

ミューオン加速用円盤装荷型加速管における カプラーセルの設計

DESIGN OF COUPLER CELLS IN THE DISK-LOADED STRUCTURE FOR THE MUON LINAC

第19回日本加速器学会年会 - PASJ2022 : FROA12

2022/10/21 16:10-16:30

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



- 研究背景：J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験
- 開発状況：ミューオン用円盤装荷型加速管
- カプラーセル電磁場シミュレーション
- ビームダイナミクスシミュレーション
- まとめ



ミューオン 異常磁気能率・電気双極子能率

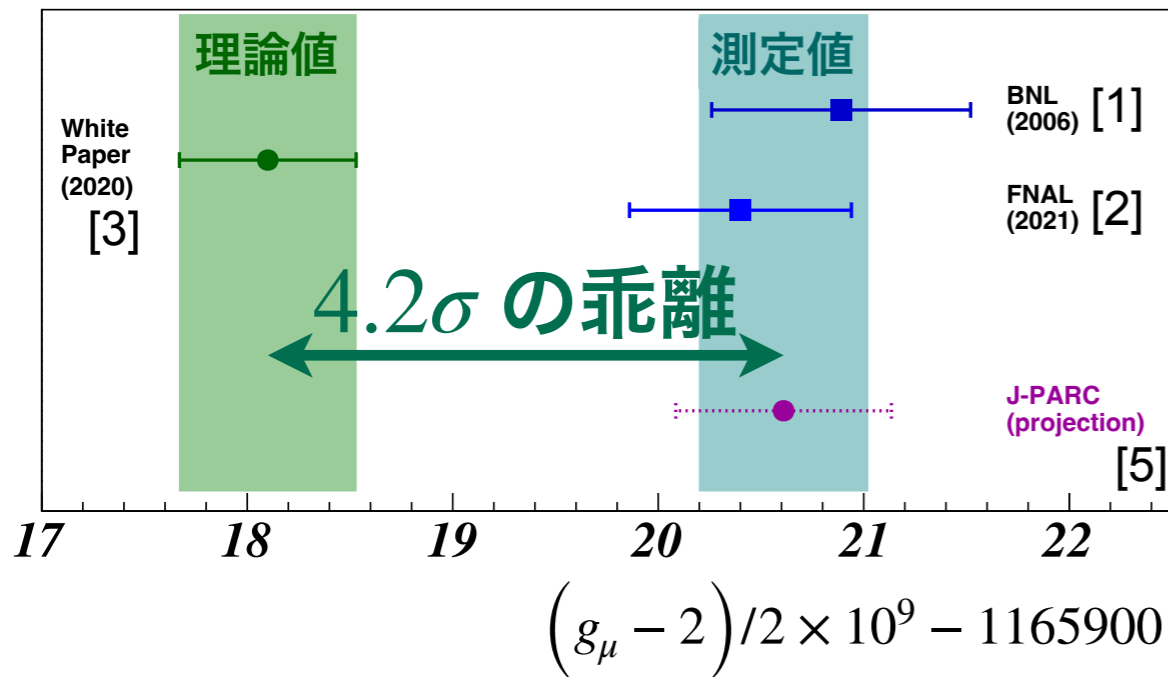


ミューオンスピン \vec{s} と電磁場 \vec{E}, \vec{B} の相互作用ハミルトニアン (静止系) :

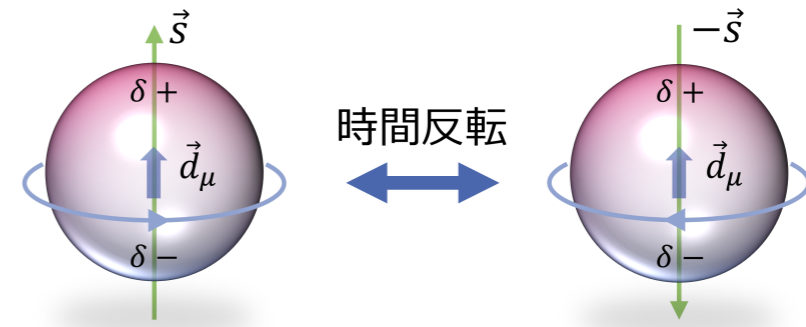
$$H = -g_\mu \frac{e}{2m_\mu} \vec{s} \cdot \vec{B} - d_\mu \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} \cdot \vec{E}$$

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.

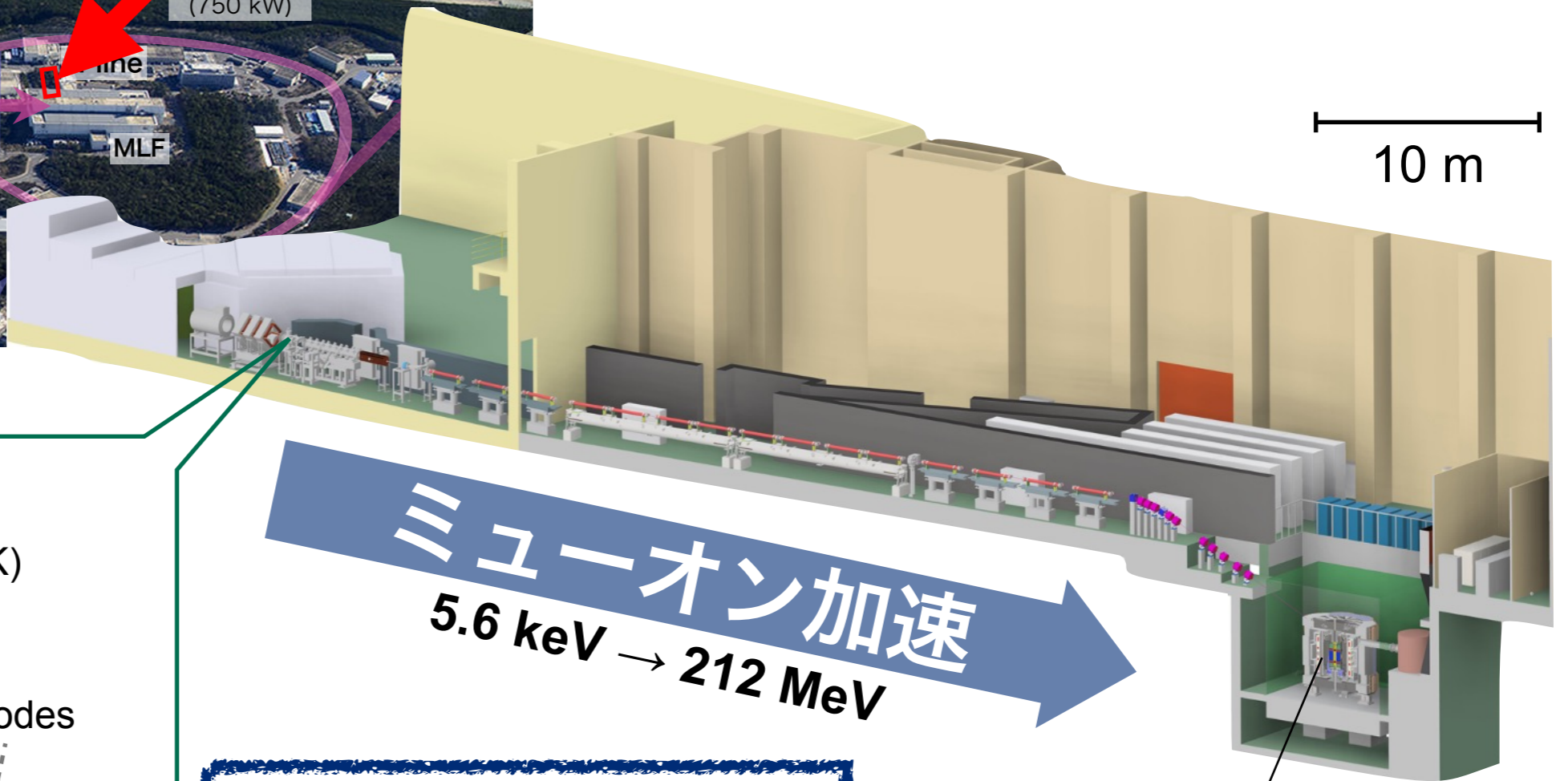
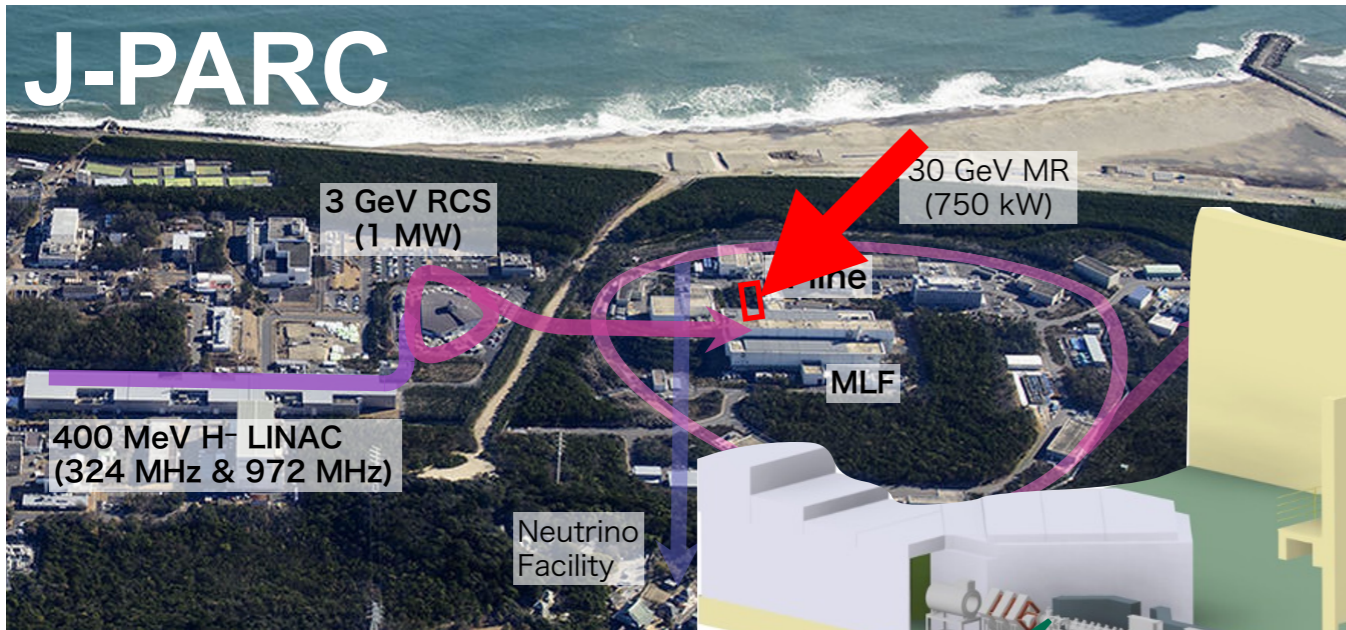


Muon g-2/EDM experiment @ J-PARC



MAKE NEW STANDARDS.
東海国立大学機構

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



ミュオン冷却

Silica aerogel target (~300 K)

Ionization laser

Electrodes

Surface muon (4.1 MeV)

Muonium (25 meV)

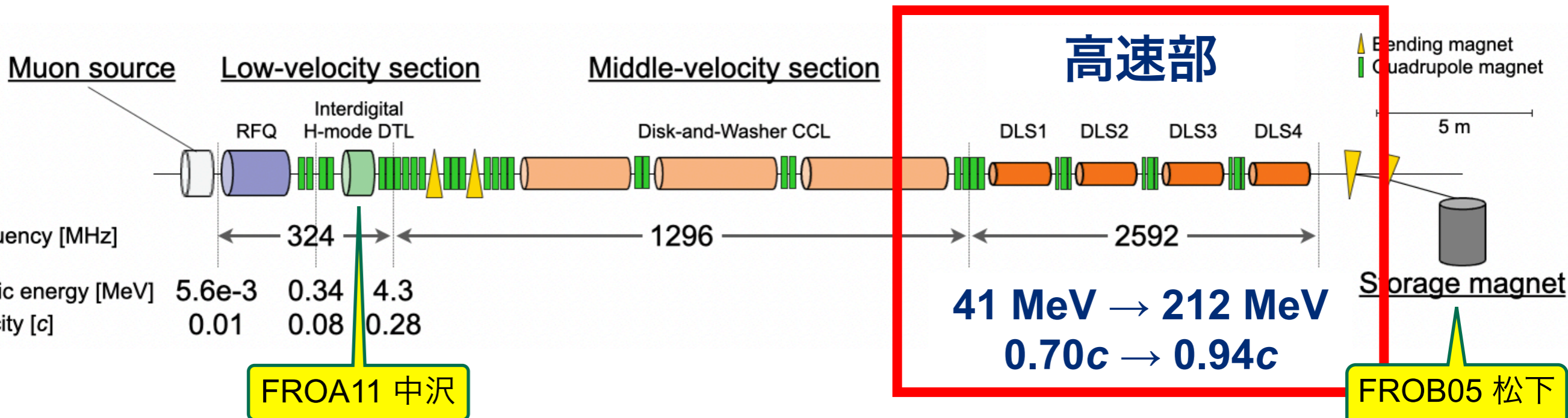
Thermal muon (5.6 keV)

$$\epsilon_{\text{norm.}; \text{total}} \sim 1\pi \text{ mm mrad}$$
$$\Delta p/p < 0.1\% \text{ (RMS)}$$

