



# ILCに向けたSTF-2クライオモジュールによる 33MV/mのビーム加速実証

TUOB04

山本 康史 (高エネルギー加速器研究機構)

# STF-2 Collaboration

Y. Yamamoto, Eiji Kako, Kensei Umemori, Hiroshi Sakai, Takayuki Saeki, Takeshi Dohmae, Taro Konomi, 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, 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, Shin-ichi Takahara, Mika Masuzawa, Ryuichi Ueki

KEK, Hiroshima Univ., Univ. of Tokyo



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



# Outline

- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

# Outline

- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

# 超伝導高周波試験施設(Superconducting RF Test Facility (STF))施設

冷凍設備



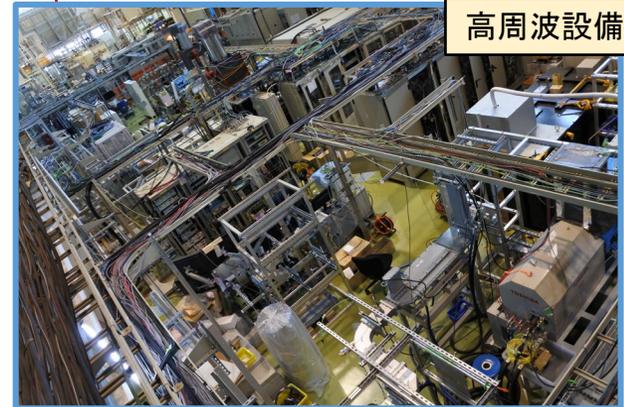
制御室



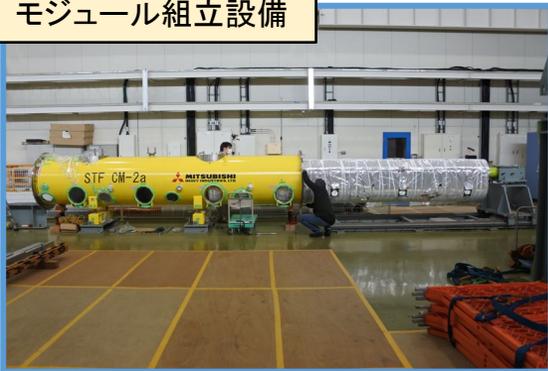
建屋外観



高周波設備



モジュール組立設備



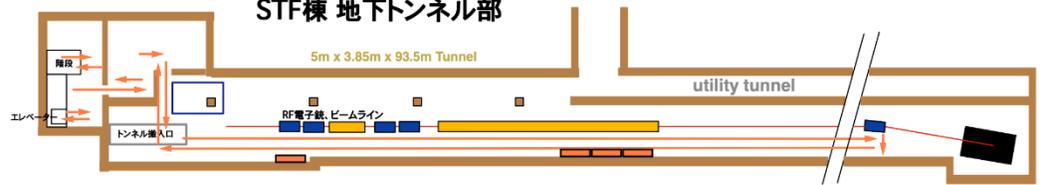
空洞検査室



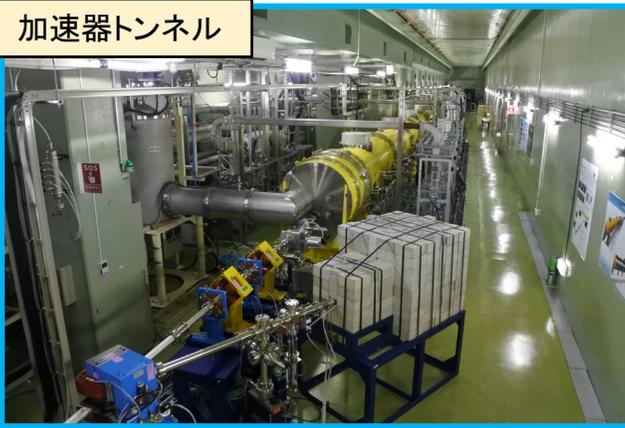
STF棟 平面図



STF棟 地下トンネル部



加速器トンネル



クリーンルーム



電解研磨設備



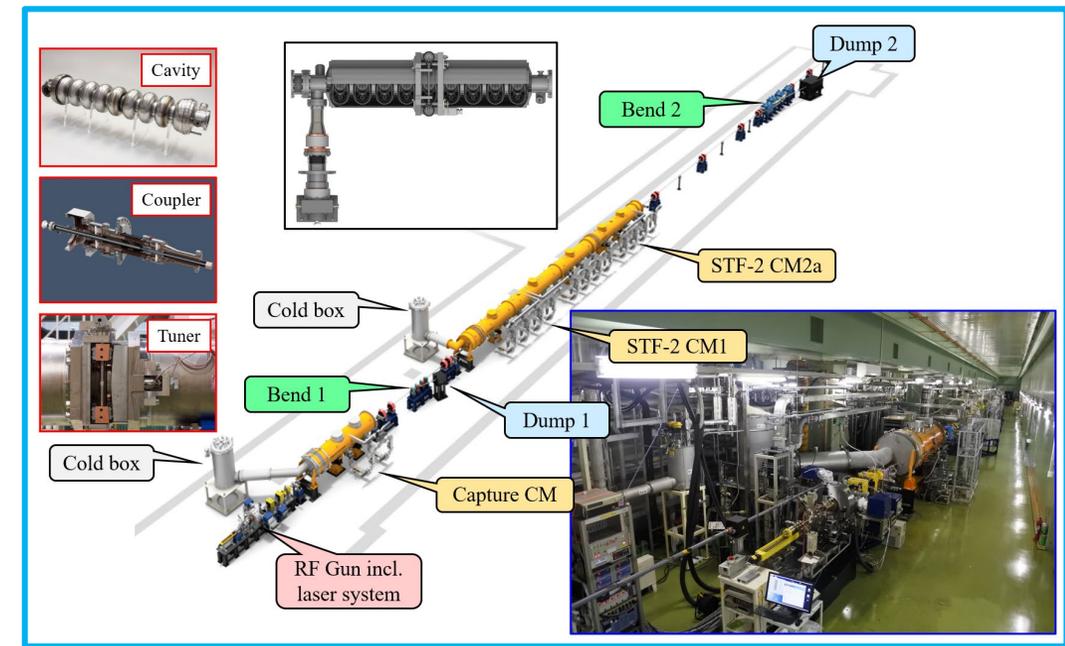
縦測定設備



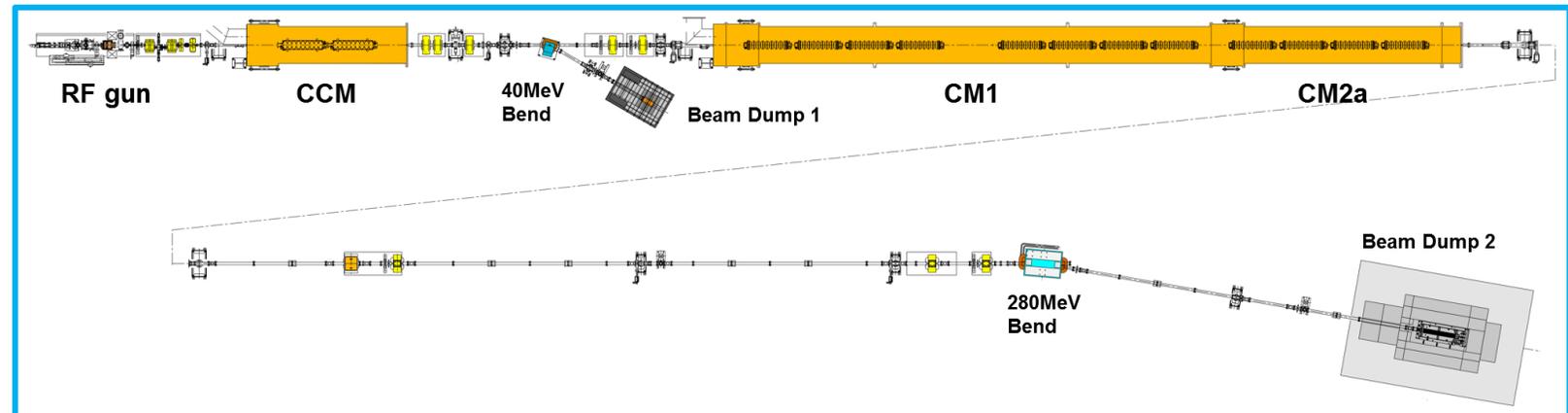
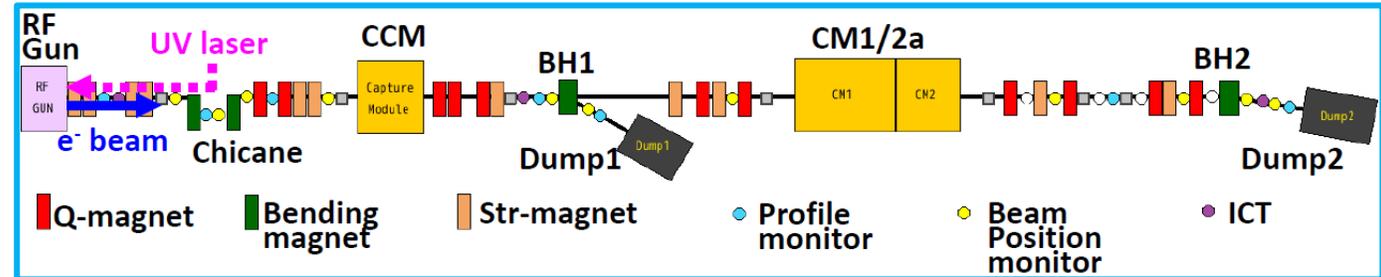
# STF-2加速器の概要

## 主な特徴

- ~70 m超伝導リニアック(1.65 msec/5Hz)
- 超伝導空洞: 14台(1.3 GHz、9セル)
- クライオモジュール: CCM(2台)とCM1/CM2a(2連結、12台)
