

ミュオン線形加速器高速部の開発状況

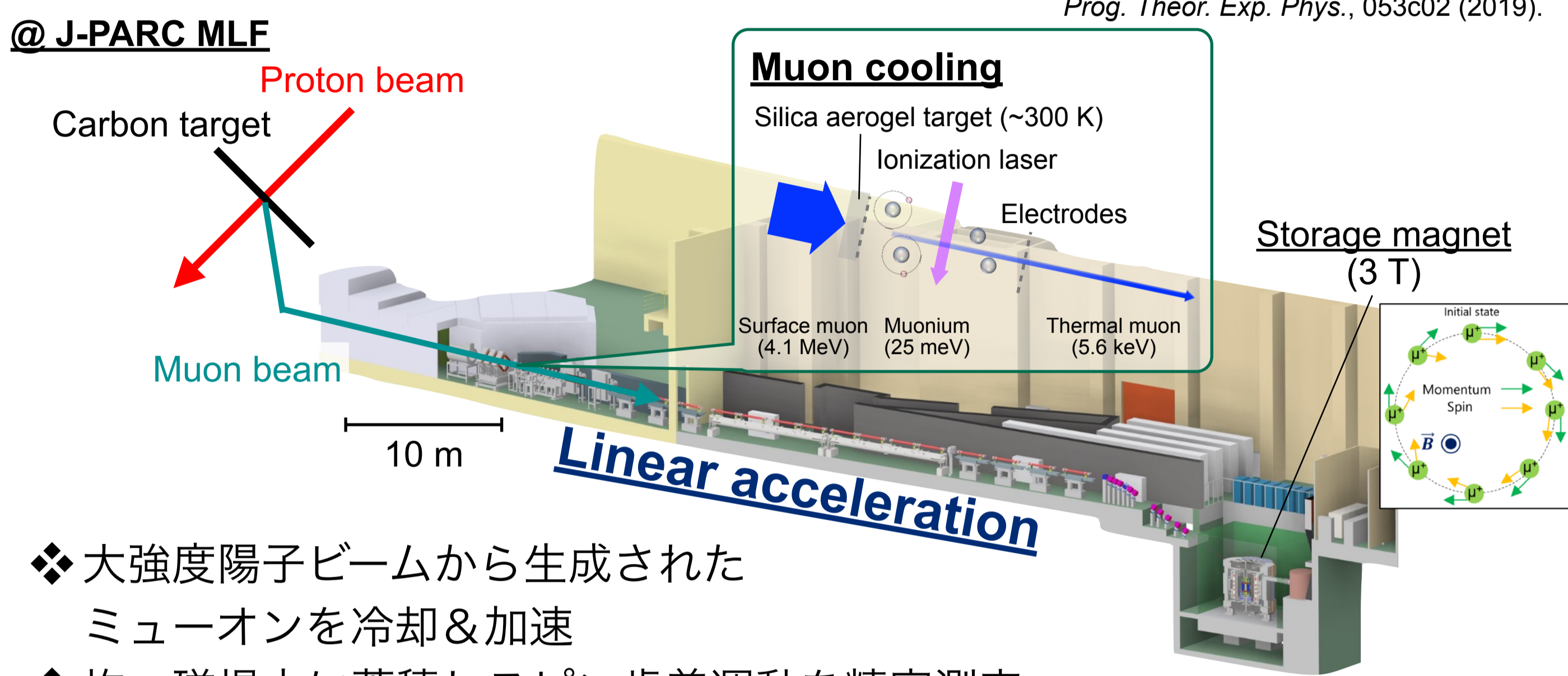
鷲見一路 A), 飯嶋徹 A), B), C), 居波賢二 A), 茨木優花 A), 惠郷博文 C), 大谷将士 C), 近藤恭弘 D), E), 齊藤直人 C), 須江祐貴 A), 竹内佑甫 F), 中沢雄河 G), 三浦禎雄 H), 三部勉 C), 吉田光弘 C), 四塚麻衣 A)

A) Nagoya Univ., B) KMI, C) KEK, D) JAEA, E) Ibaraki Univ., F) Tsung-Dao Lee Institute, G) RIKEN, H) NAT