冷却と再加速で低エミッタンスミュオンビームを実現



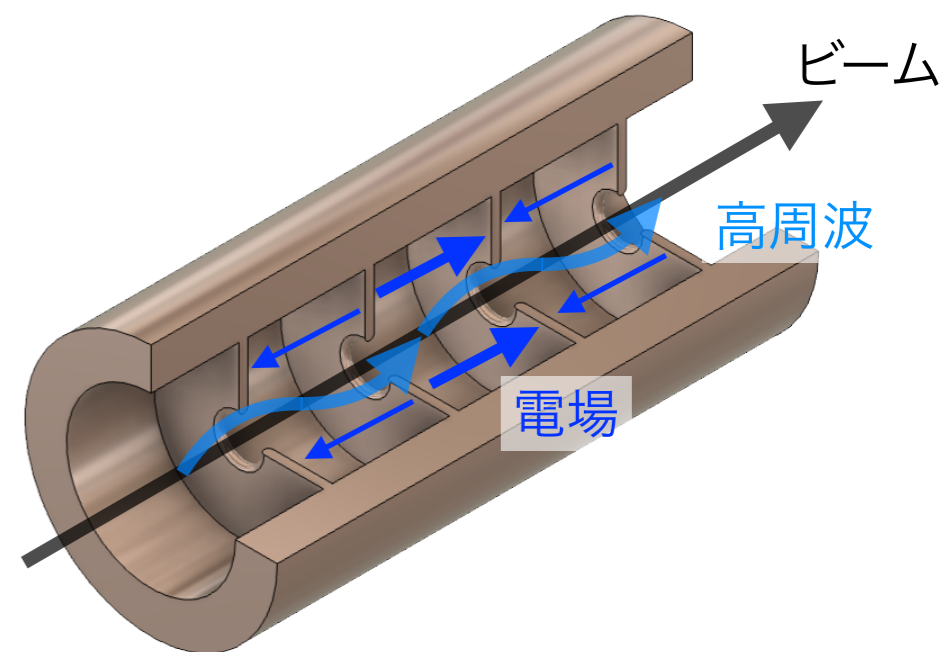
ミューオン線形加速器

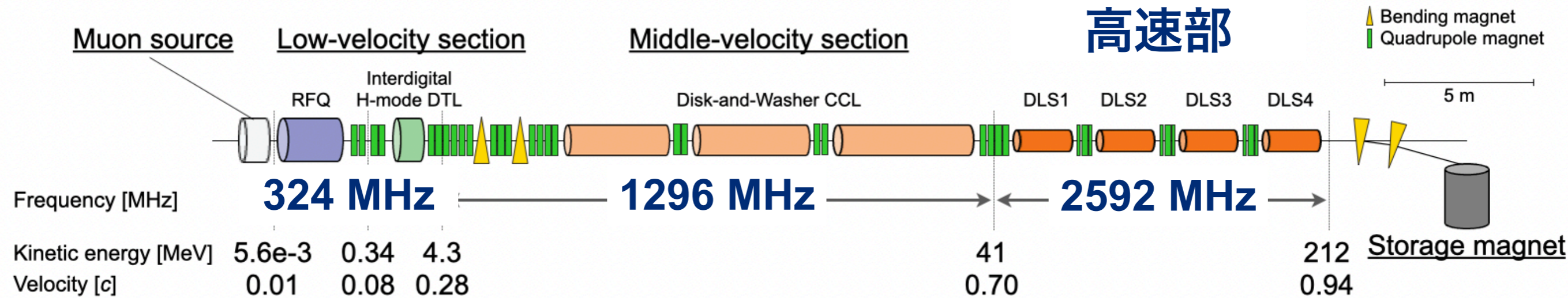


それぞれの速度域に適した4種類の加速空洞

高速部の構成：円盤装荷型加速管 (~2 m) x4 & 四極電磁石
Disk-loaded structure (DLS)

DLSへの要求：20 MV/m の高加速勾配





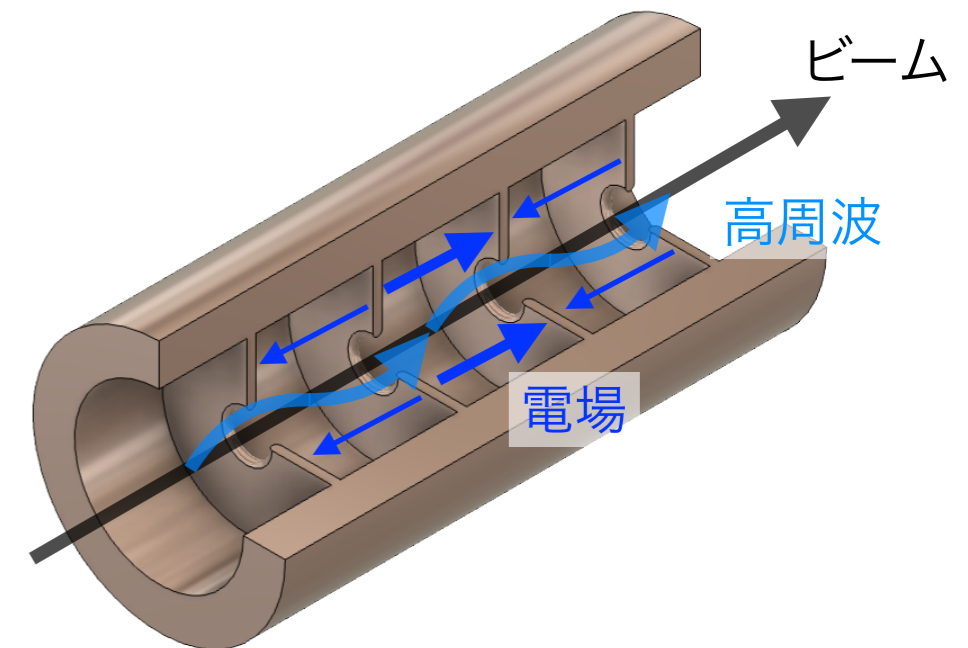
ミューオン用 disk-loaded structure (DLS)

- ・ TM₀₁-2 π /3モード 進行波型
- ・ 運転周波数 **2592 MHz** 方針転換

DLS1 第1セル加速勾配 @ 40 MW

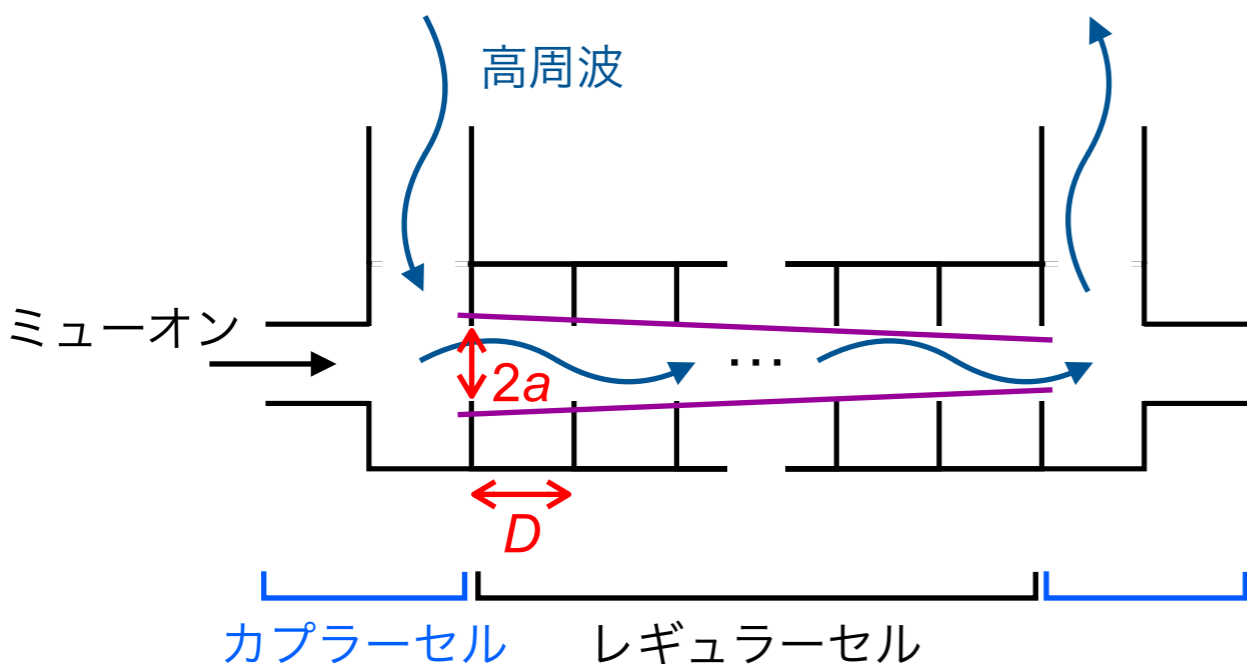
12.3 MV/m (1296 MHz) \rightarrow **19.8 MV/m (2592 MHz)**
約60%向上

