

J-PARC におけるミュオン $g-2$ /EDM 精密測定実験のための ミュオンリニアック

近藤恭弘、長谷川和男、伊藤崇、Artikova Sayyora（原子力機構）
大谷将士、三部勉、内藤富士雄、吉田光宏（高エネルギー加速器研究機構）
北村遼（東大）、岩下芳久（京大）、岩田佳之（放医研）、
林崎規託（東工大）、齊藤直人（J-PARCセンター）

内容

1. RFQ
2. IH-DTL
3. DAW
4. DLS

世界初のミュオンリニアック実現に向けた
各加速構造の開発状況と、リファレンス粒子シミュレーション

ミュオンg-2/EDMの精密測定

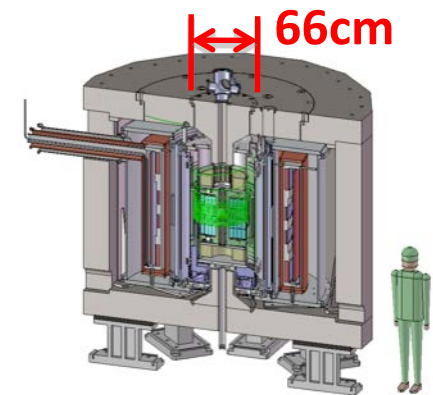
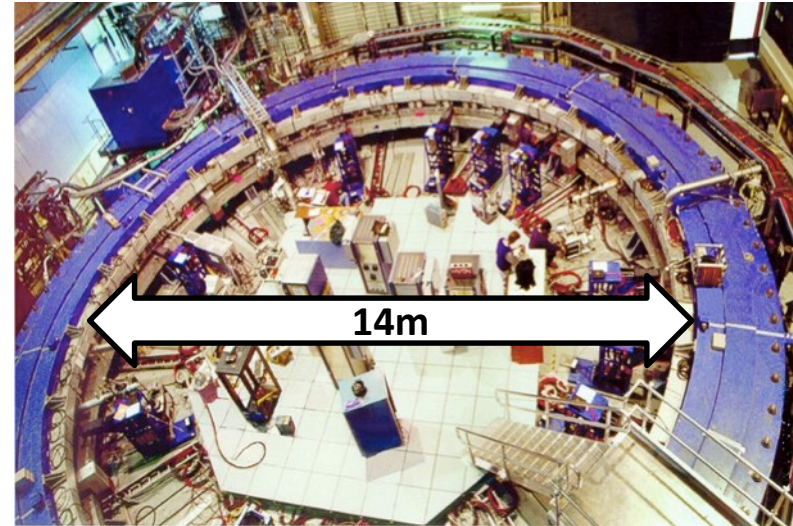
- ミュオン 電子の200倍の質量を持つレプトン
 - 未知の粒子への感度が高い
 - 基礎的物理量(異常磁気モーメントや電気双極子モーメント)の精密測定

- これまでの実験
 - 2次ビームをそのまま利用
 - $\sim 1000 \pi \text{ mm mrad}$



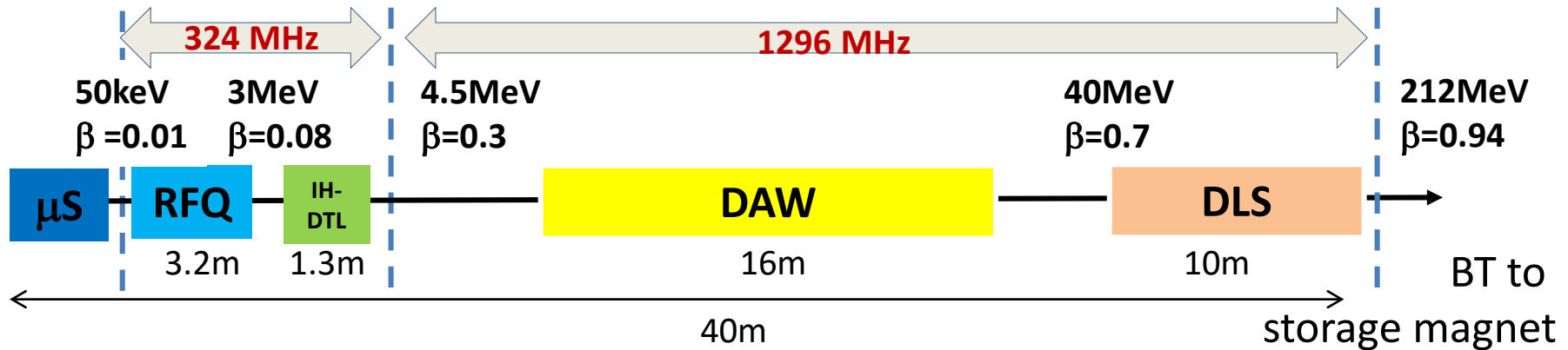
- J-PARC E34
 - 超低速ミュオンをリニアックで加速
 - $\sim 1 \pi \text{ mm mrad}$