概要

J-PARCで建設中のミュオン線形加速器は、ミュオンの異常磁気能率と電気双極子能率の精密測定を可能にする低エミッタンスミュオンビームの実現を目指している。その線形加速器は全4段で構成され、前段の3種類の加速器で光速の70%まで加速されたミュオンは、4本の進行波加速管で構成される高速部で光速の94%まで加速される。進行波加速管は速度変化が大きいミュオン専用設計し、試作によりその実現可能性を検証した。さらに、様々な不定性がビームに及ぼす影響の推定を進めている。

研究背景 ~ミュオン双極子能率測定~

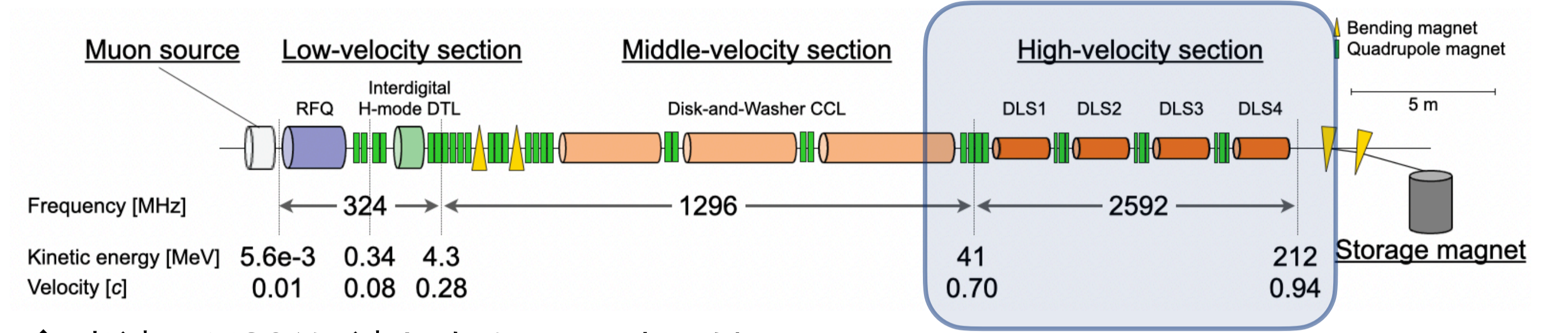


- ❖ 大強度陽子ビームから生成されたミュオンを冷却&加速
- ❖ 均一磁場中に蓄積しスピン歳差運動を精密測定

低エミッタンスミュオンビームで新手法での精密測定を実現

- ❖ ビーム品質への要求
横方向エミッタンス: $\sim 1.5\pi$ mm mrad (規格化, total)
運動量分散: $< 0.1\%$ (RMS) at 300 MeV/c

