



ILCに向けたSTF-2クライオモジュールによるILCスペックと同等の電流、パルス長を持った電子ビームの加速運転達成

倉田 正和

KEK

ON BEHALF OF THE STF-2 COLLABORATION,

加速器学会, 8/29-9/1, 2023

WEOA8

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 , Keisuke Date, 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, Yasutoshi Kuriyama

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-2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(726 μ sec) & 高い電流ビーム(5.8mA)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
- 今回、ILCスペックと同等のパルス電流・パルス長を持つ電子ビームでの運転を達成
 - その結果について報告する

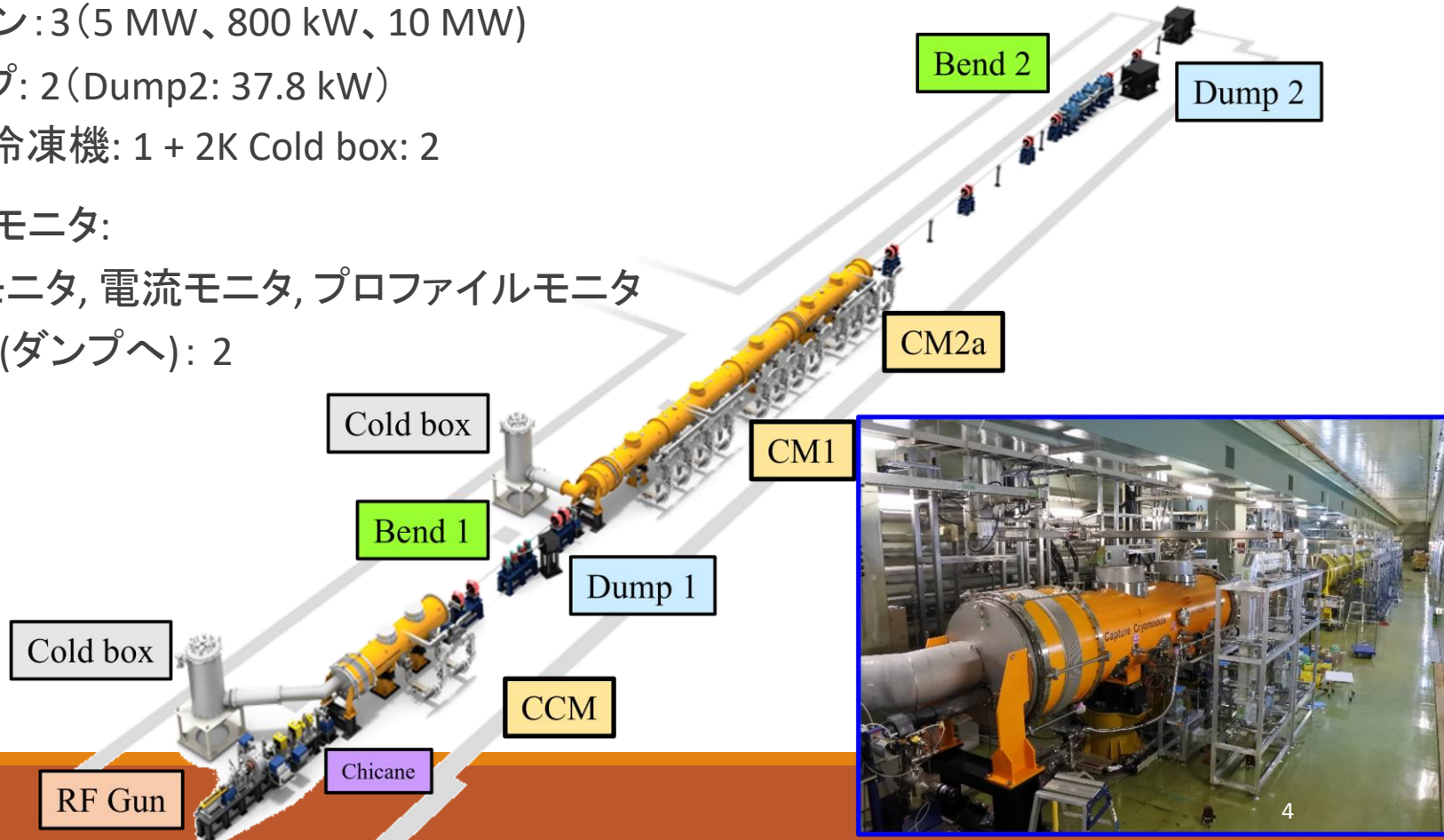
STF-2 加速器

- ~70 m 超伝導直線型加速器 (726 μ 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 (Cs₂Te、Q.E.~1%)
- レーザーシステム: 162.5 MHz, 266 nm, 1 μ 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

- F. Y. 2022年のSTF-2スペック

(規制庁への申請書の数値)

Max. Energy [MeV]	500
Max. Beam Intensity [μ A]	21.5
Max. beam power [kW]	9.675



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

	F.Y.2019	F.Y.2020	F.Y.2021	F.Y.2022	ILC spec.
Item			~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

- F.Y. 2022の運転ターゲット: ILCと同じスペックのパルス長(726μsec)で、かつビームロスを抑制した大電流運転(5.8mA)
 - ILCとパルス構造は異なるが、バンチ数・バンチchargeの調整で同じ値を目指す

	バンチ間隔 (nsec)	バンチcharge [pC/bunch]
ILC	554	3.2×10^3
STF-2	6.15	35

ILCスペックを満たすビーム運転のために

- 2021年12月(前回)