エミッタンス 1/1000 の画期的ビームで
新しい物理を探索



ミュオンリニアックの構成

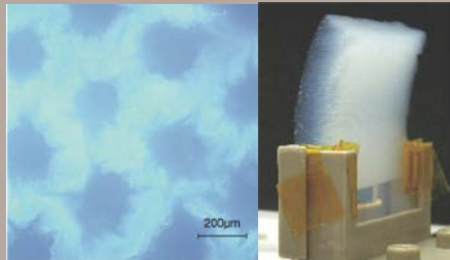
@ J-PARC MLF ミュオン施設 Hライン



加速粒子	μ^+
エネルギー	212 MeV
入射粒子数	$1 \times 10^6 / s$
繰り返し周波数	25 Hz
パルス幅	10 ns
規格化横エミッタンス	$1.5 \pi \text{ mm mrad}$
運動量分散	0.1 %

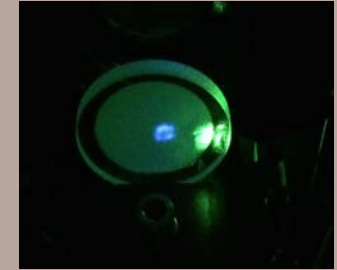
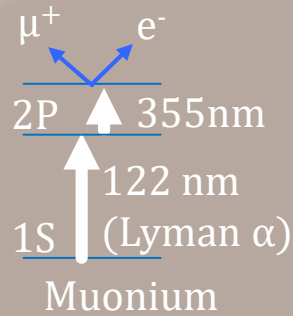
- β の範囲が広い
 - 周波数 2種類
 - 加速構造 4種類
- ビーム電流 ほぼゼロ
- ビームデューティー 非常に低い
 - 空洞フィリングタイム $20 \mu s$ は必要

超低速ミュオン生成



Silica aerogel with laser ablated surface [PTEP 2014, 091C01]