ミュオン用円盤装荷型加速管

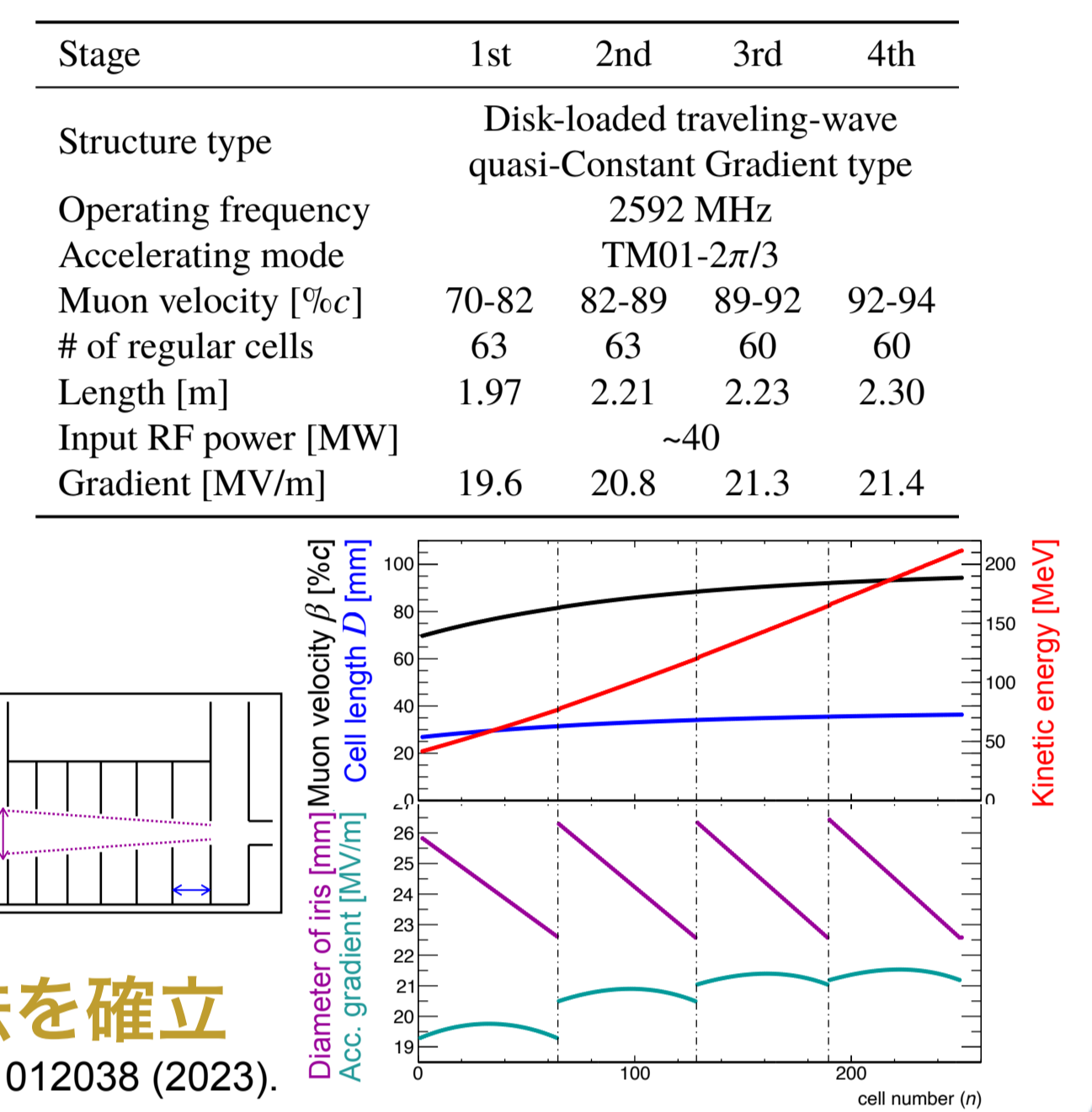


- ❖ 光速の70%に達したミュオンは4本の進行波加速管でさらに加速
- ❖ 各加速管の対応速度域は異なる

特徴

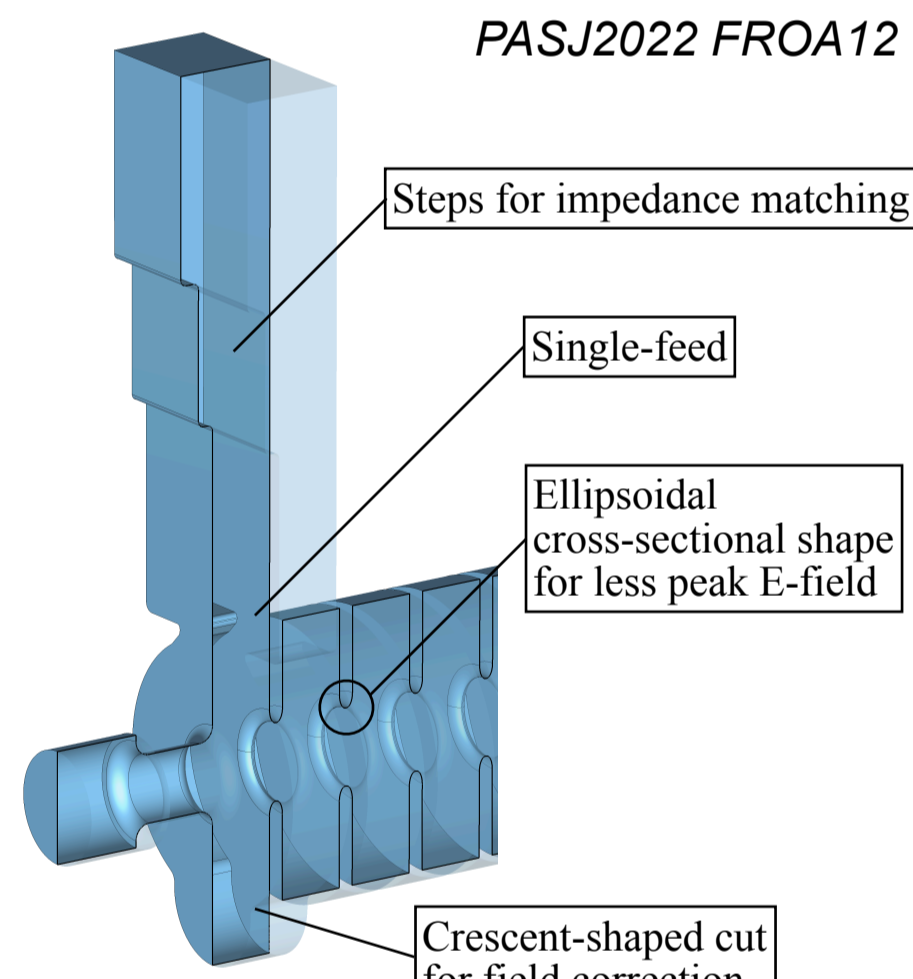
- ▶ ディスクの穴径を先細りにし準定勾配化
- ▶ 速度に比例したディスク間隔
同期条件: $D = \beta\lambda/3$ ($\lambda(2592 \text{ MHz}) = 115.661 \text{ mm}$)
- ▶ 設計したセルの電磁場分布からセルごとの運動エネルギー変化を計算
 $\Delta W = eE_{\text{acc}} \cos \phi_s$ (同期位相 $\phi_s = -13 \text{ deg}$)