- フォトカソードRF電子銃( $\text{Cs}_2\text{Te}$ 、Q.E.~1%)
- レーザーシステム: 162.5 MHz、1064 nm、12 W
- クライストロン: 3台(5 MW、800 kW、10 MW)
- ビームダンプ: 2基(Dump2: 37.8 kW)
- 2Kヘリウム冷凍機コールドボックス: 2台
- ビームモニター: 位置モニター、電流モニター、プロフィールモニター
- 偏向電磁石: 2台



STF-2の冷却試験の推移		高周波系
F.Y.2014	低電力試験	無
F.Y.2015	大電力試験	1空洞のみ
F.Y.2016	大電力試験	8空洞
F.Y.2018	大電力+ビーム	7+2空洞
F.Y.2020	低電力試験	無
F.Y.2020~2021	大電力+ビーム	12+2空洞



## 加速器のスペック(規制庁への申請書の数値)

- 最大エネルギー: 500 MeV
- 最大ビーム強度: 3.0  $\mu\text{A}$
- 最大ビームパワー: 1.35 kW

# Outline

- ◆ STF and STF-2 accelerator
- ◆ Progress from Mar/2019
- ◆ Cavity performance
- ◆ Radiation safety inspection
- ◆ Beam operation including tuning and measurement
- ◆ Achievements and Troubles
- ◆ Toward next beam operation
- ◆ Summary

# 2019年3月からこれまでの流れ

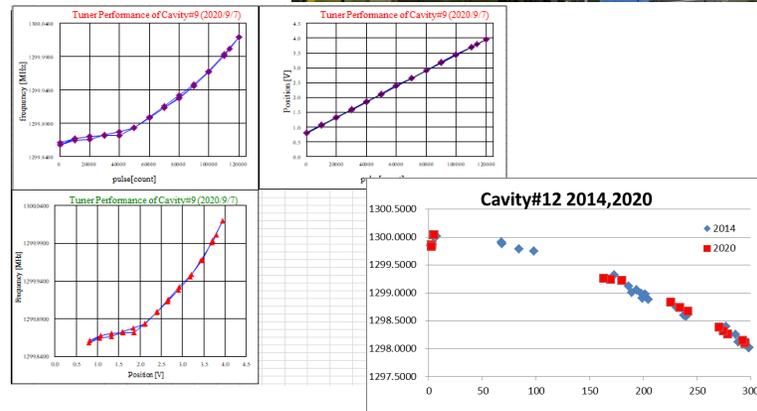
## 空洞入替・CM2a再組立

- CM2a内のCAV#9入替(2020年2月)
  - 日米協力で進めているコストダウン研究の一環
  - N-infusion処理済空洞の使用
- CM2a再組立て・再設置
- KEKスタッフと協力会社とで実施



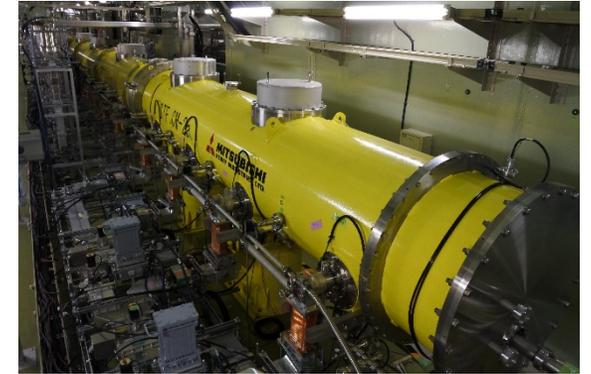
## 完成検査受検・チューナー駆動試験

- 2020年6月に完成検査受検
- その後、冷却してチューナー駆動試験実施
  - KEKスタッフと協力会社のみで作業を進めたが特に問題はなかった
  - ILCの良い予行演習になった



## 導波管整備・14空洞運転

- 12空洞分に導波管が整備された(チューナー関連モジュールも)
- STF-2初となる14空洞によるビーム運転実施(2021年4月)
- 9空洞の平均加速勾配が32.9 MV/mに到達

