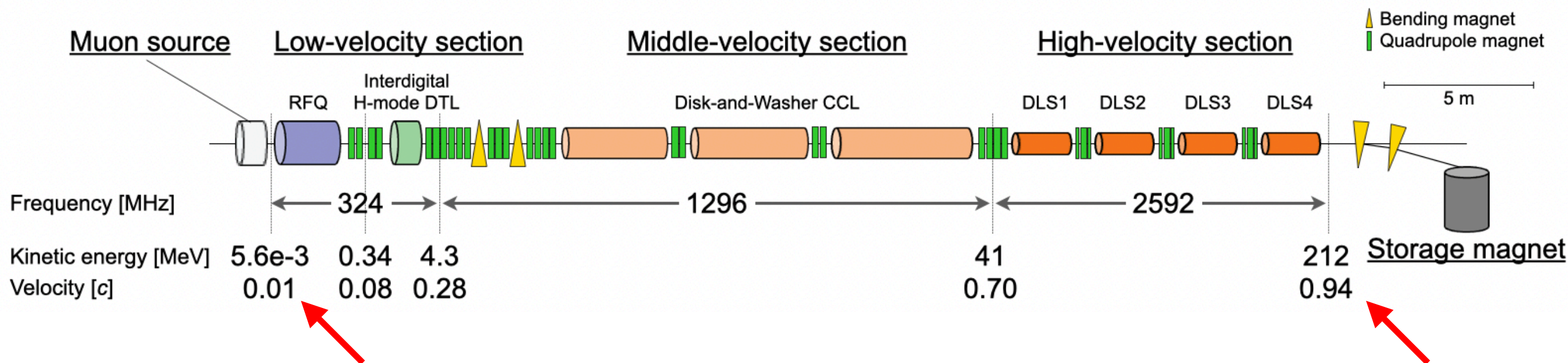
横方向*の位置と運動量の広がり
 を表す指標 (エミッタンス):

$$\epsilon_{\text{norm.}; \text{total}} \sim 1\pi \text{ mm mrad}$$

冷却と再加速で高品質なビームを実現
= 位置と運動量の広がりが小さい

* 進行方向に対して垂直な方向

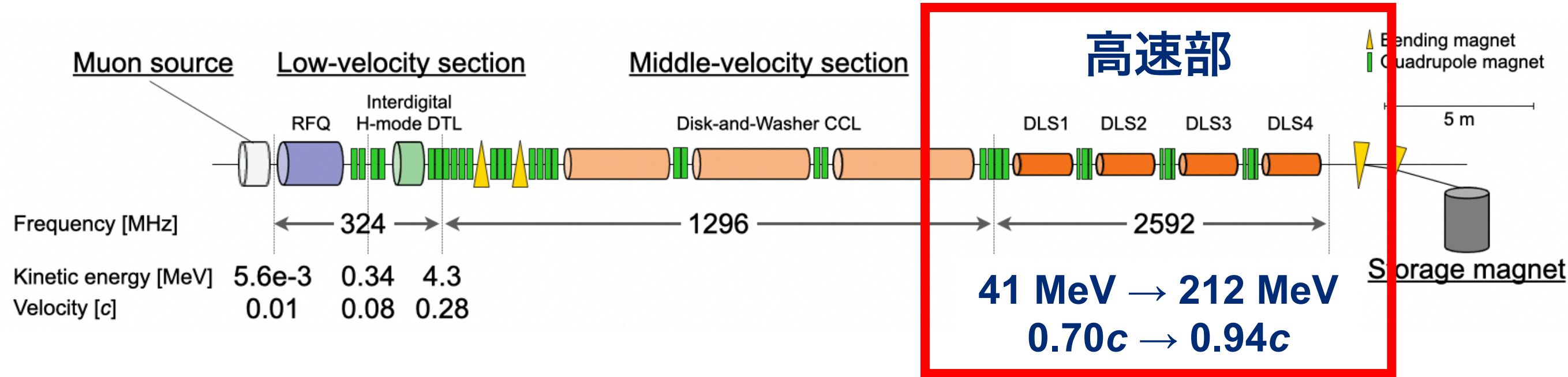
ミューオン線形加速器



- 加速によりミューオンの速度が大きく変化 (光速の1% → 94%)
 - ミューオンの崩壊損失や空間的制限
- それぞれの速度域に適した4種類の高周波加速空洞

