



---

# ILCに向けたSTF-2クライオモジュール による電子ビーム加速運転

---

倉田 正和

KEK

ON BEHALF OF THE STF-2 COLLABORATION

日本加速器学会, OCTOBER 18-21, 2022

WEOA04

# STF-2 Collaboration

---

Masakazu Kurata, Yasuchika Yamamoto, Eiji Kako , Kensei Umemori , Hiroshi Sakai, Takayuki Saeki, Takeshi Dohmae , Mathieu Omet , Ryo Katayama, Hayato Ito, Hayato Araki, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Masato Egi , Mitsuo Akemoto , Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri , Masato Kawamura, Hiromitsu Nakajima, Hitoshi Hayano , Masafumi Fukuda, Yosuke Honda, Miho Shimada, Alexander Aryshev , Masao Kuriki , Shinya Aramoto , Zachary Liptak, Kazuyuki Sakaue , Hirotaka Nakai , Yuuji Kojima, Kazufumi Hara, Teruya Honma , Kota Nakanishi, Hirotaka Shimizu, Yoshinari Kondou , Akira Yamamoto, Nobuhiro Kimura, Sakae Araki, Yu Morikawa, Takahiro Oyama , Shinichi Takahara , Mika Masuzawa , Ryuichi Ueki, Yoshihisa Iwashita

Univ. of Tokyo, KEK, Hiroshima Univ., Kyoto Univ.



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



# Introduction

---

- STF-2は国際リニアコライダー(ILC)における基幹技術のひとつである、超伝導加速の実証を行うための施設である
- STFの目的: ILC実現のためにILCのスペックによるビーム運転を行う
  - 高加速電界による加速(ILCスペック or それ以上を実現)
  - ビームロスのない、長いパルス( $\sim 700\mu\text{sec}$ ) & 高い電流ビーム(5.8mA)の運転
  - ビーム品質の維持: 低エミッタンスビームをダンプまで輸送
- 上述を実現するため、精力的にR&Dが行われてきた
- STF-2におけるこれらの研究の進捗状況を報告する

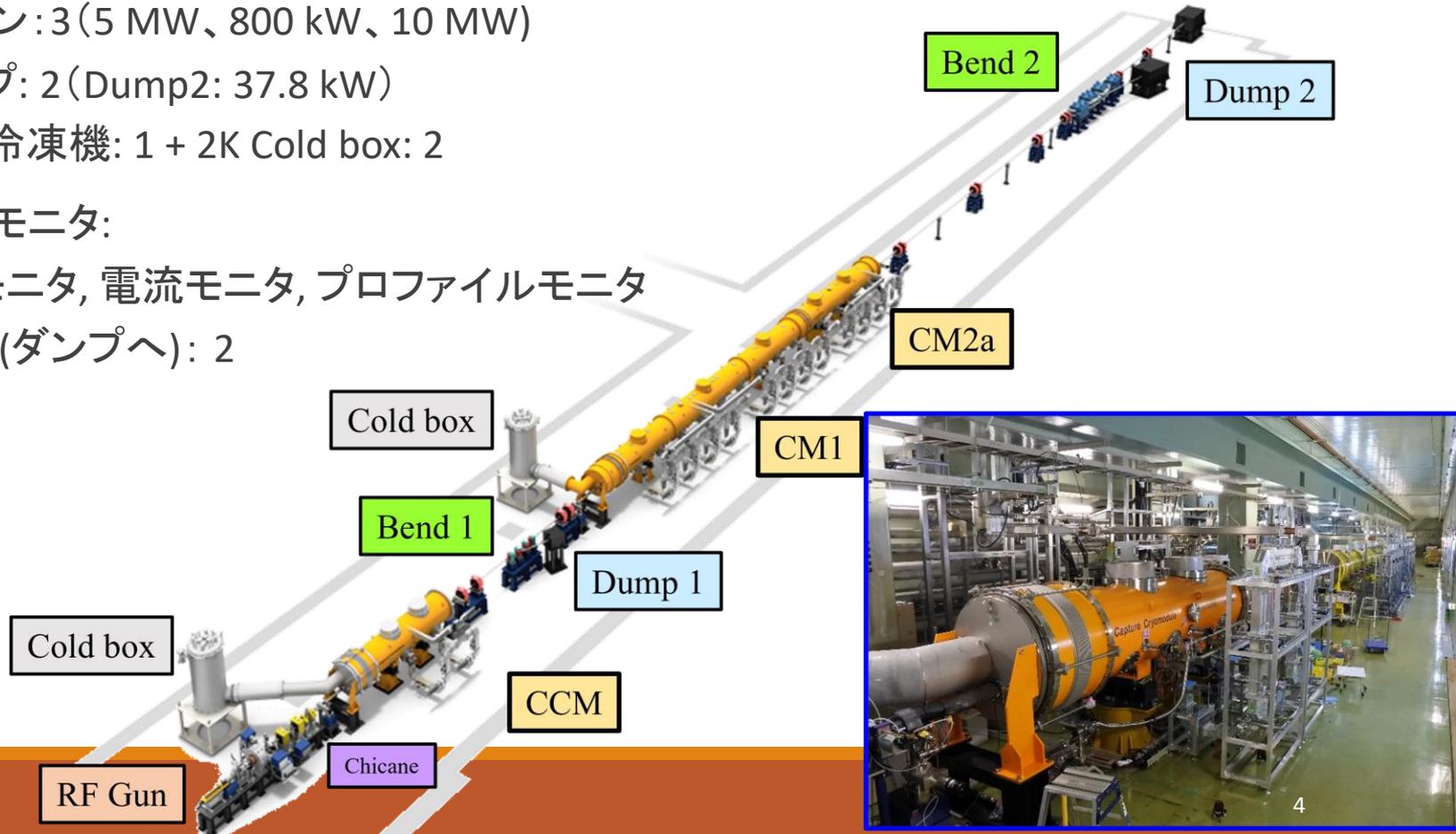
# STF-2 加速器

- ~70 m 超伝導直線型加速器 (726 $\mu$ sec/5Hz)
- 超伝導空洞: 14 (1.3 GHz、9-cell)
- クライオモジュール: CCM (2) CM1/CM2a (12)
- RF電子銃 (Cs<sub>2</sub>Te、Q.E.~1%)
- レーザーシステム: 162.5 MHz, 266 nm, 1 $\mu$ J/bunch
- クライストロン: 3 (5 MW、800 kW、10 MW)
- ビームダンプ: 2 (Dump2: 37.8 kW)
- 4Kヘリウム冷凍機: 1 + 2K Cold box: 2
- 各種ビームモニタ:  
位置モニタ, 電流モニタ, プロファイルモニタ
- 偏向電磁石(ダンプへ): 2