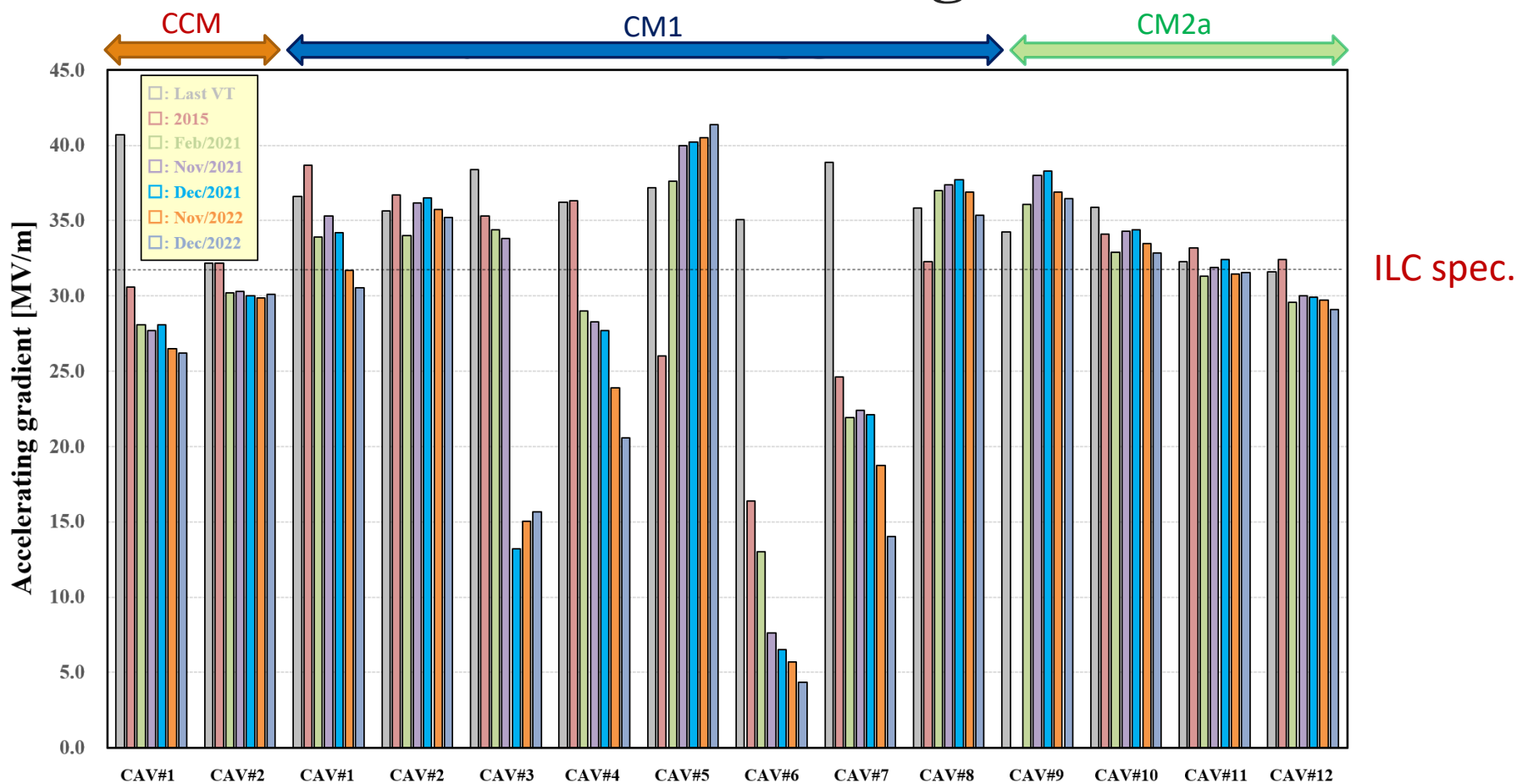
- パルス長100 μ secビーム運転の達成: ビームロスの抑制
 - ビームロス抑制のためのLLRF, およびビーム調整のstudy
 - FY2021のビーム運転におけるビームパラメータを目指した
 - ターゲットと同じパルス長で実施し、ビームロス抑制を実証

- 2022年11-12月

- ILCスペックを満たすビーム運転の達成: 3つのポイント
 - ILCスペックと同じパルス長: 726 μ sec
 - + ILCスペックと同じ電流: 5.8mA (>35.0 [pC/bunch])
 - + ILC targetの加速勾配でのビーム加速: 31.5MV/m

parameter	Beam Energy [MeV]	Pulse length [μ sec]	Bunch charge [pC/bunch]	Rep. rate [Hz]
F.Y.2021	500	100	36.9	5
ビーム運転実績2021	312	98.4	26	5
F.Y. 2022	500	726	35.7	5
ビーム運転実績2022	293	726	35.0	5