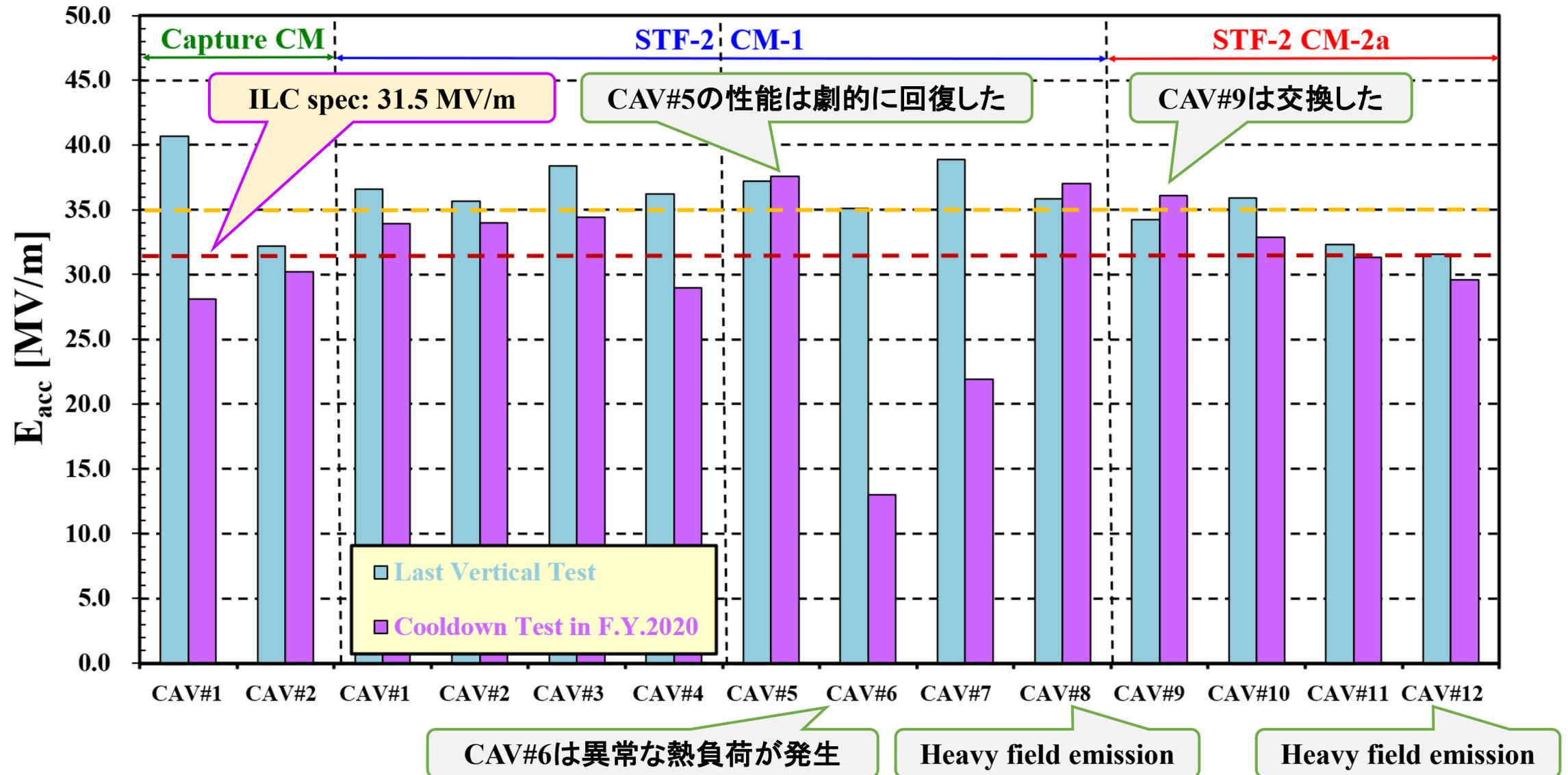


Tuner Control (Mechanical)															
Tuner Control (Mechanical)										2021/02/17 17:01:22					
Position	Pulse	Set	Step	Down	Up	Stop	Go Origin	LS Low	LS High	Alarm Busy	Memory	memory store	memory set	memory set	
CAV1	2.132	40000	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	75540	store	set	Set Origin
CAV2	1.824	30000	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	67300	store	set	Set Origin
ALL							Go Origin						store	set	
Cavity#12															
Position	Pulse	Set	Step	Down	Up	Stop	Go Origin	LS Low	LS High	Alarm Busy	Memory	memory store	memory set	memory set	
CAV1	2.440	65400	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	72800	store	set	Set Origin
CAV2	2.630	75100	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	76700	store	set	Set Origin
CAV3	3.180	90450	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	104550	store	set	Set Origin
CAV4	4.437	144200	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	55000	store	set	Set Origin
CAV1-4							Go Origin						store	set	
CAV5	4.486	139500	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV6	4.195	129650	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV7	3.382	90000	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV8	3.867	77500	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV5-8							Go Origin						store	set	
CAV9	3.807	114000	0	100	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV10	2.991	82700	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV11	2.637	67250	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV12	3.150	84300	0	5000	-	+	Stop	Go Origin	●	●	●	0	store	set	Set Origin
CAV9-12							Go Origin						store	set	

# Outline

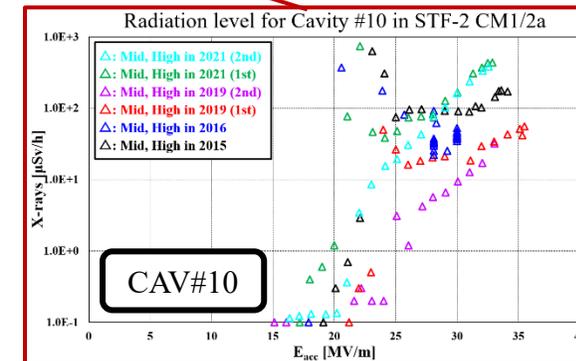
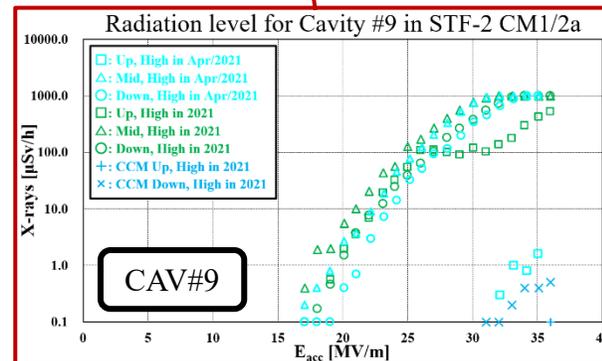
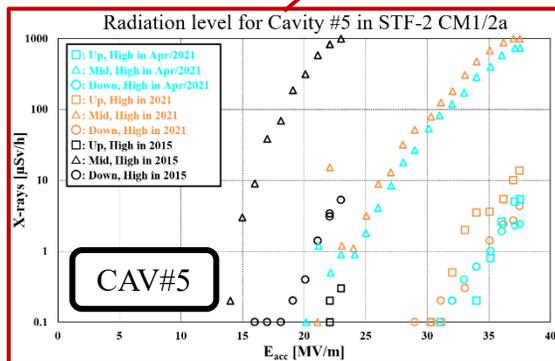
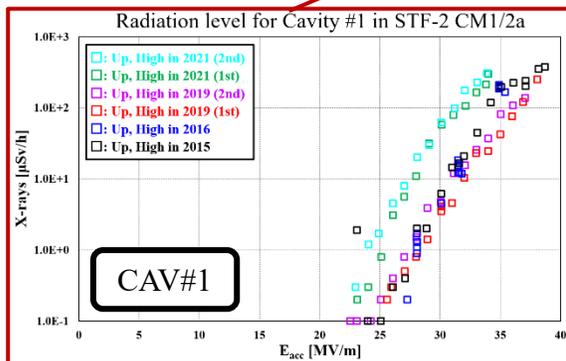
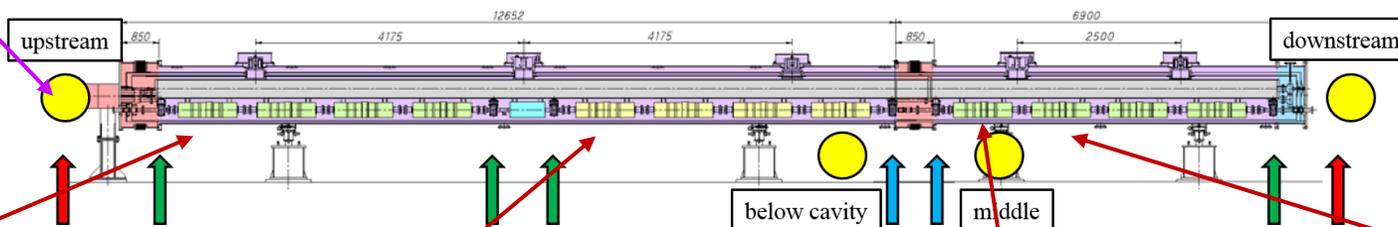
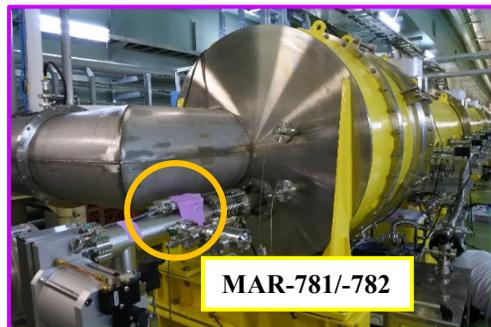
- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