- 2020年以降のSTF-2スペック

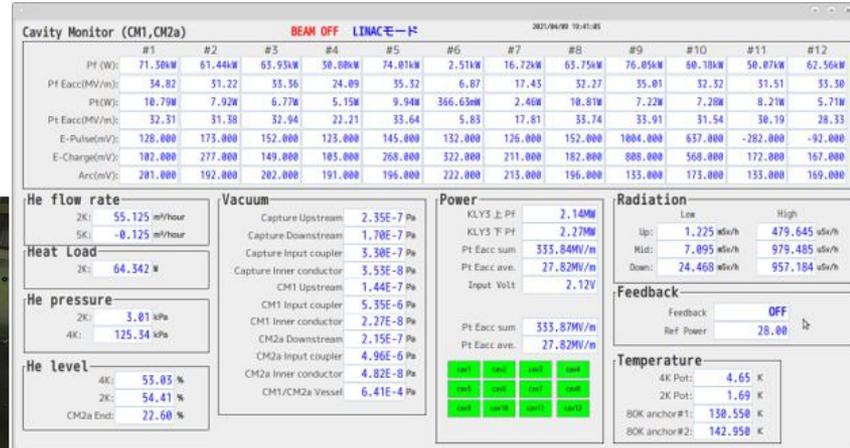
(規制庁への申請書の数値)

Max. Energy [MeV]	500
Max. Beam Intensity [ $\mu$ A]	3.0
Max. beam power [kW]	1.35



# Last operation & This operation

- 2021年4月
  - STF-2初の全14空洞による運転が実現
  - 9空洞の平均加速勾配が33.0 MV/m を達成
  - ILCスペックの5%マージン

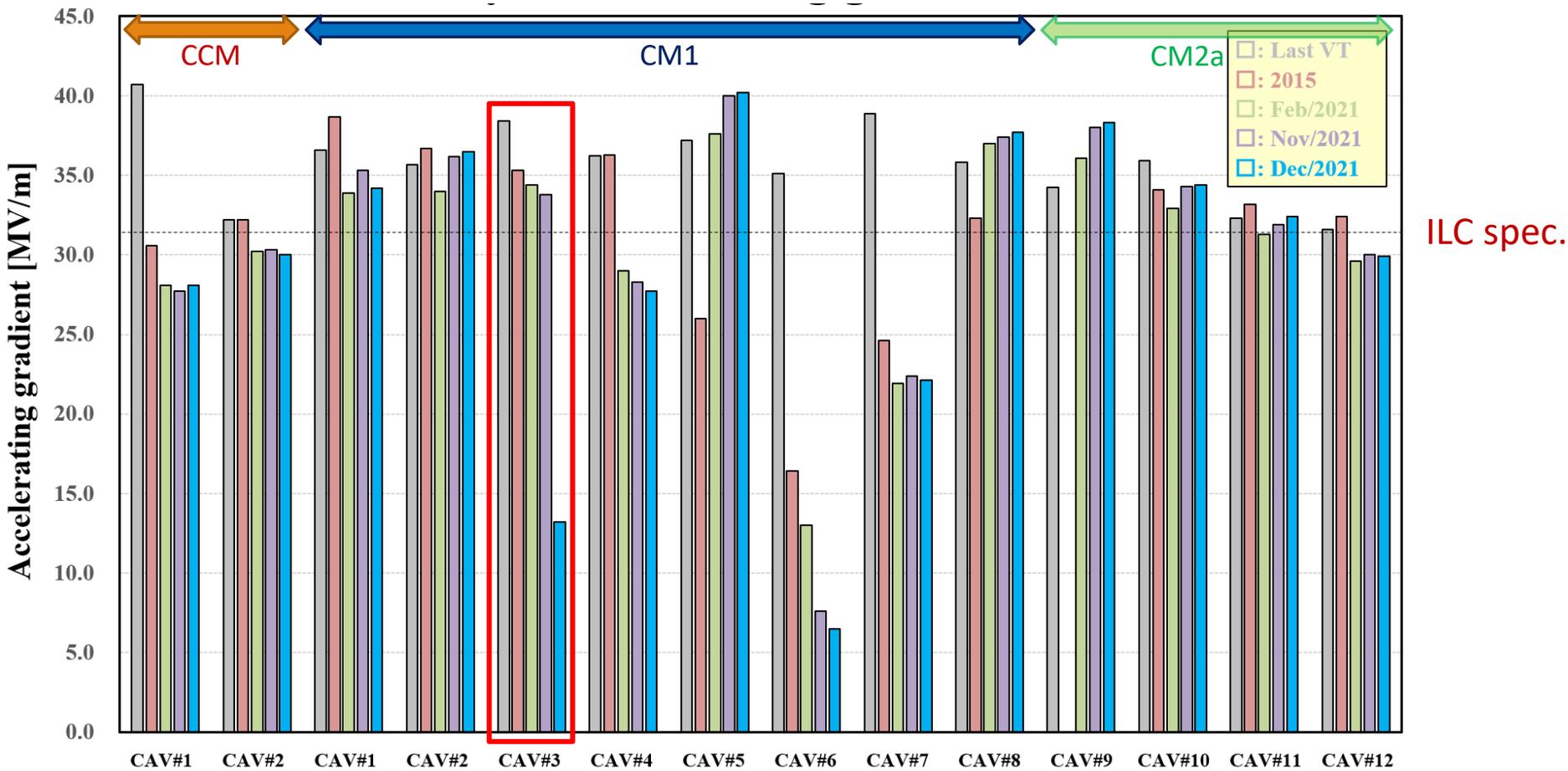


- 2021年12月
  - パルス長100μsecビーム運転の達成: ビームロス抑制
  - FY2021とビーム運転におけるビームパラメータ
    - ターゲットと同じパルス長で実施

parameter	Beam Energy [MeV]	Pulse length [μsec]	Bunch charge [pC/bunch]	Rep. rate [Hz]
F.Y.2021	500	100	36.9	5
ビーム運転実績	312	98.4	26	5