累積移相誤差2度以下の構造最適化手法を確立
J. Phys.: Conf. Ser., 2040, 012038 (2023).

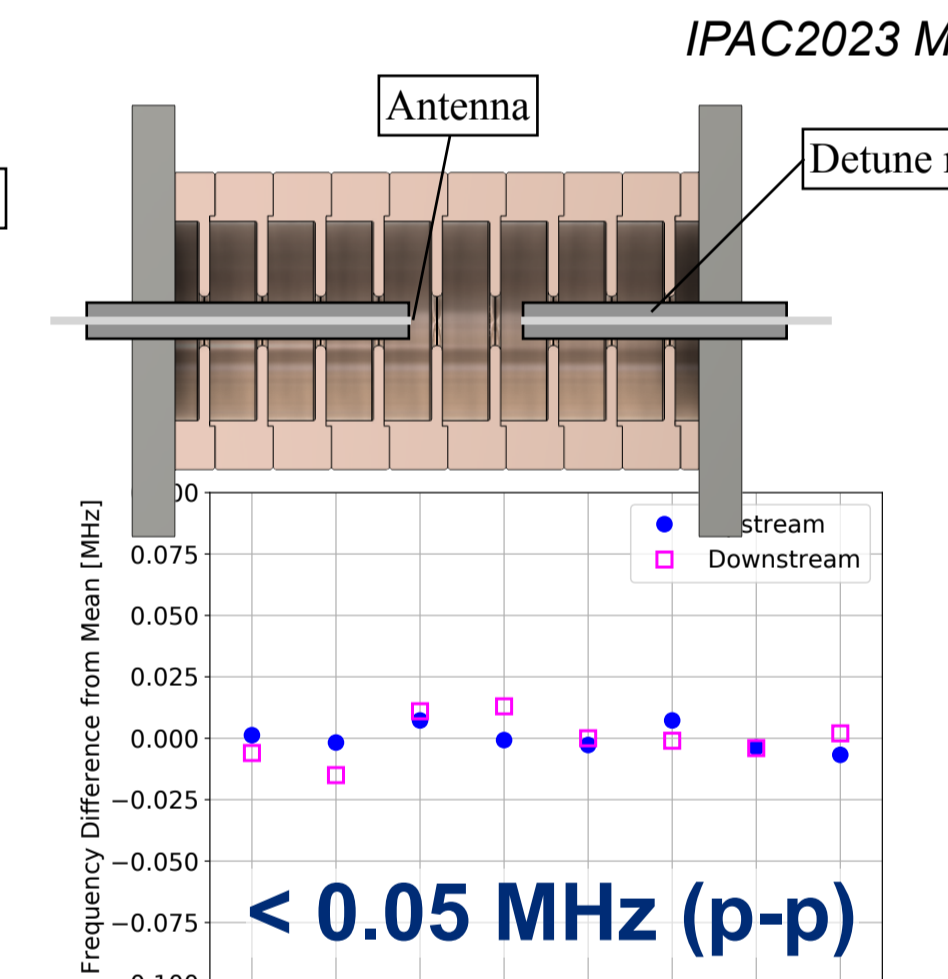


ミュオン用円盤装荷型加速管の試作

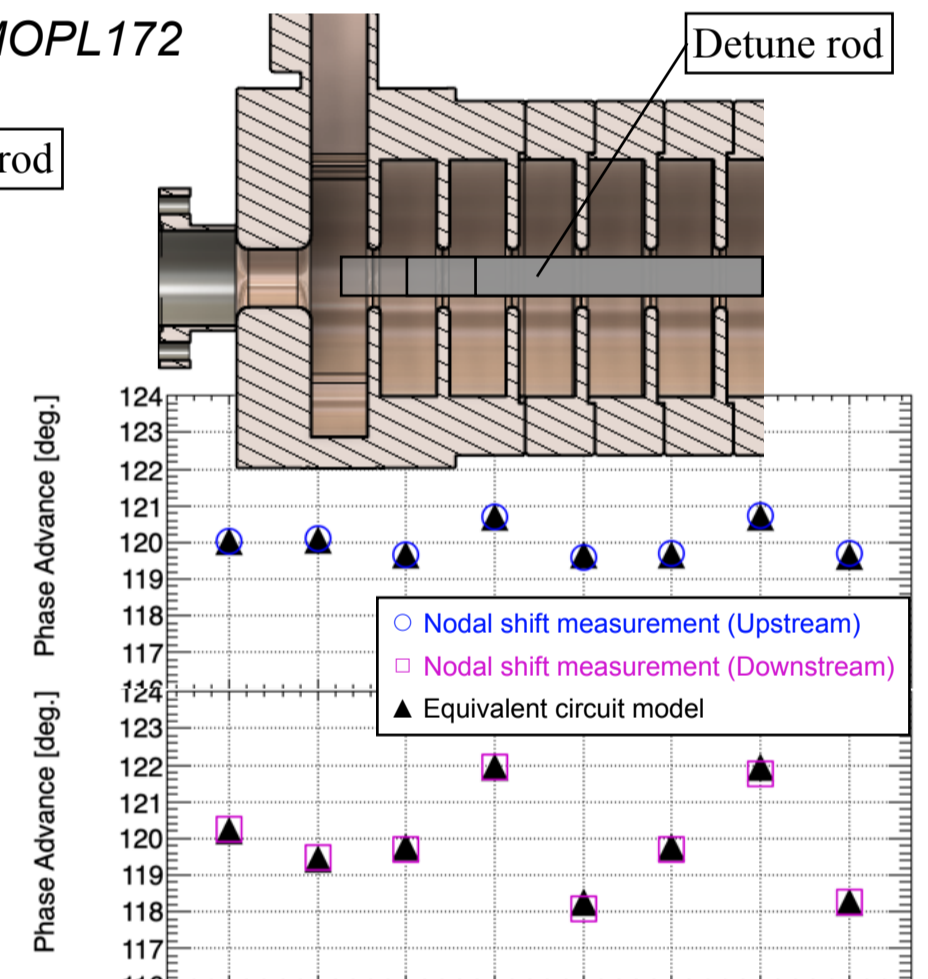
カプラー設計



通常セル特性評価



カプラー調整精度評価



- ❖ KEK新型Sバンド加速管のカプラー形状を踏襲
- ❖ DLS1に合うように寸法調整&水路変更
- ❖ カプラーに隣接する通常セルを8セルずつ作成
▶ $\pi/2$ モード: $< 0.05 \text{ MHz (p-p)}$
▶ セル間カップリング: 3桁目まで一致
▶ Q値: 計算値の96.4% (上流)
▶ シャントインピーダンス: 計算値より数%高い
- ❖ Kyhl法でカプラーセルの移相を0.5度の精度で調整
❖ ろう付後に測定すると4セル目以降で移相ずれ大