ミュオニウム生成

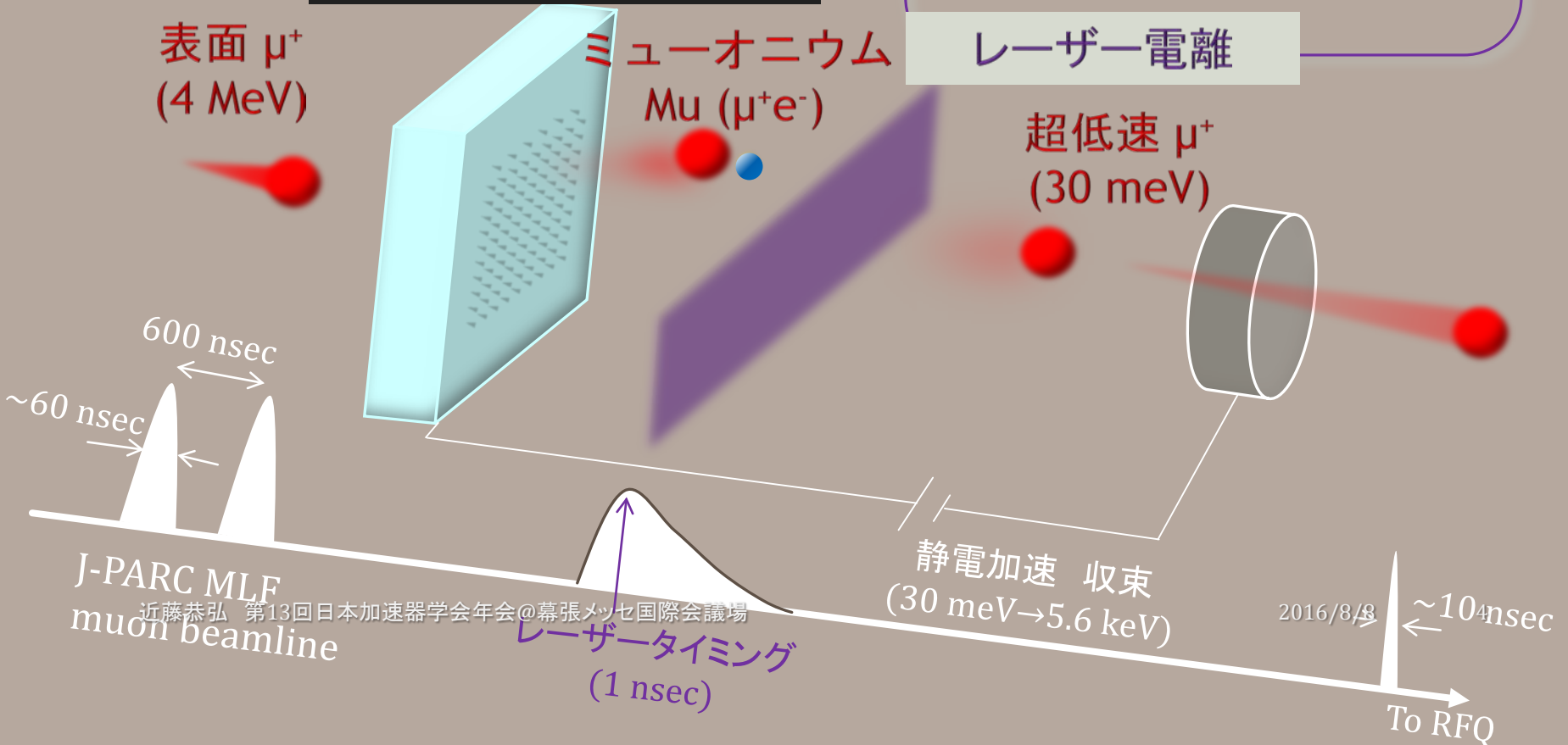


レーザー電離

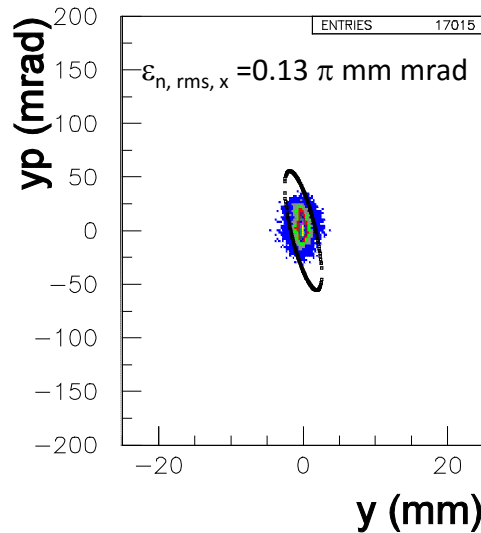
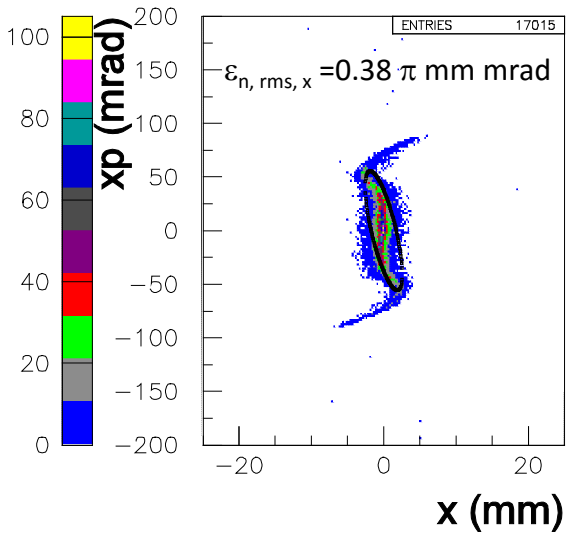
表面 μ^+
(4 MeV)

ミュオニウム
Mu (μ^+e^-)

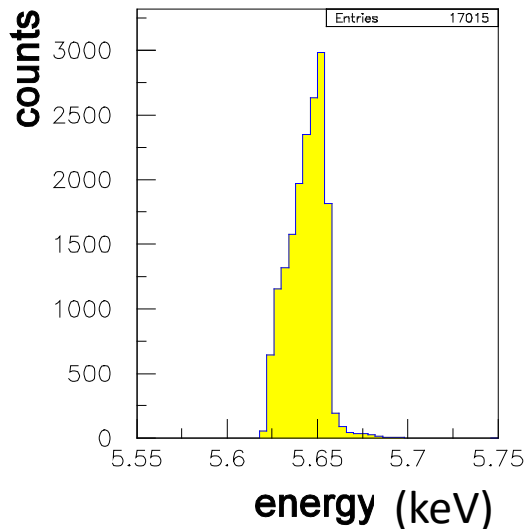
超低速 μ^+
(30 meV)