Achievable Accelerating Gradient

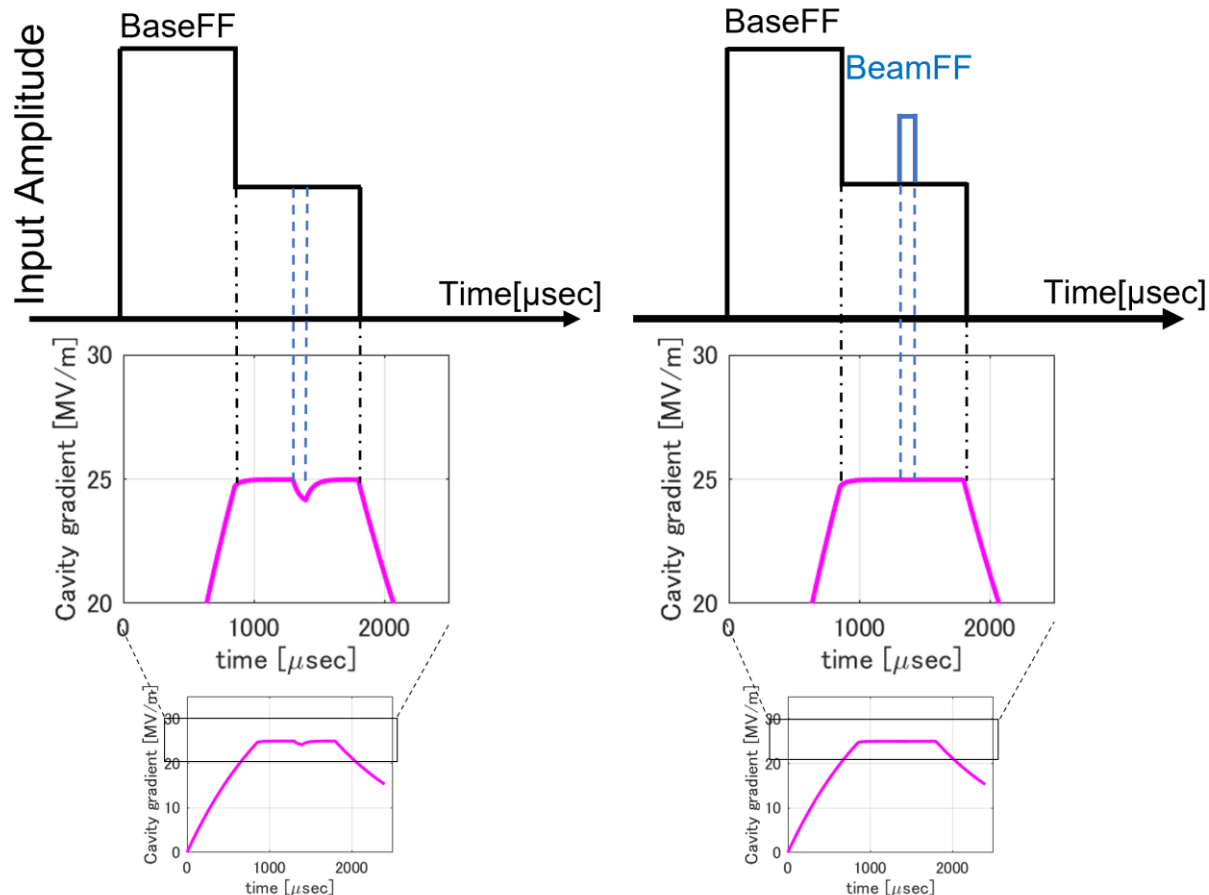


ILC spec.

- 10/14 空洞の性能はILCスペックの $\pm 20\%$ 内
- CAV#6, #3は異常な熱負荷で性能劣化
- CCM, CM1のCAV#1はF.Y.2022運転で徐々に性能劣化

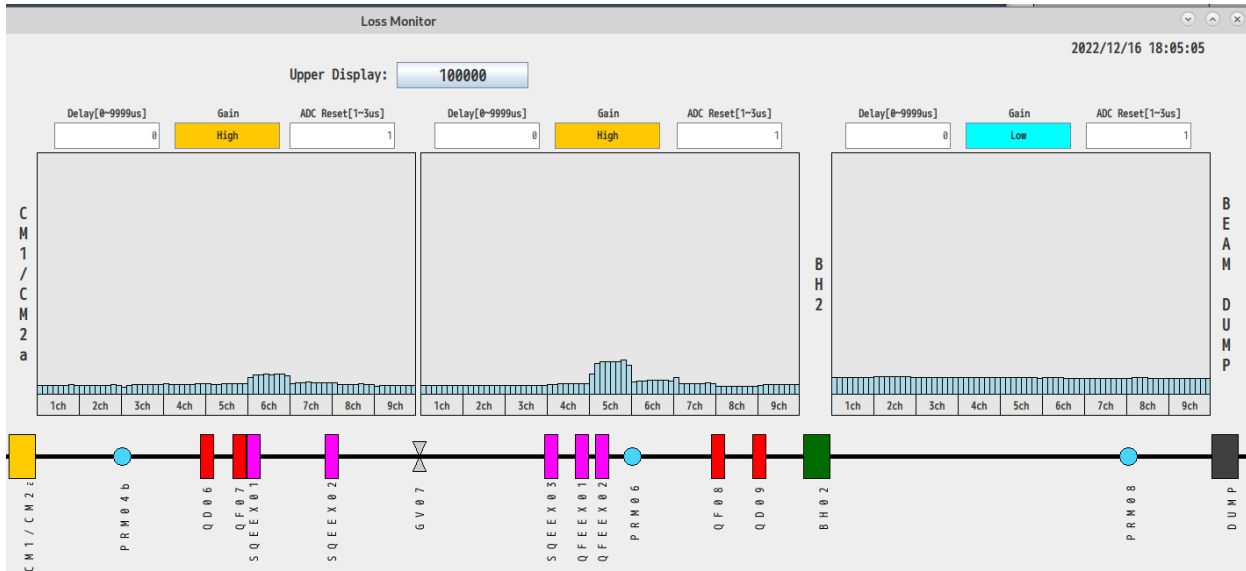
ビームローディング補償

- 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



ビームロス抑制のためのモニタ

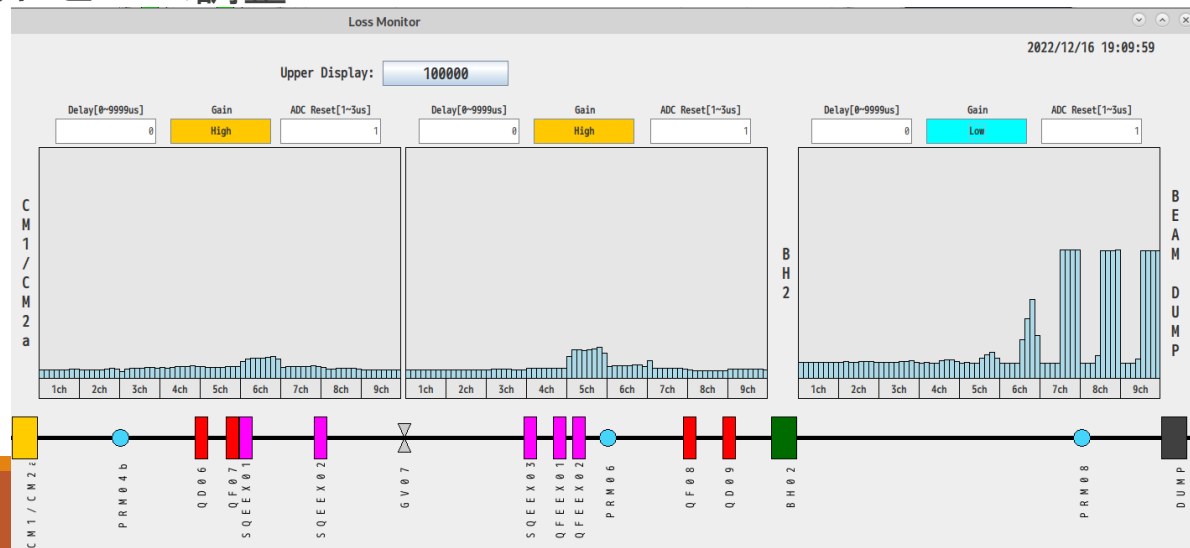
CCM下流から1mおきにフォトダイオードを設置。壁面衝突からの γ 線を検出する