# Cavity Performance in VT and CM



# Change of Radiation Level at CM1/2a

冷却試験の度に、各空洞の放射線測定が行われている。  
放射線モニターは、クライオモジュール上下流と測定している空洞直下に置かれている。  
長期間に亘り、放射線の定点観測を行うことで、空洞の状況が分かる。



## 放射線のまとめ:

- CAV#1は、2019年の冷却試験以降、増加した(この間、真空保持されていた)
- CAV#5は、2015年の性能から劇的に改善した(STFでは初めての事例)
- CAV#9は、2020年に空洞入替が行われ、今回のビーム運転後に上流方向が減少した
- CAV#10は、CAV#9の交換作業のため、一旦、大気開放されたが、今回増加した

# Outline

- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

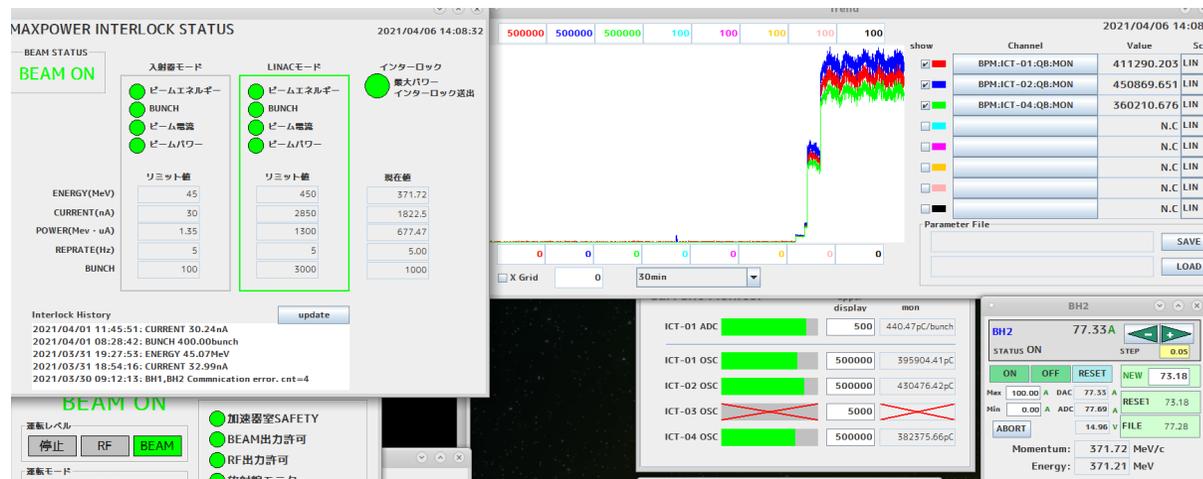
# Radiation Safety Inspection

4/6 今期のビームパワー最大条件での運転が可能になったので、放射線チェックを受ける → 無事、合格

地上部への漏洩放射線量のチェック



ビームライン近傍の放射線量のチェック



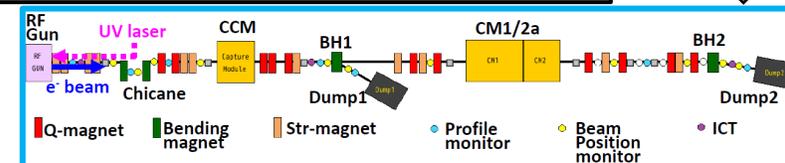
RF Gun status monitor

## 放射線安全チェックの条件

- ビームエネルギー: 371 MeV
- ビーム強度: 1.8  $\mu\text{A}$
- ビームパワー: 0.675 kW (50%)

## 加速器のスペック(規制庁への申請書の数値)

- 最大エネルギー: 500 MeV
- 最大ビーム強度: 3.0  $\mu\text{A}$
- 最大ビームパワー: 1.35 kW



- 放射線安全試験は、申請書の数値の50%のところで行い、無事、合格した
- ビーム運転直後のビームラインの残留放射線量を測定した
  - この際、BH2下流側ビームラインの放射線量が高いことが判明したため、人払いのフェンスを設置した
  - この原因は、ビームロスによるものと判明した