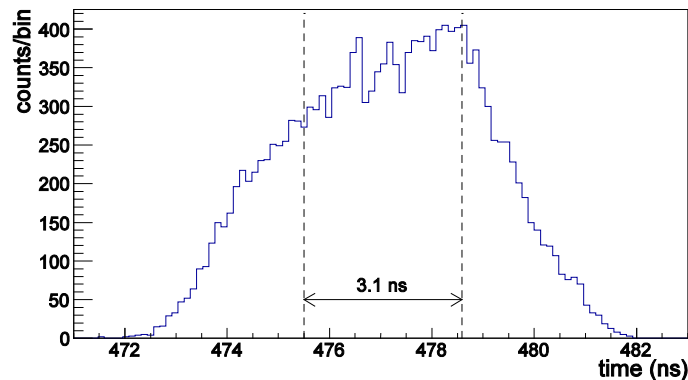
RFQ入り口での粒子分布



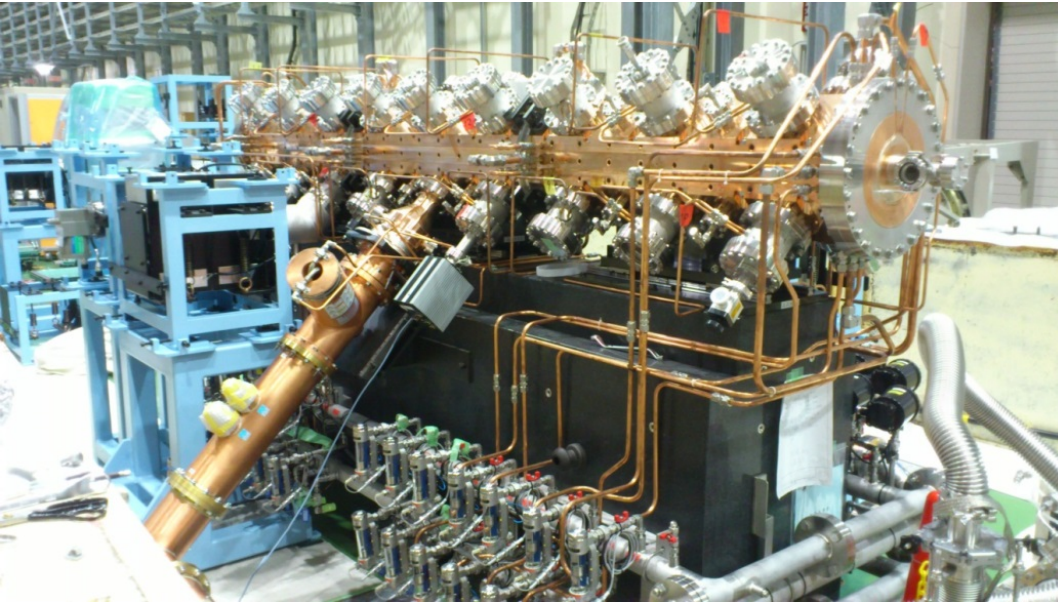
- ミューオニウムの拡散シミュレーションで得られた分布をGEANT4で輸送
- x方向 強いフィラメンテーションによるエミッタンス増大
- 電離用レーザーパルス幅 1ns
⇒ レーザ位置での空間分布に起因するビーム幅 10 ns



Time structure



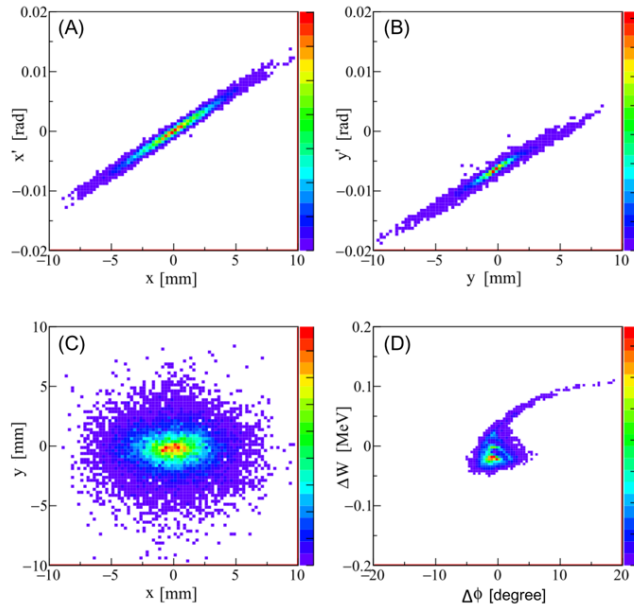
RFQ



	H ⁻	μ
共振周波数 (MHz)	324	
ヴェーン長 (m)	3.2	
質量(MeV/c ²)	939.3	105.7
入射エネルギー (keV)	50	5.6
出射エネルギー (MeV)	3	0.34
ヴェーン間電圧 (kV)	83	9.3
空洞消費電力 (kW)	330	4.2