前例のないミューオン加速に向けて各要素の開発が進行中

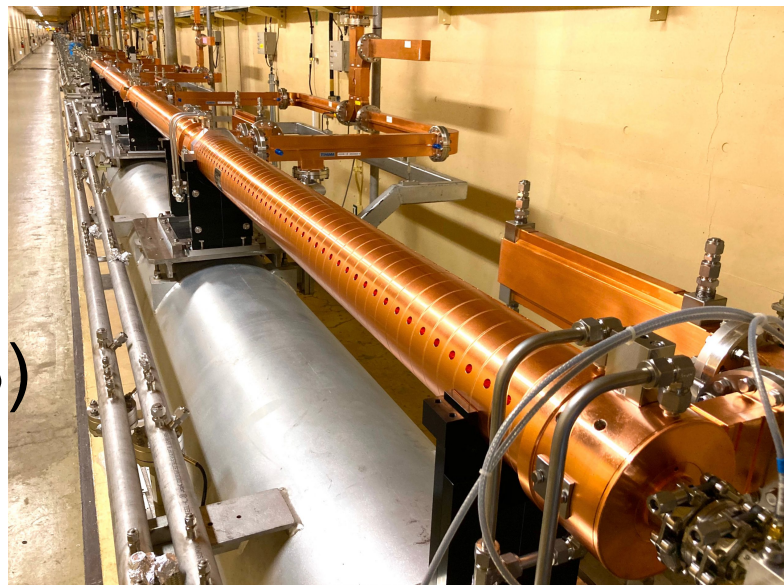
詳細はこの後の大谷さんの講義にて



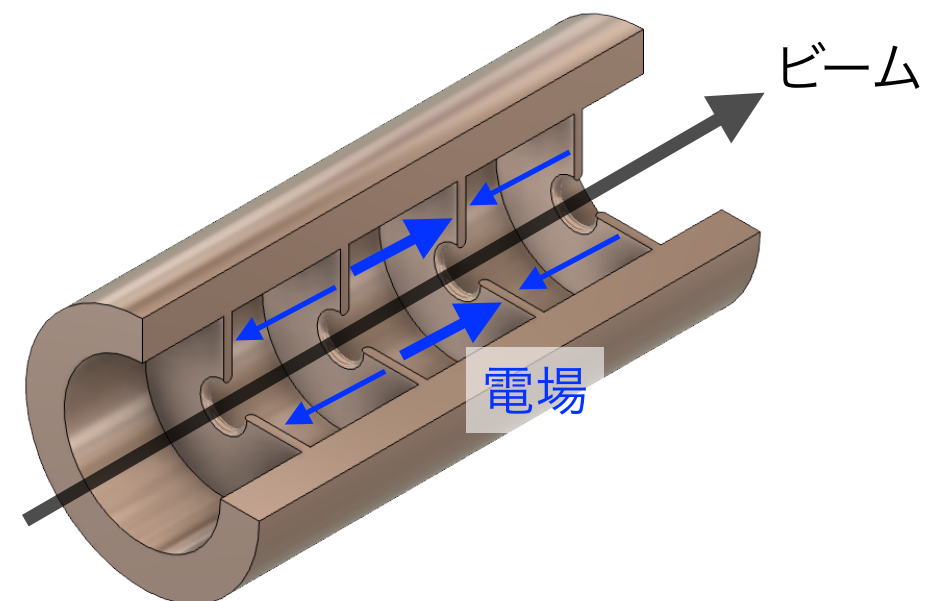
高速部への要求: 高い加速勾配 (~20 MeV/m) と高いビーム品質の両立

ほぼ光速の電子加速で
広く用いられている
円盤装荷型加速管
(disk-loaded structure, DLS)
初めてミュオンへ適用

外観 (例: KEK入射器)



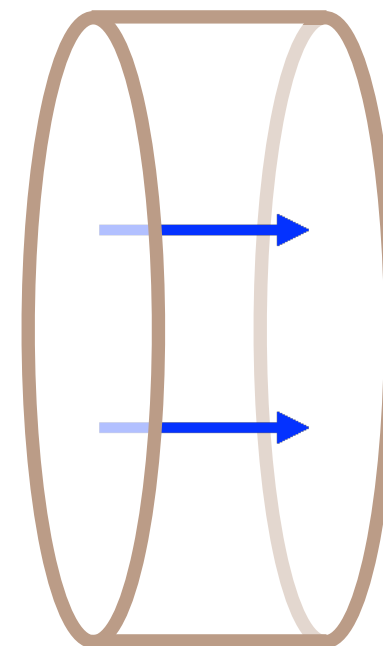
断面 (イメージ)



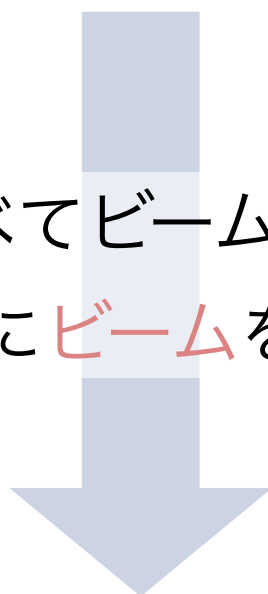
<https://www2.kek.jp/accl/>

円筒型マイクロ波空洞共振器

- 金属 (銅) で囲まれた中空空洞
- 共振周波数で振動する電場 (と磁場)