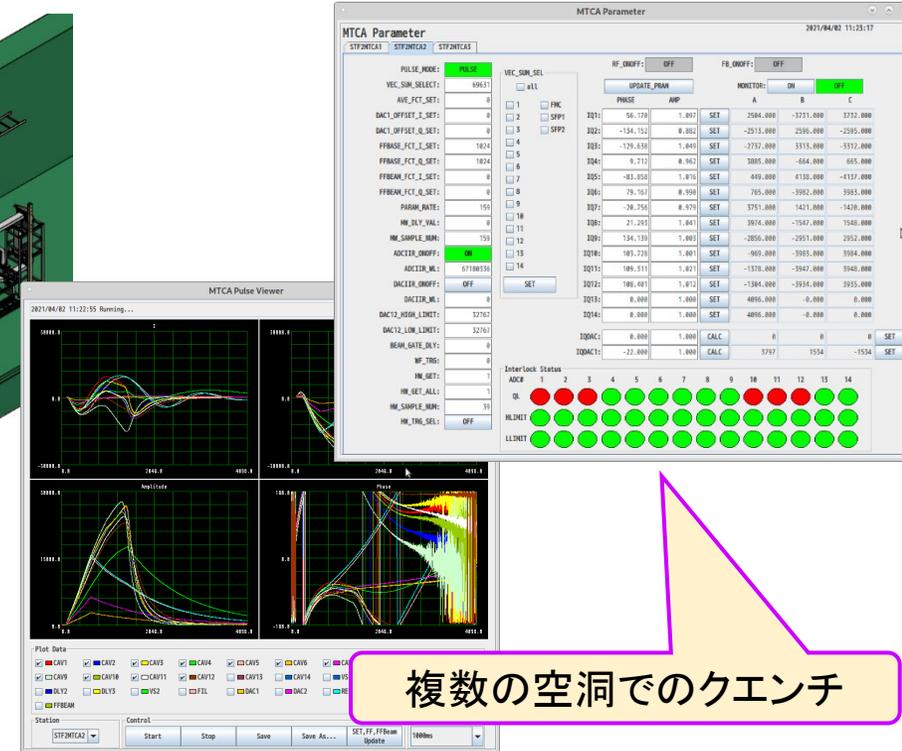
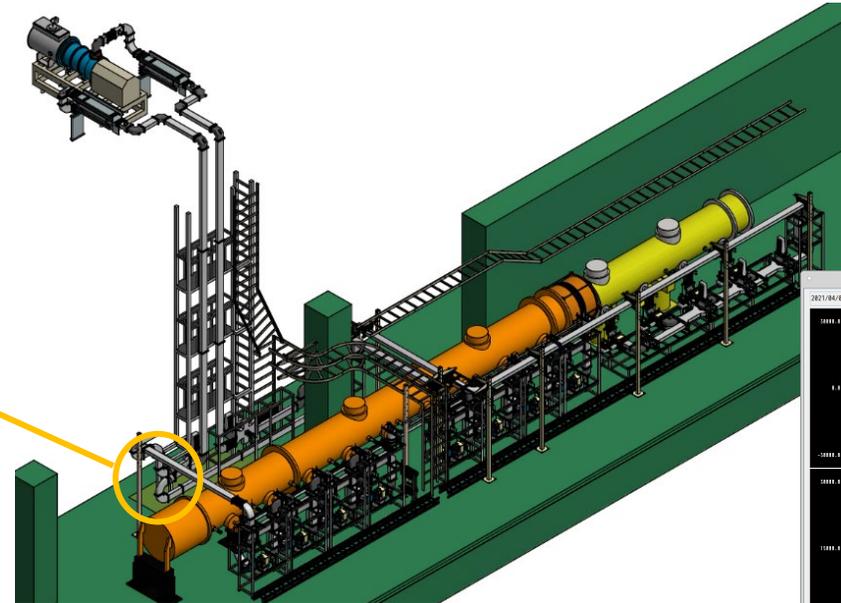
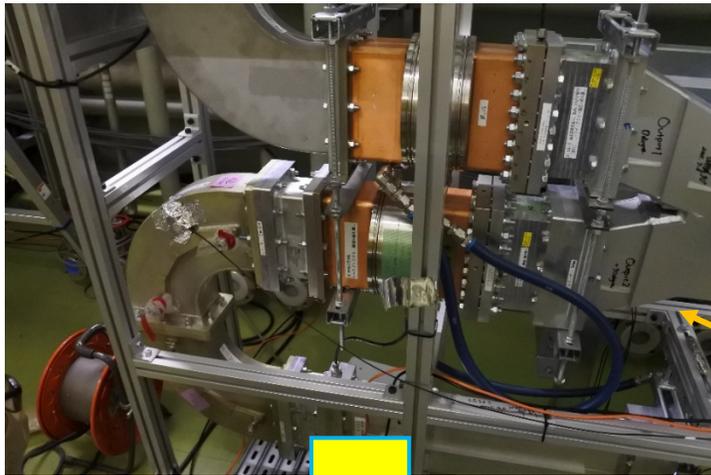
# Outline

- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

# Position Change of RF Window at Waveguide

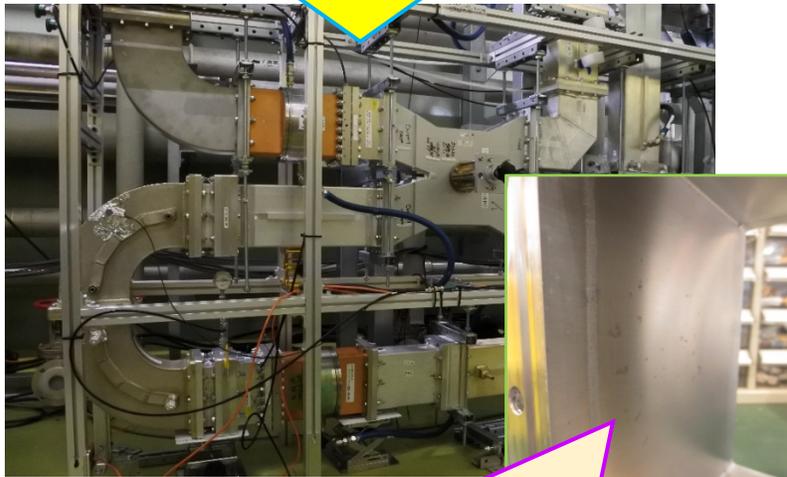
4/7~8トンネルに降りた後のUリンクのところの放電がずっと収まらないため、窓の位置を下流に少し移動させる

地上からトンネルへ降りた後のUリンク



複数の空洞でのクエンチ

- 導波管内で放電が起こると、その先の空洞にパワーが行かなくなる
- フィードバック運転を行っているため、他の空洞を上げて電圧低下を補償しようとする
- 結果として、さらに高いパワーが投入され、複数の空洞で同時にクエンチが起こる
- この問題を解消するため、窓の位置を下流に移動させ、放電箇所をSF<sub>6</sub>を加圧充填した
- その後、再発しなくなった



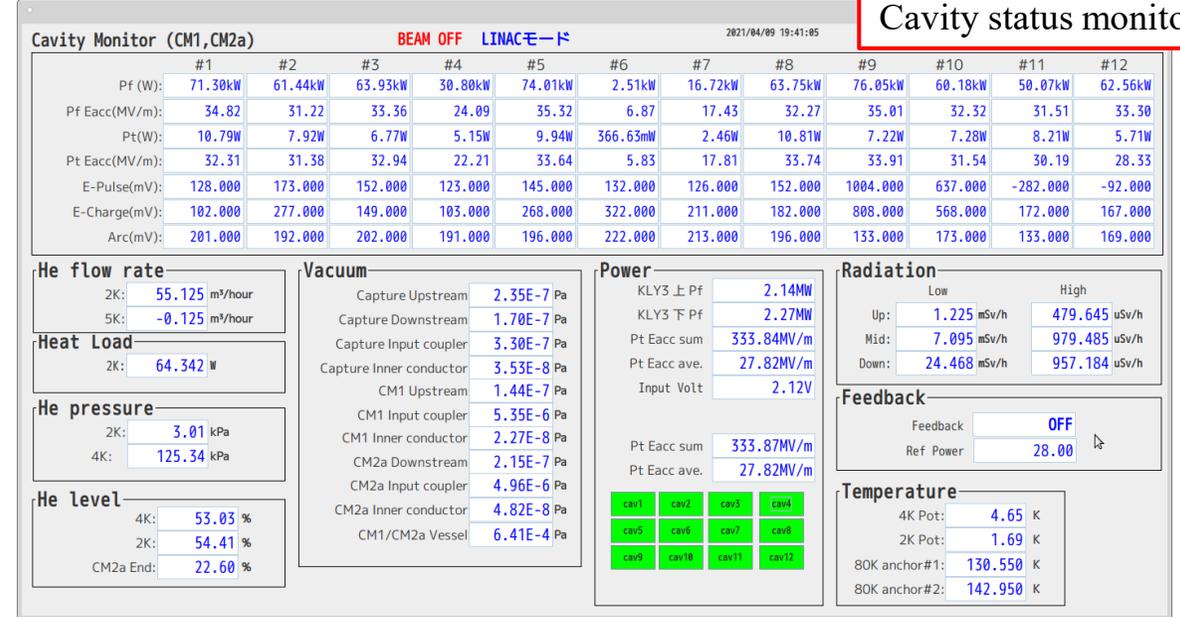
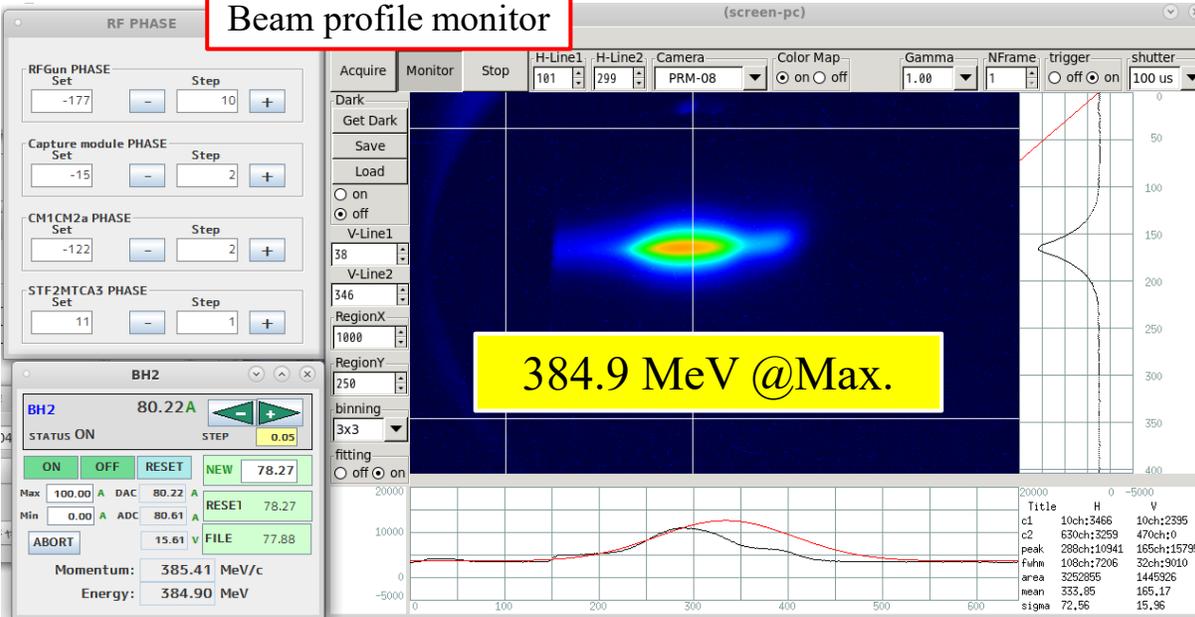
放電痕が多数見つかった