- 初期段階ではJ-PARCリニアック用を使用
- ヴェーン間電圧を粒子の質量でノーマライズ
- RFQ自体は準備完了

APF型IH-DTL



IH出口での粒子分布
(GPTシミュレーション)

IH主要パラメータ

周波数	324 MHz
空洞長	1.3 m
入射エネルギー	0.34 MeV
出射エネルギー	4.5 MeV
シャントインピーダンス	92 MΩ/m
空洞消費電力	250 kW

- H-mode + APF (Alternative Phase Focusing) 高シャントインピーダンス
- 重イオンリニアックでの成功 HIMAC
- ゼロ電流のミュオンリニアックにも適用可。ただし周波数は1.6倍
⇒ 大谷 et. al., ポスター発表 TUP017

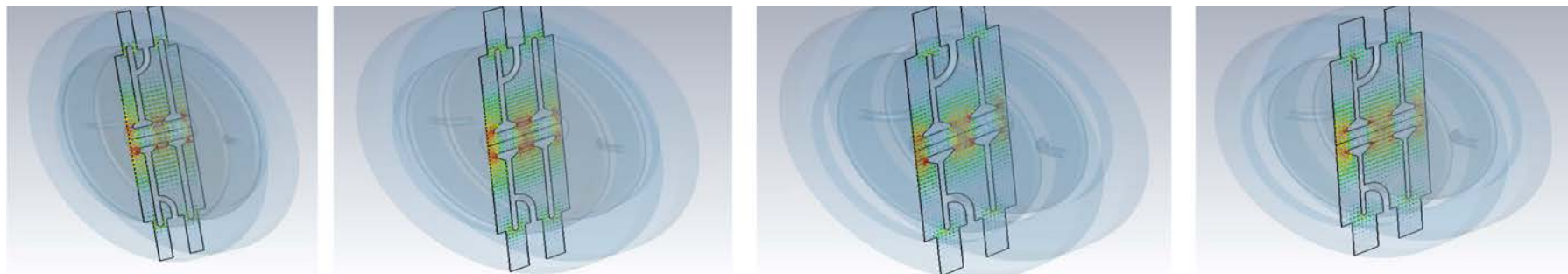
DAW型結合空洞リニアック

B = 0.3

B = 0.4

B = 0.5

B = 0.6



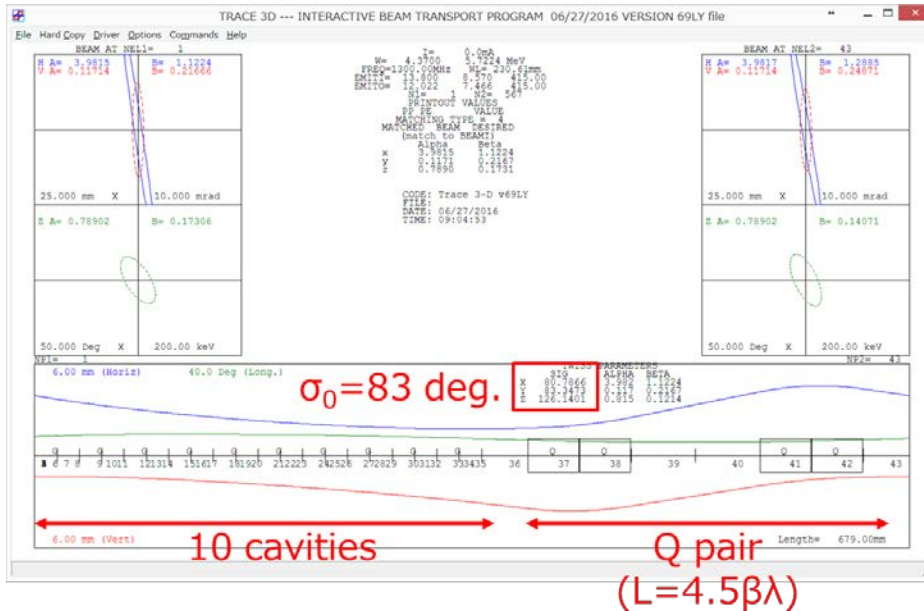