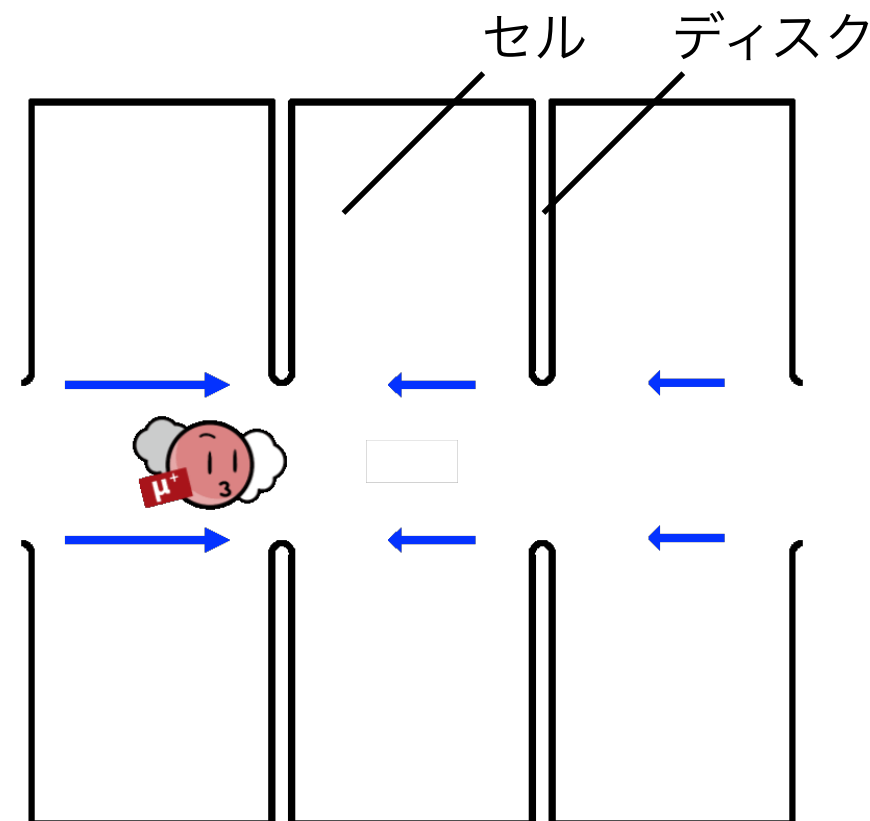
空洞 (セル) を並べてビームが通る穴を開ける
電場の位相にビームを同期させる



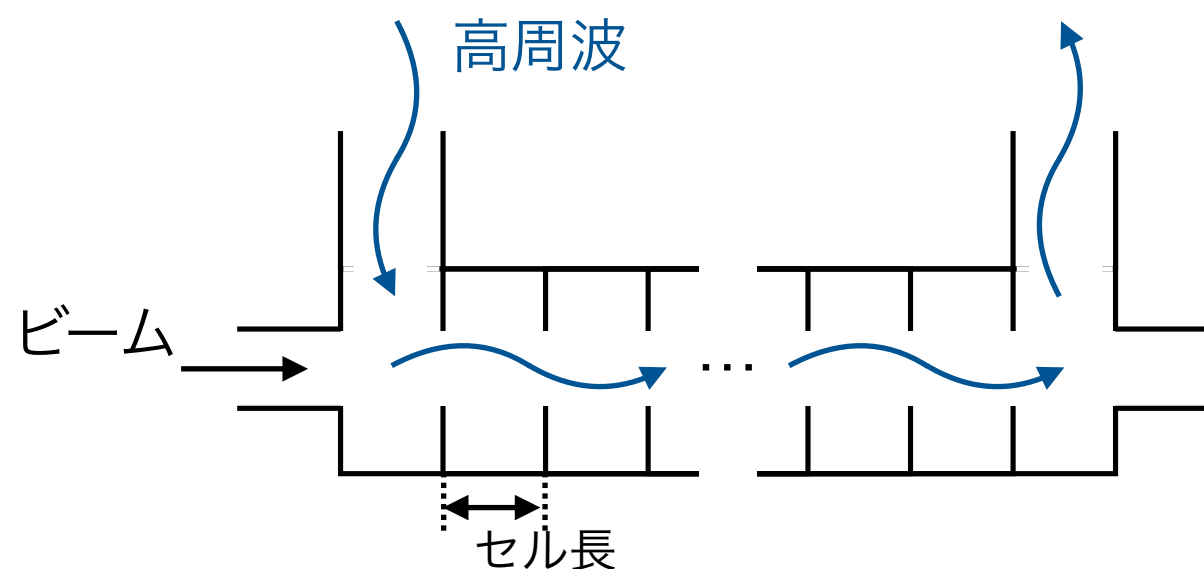
加速

力 = ビームの電荷 q x 電場 E

ミューオン加速では特に同期が重要



- ~60セルを繋げた~2 mの構造 x4
- ビーム進行方向に対して側方から高周波 (~40 MW) を投入
- 進行波が**減衰しながら**管内を伝搬し, 各セルに電磁場が発生