等価回路解析

自由度を4つに制限し値指定
 β : カップリング係数, ω_i : $\pi/2$ モード周波数

セルN-1の回路方程式: $[Y_{N-1} - \omega^2] V_{N-1} + j\omega Y_{N-1} \frac{V_{N-1}}{Q_{N-1}} - \frac{1}{2} k_{N-1,N-2} V_{N-2} - \frac{1}{2} k_{N-1,N} V_N = 0$
 $\Rightarrow V_{N-1}(V_{N-2}) = \dots$

セル1の回路方程式: $[Y_1 - \omega^2] V_1 + j\omega Y_1 \frac{V_1}{Q_1} - \frac{1}{2} k_{1,2} V_2(V_1) = j\omega Y_1 \frac{R_1}{Q_1} V_1$
 $\Rightarrow R_1 Y_{in}(V_1) = \dots$

反射係数: $\Gamma = \frac{Y_0 - Y_{in}}{Y_0 + Y_{in}} = \frac{\beta - R_1 Y_{in}}{\beta + R_1 Y_{in}}$

$Y_{in}(\Delta f, \Delta\beta_i)$ としてVSWRを算出

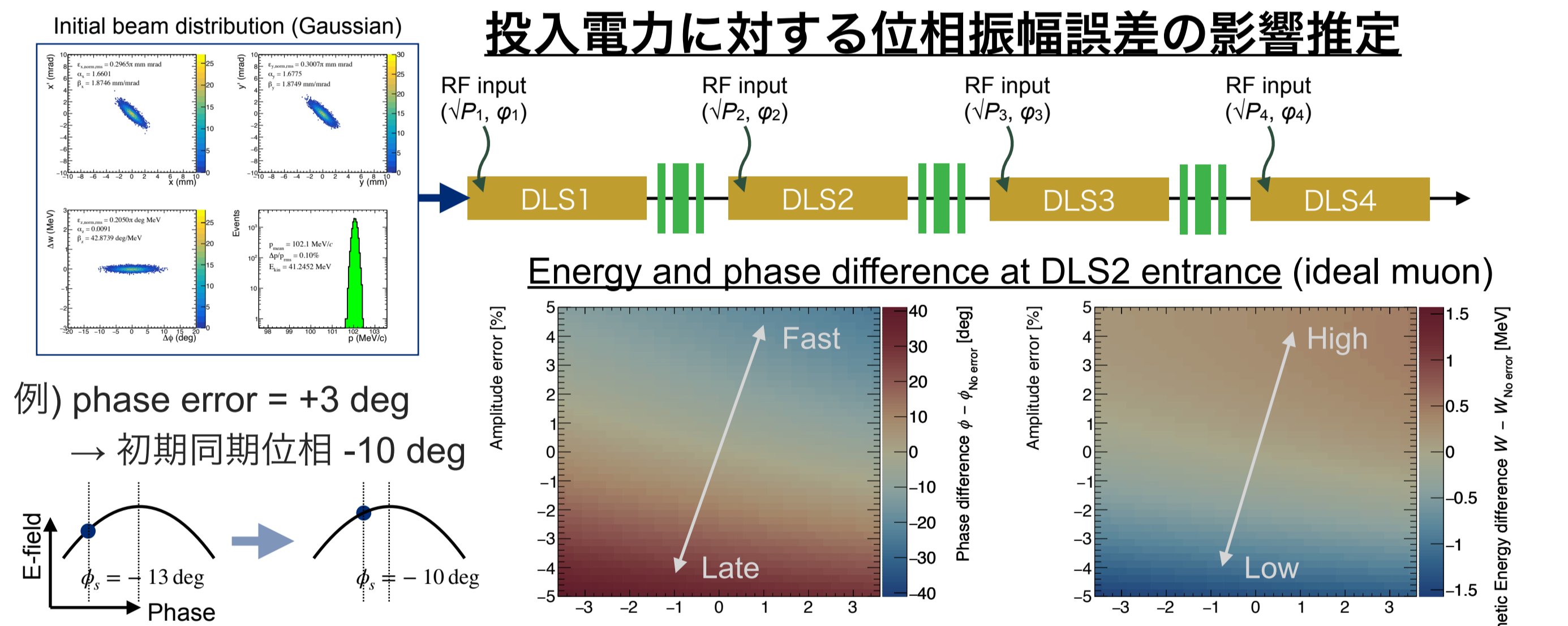
得たパラメータ
 $\beta \times 1.01465$
 $\omega_1 \times 0.999949$
 $\omega_2 \times 1.000087$
 $\omega_3 \times 0.999945$