- Beam OFF: RFgunから来るDark current起因の放射線を検出している
- ここから大きく変わらないようにビーム調整

ロスしたとき

- 例) パルス後方がロス
大きい信号検出

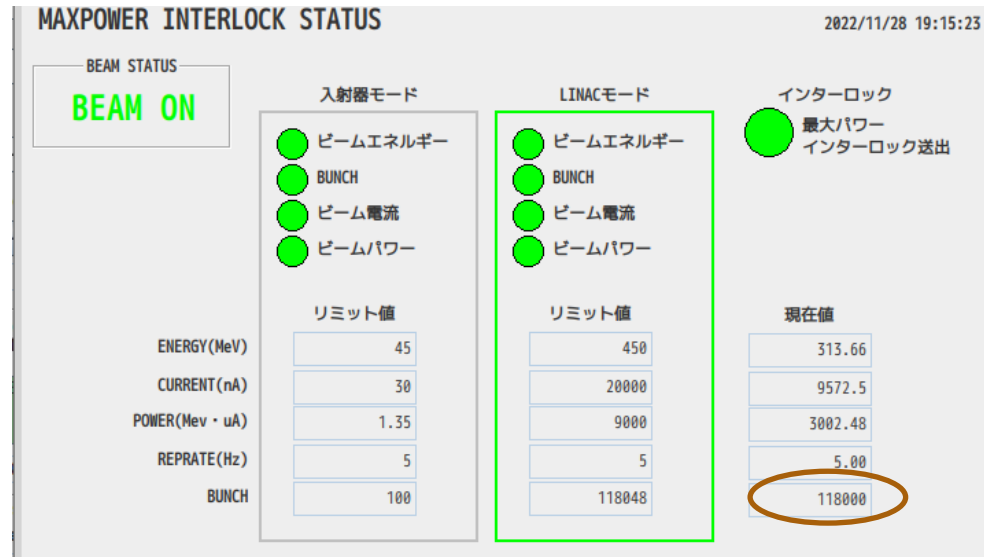


ILCスペックを満たすパルス長・電流運転

• ILCと同等のパルス長でビーム運転し、バンチcurrentを上げて同等の電流を目指した

• ビーム調整:

- BH2
- CM1/2a phase
- シケイン
- 逐次軌道調整

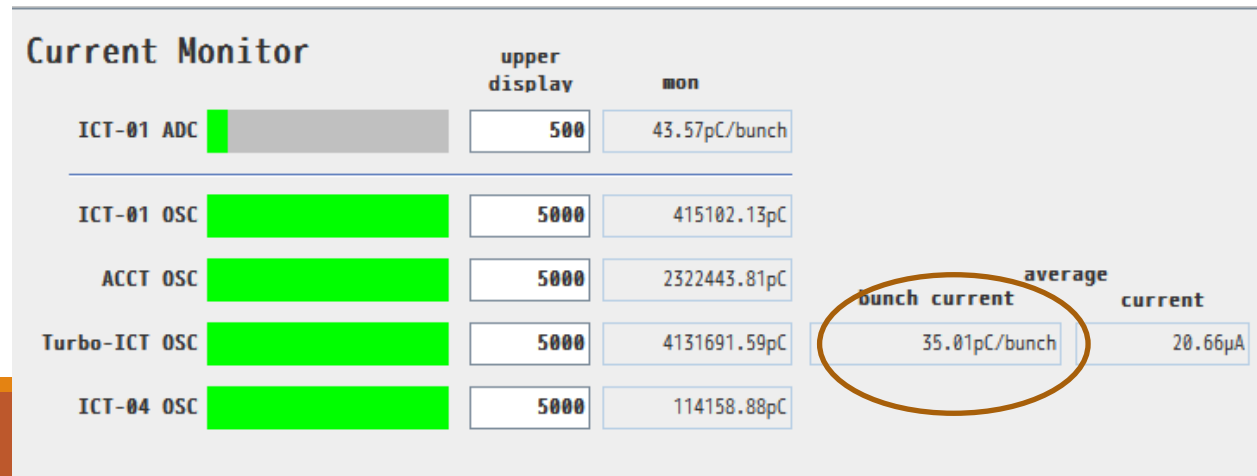


• パルス長は比較的簡単に達成(低電流)