ディスクの間隔 (セル長) を変えると電場の位相速度が変わる



セル長を1つ1つ変えて速度変化に対応

高速部~10 mの区間を通して常にビームと電場を同期

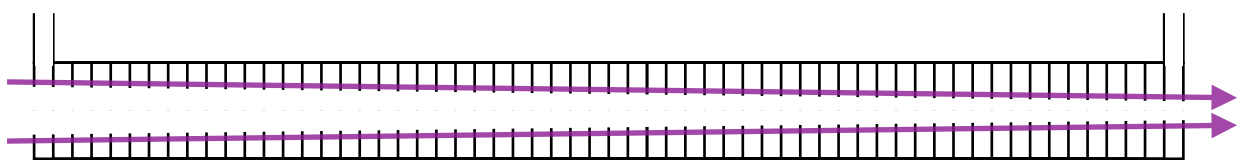


ミューオン加速用DLS 高周波設計



MAKE NEW STANDARDS.
東海国立大学機構

加速中の速度変化を簡単に計算する工夫



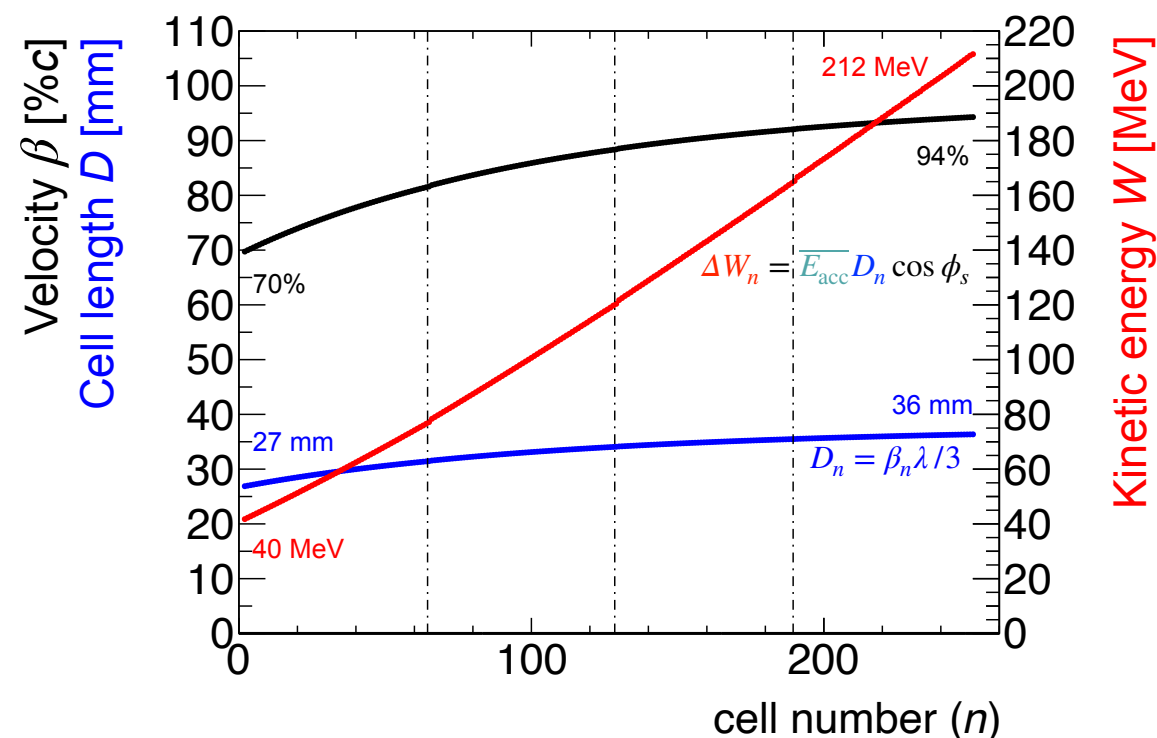
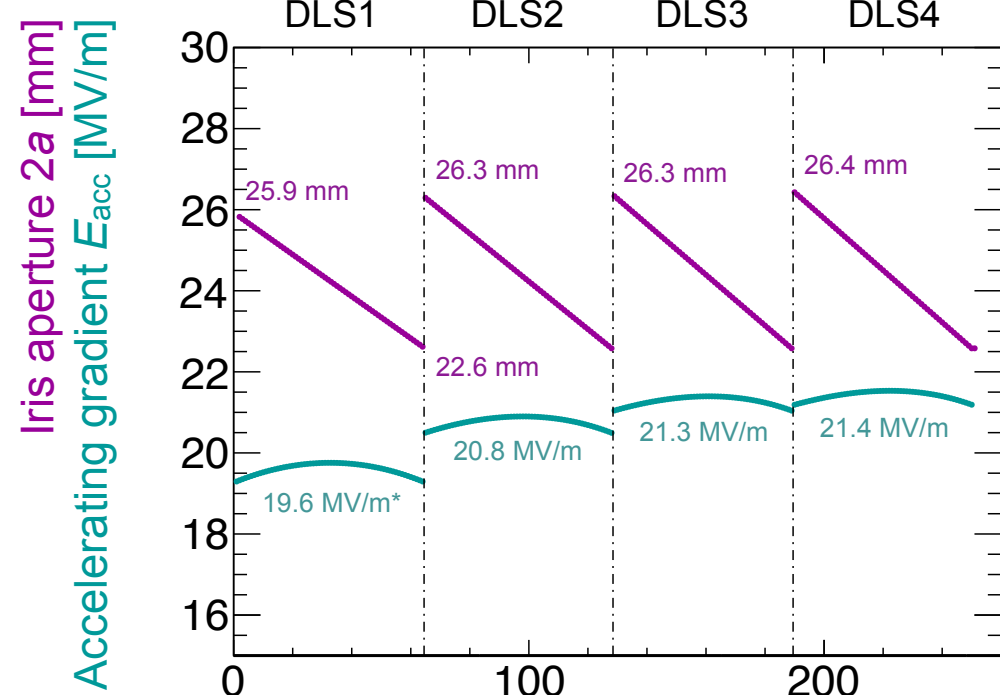
ビーム孔を先細りにして進行波の減衰量を調整
→ 角度の最適化で (準) 定勾配化

運動エネルギーの変化量

\propto [“各DLSの” 平均加速勾配]