CST Micro Wave Studioによるセル形状設計

DAWセクション主要パラメータ

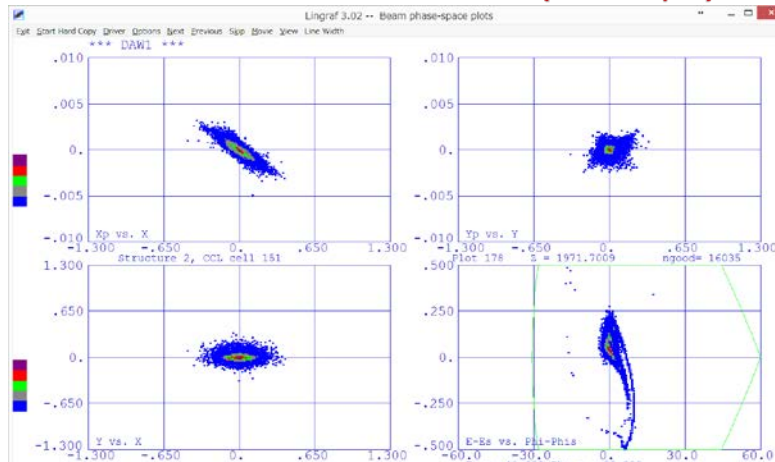
周波数	1296 MHz
全長	16 m
入射エネルギー	4.5 MeV
出射エネルギー	40 MeV
加速勾配	5.6 MV/m
モジュール数	15
空洞消費電力	4.5 MW

- 単純な構造
- 高い結合度 加速効率
- セル設計 ビーム設計は完了。コールドモデル測定中

DAWセクションのビーム力学設計



- PARMILAで縦方向設計
 - 同期位相 -30°
 - Transit time factorはSUPERFISHで計算
- TRACE3Dで横方向も含めた周期構造を設計
 - 1収束周期での位相進み $< 90^\circ$
- PARMILAで粒子シミュレーション

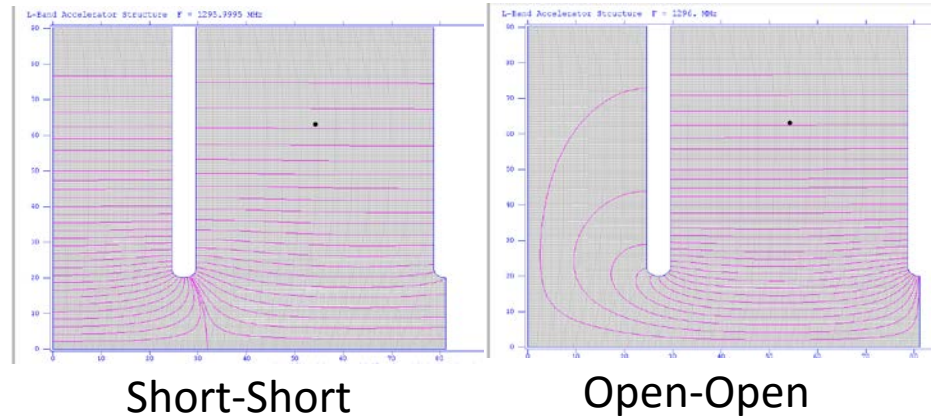


DAW出口での粒子分布(PARMILAシミュレーション)