- 4月の運転を受けて、エミッタンス増大の原因究明

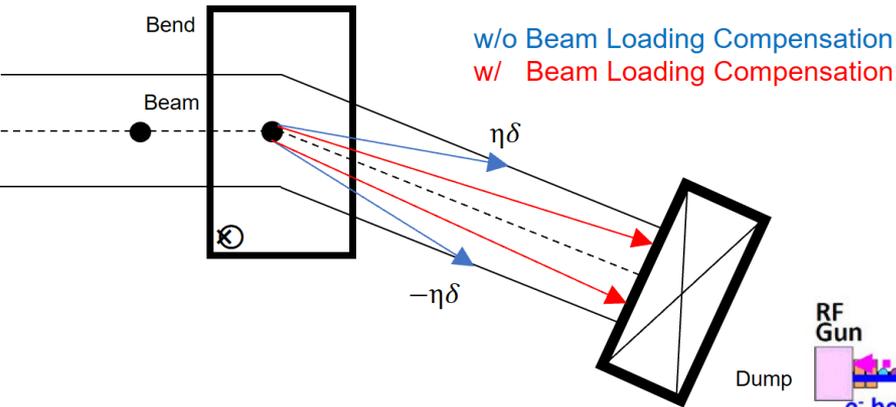
# Achievable Accelerating Gradient in CM1/2a in 2021



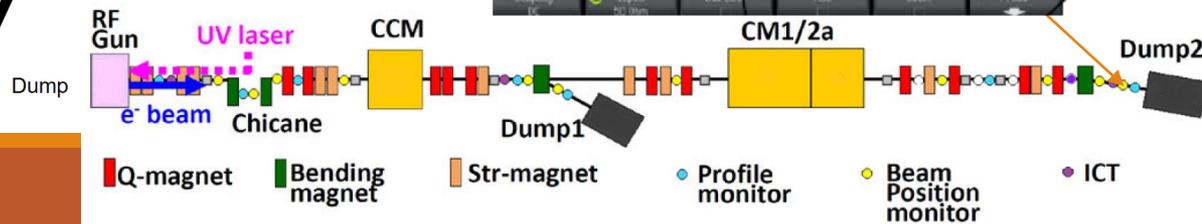
- 11/14 空洞の性能はILCスペックの ±20% 内
- CAV#3は11月の放射線測定中、性能の急激な劣化が発生 (TUP029)
  - 異常な熱負荷が発生した
  - ビーム運転ではdetuneして対応した

# ビームロスを抑えた $\sim 100\mu\text{sec}$ パルス 運転

- 2021年4月のビーム運転でBend2下流におけるビームロスが観測された
  - $>150\text{nC/pulse}$ でチェレンコフカウンターに信号
- ビームローディングによりエネルギー広がりが増大
  - 加速空洞での電圧降下を引き起こす
- 偏向電磁石下流のディスパージョンによりビームラインに当たる
  - エネルギーの異なる電子は偏向電磁石により異なる軌道を運動する
- STF-2でビームロスなくパルス長 $>100\mu\text{sec}$ のビーム運転を行いたい
  - ビームローディングの補正が必須である