ビームと高周波電場の同期条件

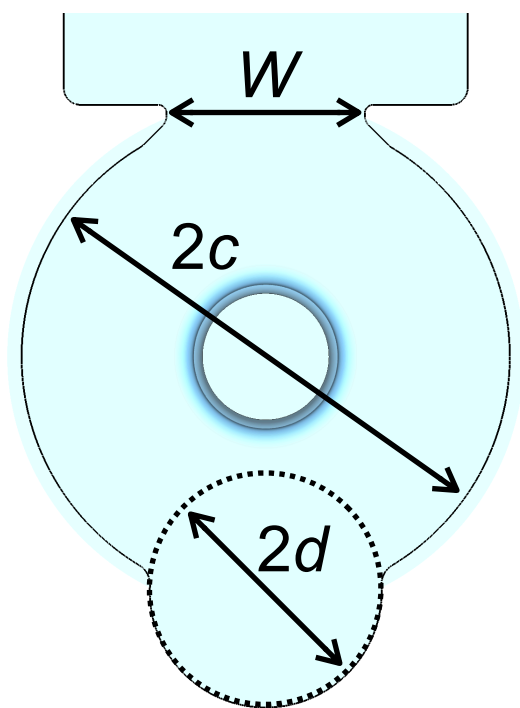
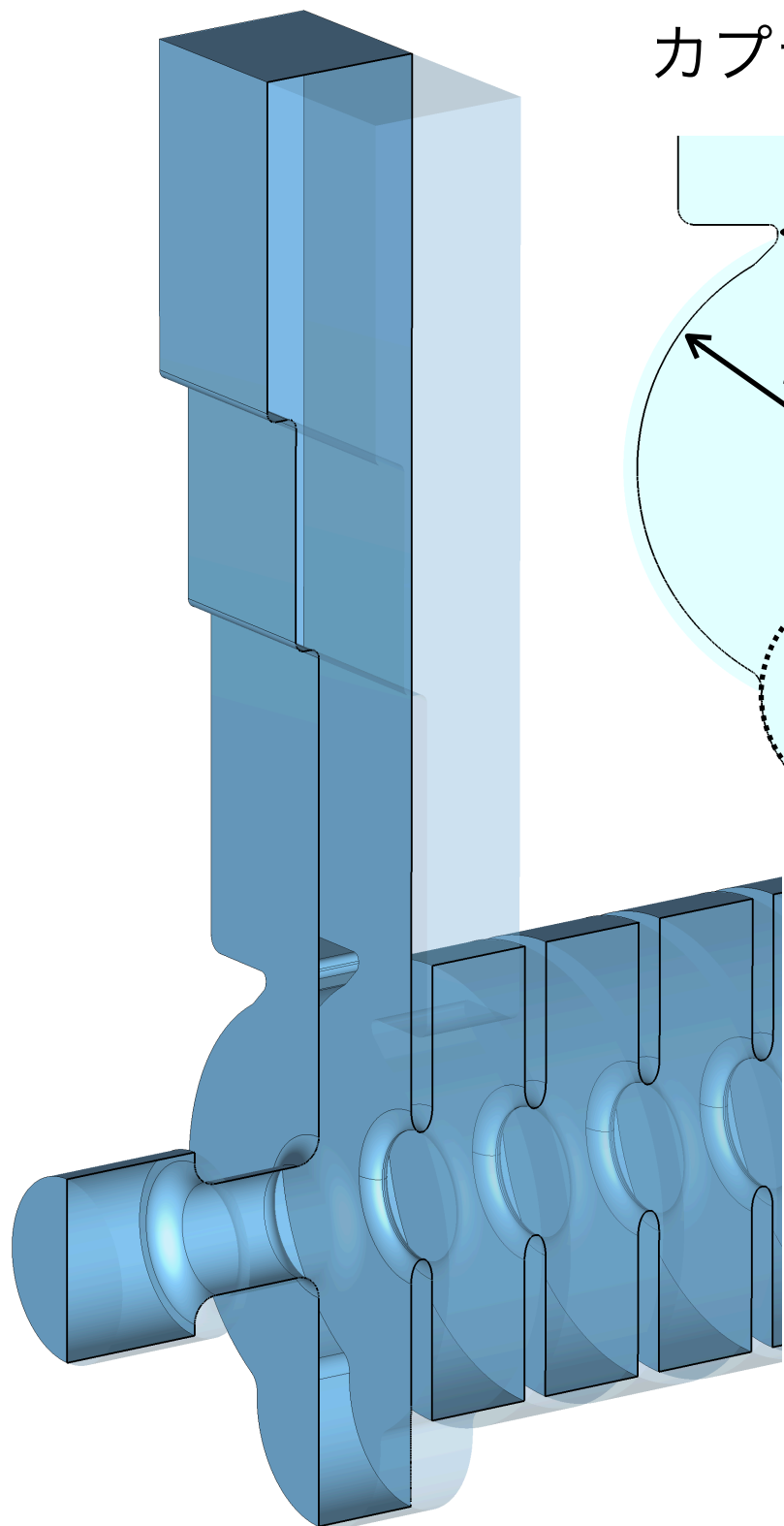
[セル長] \propto [ビーム速度]



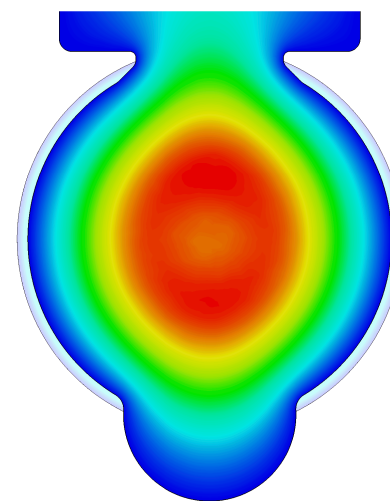
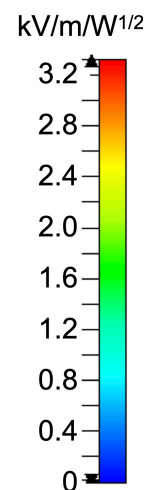
シミュレーション上ではビームと電場のずれを最大で2 ps程度に抑制