現時点でもVSWR1.05以下を実現できる見込み

パラメータずれとCSTで計算した寸法感度から寸法誤差推定

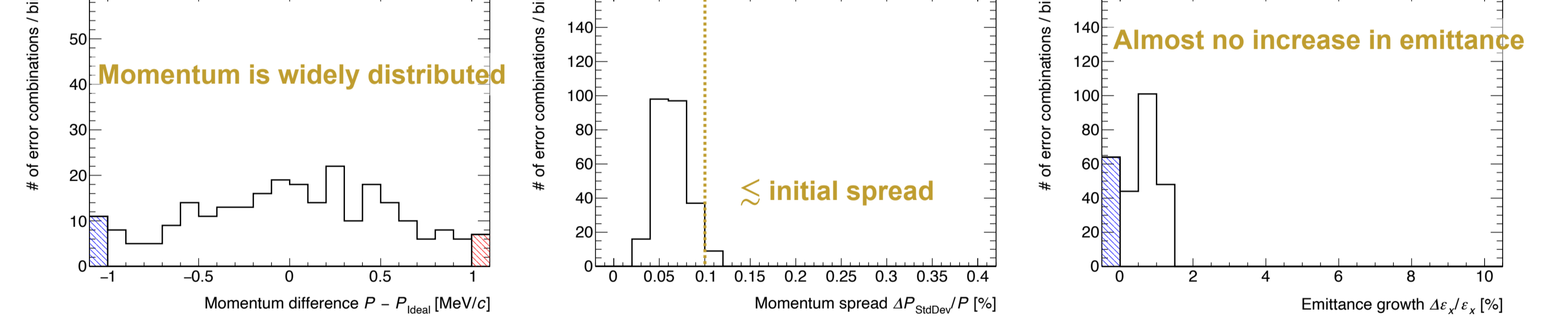
ビームダイナミクスシミュレーション

投入電力に対する位相振幅誤差の影響推定



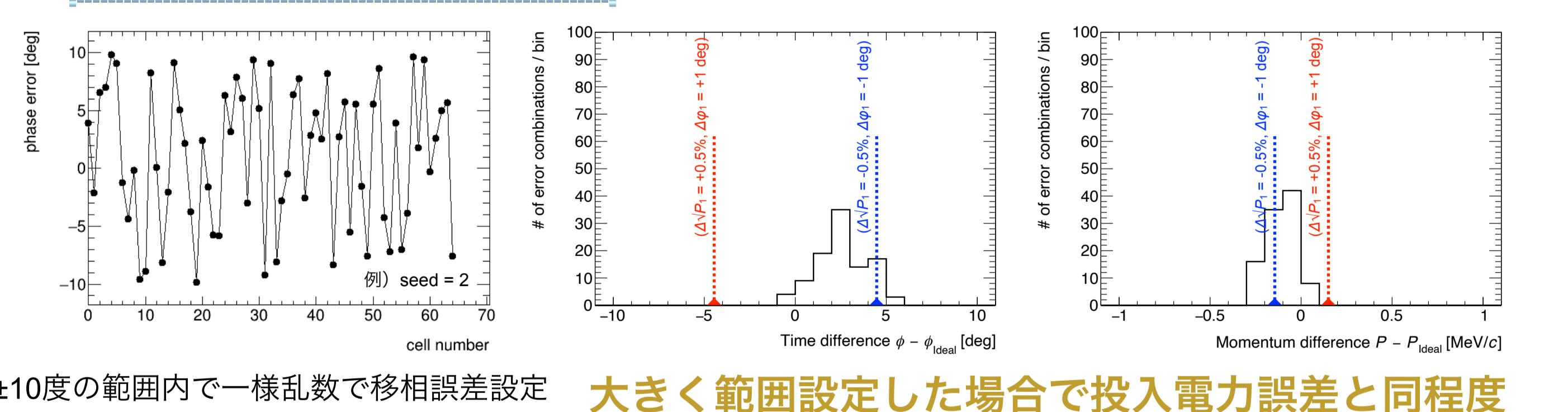
位相振幅誤差 $\Delta\phi_i, \Delta\sqrt{P_i}$ により加速中に大きな位相ずれが生じ、 ϕ_2 の位相誤差に上乗せ