PASJ2021.WEOA06





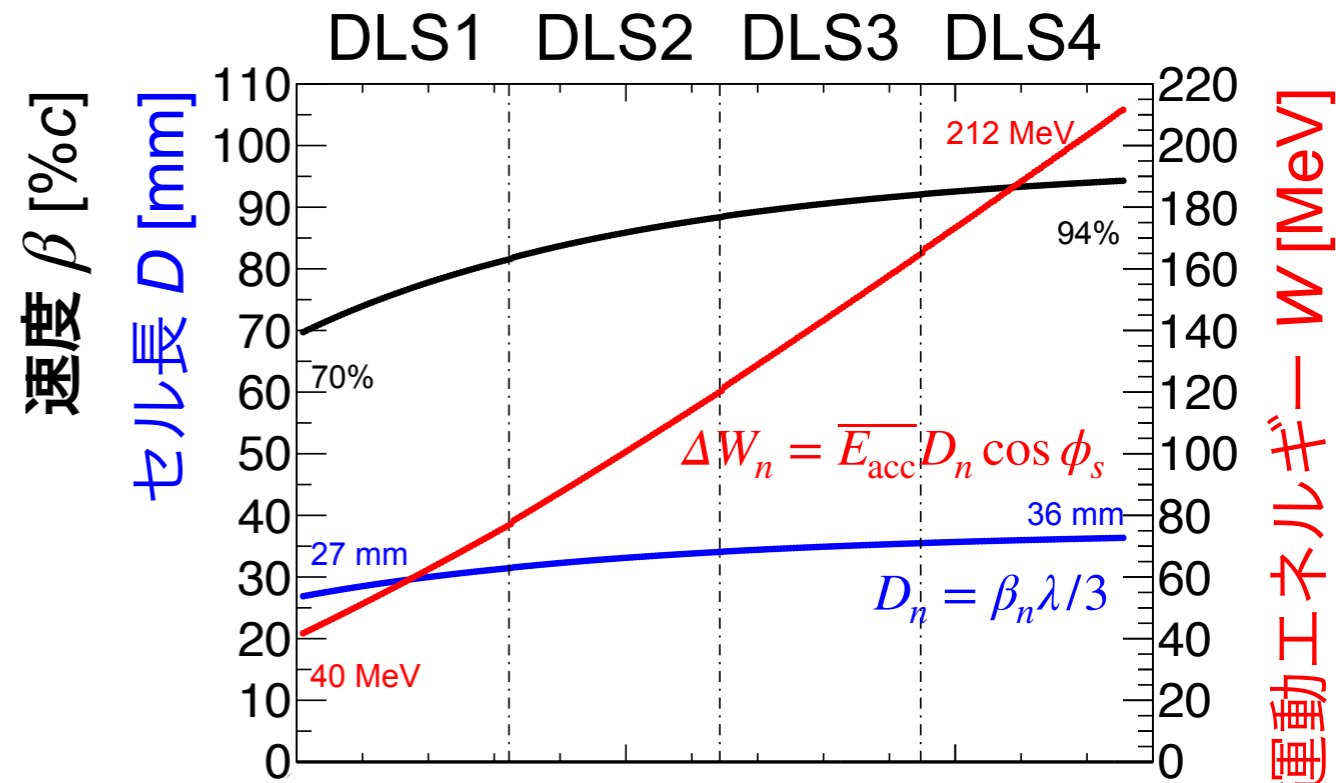
ミューオン加速用SバンドDLSの現状



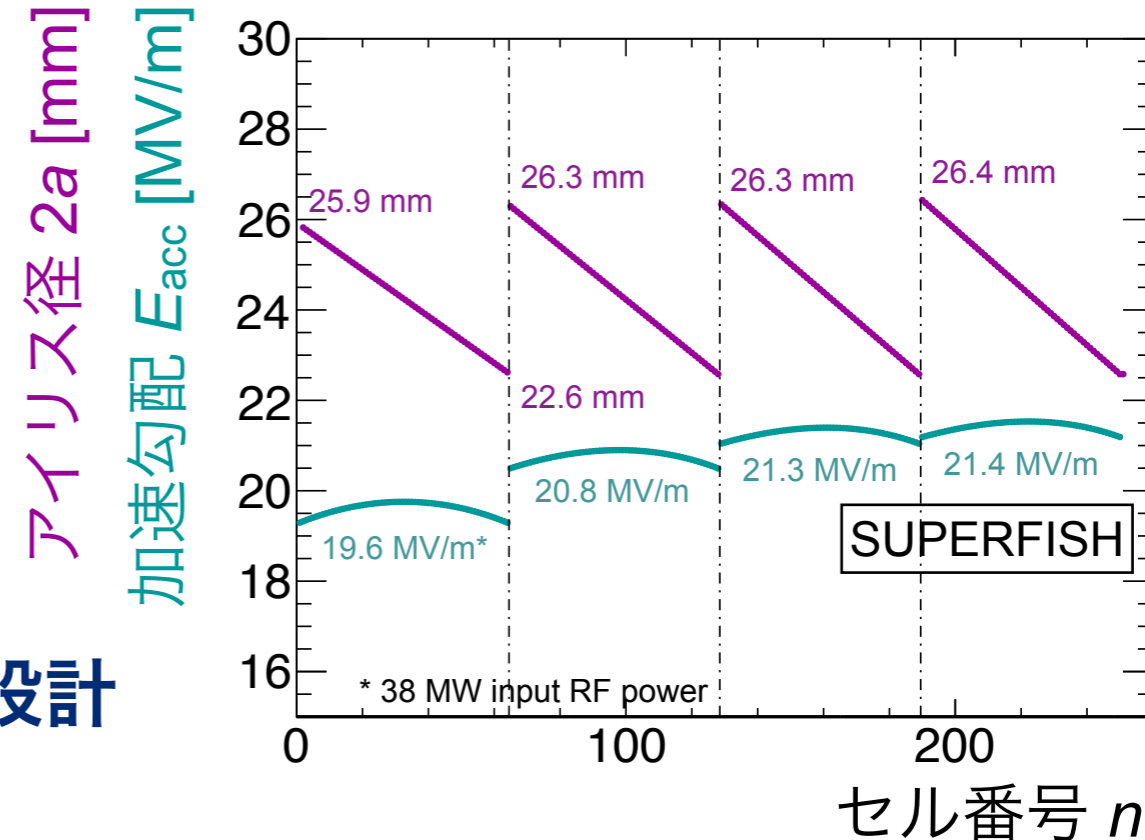
- ① ビーム速度に比例したセル長
- ② Off-crest 加速 (同期位相 $\phi_s = -13 \text{ deg}$)
- ③ 準定勾配型

軸対称構造のレギュラーセル設計完了
カプラーセルは軸対称・定在波近似

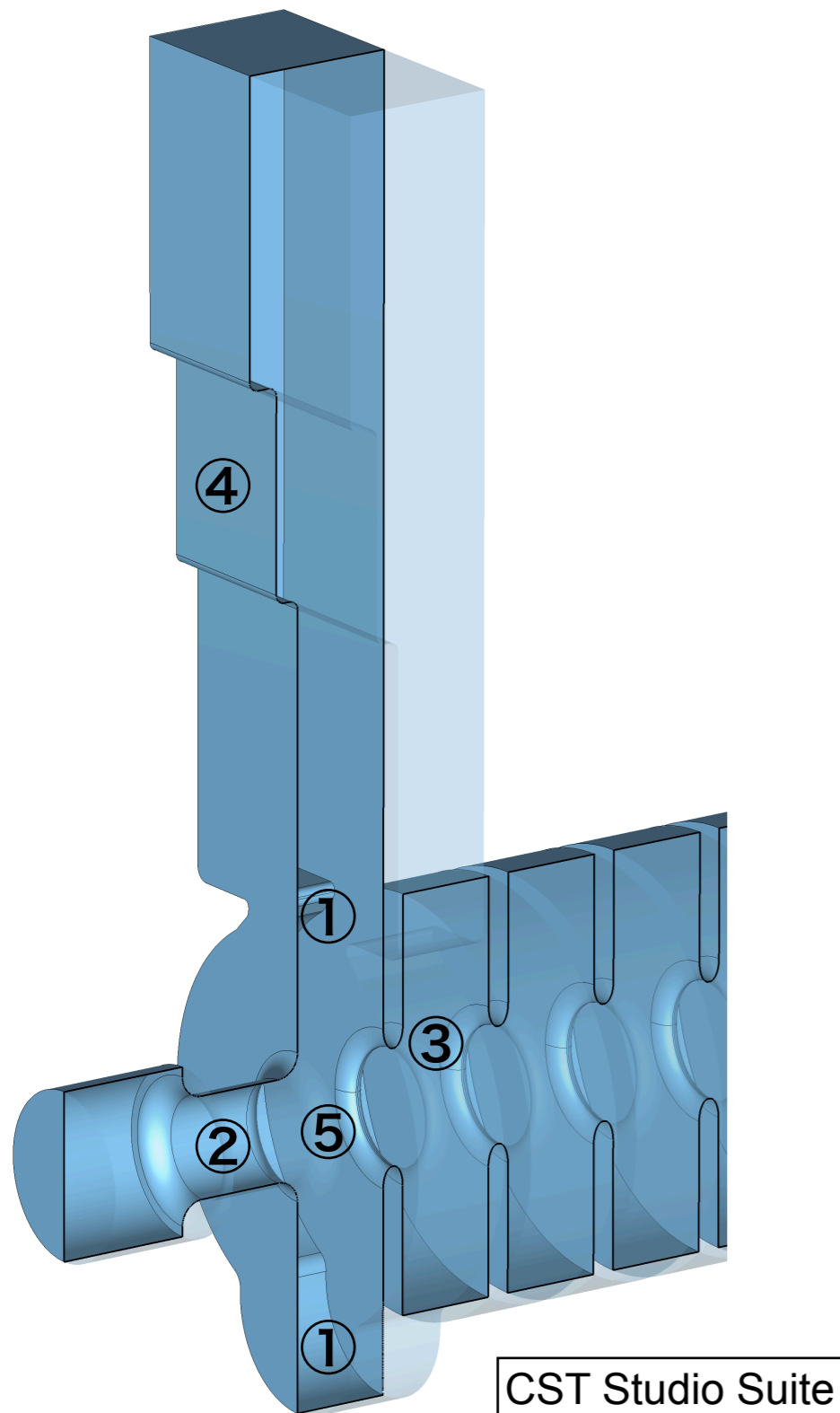
➡ 実際に即したカプラーセル詳細設計



運動エネルギー W [MeV]



カップラーセル高周波設計 概要



KEK入射器用新型Sバンド加速管[1]の形状を踏襲

① 開口部

1 開口部 + 電磁場対称性補正用窪み
→ シミュレーションによるビーム品質評価

② ビームポート形状

内径・長さ・R面取りの調整

③ ディスクアイリス断面形状

楕円形状

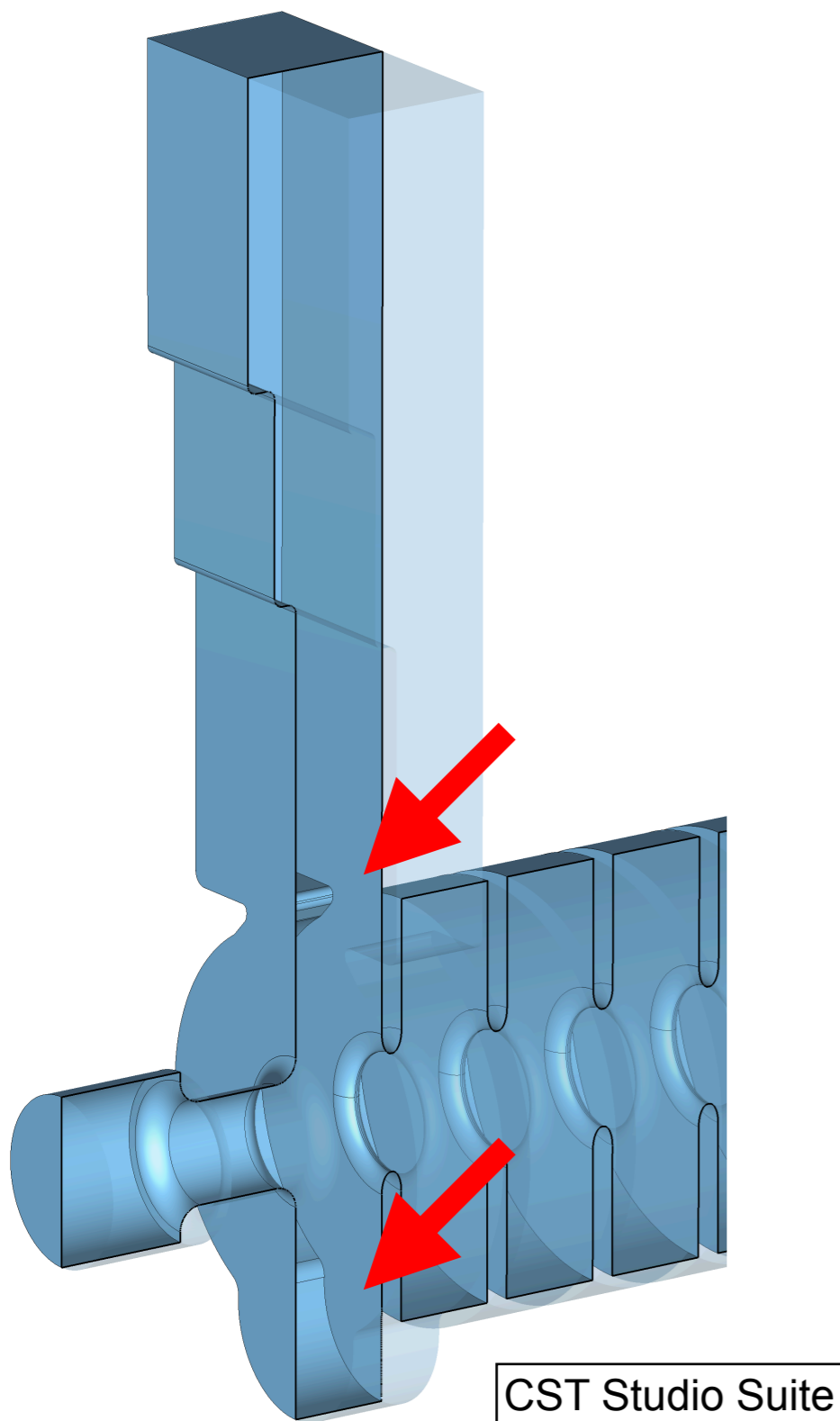
④ 矩形導波管形状

ステップによるインピーダンス整合

⑤ カップラーセル寸法

CST計算に基づく寸法の最適化

[1] Proc. of PASJ2021, pp. 130-132, 2021.