• 単純にcurrentを増やそうとRFgunの出力を上げると空洞がクエンチし、苦労した

• 最終的に**118000bunch, 35pC/bunch**に到達し、**運転させることに成功**

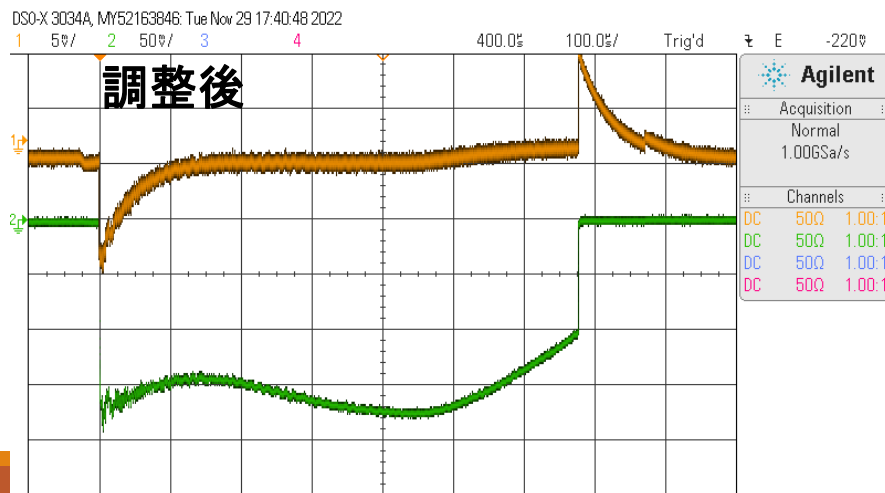
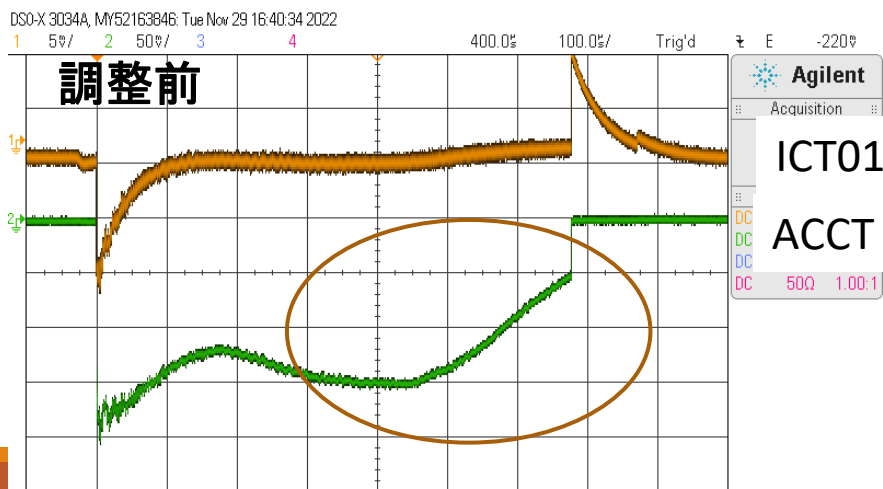
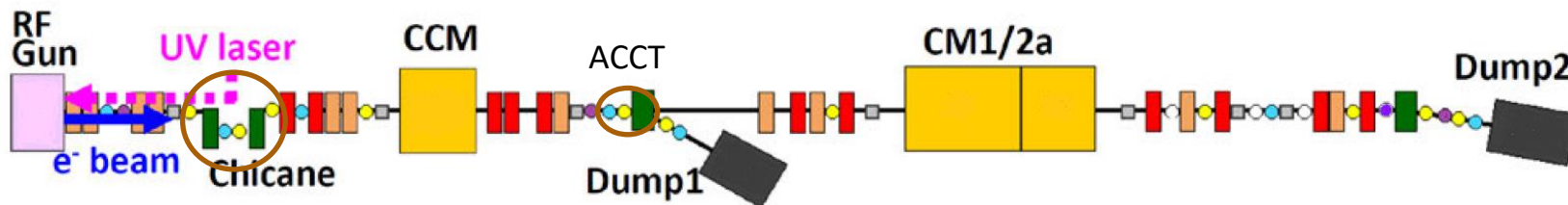
- 1h運転
- 最大ビーム強度 ~5.6kW
- 平均勾配: 24.9MV/m
- Energy : 293MeV
- Average intensity: ~20.7 μ A



電流モニタの波形

- ICT波形の後ろ側の信号が小さい
 - 低エネルギー部分がシケインで落とされている
- そのため、シケイン磁石電流を調整して低エネルギー側が通るようにする
- さらに、シケインのスリットを開放してシケインで落とさないようにした。

→これによりcurrent増大が容易になった



高加速勾配によるビーム運転

- ILCスペックのビームを高加速勾配で加速させる運転を目指した。
 - CM1/2aは性能の良い8台で運転
 - ビーム調整はこれまでと同じ方針で行った
- **118000bunch, ~32pC/bunchで運転**
 - 平均加速勾配: **30.06MV/m**
 - Energy : 293.0MeV
 - Average Current : ~19.2 μ A
- 空洞のクエンチとのせめぎあいとなった
 - なぜ空洞電圧をあげてビーム加速するとクエンチしてしまうかが課題となった
 - 調査が必要

Cavity Monitor (CM1,CM2a) BEAM ON LINACモード 2022/12/02 16:16:44

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
Pf (W):	201.32kW	260.58kW	116.34kW	51.30kW	385.97kW	3.77kW	29.57kW	174.22kW	276.45kW	216.97kW	183.04kW	223.68kW
Pf Eacc(MV/m):	58.99	63.89	85.39	31.73	77.55	NaN	23.34	54.25	66.60	61.52	60.36	63.11
Pt(W):	7.75W	8.24W	1.84mW	847.22mW	13.34W	360.74uW	328.97mW	6.35W	7.00W	6.22W	6.87W	4.85W
Pt Eacc(MV/m):	27.38	32.01	0.54	9.01	38.96	0.18	6.51	25.86	33.40	29.15	27.62	26.09
E-Pulse(mV):	117.000	156.000	126.000	123.000	247.000	146.000	140.000	140.000	632.000	472.000	3737.000	687.000
E-Charge(mV):	104.000	210.000	111.000	104.000	231.000	270.000	200.000	160.000	1088.000	733.000	13852.000	1234.000
Arc(mV):	192.000	193.000	201.000	199.000	203.000	221.000	219.000	199.000	165.000	145.000	168.000	171.000

Helium

flow rate 2K:	56.550 m ³ /hour
float rate 5K:	-0.500 m ³ /hour
Heat Load 2K:	66.179 W
Pressure 2K:	3.01 kPa
Pressure 4K:	124.53 kPa
Level 4K:	32.84 %
Level 2K:	54.58 %
Level CM2a End:	19.90 %

Temperature

4K Pot:	4.64 K
2K Pot:	1.66 K
80K anchor#1:	126.750 K
80K anchor#2:	143.150 K

Vacuum

Capture Upstream	4.45E-7 Pa
Capture Downstream	2.25E-7 Pa
Capture Input coupler	9.13E-7 Pa
Capture Inner conductor	4.63E-8 Pa
CM1 Upstream	1.46E-7 Pa
CM1 Input coupler	3.90E-6 Pa
CM1 Inner conductor	2.33E-8 Pa
CM2a Downstream	2.39E-7 Pa
CM2a Input coupler	1.49E-6 Pa
CM2a Inner conductor	3.55E-8 Pa
CM1/CM2a Vessel	9.73E-4 Pa