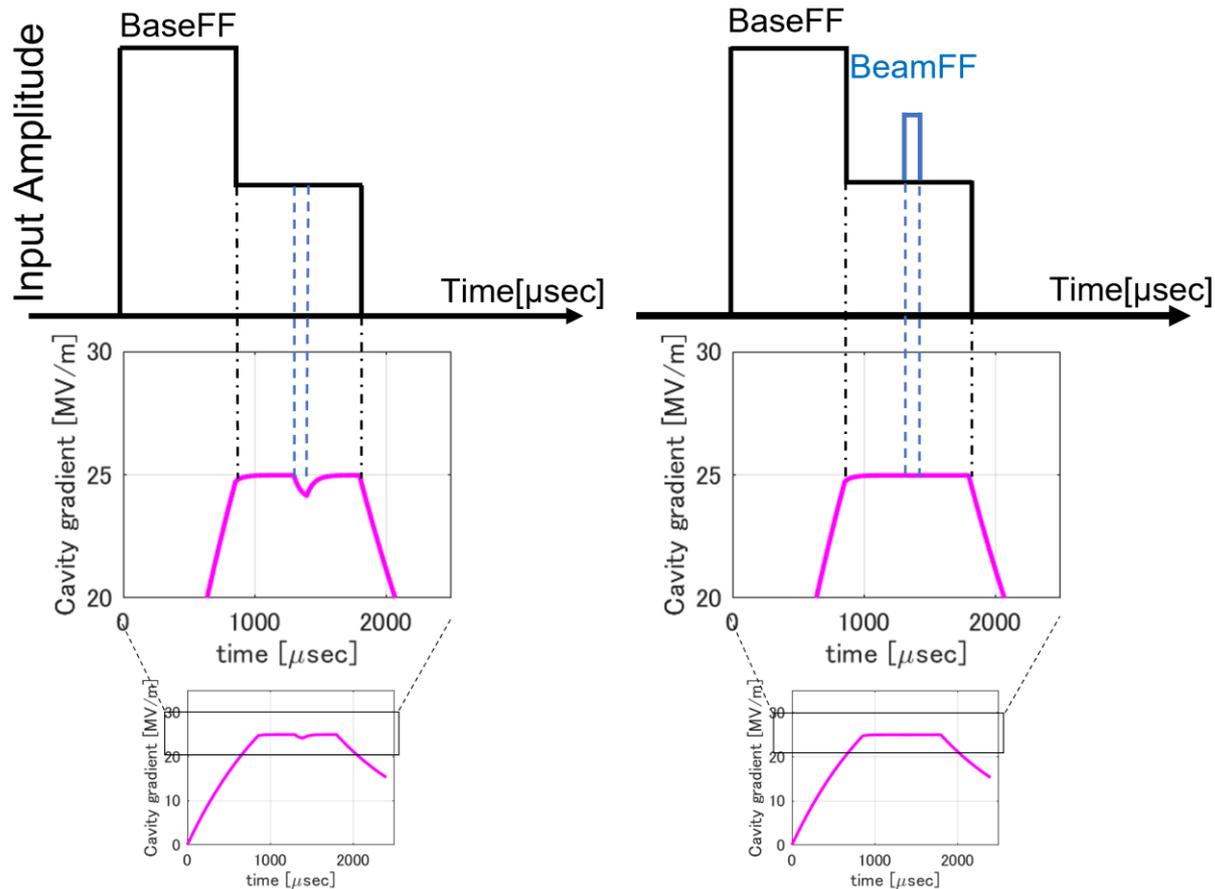


Signal of Cherenkov counter



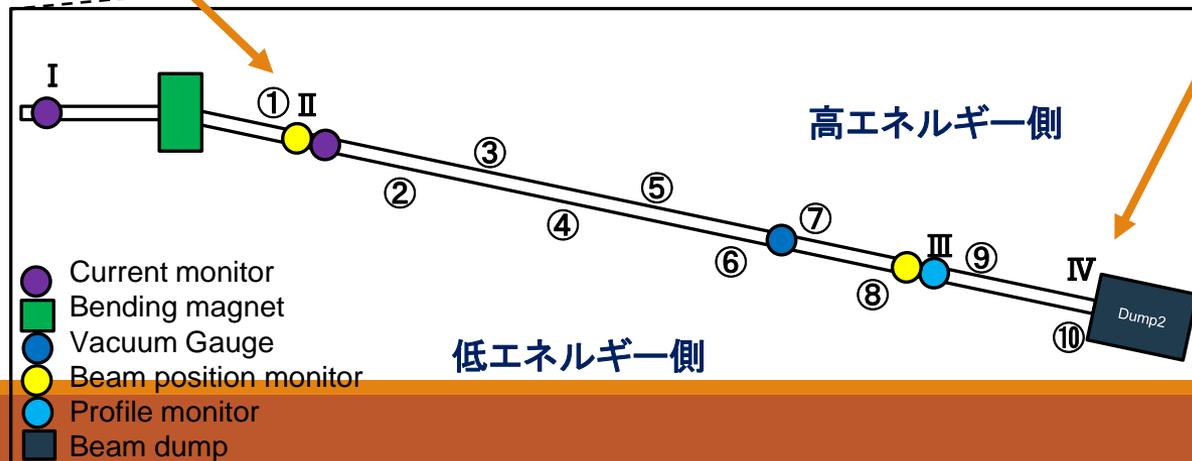
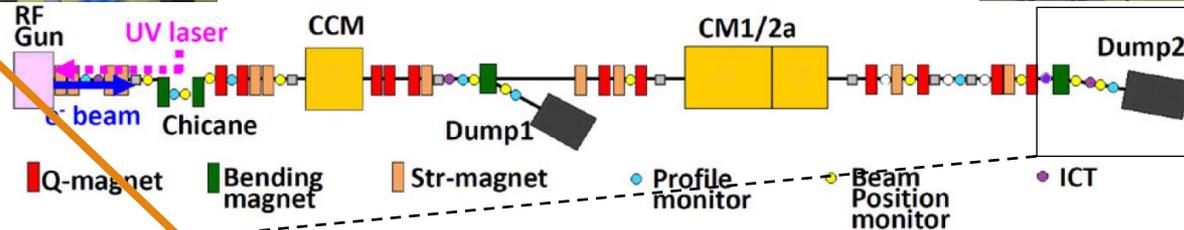
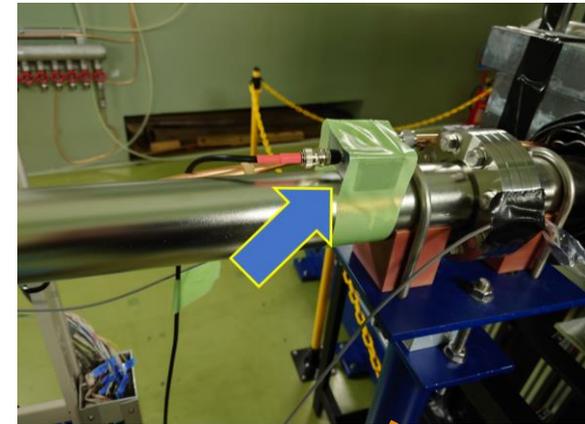
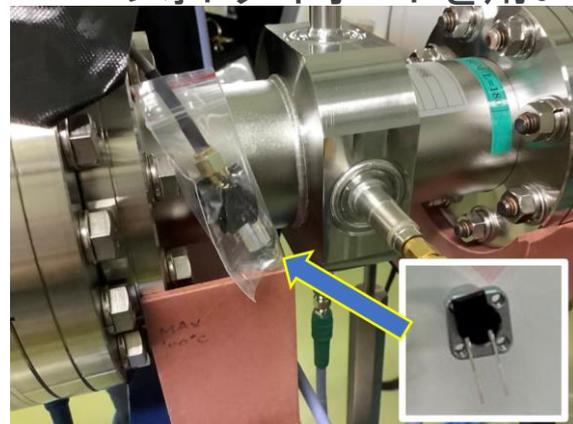
# ビームローディング補償

- 安定なフラットトップの加速電界を得るために:
    - 不規則な擾乱: フィードバックループにより補正
    - 規則的擾乱: フィードフォワード – あらかじめ補正入力を入れる
- ⇒ 電圧降下を補償する