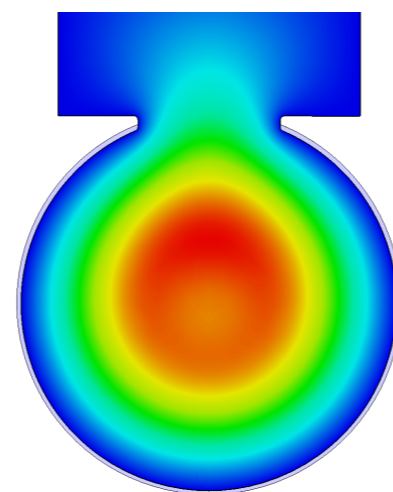


① 開口部

1 開口部 + 電磁場対称性補正用窪み

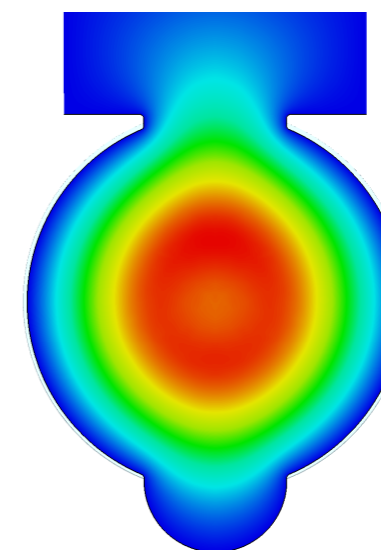
カプラーセルにおける電場強度分布

窪みなし



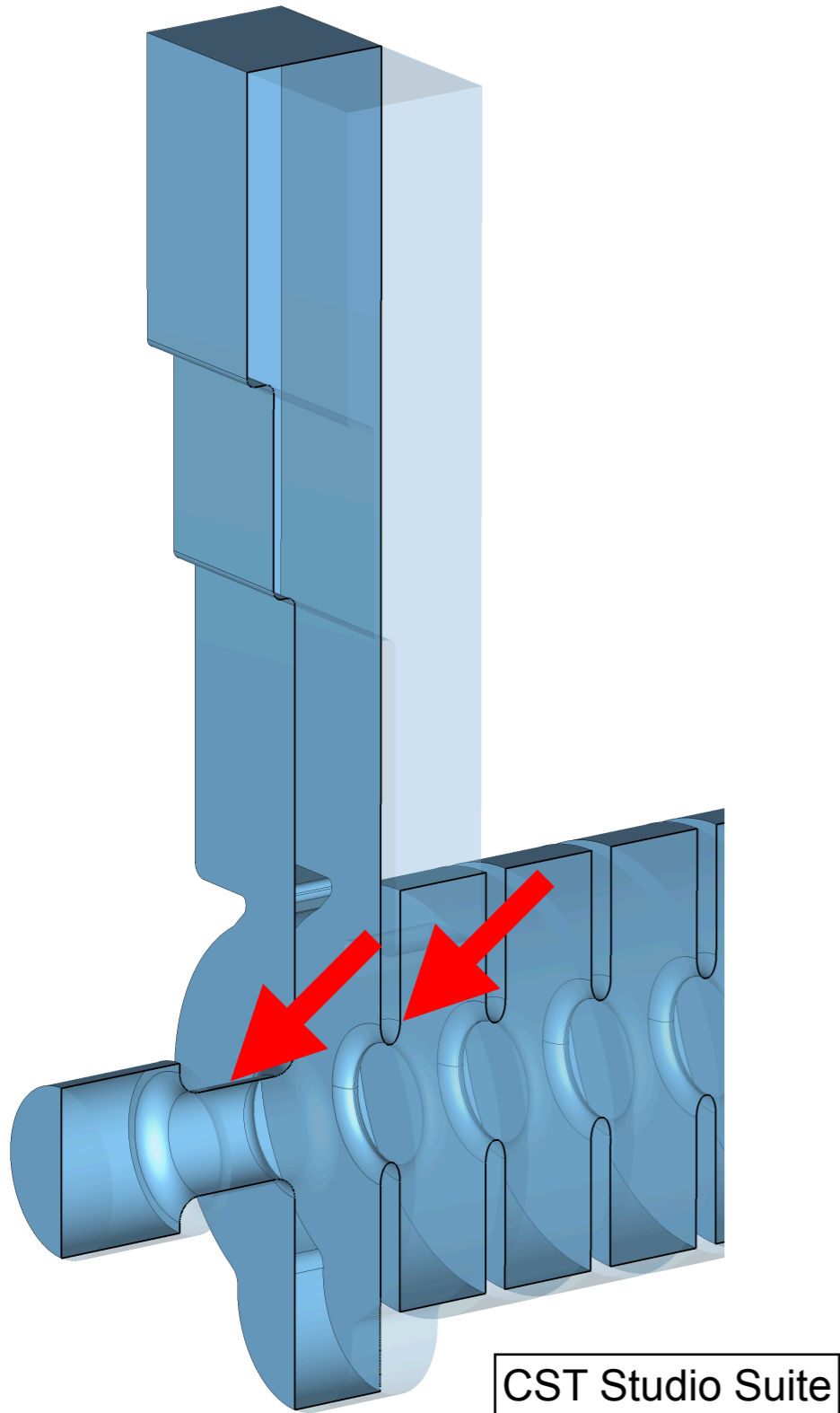
電磁場中心のずれ
→ キック力

窪みあり



中心ずれ補正
楕円状の電磁場分布

非対称性分布のビーム品質への影響を
ビームシミュレーションで評価 (後述)



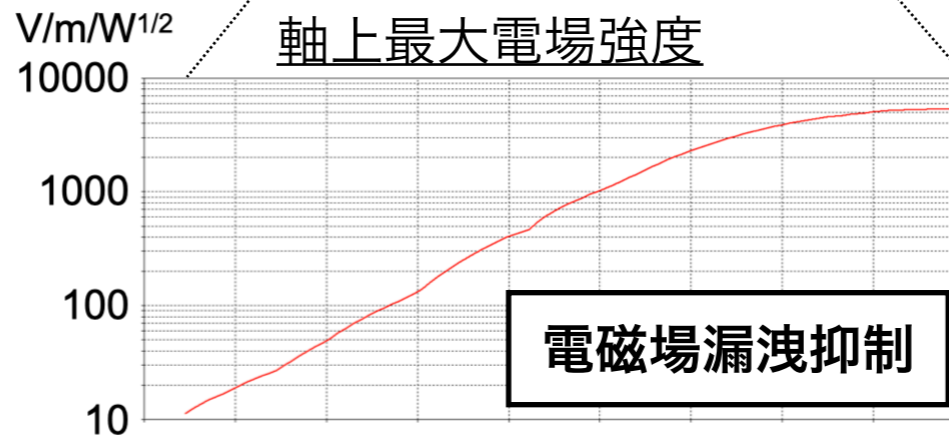
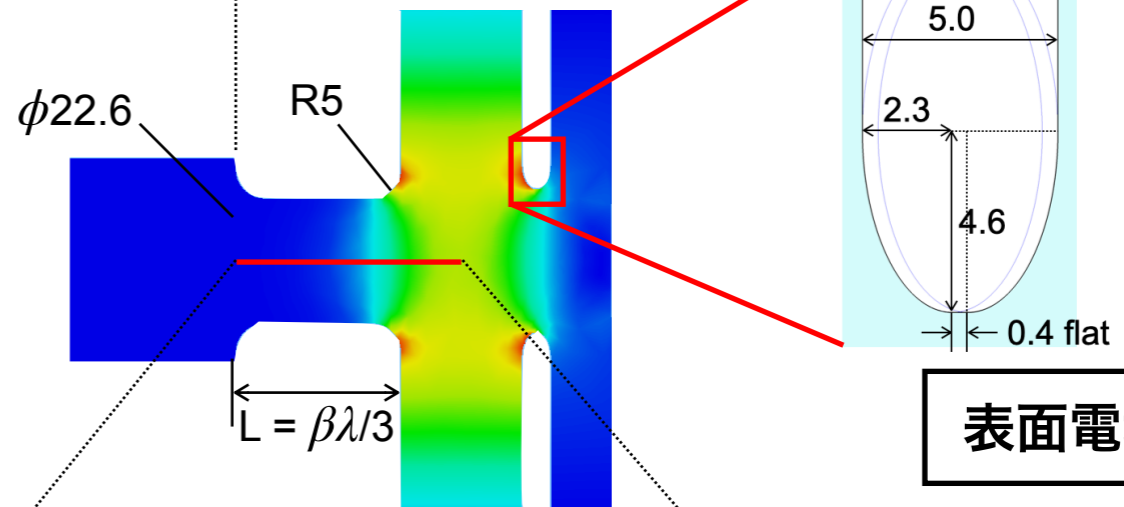
② ビームポート形状

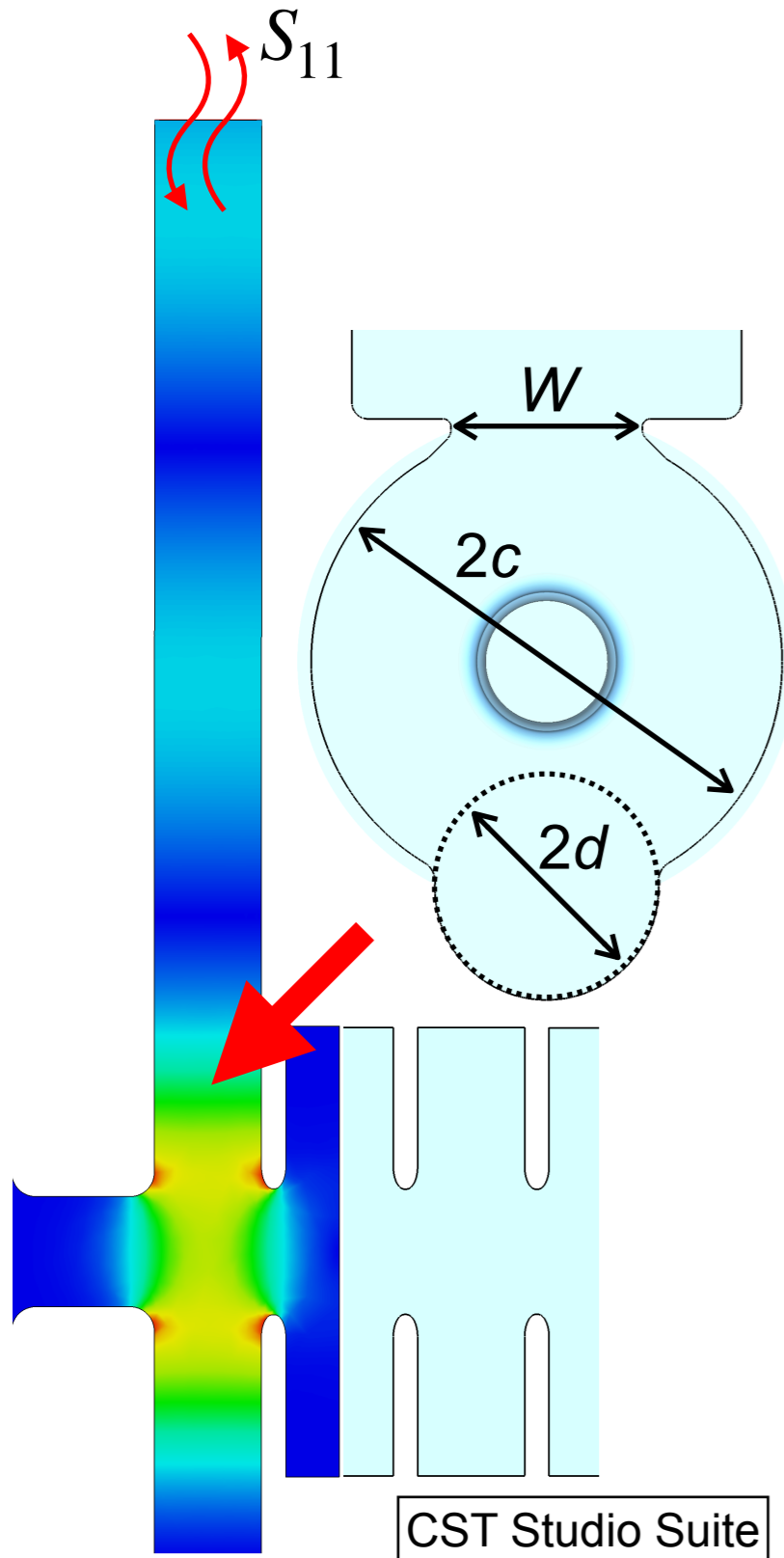
内径 $\phi 22.6$, 長さL27 (上流), 31 (下流)
R5

③ ディスクアイリス断面形状

短径2.3, 長径4.6の楕円形状
アイリス先端0.4 mm直線部 (加工精度)

ビームパイプ ← → DLS



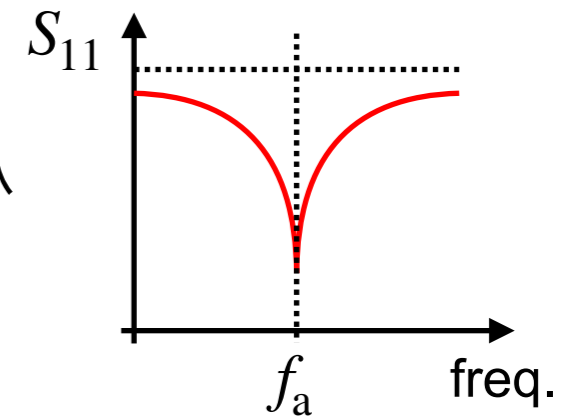


⑤ カプラーセル寸法

内径 ($2c$) とアイリス幅 (W) を最適化し反射低減
窪み径 ($2d$) の調整で対称性補正

初期値 (荒い調整)