Energy difference, spread, and emittance growth at DLS4 end

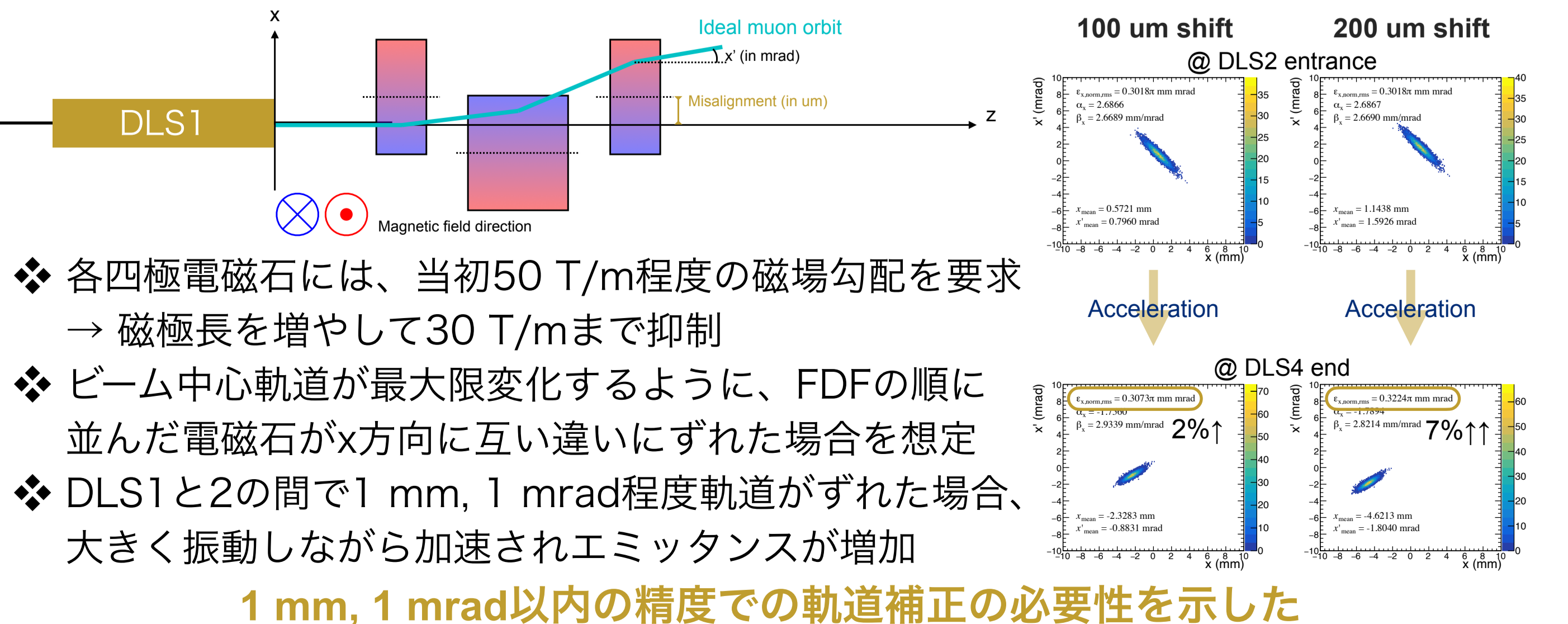


各加速管で位相誤差 ± 1 度、振幅誤差 $\pm 0.5\%$ 程度であれば要求品質を満たす*
* 移相器とボタン付3dB分配器で調整可能な精度

各セルの移相誤差の影響推定



四極電磁石の位置ずれの影響推定



まとめと展望

進行波加速管による高速ミュオン加速に向け、構造最適化、試作機による高周波特性評価とその結果の解釈、シミュレーションによる位相振幅誤差や電磁石ミスアライメントの影響推定を行ってきた。

- ・パルス圧縮器の導入 ... 平坦でないパルス形状に対応した構造最適化
- ・セル移相誤差の影響推定 ... 等価回路解析に基づく高調波成分&累積移相誤差 $\neq 0$ の場合&熱解析
- ・四極電磁石詳細設計 ... 軌道補正コイル追加&互い違いにずれない工夫
- ・運動量測定手法検討 ... 蓄積後のサイクロトロン周期測定