カプラーセルの高周波設計

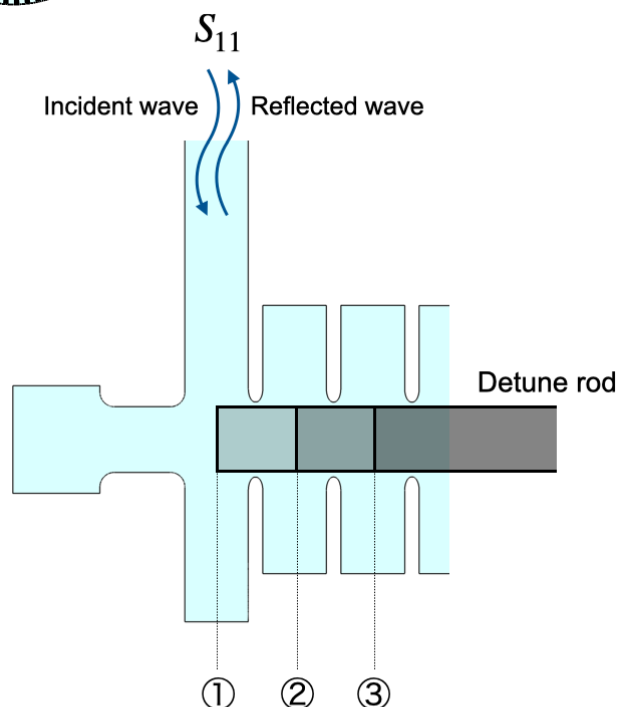
カプラーセル=加速管と外部回路を繋ぎ高周波が入り出す部分



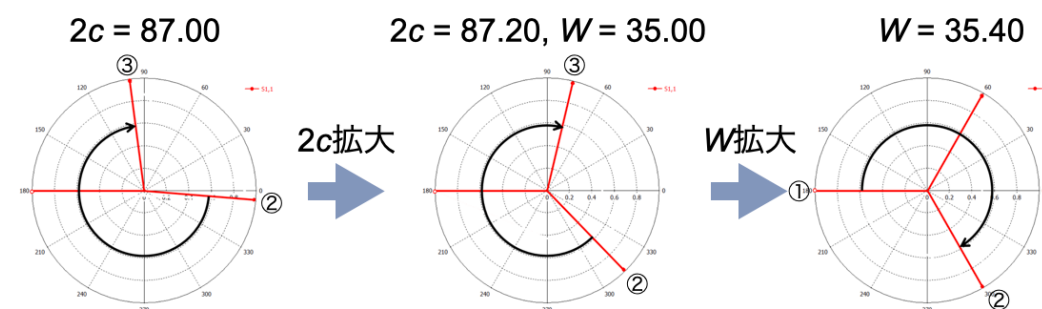
軸対称でないため複雑な設計を要する



電磁場対称性を補うために
開口部の反対側に凹み

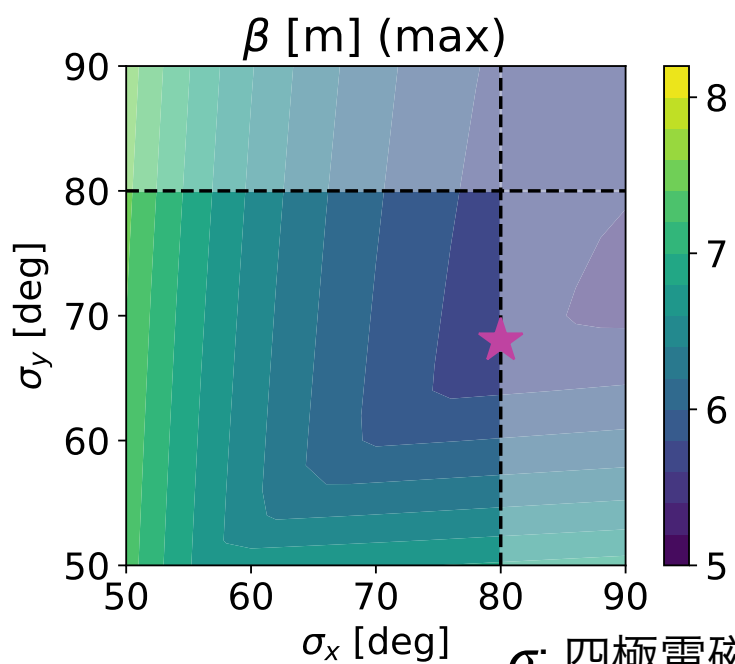
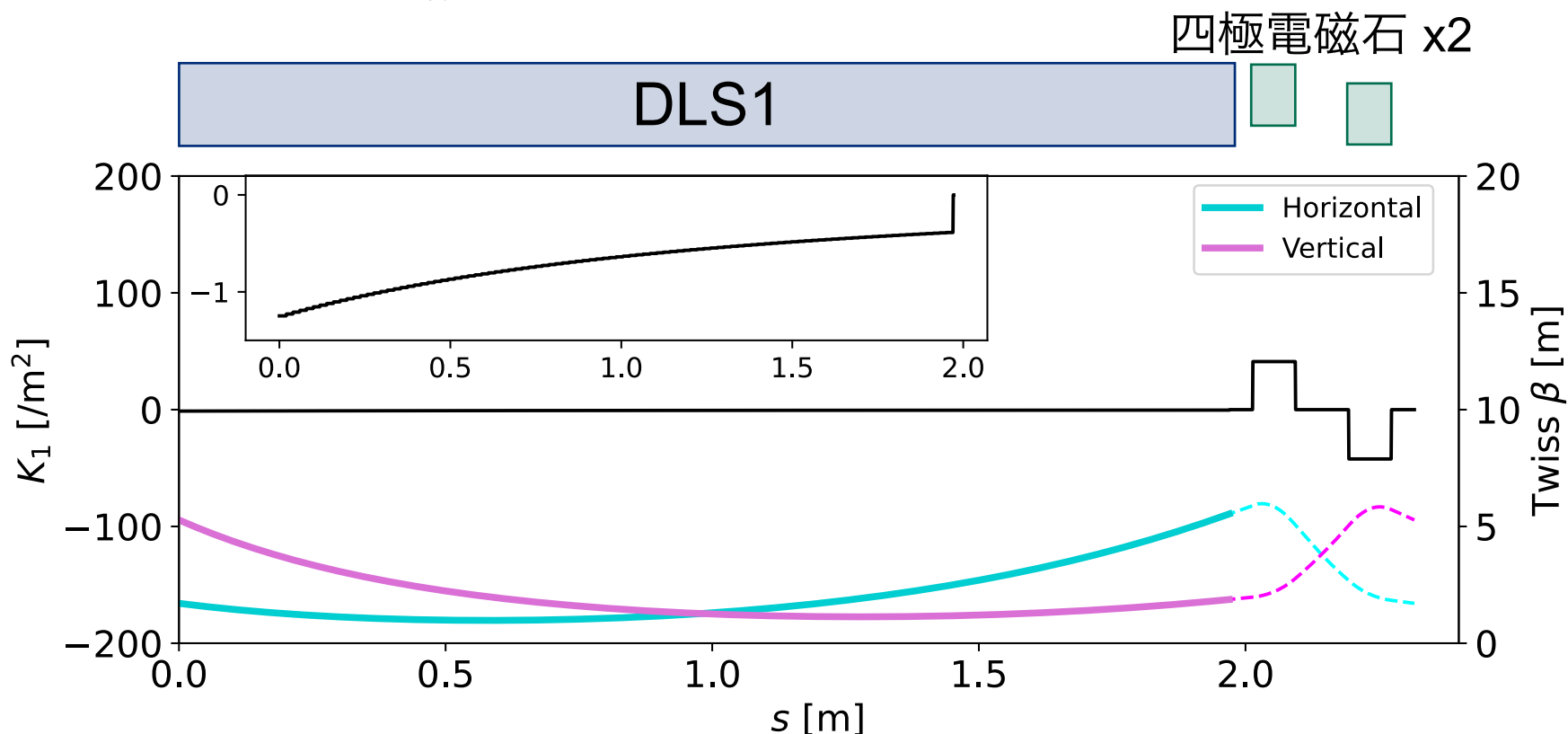