- $2c$: 運転周波数 f_a あたりで反射最小



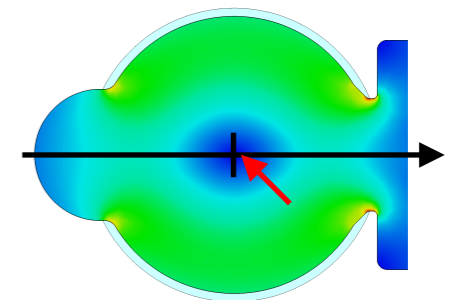
- W : 外部Q値が目標値と一致

目標値 (概算): $Q_{\text{ext}} \approx \left(\frac{1}{2} \frac{f_{\pi/2}}{f_a} k \sin(2\pi/3) \right)^{-1}$

隣接するレギュラーセル

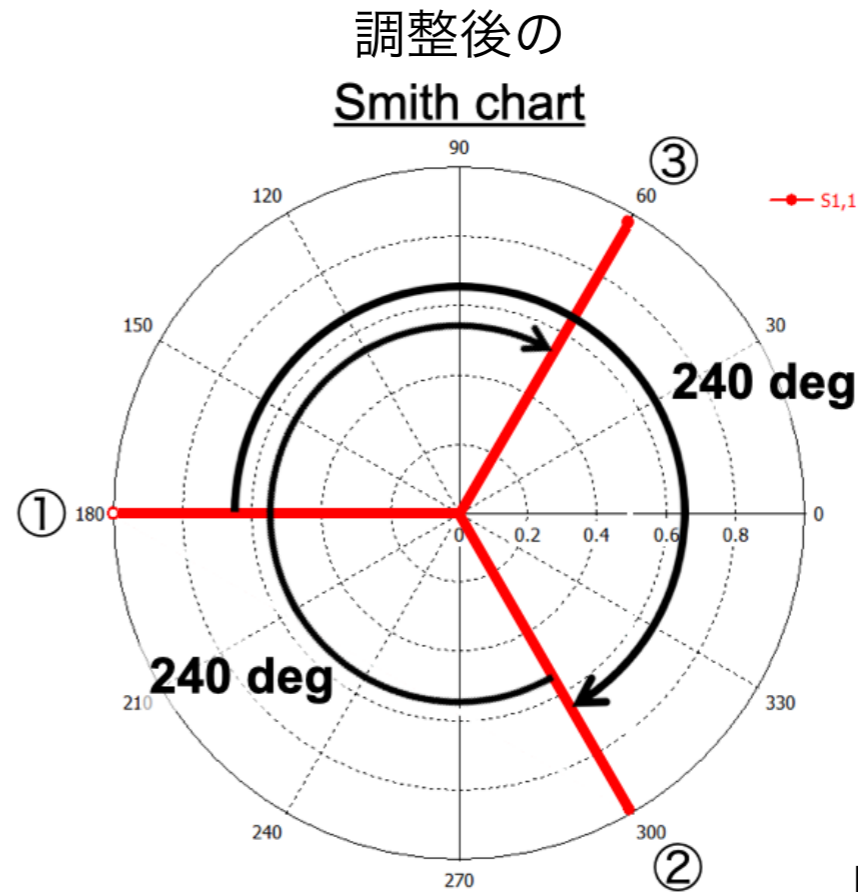
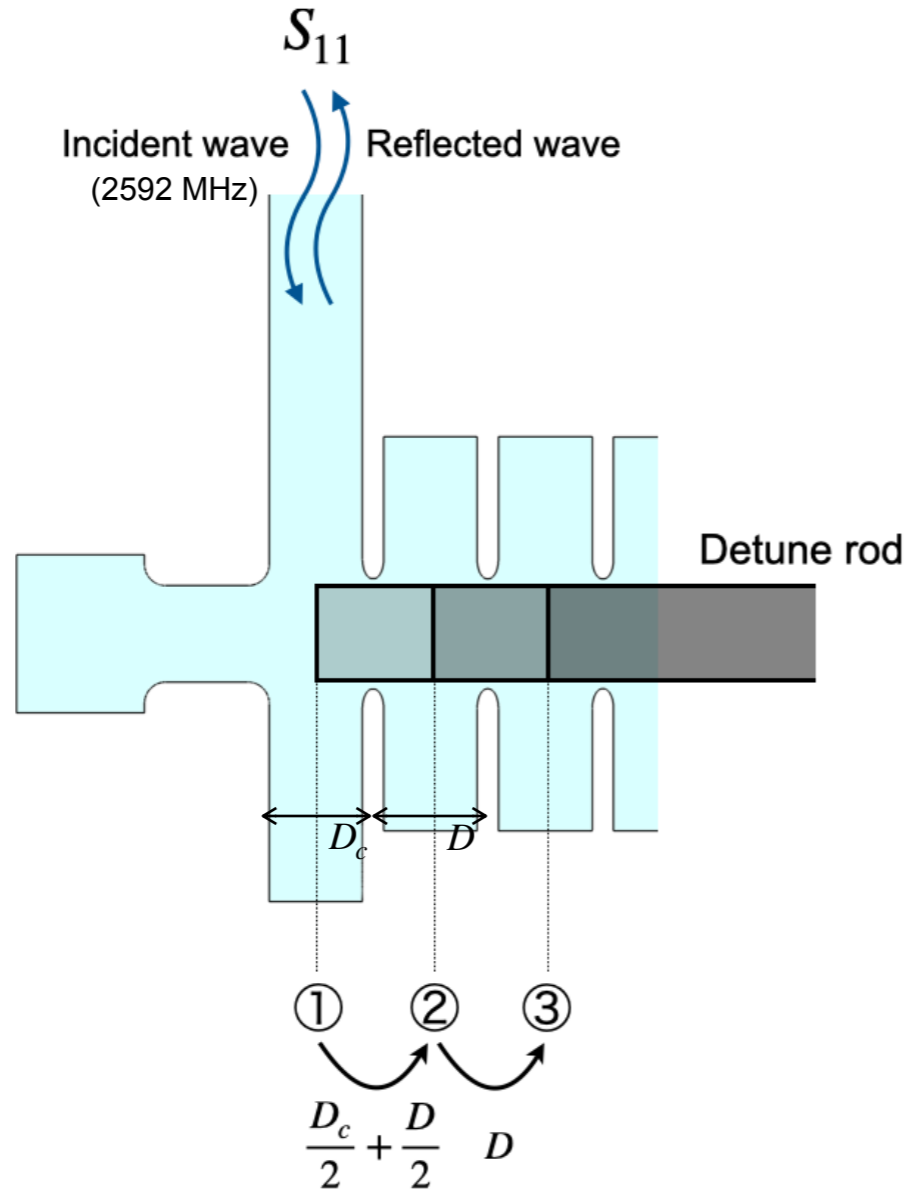
Parameters	Upstream	Downstream
$\pi/2$ -mode frequency ($f_{\pi/2}$) [MHz]	2574.8	2582.5
Coupling coefficient (k)	0.026	0.015

- $2d$: 磁場中心がビーム軸に一致



周波数と移相が正確な基準管を用いた
寸法の微調整をシミュレーション

Nodal-shift法によるインピーダンス整合 [1]



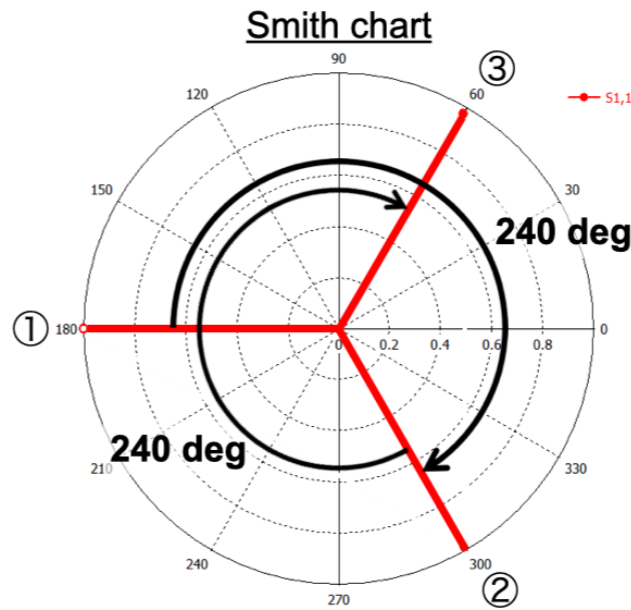
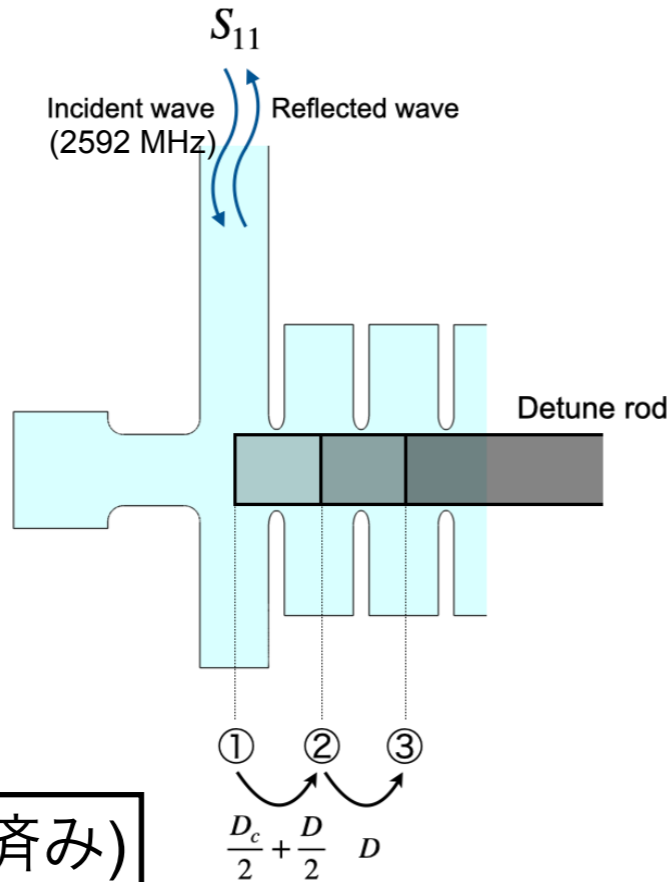
CST Studio Suite

- ロッドの送り量を変えながら各セルの中央を離調
- 運転周波数のみを用いて位相差を240 degに合わせる

[1] S. Miura, “進行波加速管の精密インピーダンス調整方法”, PhD thesis, 総合研究大学院大学, 2006.



Nodal-shift法によるインピーダンス整合 [1]



CST Studio Suite

例: 上流側 (2d 調整済み)

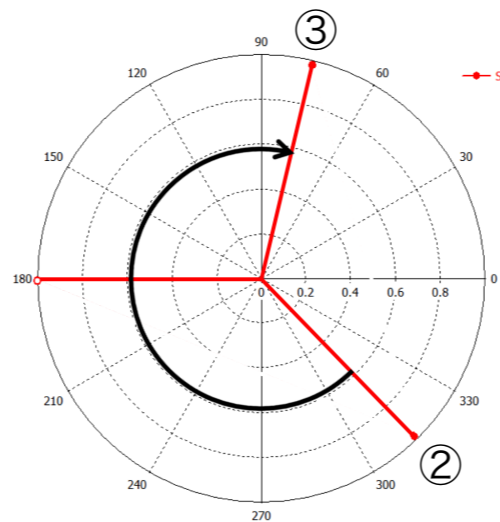
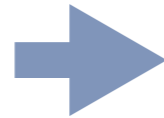
$$2c = 87.00$$

$$2c = 87.20, W = 35.00$$

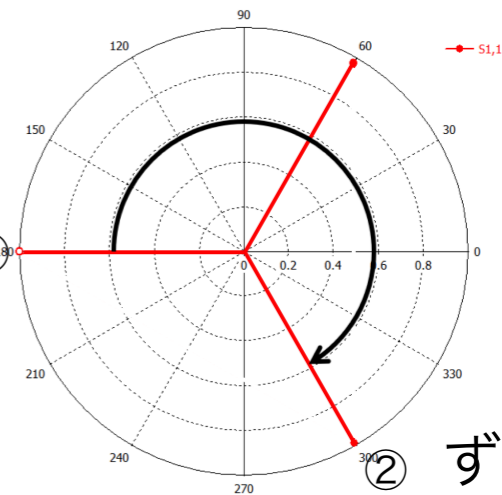
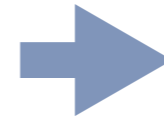
$$W = 35.40$$



2c拡大



W拡大



② ずれ1 deg以下

[1] S. Miura, "進行波加速管の精密インピーダンス調整方法", PhD thesis, 総合研究大学院大学, 2006.