# Max. Beam Energy Operation

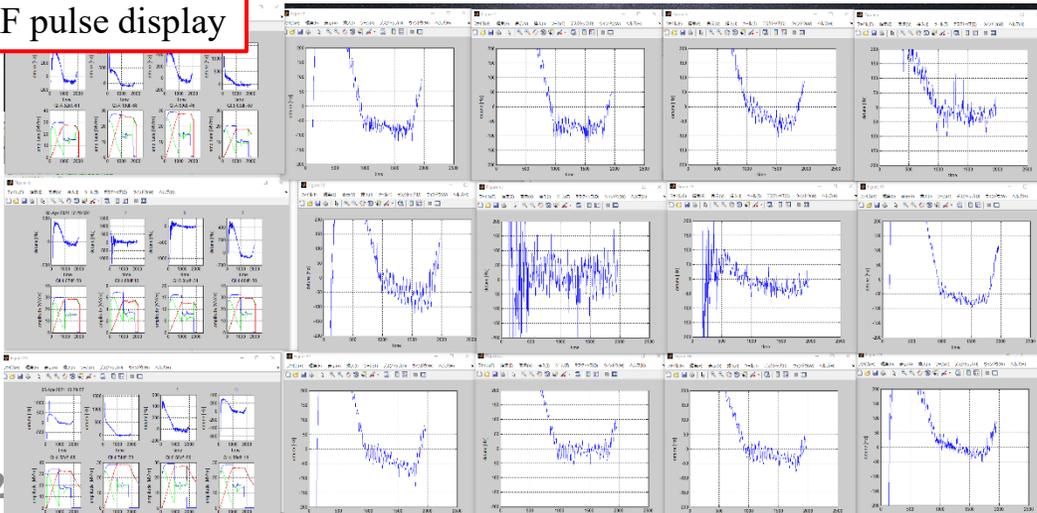
4/9 Beam profileを見ながらcavity phaseを調整し、ビームエネルギーの最大を目指した

Beam profile monitor

Cavity status monitor



RF pulse display

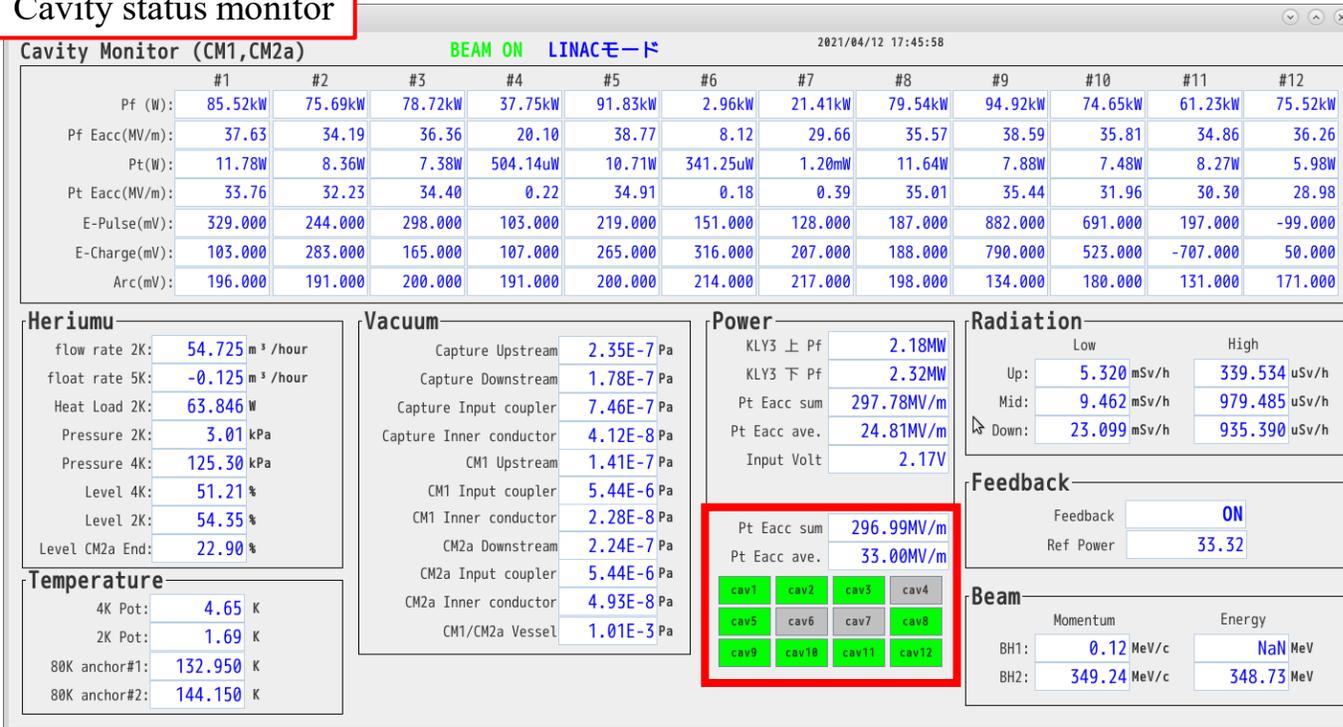


- 空洞性能から想定される12空洞の合計加速電界は429MV/mであるが、最後の微調整がうまくいかなかったため400MeV超えはならず
- 空洞性能がマチマチであるため、各空洞の性能を最大にするのは難しい
- 最大フィールド付近で空洞が一旦クエンチを起こすと、次に立ち上げる際、不安定になることがあった(どこかが温まっていたものと思われる)
- 電子銃、冷凍機、高周波系、クライオモジュール、いずれも安定であった