導体棒で高周波を反射させ、
入射波との位相差を見ながら寸法を調整



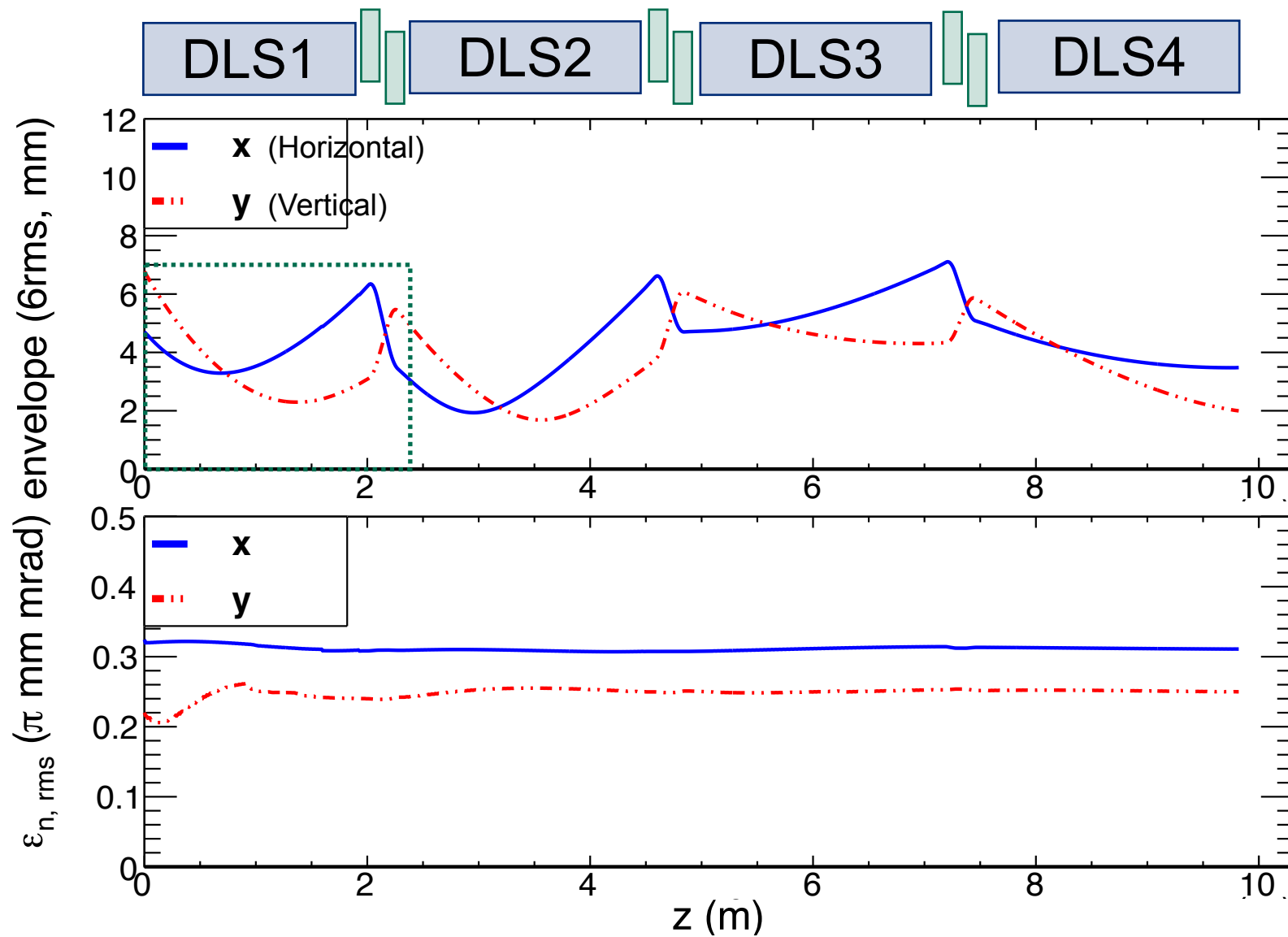
外部回路への反射率1%以下 (simulation)