# ビームロス検知のためのロスモニタ

- ビームライン上でのビームロスをとらえるために各種ロスモニタを設置
- フォトダイオードを用いたロスモニタ

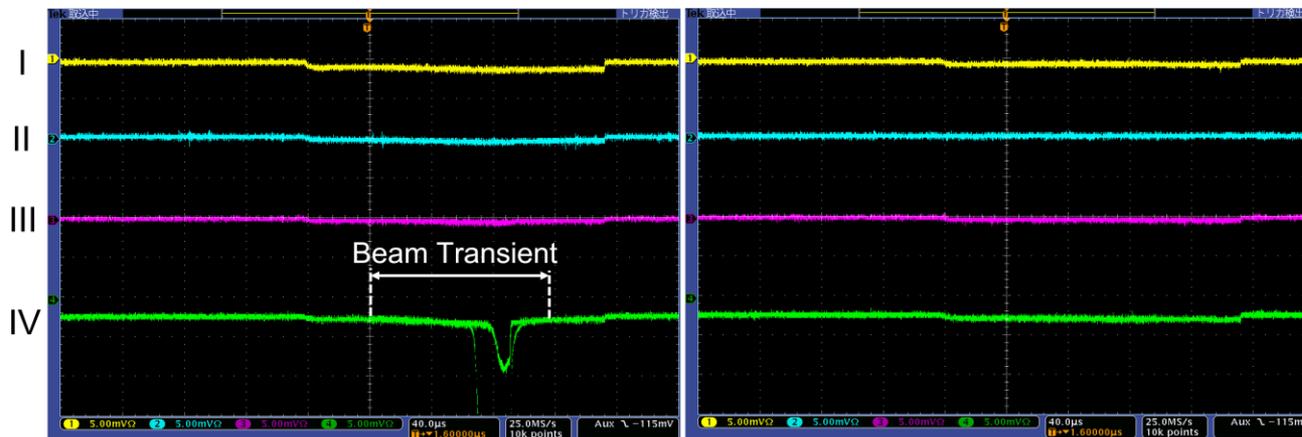


# ロスモニタの信号

- ロスが発生した瞬間の信号を見る

Without Beam FF

With Beam FF



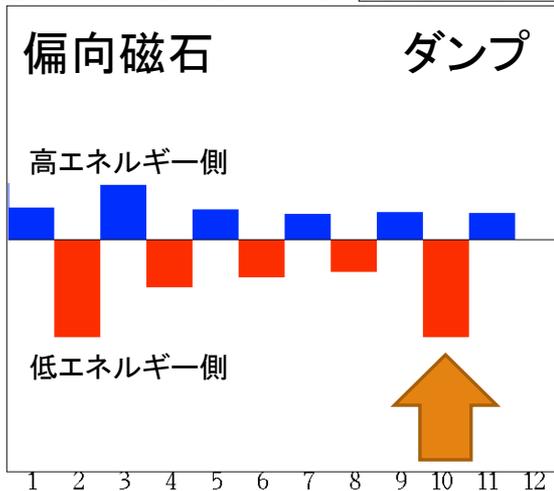
- パルスごとのロス強度の積分値をみる(パルスの傾向を知る)

Without Beam FF

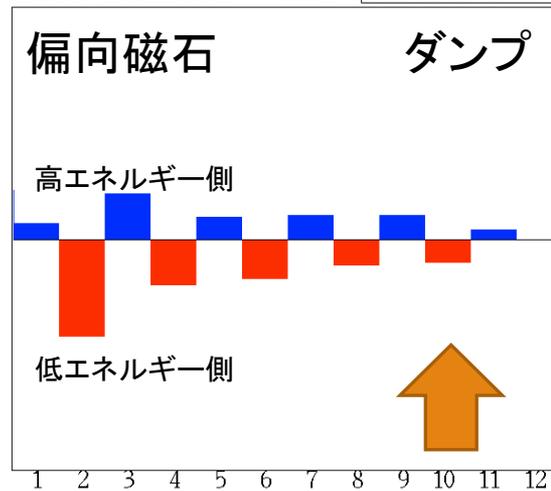
With Beam FF

Amplitude[arb. units]

Loss Monitor Ver.2 2021.12.09 21:37:15:58



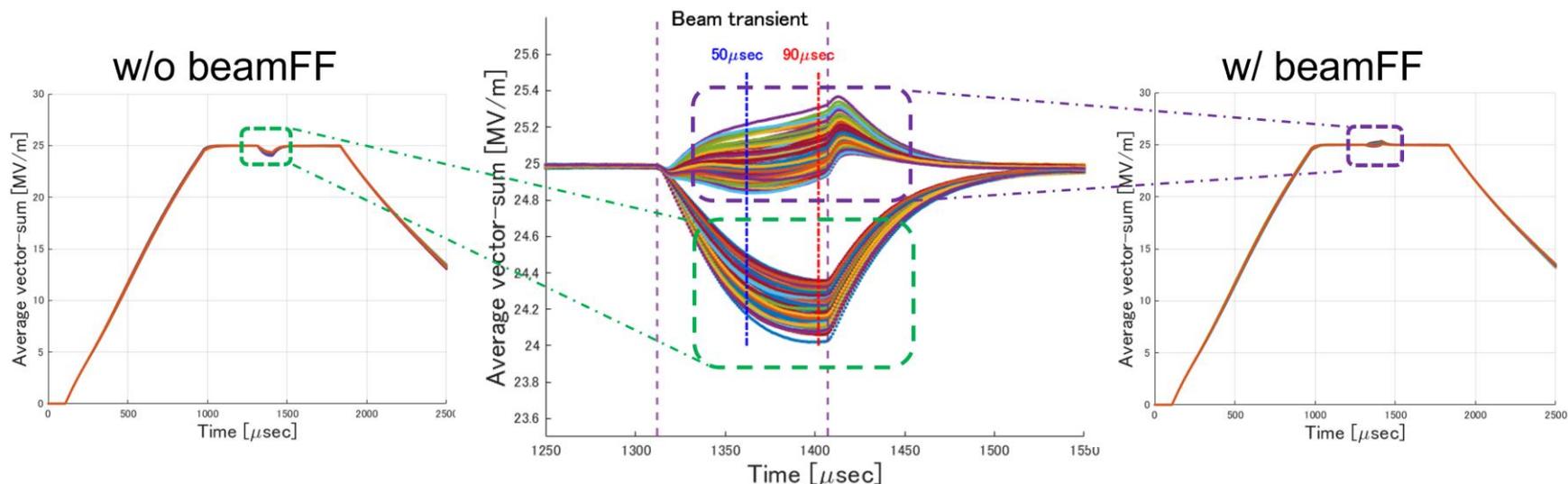
Loss Monitor Ver.2 2021.12.10 19:57:47:60