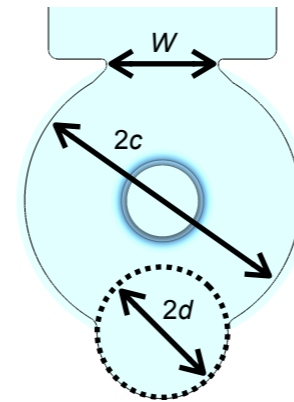
カプラーセル高周波設計 設計値 & 高周波特性



MAKE NEW STANDARDS.
東海国立大学機構

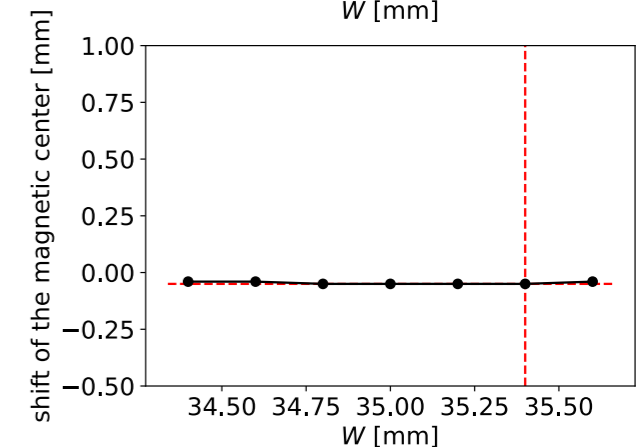
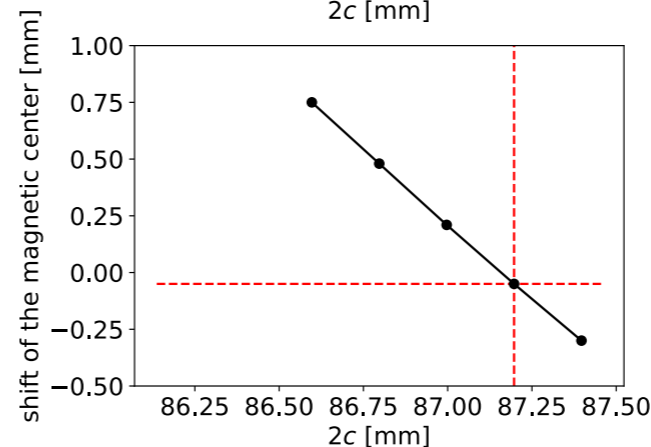
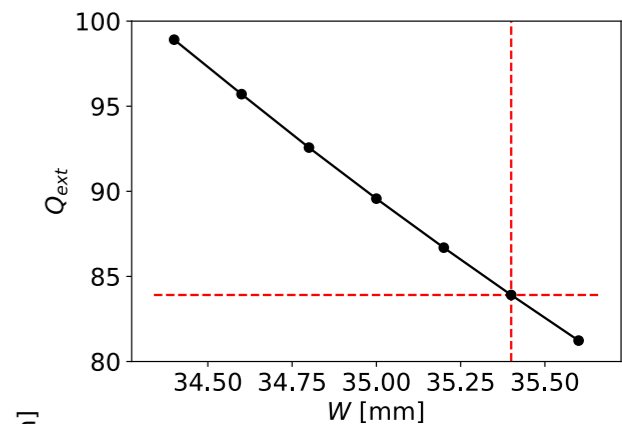
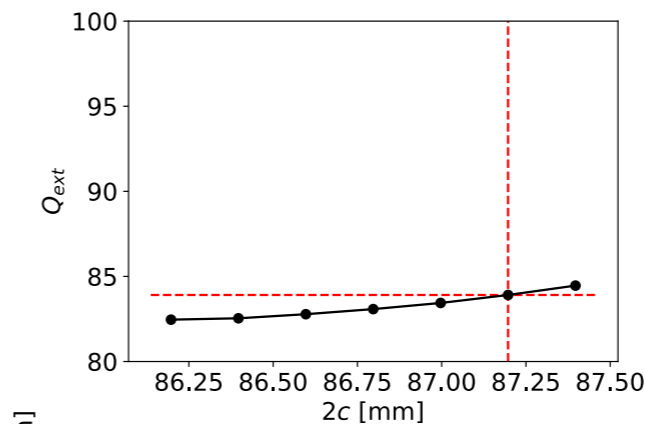
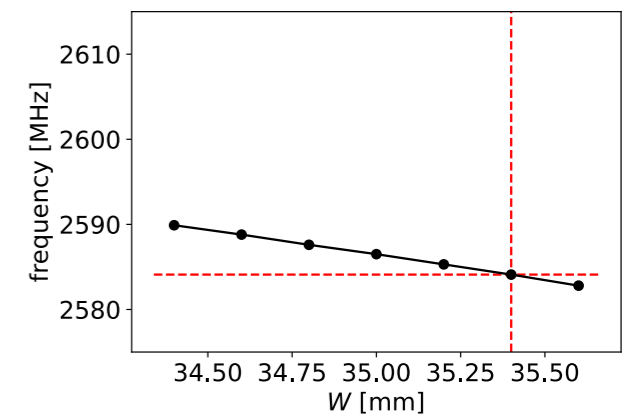
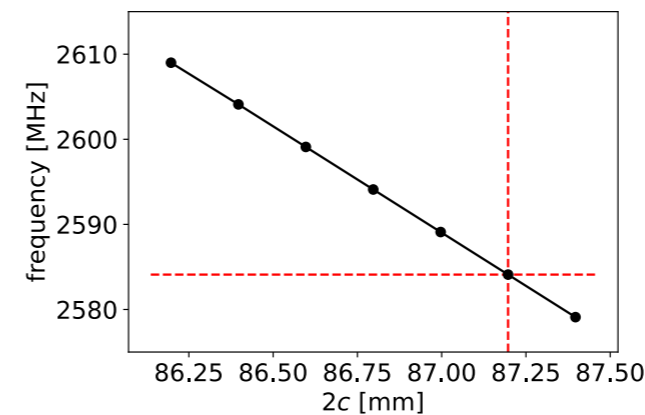
カプラーセル設計値

Parameters	Upstream	Downstream
Resonant frequency [MHz]	2584.1	2587.4
External Q	84	155
Cylinder diameter ($2c$) [mm]	87.197	87.452
Iris width (W) [mm]	35.40	31.62
Cut diameter ($2d$) [mm]	41.40	36.67



上流側

CST Studio Suite



製作時

- $2d$: 設計値で固定
- $2c, W$: 初期寸法を設計値より小さく
→ 高周波測定と拡大修正加工

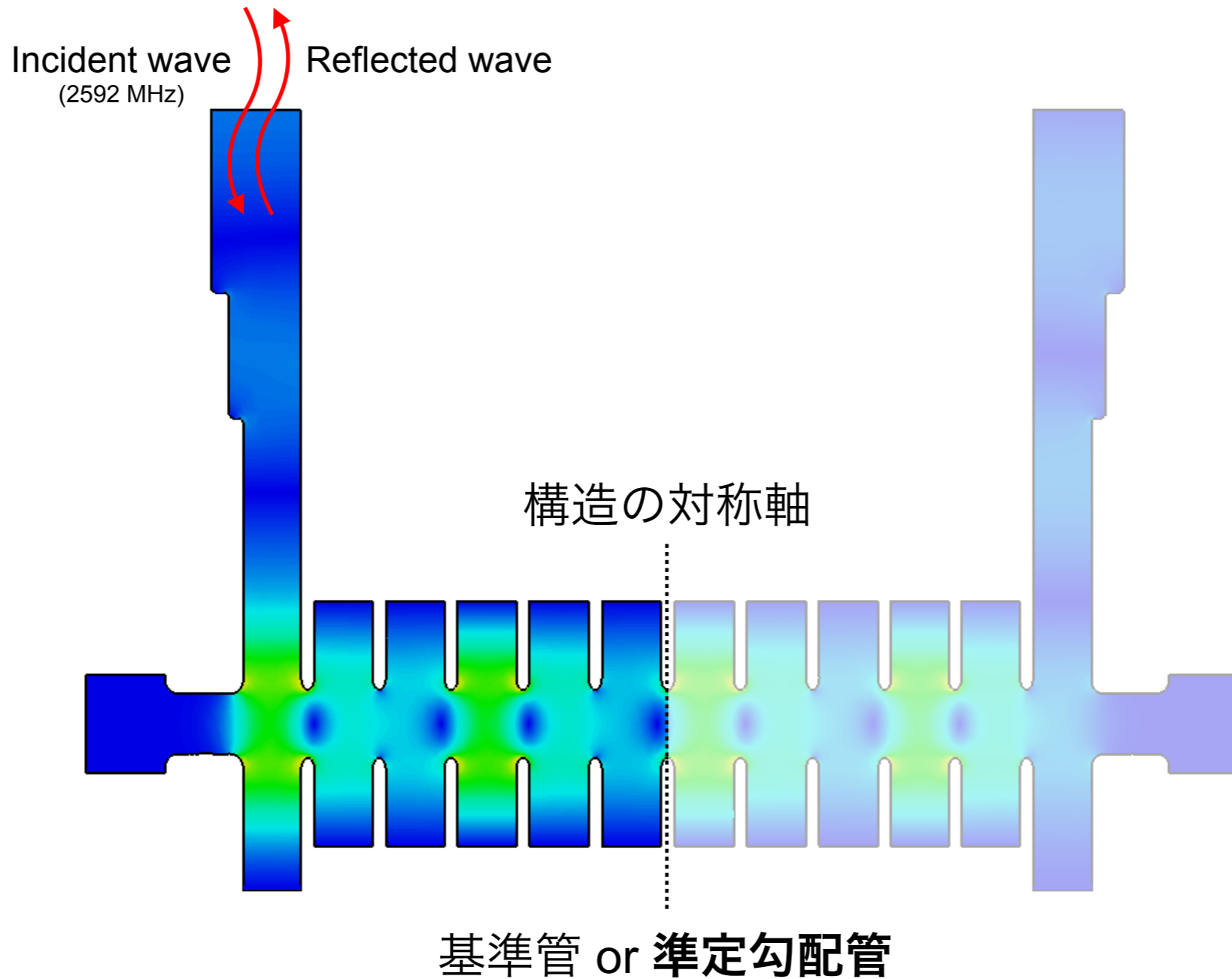
修正加工時の指標となる
高周波特性の寸法依存性 →



カップラーセル高周波設計 VSWR

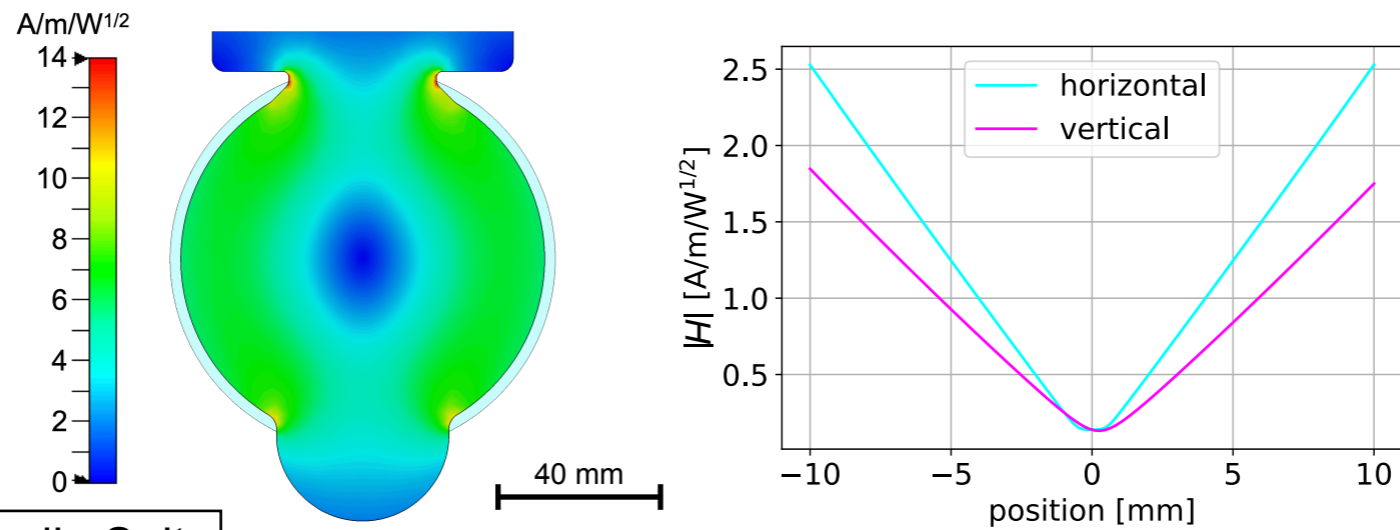
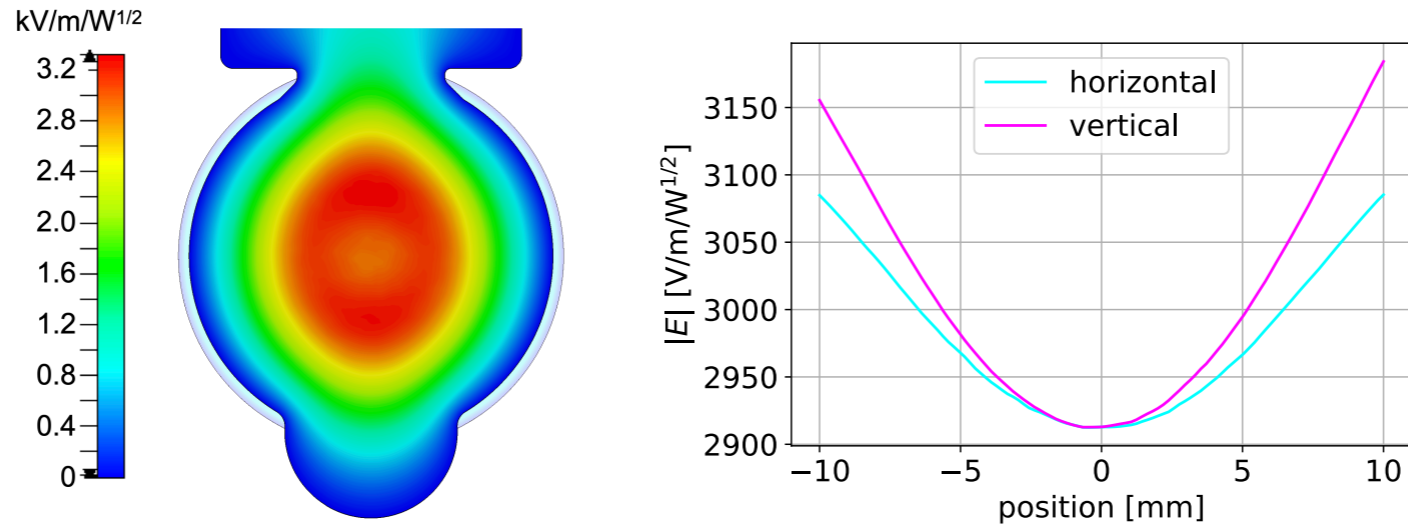
VSWR: 電圧定在波比 = $(1+S_{11}) / (1-S_{11})$