Fluxgate

	X	Y	Z	ABS	TEMP
CM1:	14.57 μ T	10.09 μ T	-7.83 μ T	19.38 μ T	65.06K
CM2a:	3.01 μ T	9.71 μ T	3.68 μ T	10.81 μ T	106.94K

Power

KLY3 上 Pf	1.28MW
KLY3 下 Pf	1.34MW
Pt Eacc sum	256.73MV/m
Pt Eacc ave.	21.39MV/m
Input Volt	1.08V
Pt Eacc sum	240.48MV/m
Pt Eacc ave.	30.06MV/m

cav1

cav2

cav3

cav4

cav5

cav6

cav7

cav8

cav9

cav10

cav11

cav12

Radiation

	Low	High
Up:	17.320 mSv/h	70.911 uSv/h
Mid:	28.256 mSv/h	777.988 uSv/h
Down:	9.739 mSv/h	380.974 uSv/h

Feedback

Feedback	<input checked="" type="checkbox"/> ON
Ref Power	25.70

Beam

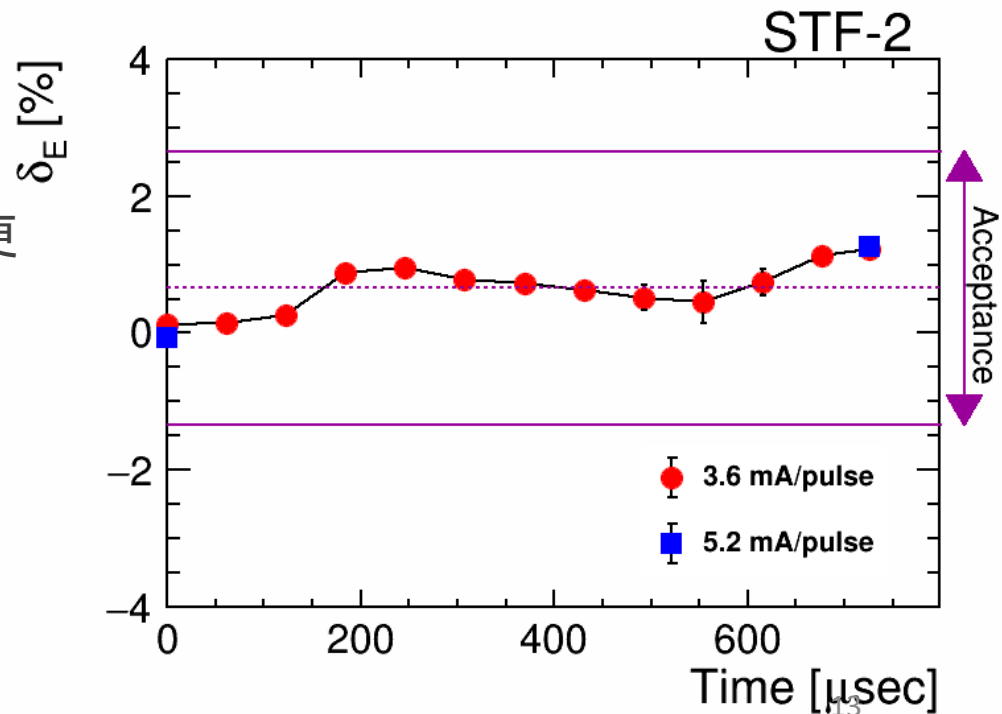
	Momentum	Energy
BH1:	0.12 MeV/c	NaN MeV
BH2:	293.47 MeV/c	292.96 MeV

エネルギー差見積り

- ビーム運転中のパルス内位置でのエネルギー差の見積もりを行った
- パルス内61.5 μ secごとの位置でのエネルギー差
 - E=291-293 [MeV]
 - バンチ間エネルギー差 \sim 1.5%
- Feedforwardにもかかわらず、まだパルス内位置でエネルギー差がある
 - RFGunに照射するレーザーのパワーのprofileが反映していると思われる
 - パルス後方のエネルギーが高くなるビーム調整になっている

- レーザーパワー安定化、あるいはFF tableの改善によりよくなると期待される
 - feedforwardを矩形波 \rightarrow adaptiveに変更
 - 詳細調査が必要

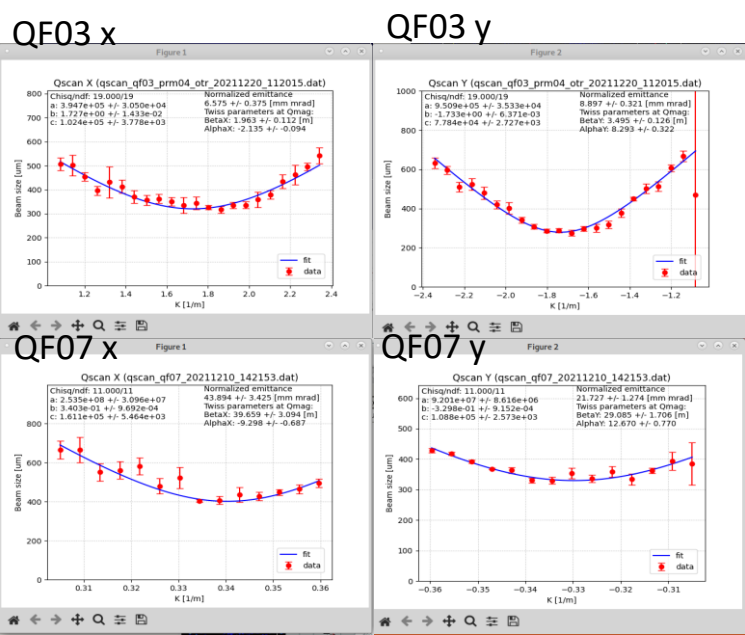
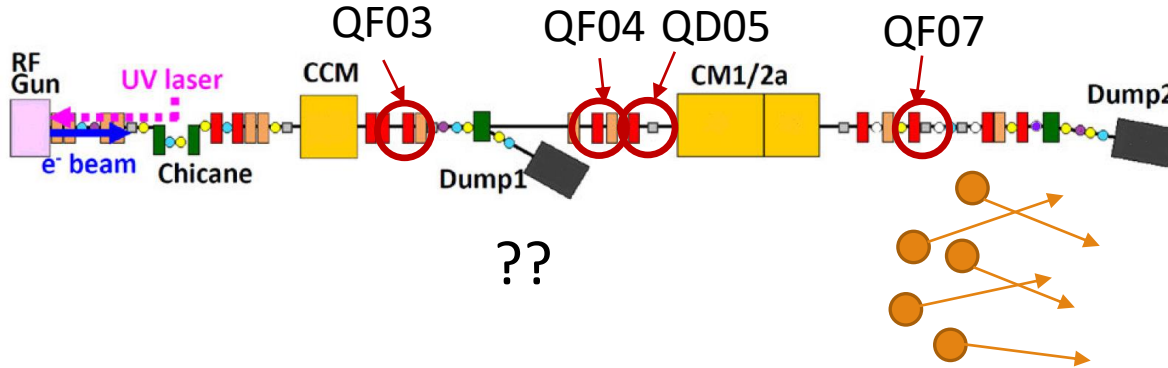
最大4%差があると
acceptanceを超えて
ビームロス制御不能
 \rightarrow これはクリアできている