# ～100 $\mu$ secパルスビーム運転

## ● 平均加速勾配

- フィードフォワードがないと、勾配降下が起きている
- **フィードフォワードにより、加速勾配の降下を抑制**

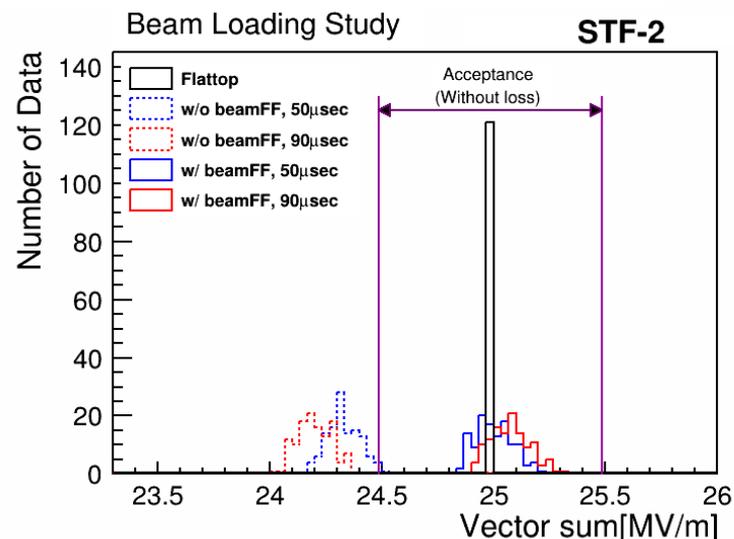


## ● チェックした全121パルスがアクセプタンス内

- ビームロスを抑制できている

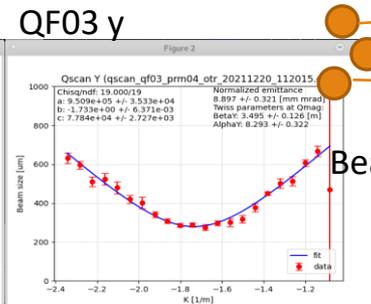
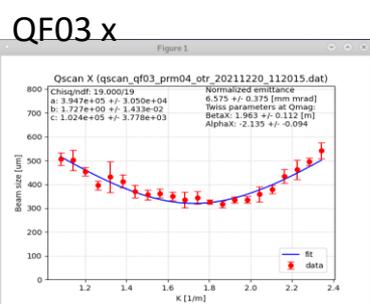
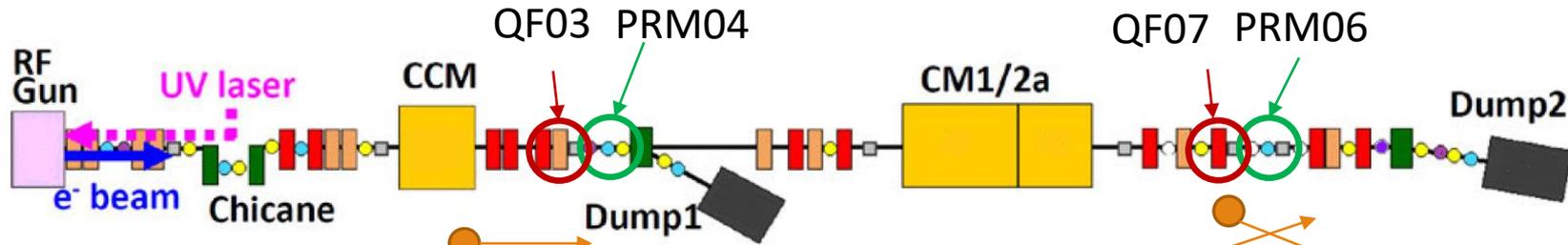
⇒ **Long pulse運転に向けた良い知見を得ることができた**

- 電子銃からの暗電流による放射化の問題が残っている



# 異常なエミッタンス増大

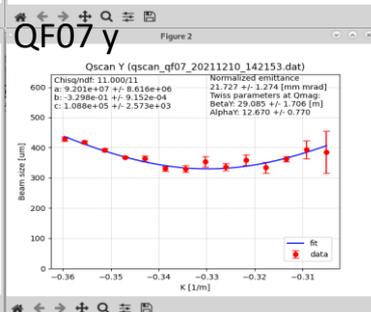
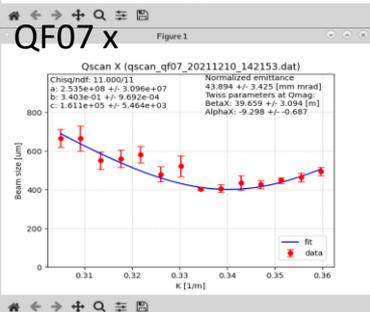
- 2019年以來、エミッタンスの空洞前後の変化が確認されている
  - OTRモニタでのQスキャンにより、空洞前後のエミッタンスを測定している
  - エミッタンスが異常に増大: デザインの何倍も大きくなっている
    - $O(1)_{[\text{mm mrad}]} \Rightarrow ?? \Rightarrow O(10)_{[\text{mm mrad}]}$
- ⇒この増大の原因を突き止めたい



Beam quality good

??