円盤装荷型(DLS)進行波リニアックの ビーム力学設計

DLSセクション主要パラメータ

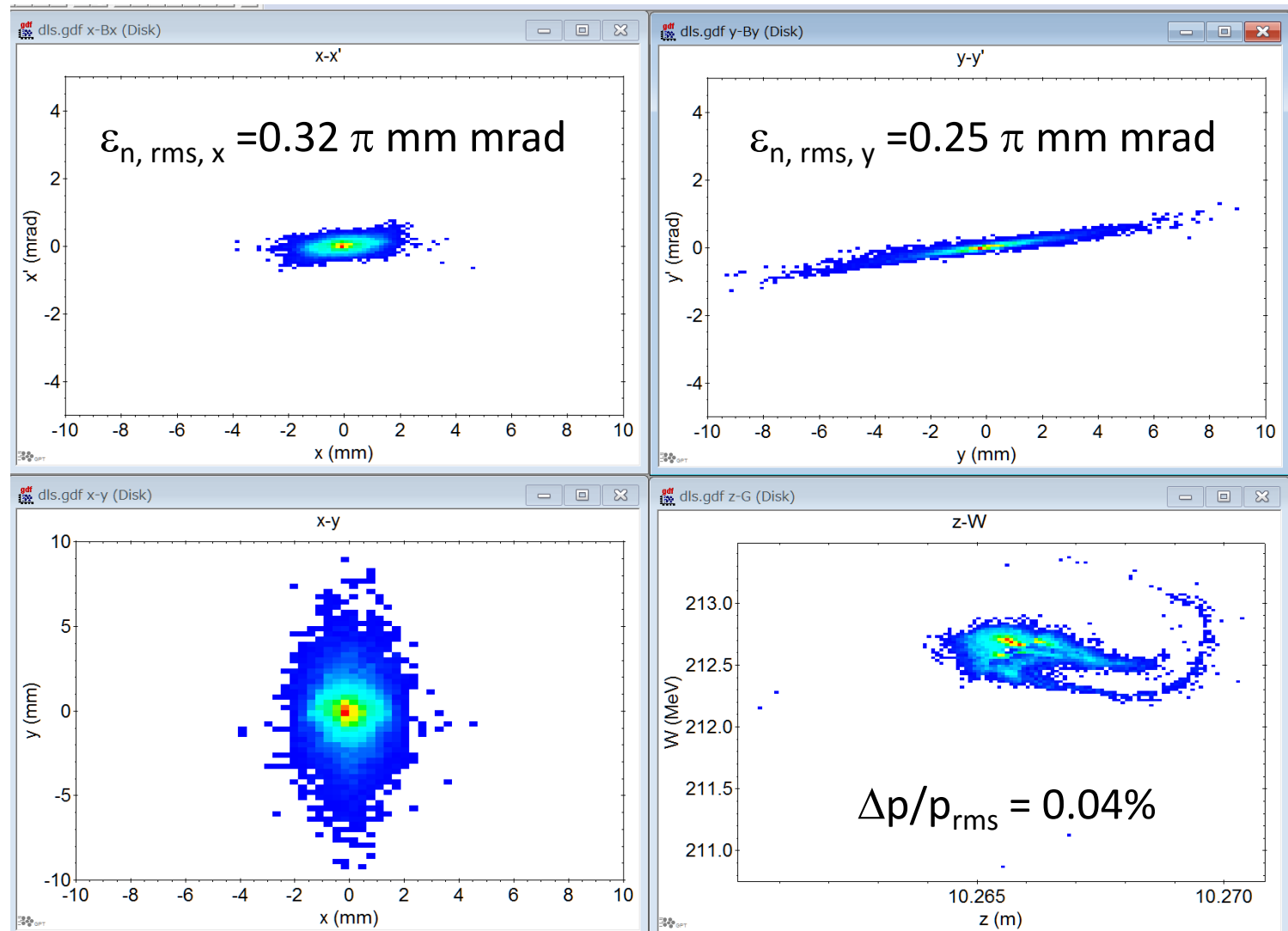
周波数	1296 MHz
入射エネルギー	40 MeV
出射エネルギー	212 MeV
セル長	$\beta\lambda/3$ ($2\pi/3$ mode)
加速勾配	20 MV/m
同期位相	-10°
加速管数	4