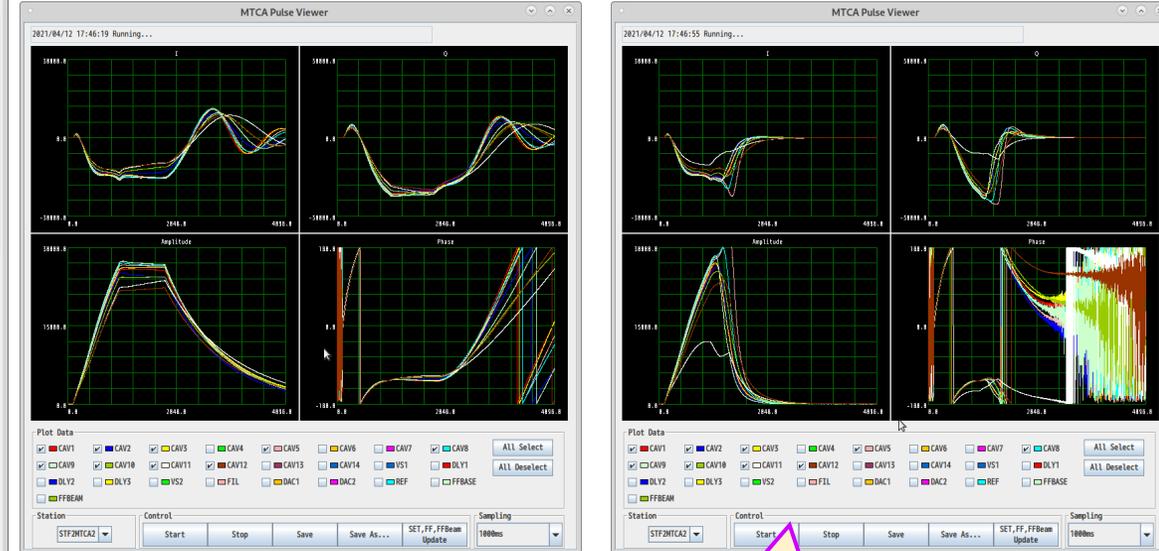
# Max. Average $E_{acc}$ Operation

4/12 性能の低い3空洞をdetuneし、9空洞の平均加速勾配が最大になるビーム運転を行った

Cavity status monitor

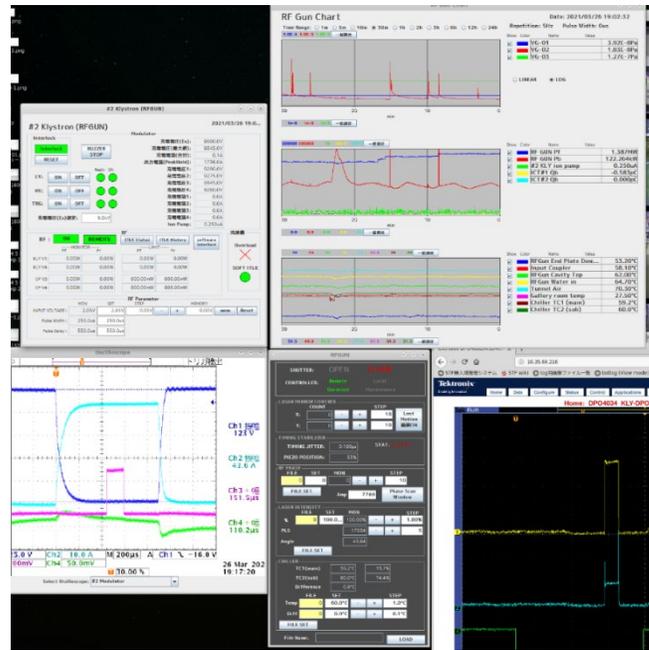
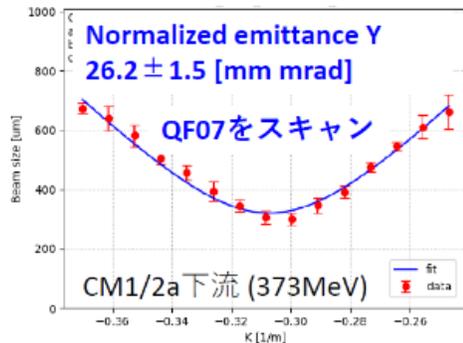
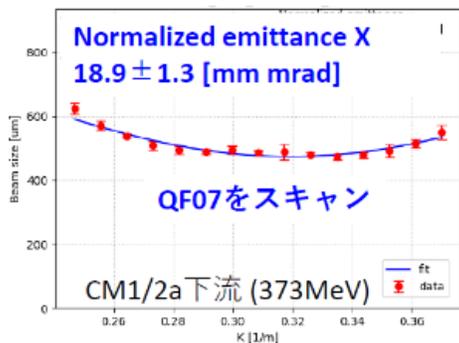
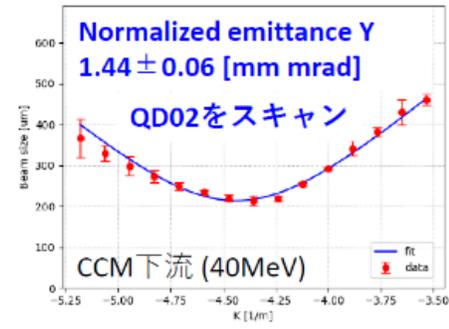
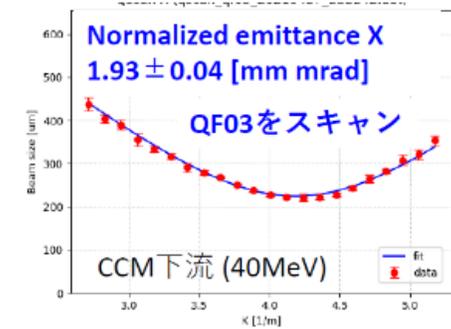
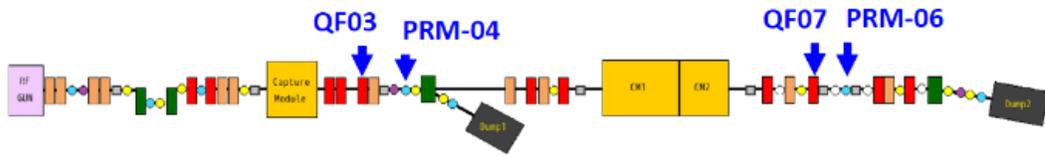


Pulse Viewer



# Beam Emittance Measurement

- CCM下流、およびCM1/2a下流のQ-magnetを用いて、それぞれのエミッタンス測定(Q-scan法による)を行った
- CCM下流は、RF Gunのパワーが2.5 MW(2019年3月)から4.0 MWに上がったことで改善が見られた
- 一方、CM1/2a下流は、あまり変化しておらず、CM1/2a内にエミッタンス増加を引き起こすものがあると示唆される
  - この件については、今年11月に内部調査を行う予定である



電子銃は4 MW運転で5時間キープできるほどに安定した

M. Fukuda et al., THP029

# Outline

- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

# Achievements in 2019 and 2021

- **STF-2初の14空洞によるビーム加速が実現した**
- 平均加速勾配は、ビームエネルギーから求めたものが32.9 MV/mで、RFから求めたものが33.0 MV/mとなり、非常に良い一致であった
- CM1/2a内で発生するエミッタンス増加の原因については調査中である