Emittance going bad



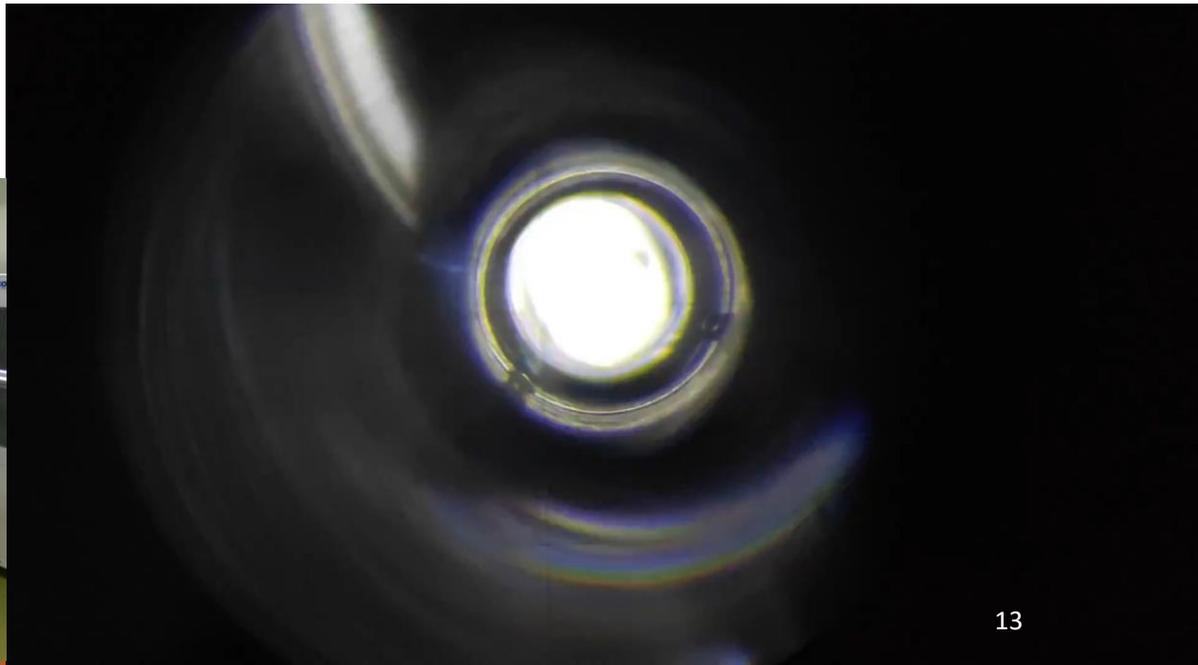
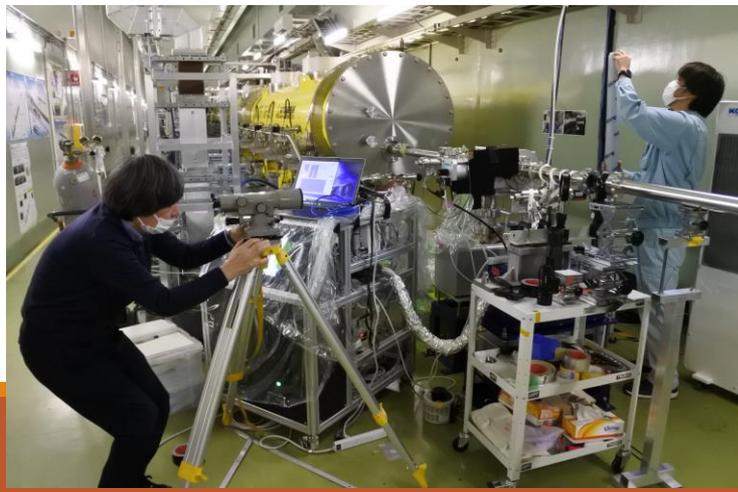
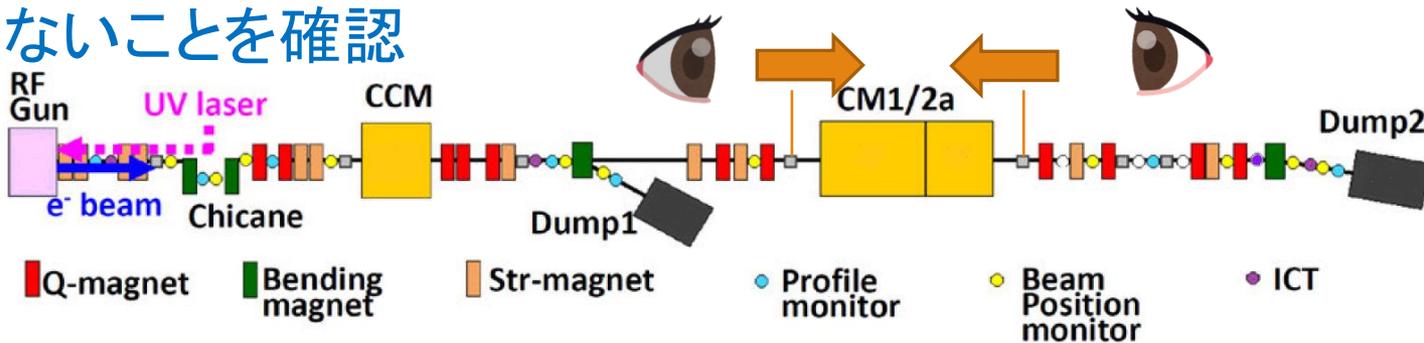
この間は

- 線型オプティクス
- 空洞加速

# 空洞の内部を視る

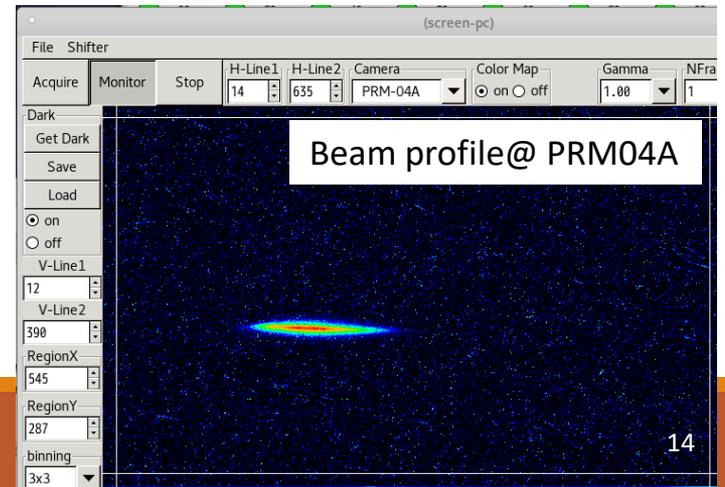
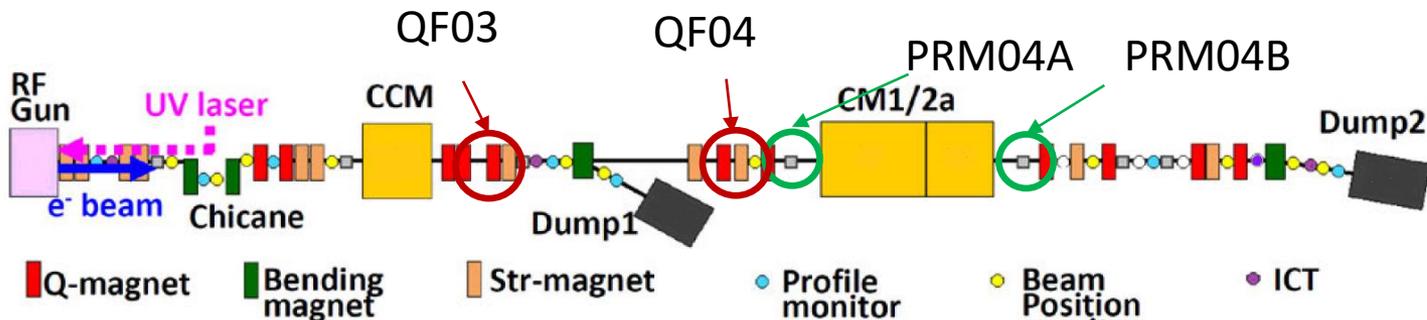
- 2021年11月、実際に加速空洞の中をのぞくことで、エミッタンス増大の原因となる障害物等がないことを確認した
  - ベローズを除去/view portを設置/真空をベント/望遠鏡&光学系をセット/ゲートバルブ開放