VSWR \leq 1.01



インピーダンス整合の取れたカップラーセルの高周波設計完了

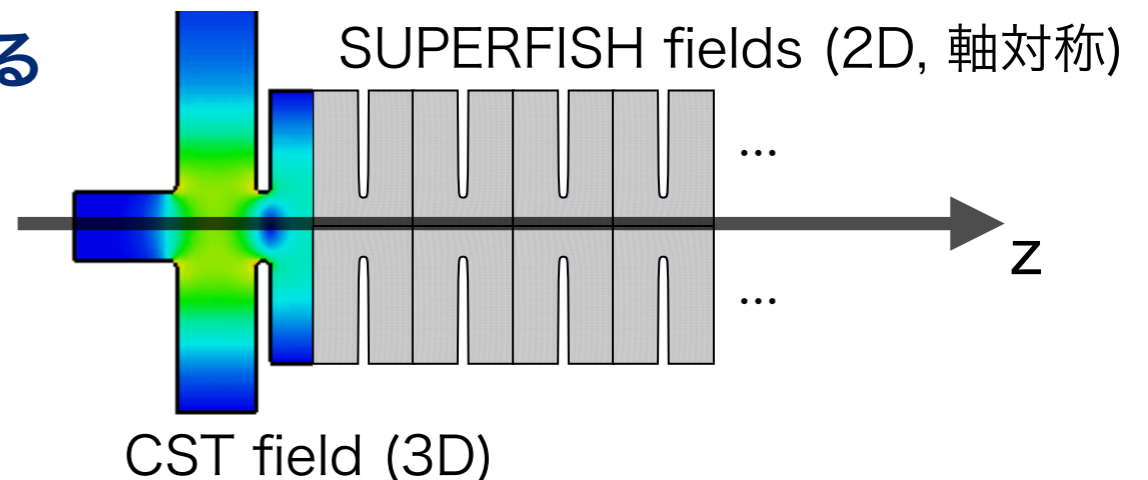
カプラーセル 電磁場分布



CST Studio Suite

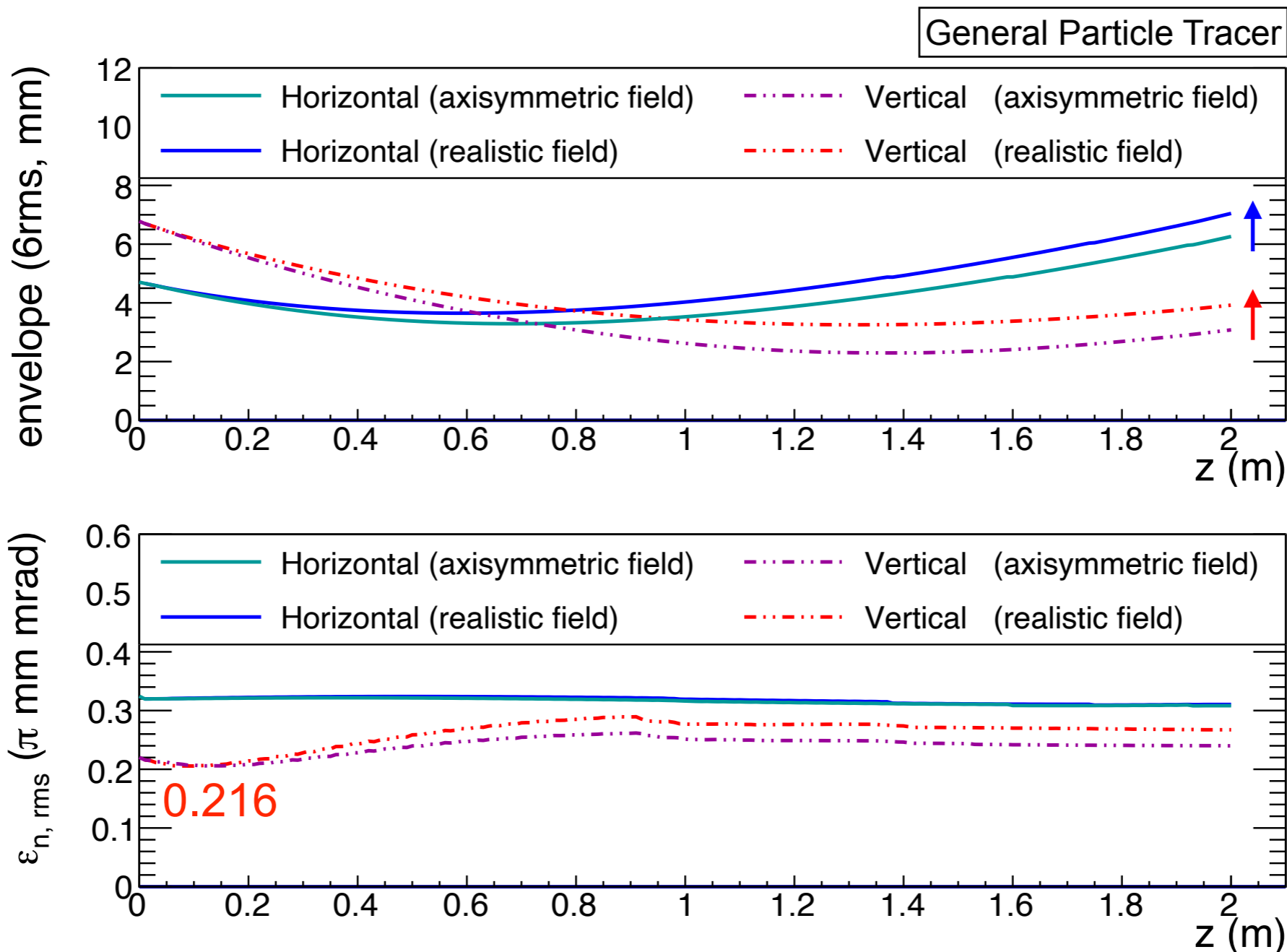
ビームが低速であるほど電磁場の影響を強く受ける

- DLS1上流側カプラーセルの位置に3次元電磁場分布を適用
- DLS1のビームダイナミクス





ビームダイナミクス (DLS1)



- **垂直方向エミッタンス増加** ← 軸対称近似の場合でも増加
- **エンベロープ増加 (水平, 垂直)**

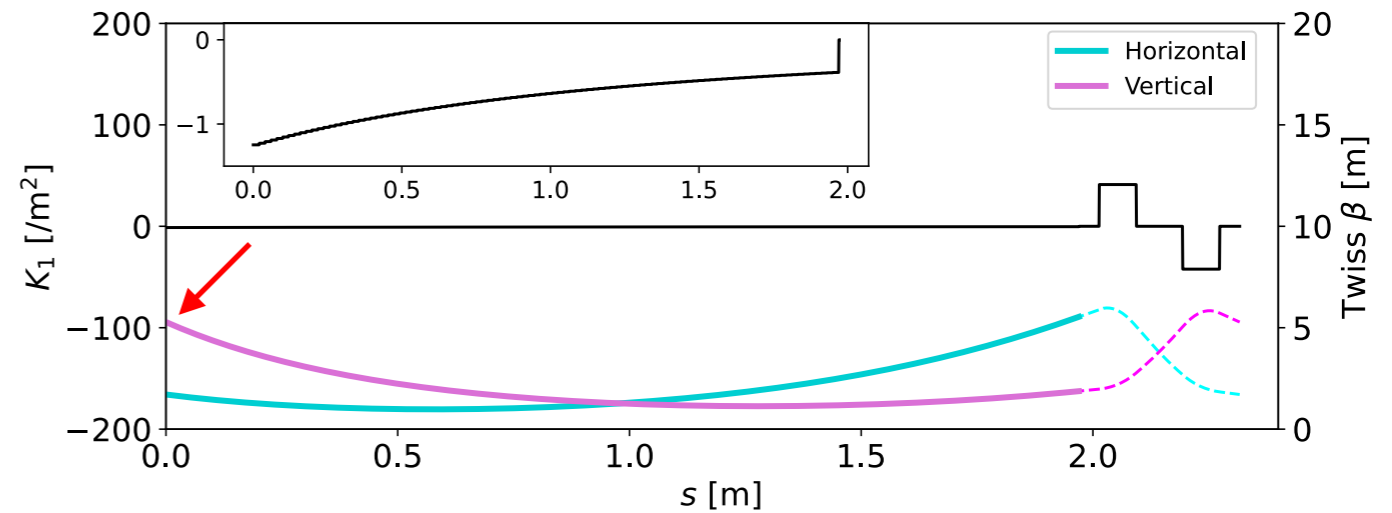
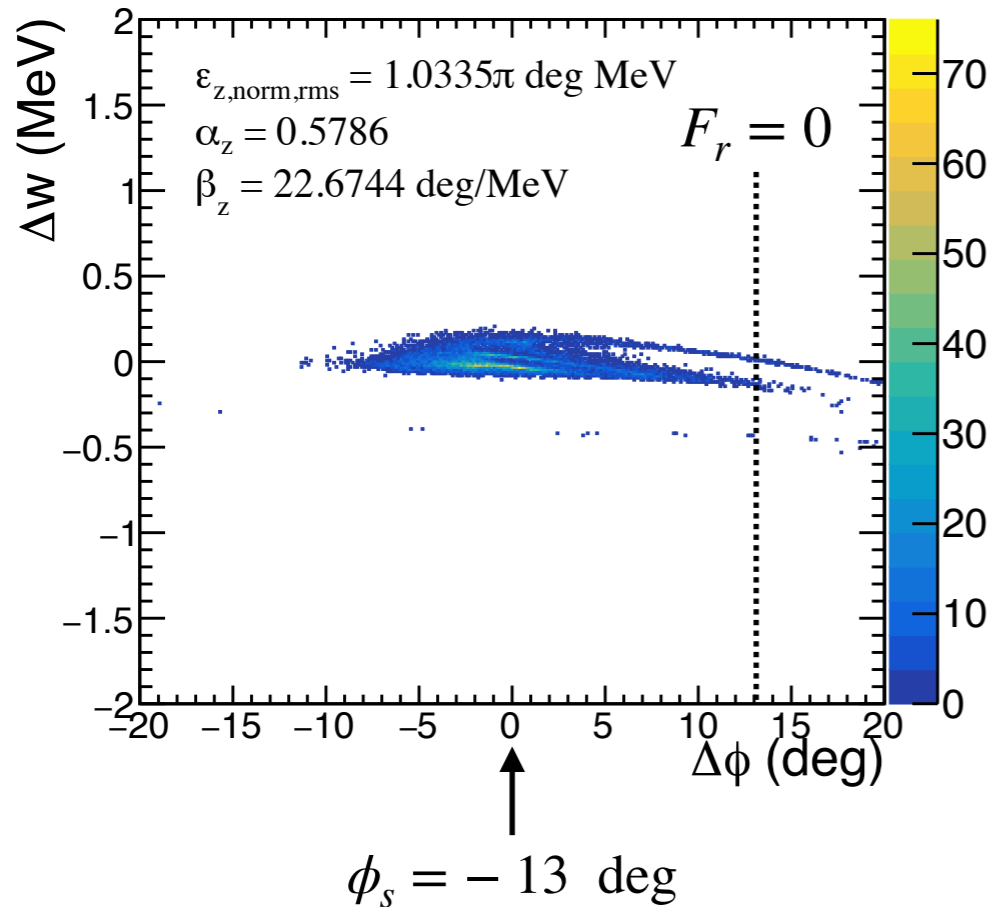
注) 構造が異なる影響でカプラーセルの電場強度は全体的に軸対称近似の場合より高い。