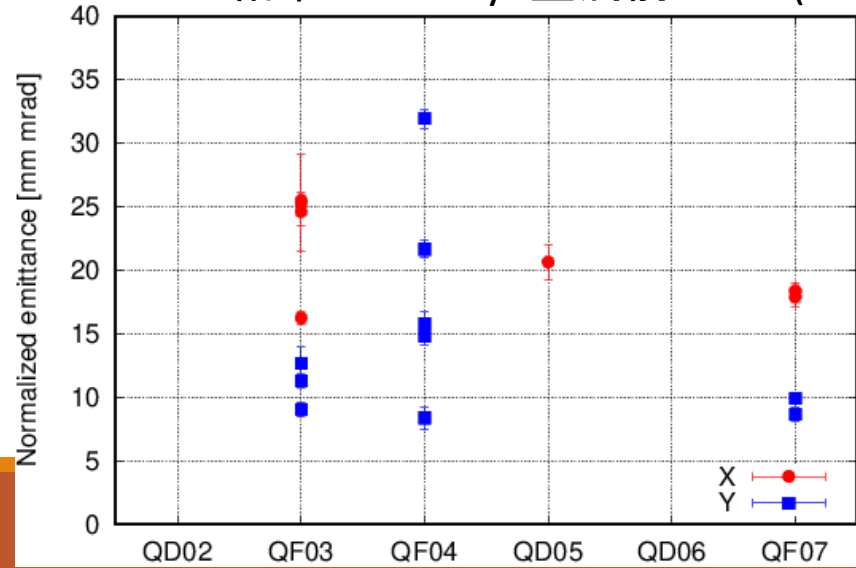
異常なエミッタンス増大

- 2019年以來、エミッタンスの異常な増大が確認されている
- 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
 - $O(1)_{[mm\ mrad]} \Rightarrow ?? \Rightarrow O(10)_{[mm\ mrad]}$

⇒この増大の原因を突き止めたい

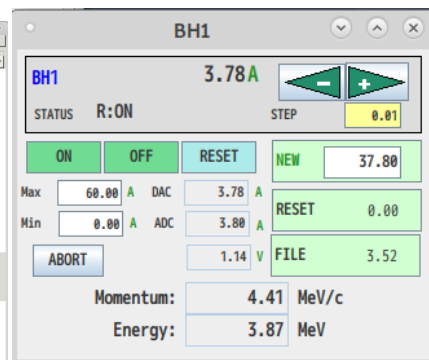
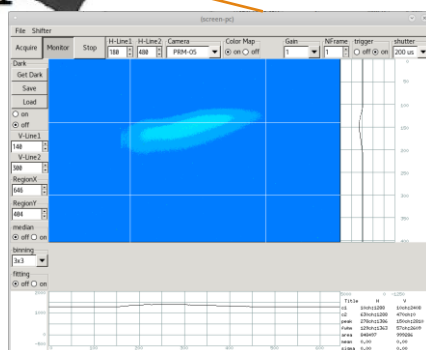
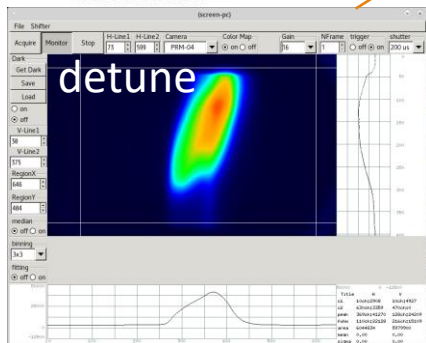
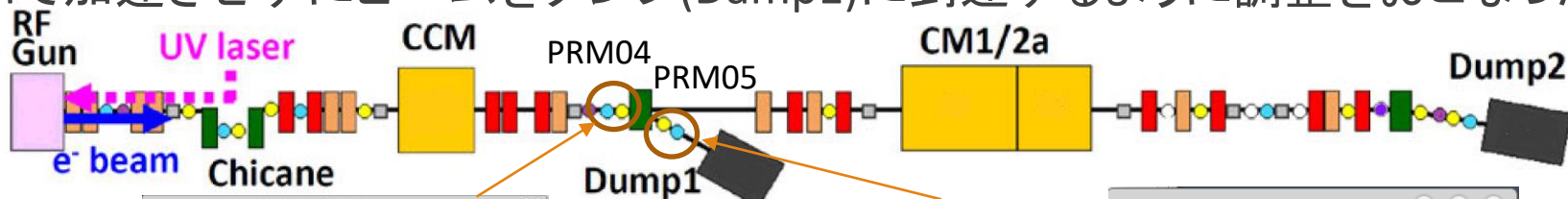


F.Y.2021の結果summary: 空洞前からO(10)