ビームの運動方程式: $\frac{d^2\sqrt{\beta}}{ds^2} + K_1\sqrt{\beta} - \sqrt{\beta}^{-3} = 0$, $\sqrt{\beta}$: 横方向のビーム幅



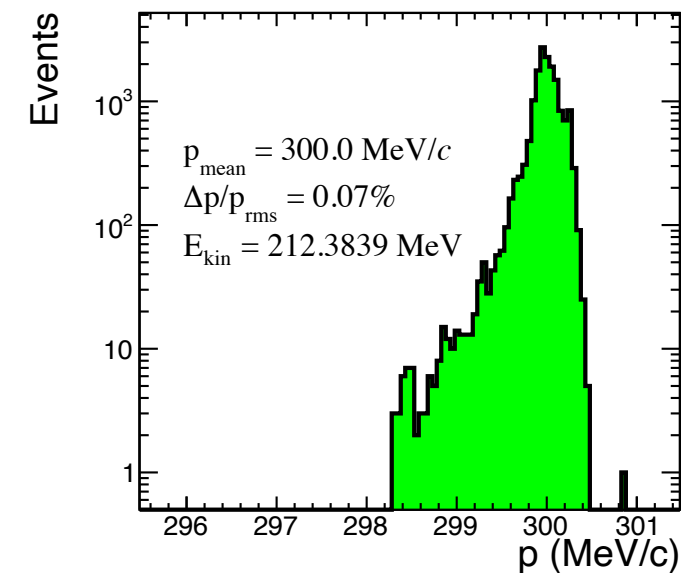
ビームを加速管に通すには...
周期境界条件を満たすように始点でのビーム分布を調整
 四極電磁石の収束力で走査し、
 全体的にビーム幅が小さい光学系になる値を取得

上流のシミュレーションで得たビーム分布を用いて高速部での加速を評価



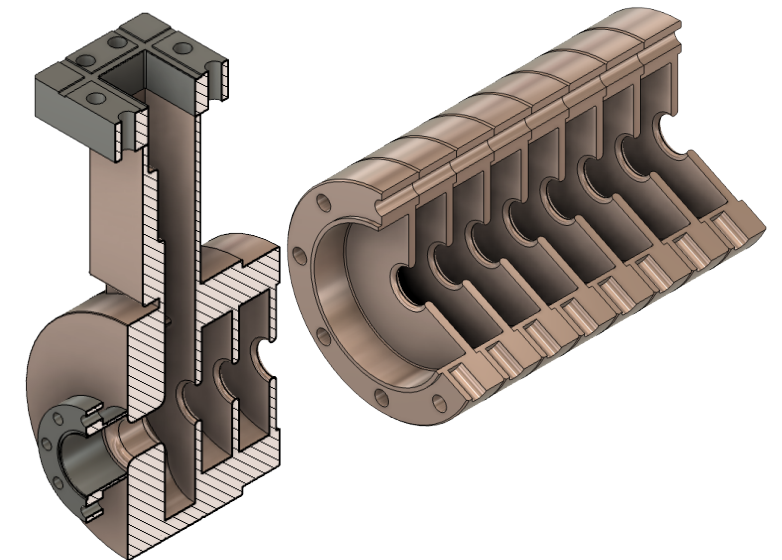
DLS1には設計した光学系を適用
厳密には周期境界条件が
成り立たないため、DLS2以降は
大まかに調整した光学系

運動量分布 (高速部出口)



エミッタンスはほぼ維持できており、運動量分散は要求を満たしている

- J-PARC muon g-2/EDM 実験に向けて世界初のミュオン加速器を開発中
- ミュオン加速用DLSの高周波設計
 - 各セルでセル長を変える構造, $\sim 20 \text{ MV/m}$ @ 40 MW の準定勾配型
 - 反射を見ながらカプラーセルの構造を最適化
- ビーム光学系の設計
 - 周期境界条件を適用, 高いビーム品質を維持した加速が可能
- 展望
 - 2022年度後半~ 試作機高周波測定・誤差評価
 - 2024年度~ 実機製作
 - 2027年度 DLSでのミュオン加速実証・実験開始



本研究は、JSPS 科研費 JP18H03707、JP18H05226、JP20H05625、21K18630、21H05088、22H00141、22J20870、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR2120、三菱財団自然科学研究助成の助成を受けたものです。

科研費
KAKENHI

また、本稿は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託事業で得られた成果を基に作成したものです。