エミッタンス増加原因

横方向高周波発散力: $F_r(\Delta\phi, \beta\gamma, r) \propto -K_1 r \propto -\frac{E_{\text{acc}} \sin(\phi_s + \Delta\phi)}{\beta^3 \gamma^3} r$ $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$

入射ビーム縦方向位相空間分布

DLS1のラティス関数



低速 ($\beta\gamma$ 小) の上流側カプラーセル付近で
ビームサイズ大 (ビーム軸からの距離 r 大)
→ 発散力大

発散力に時間依存性

3D電磁場適用により軸上電場強度 E_{acc} 増加
→ 発散力増加 → **エミッタンス増加率up**

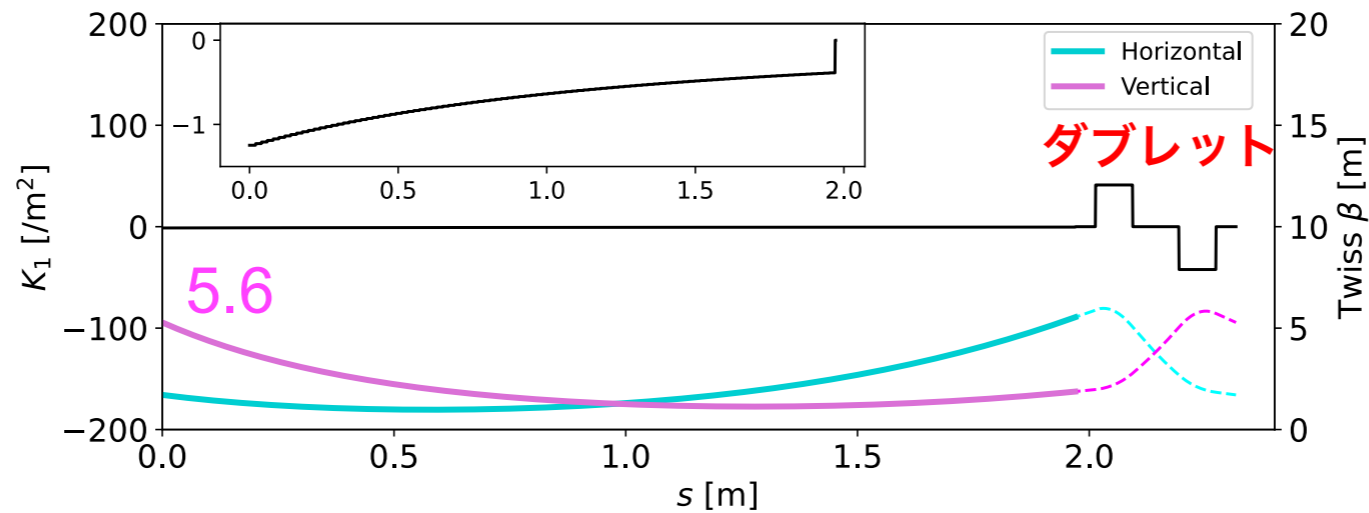
ラティス再設計による発散力抑制



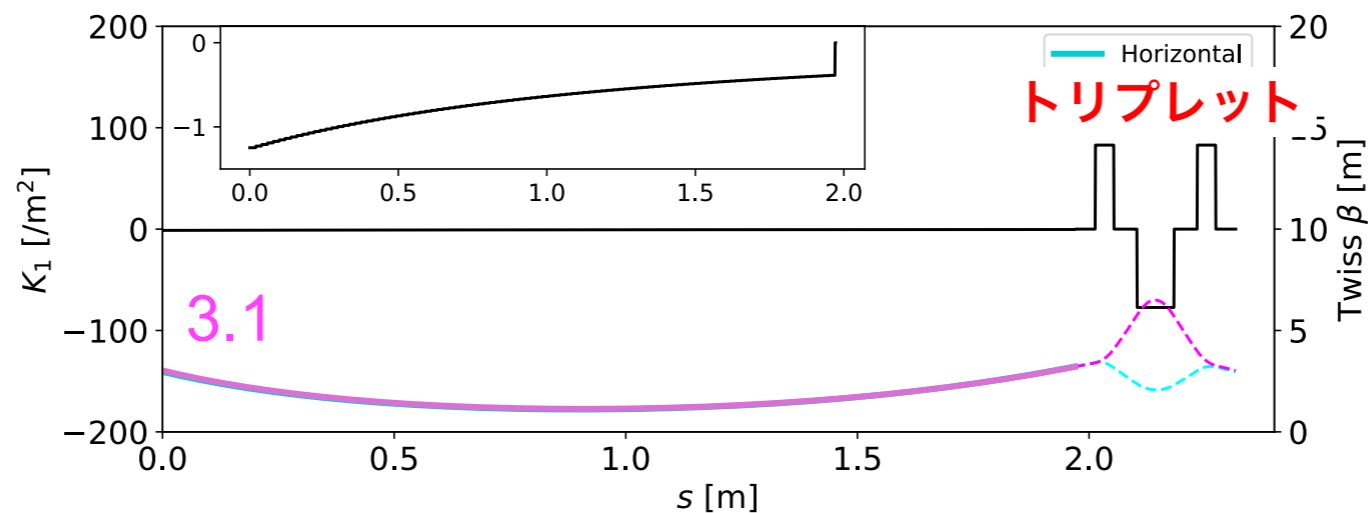
ラティス設計変更

横方向高周波発散力: $F_r(\Delta\phi, \beta\gamma, r) \propto -K_1 r \propto -\frac{E_{\text{acc}} \sin(\phi_s + \Delta\phi)}{\beta^3 \gamma^3} r$

DLS1のラティス関数

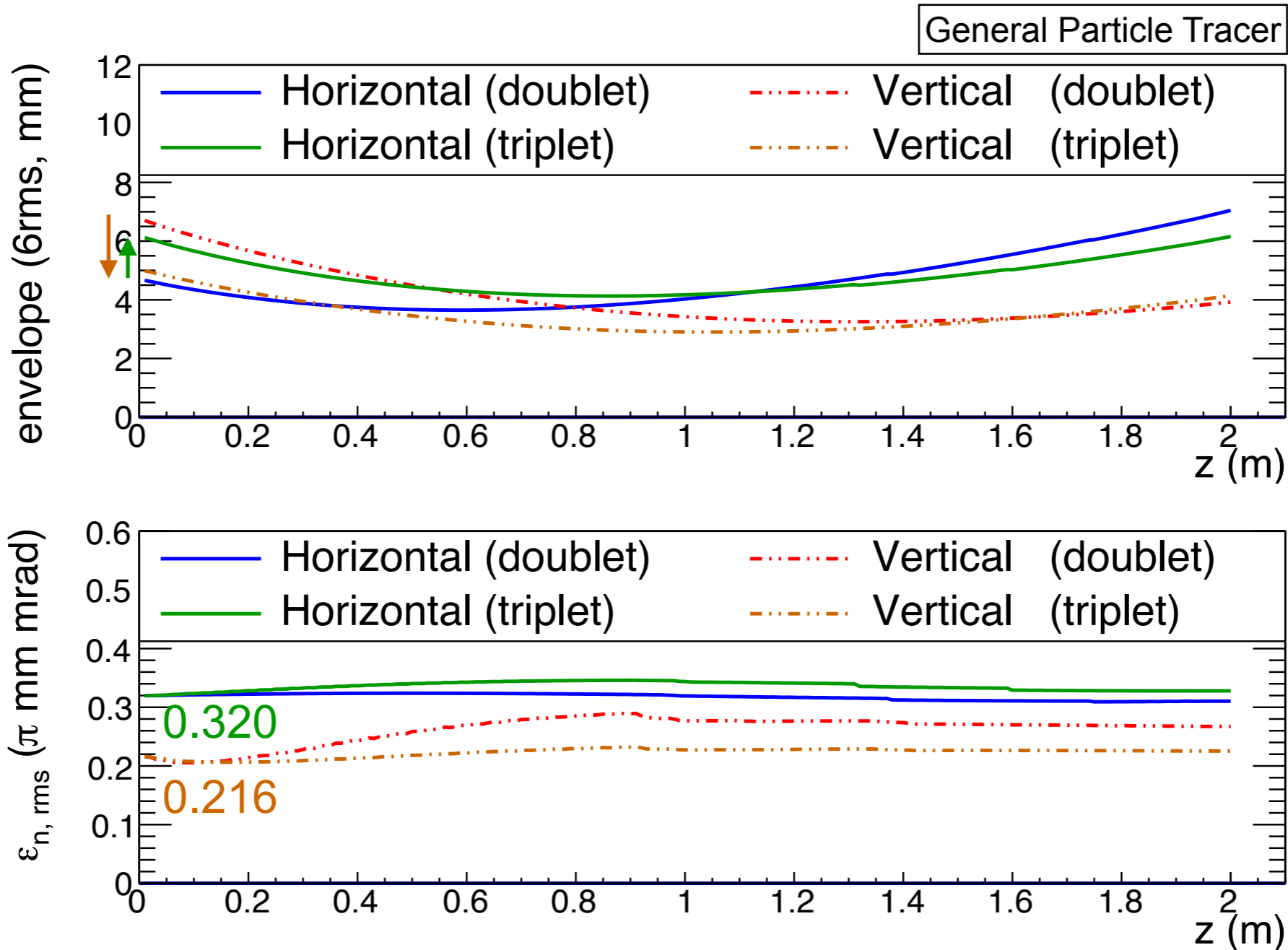


↓ $\sqrt{\beta_{\text{Vertical}}(0)}$ 25%減少





ラティス設計変更後のビームダイナミクス

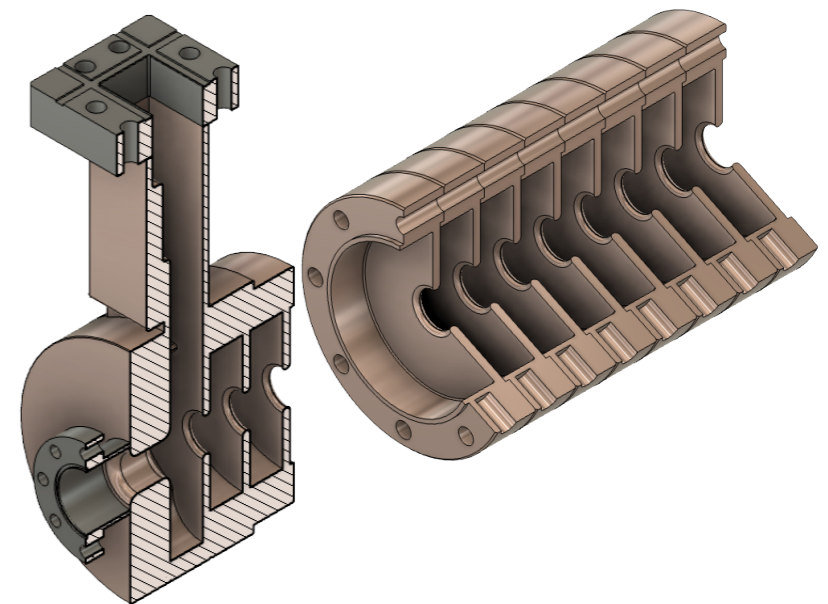


トリプレットラティスに合わせた入射条件でエミッタンス増加抑制

カプラーセルにおける非対称電場分布の影響は小さい

- ミューオン加速用SバンドDLS カプラーセル高周波設計
 - 1 開口部＋電磁場対称性補正用窪み
 - 非対称な電磁場分布のエミッタンスへの影響小
 - トリプレットラティスでエミッタンス増加抑制
 - Nodal-shift法によるインピーダンス整合
 - 反射を十分抑制 ($VSWR \leq 1.01$, simulation)

- カプラー・基準管試作 (2022年度末に完了)
 - 寸法および高周波特性の測定 → 誤差評価
 - 2024年度 実機製作開始予定



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。