## 何も無いことを確認



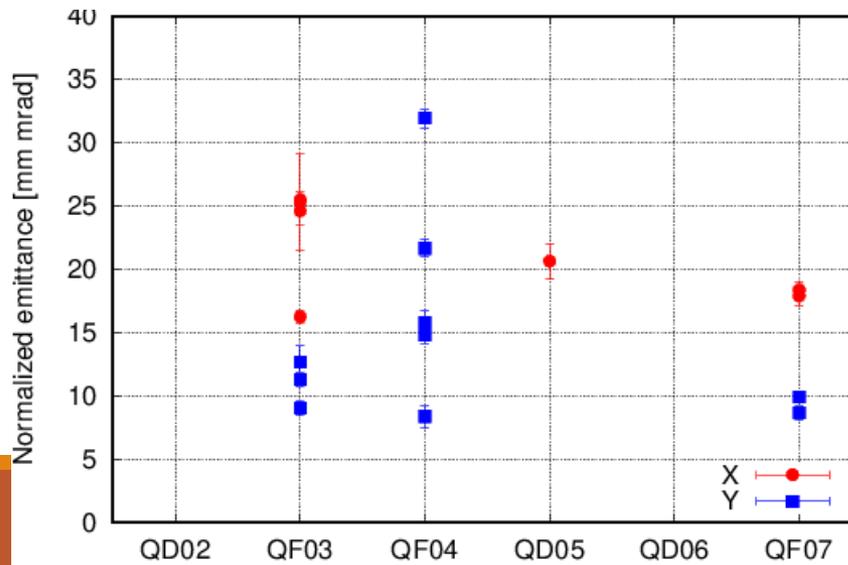
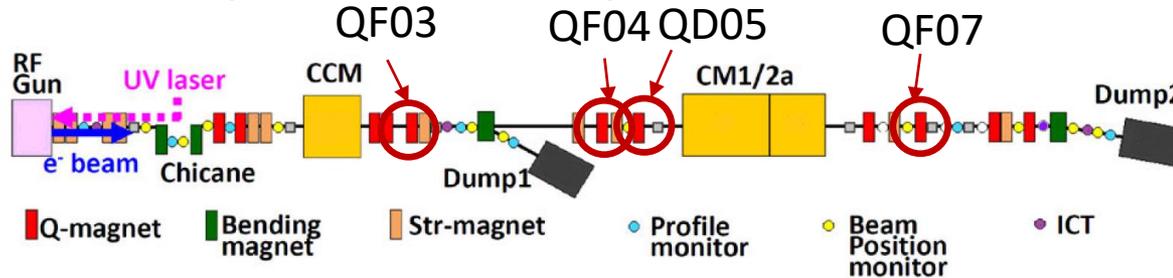
# モニタ増設

- 2021年11月, 加速空洞の上流/下流に新たにプロファイルモニタを設置
  - 空洞入射直前/直後のビームの状態を調査
  - 空洞入射直前のエミッタンスを測定可能: QF04-PRM04A
- エミッタンス増大の候補を一つずつ調査
  - 加速空洞周りを中心に調査



# エミッタンス再評価

- エミッタンス計算を再チェック
  - 計算にビームラインの最新のgeometryが正しく反映されていなかった
- エミッタンス再評価
  - QF03に到達するまでにすでに悪くなっている: デザインの数倍
  - 加速空洞の効果は小さそう
  - 上流のコンポーネント(電子銃-CCM間)について調査する予定



# Plan of STF-2 beam operation

※ILCスペックと同等のパルス長、beam intensityでの運転が最終目標

Next target

	F.Y.2019	F.Y.2020	F.Y.2021	F.Y.2022	ILC spec.
<b>Item</b>			~100μsec pulse	x 7 beam power	
Max. beam energy [MeV]	500	500	500	500	500 GeV
Max. beam intensity [μA]	0.30	3.00	3.00	21.5	21.0
Max. beam power [kW]	0.135	1.350	1.350	9.675	14 MW
Max # of bunch / train	1000	1000	16260	118048	1312
Bunch spacing [nsec]	6.15	6.15	6.15	6.15	554 nsec
Max train length [μsec]	6.15	6.15	100	726.00	726.848 μsec
Max. RF repetition rate [Hz]	5	5	5	5	5 Hz
Bunch charge [pC]	60	600	36.90	35.66	3.21 nC
Bunch current [mA]	9.756	97.561	6.00	5.799	5.8 mA

- 次回の運転ターゲット: ILCと同じスペックのパルス長(726μsec)で、かつビーム口の無い大電流運転
- 次の運転へ向けて
  - ロスモニターをさらに設置(CCM下流から1mおき)
  - 電磁石の交換・設置
  - BPMをさらに設置
  - Turbo ICTの導入

# Summary

---

- STF-2では、ILCのための超伝導加速を実証してきた。  
2021年12月の運転:
  - $\sim 100\mu\text{sec}$ パルス運転におけるビームロスの抑制
  - 異常なエミッタンス増大の原因究明
- 2022年はILCスペックと同等の長さのパルス運転( $726\mu\text{sec}$ )を計画している。2021年の運転では $100\mu\text{sec}$ まではビームロスなく運転することができた。
- 異常エミッタンス増大の原因究明のため、モニタを新設した。またビーム運転では空洞周りを中心に一つ一つ調査した。
  - これまでの測定から元々、下流部に原因があるかと疑っていた
  - しかし、実際には空洞周辺で増大しておらず、**原因は電子銃を含めた上流部に絞られてきている**