Parameters	Mar/2019	Apr/2021
Number of cavities incl. CCM used for operation	7 + 2	12 + 2
Beam energy	280 MeV (40 MeV @CCM)	384 MeV (40 MeV @CCM)
Beam intensity	0.28 $\mu$ A	1.8 $\mu$ A
Beam power	78 W	677 W
Total charge per pulse	56 nC	360 nC
RF power @RF Gun	2.5 MW	4.0 MW
Normalized emittance @CCM	$\sim 10$ / $\sim 10$ mm mrad	1.93 / 1.44 mm mrad
Normalized emittance @CM1/2a	70~90 / 35~53 mm mrad	18.9 / 26.2 mm mrad
$E_{acc}$ from beam energy	33.1 MV/m (7 cavities)	32.9 MV/m (9 cavities)
$E_{acc}$ from RF power ( $P_{tra}$ )	33.8 MV/m (7 cavities)	33.0 MV/m (9 cavities)

# Troubles in this beam operation

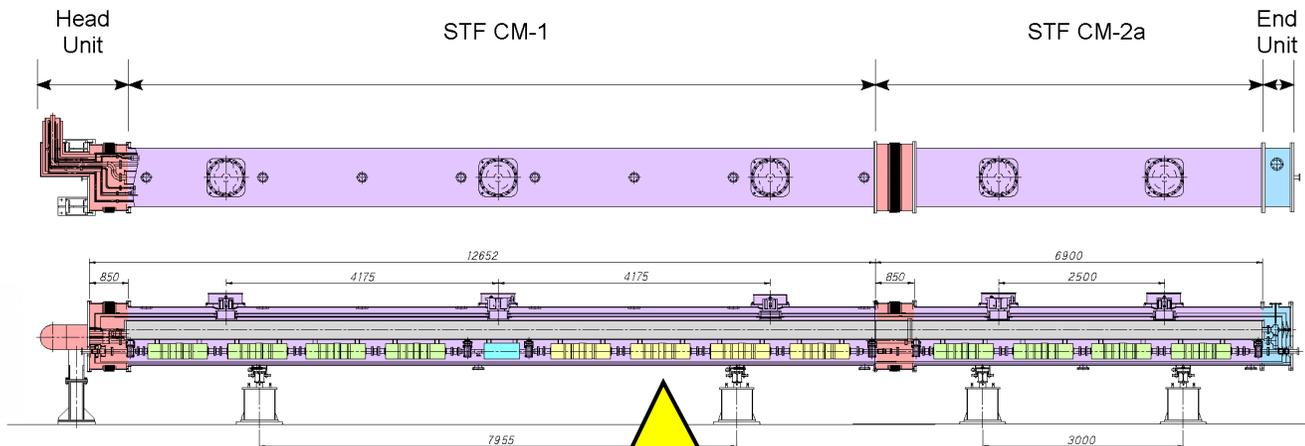
2019年の運転の際は多くのトラブルに見舞われたが、  
今回は運転を停止するような大きなトラブルは発生しなかった

# Outline

- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

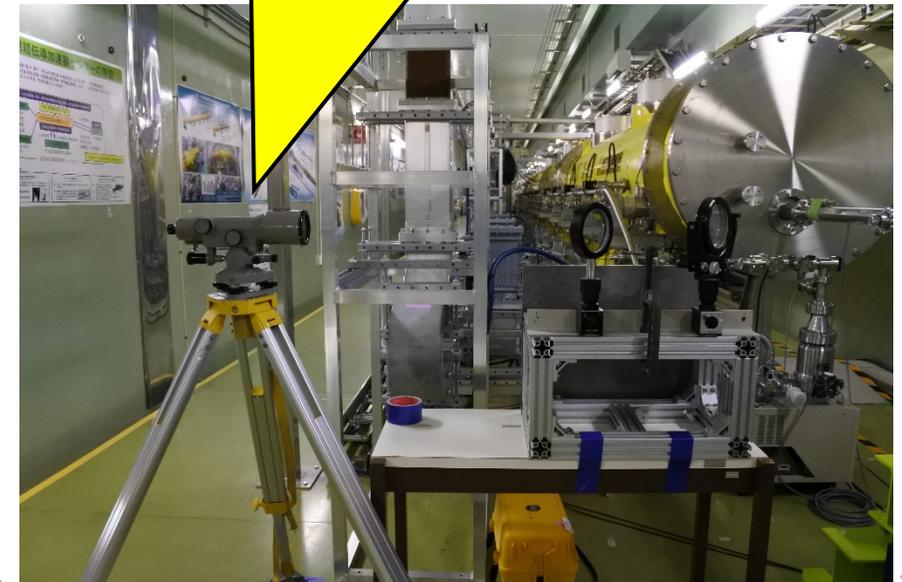
# Towards Next Beam Operation in Dec/2021

- ❑ Inspection on inside CM1/2a for emittance growth
- ❑ Bunch Pattern Change for less beam loading at downstream of beamline
- ❑ Upgrade Beam Monitor Systems
  - ❑ Two Beam Profile Monitors at upstream and downstream of CM1/2a
  - ❑ ACCT and Turbo ICT for long train over 100  $\mu\text{sec}$
  - ❑ Additional Beam Loss Monitor (currently, air Cherenkov)



異常な熱負荷のある空洞

11月にCM1/2a両端のビームパイプにビューポートを取り付けて、望遠鏡で内部を調査する予定



# Beam Parameters in STF-2 Accelerator

放射線変更申請書で定められている数値

今回の運転パラメータ

次回の運転パラメータ

最終目標

	F.Y.2019	F.Y.2020	F.Y.2021	F.Y.2022	ILC spec.
Max. beam energy [MeV]	500	500	500	500	500 GeV
Max. beam intensity [ $\mu$ A]	0.30	3.00	3.00	21.05	21.0
Max. beam power [kW]	0.135	1.350	1.350	6.750	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 [ $\mu$ sec]	6.15	6.15	100	726.00	726.848 $\mu$ sec
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

**Max. beam intensityをILC spec.に到達させることが最終目標である**

# Outline

- ◆ **STF and STF-2 accelerator**
- ◆ **Progress from Mar/2019**
- ◆ **Cavity performance**
- ◆ **Radiation safety inspection**
- ◆ **Beam operation including tuning and measurement**
- ◆ **Achievements and Troubles**
- ◆ **Toward next beam operation**
- ◆ **Summary**

# Summary

- ◆ **Beam operation with 14 cavities in STF-2 was successfully done**
- ◆ **Accelerating gradient of 32.9 MV/m estimated from beam energy was achieved!**
- ◆ **Radiation level was increased for some cavities, regardless of vacuum condition**
- ◆ **Performance of Cavity#5 in CM1 was drastically improved (first case)**
- ◆ **Emittance growth in CM1/2a occurred, then inspection inside will be done**

# Related presentations in this conference

- ◆ H. Shimizu *et al.*, “R&D activities report on superconducting magnet in STF”, MOOB05
- ◆ M. Fukuda *et al.*, “Beam tuning and beam parameter measurement in STF-2 accelerator”, THP029
- ◆ Y. Kikuchi *et al.*, “Change of radiation level of superconducting cavities in STF-2 cryomodules”, THP037
- ◆ Y. Kikuchi *et al.*, “Superconducting cavity tuning for beam operation in STF-2 cryomodules”, WEP037
- ◆ S. Aramoto *et al.*, “Round to flat beam transformation experiment at KEK STF”, WEP031
- ◆ K. Ishimoto *et al.*, “Construction of L-band Resonant ring for high power testing of ILC waveguide components”, MOP044
- ◆ N. Numata *et al.*, “Performance of the power distribution system in the STF2 accelerator”, THP045

**ご清聴ありがとうございました**