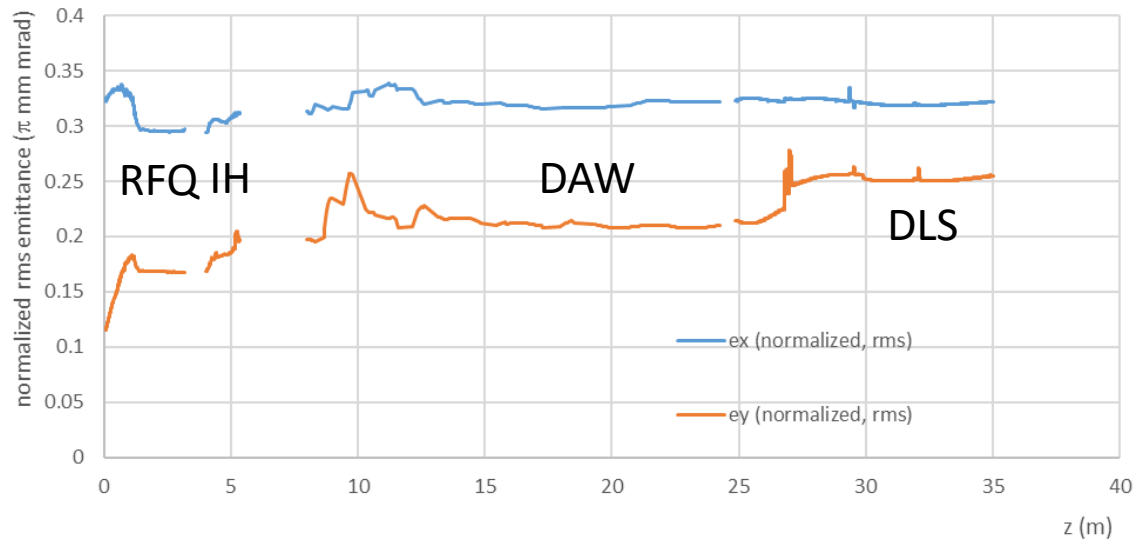
$$\mathbf{E}_{TW}(\mathbf{r}, t) = [\mathbf{E}_{SS}(\mathbf{r}, \omega) + i\mathbf{E}_{OO}(\mathbf{r}, \omega)] e^{i\omega t}$$
$$\mathbf{H}_{TW}(\mathbf{r}, t) = [\mathbf{H}_{OO}(\mathbf{r}, \omega) - i\mathbf{H}_{SS}(\mathbf{r}, \omega)] e^{i\omega t}$$

- GPTへの外部電場をSUPERFISHで計算
- 異なる境界条件の定在波を位相をずらして重畳
- http://www.yamamo10.jp/yamamoto/study/accelerator/GPT/TW_structure/index.php

ミュオンリニアック出口での粒子分布



End to end シミュレーションまとめ

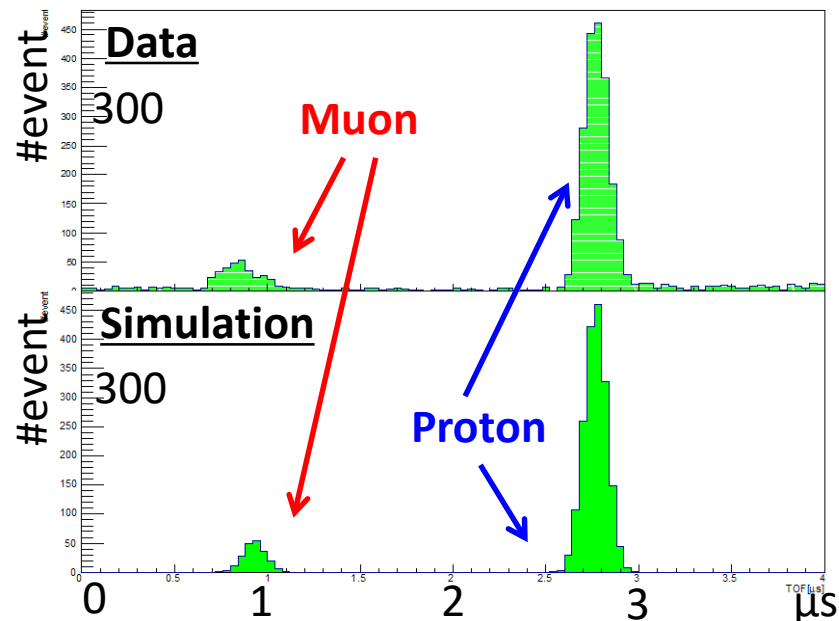


	入射	RFQ	IH	DAW	DLS
粒子シミュレーションコード	GEANT4	PARMTEQM	GPT	PARMILA	GPT
透過率 (%)	87	94.7	99.9	99.5	99.9
崩壊ロス (%)	17	19	2	4	1
$\epsilon_{n, rms, x}$ (π mm mrad)*	0.38	0.30	0.32	0.32	0.32
$\epsilon_{n, rms, y}$ (π mm mrad)*	0.13	0.17	0.20	0.21	0.25
* 規格化rmsエミッタンス					

ミューオン加速試験用低速 μ^+ μ^- 源の開発



Time of Flight 分布



- 2016年2月 MLF D2エリアにてビーム試験
- RFQで受け入れ可能な μ^+ の生成を確認
- Hラインが整備されしだい、RFQによる加速試験
⇒ 北村 et. al., ポスター発表 MOP050

まとめ

- 世界初のミュオンリニアック実現を目指し、ビーム力学、空洞設計を行っている
- 超低速ミュオン生成からリニアック出口までの、最初のリファレンスデザインが完成
- ビーム加速試験を計画中。まずはRFQまで