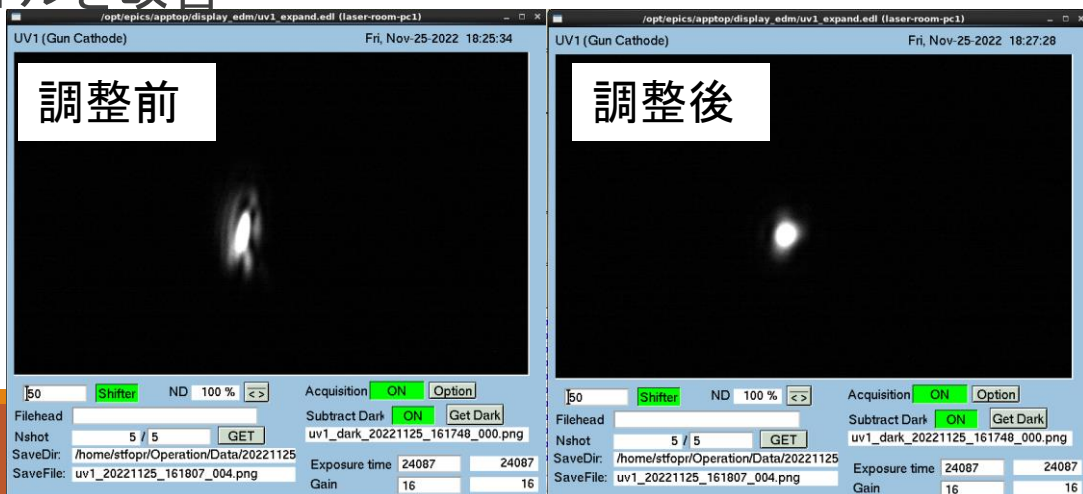


CCM detune運転

- CCMで加速させずにビームをダンプ(Damp1)に到達するように調整をおこなった。

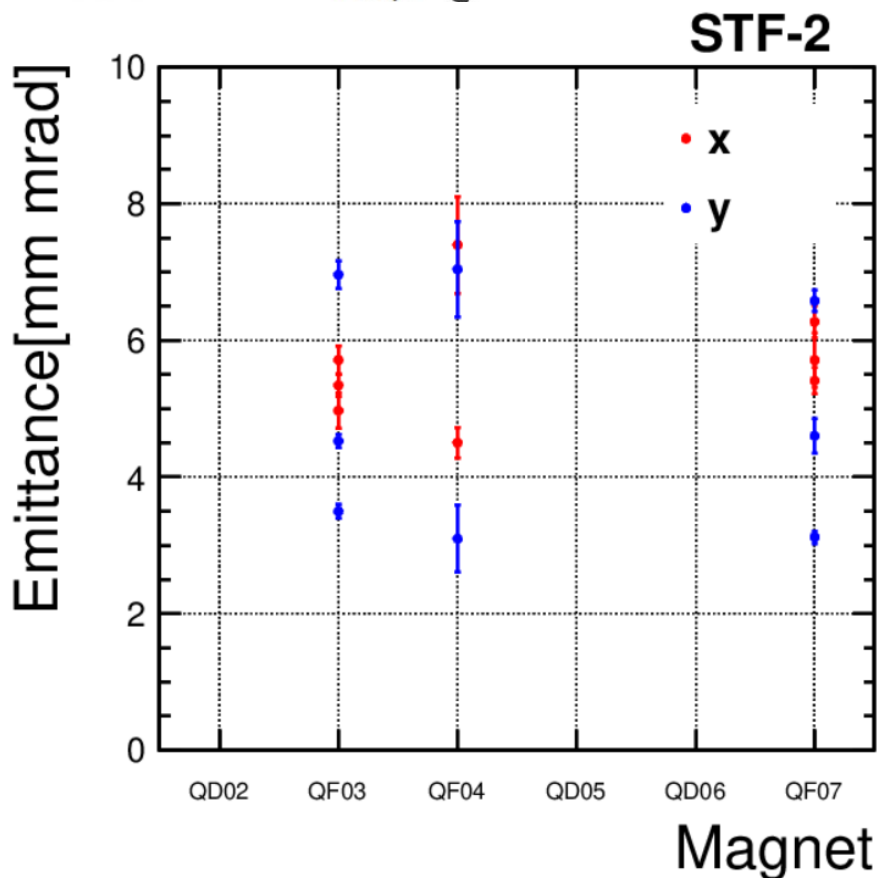
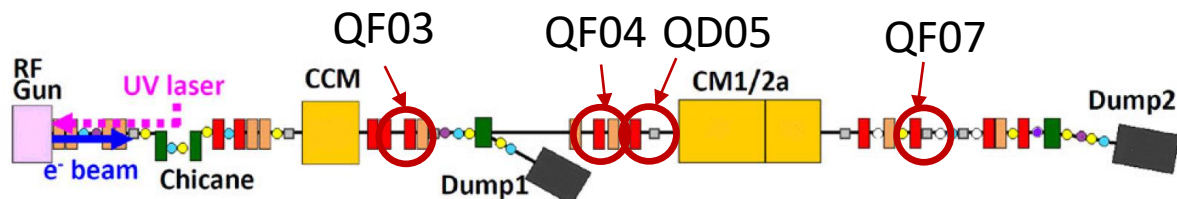


- この結果、CCMに入射する際のより良い軌道に調整することができた
→エミッタンスが劇的に改善
- RFGunに照射するレーザープロフィールを改善
 - バンチ内に余分な塊を作らないように



エミッタンス@2022

- 劇的に改善した: 3-7 [mm mrad]
 - まだデザインより大きい: レーザープロファイルの微細構造?
- 空洞でのエミッタンス増大効果は小さい



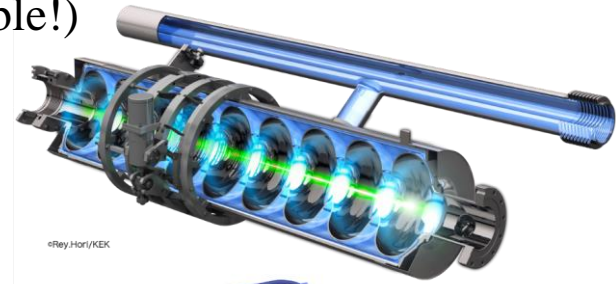
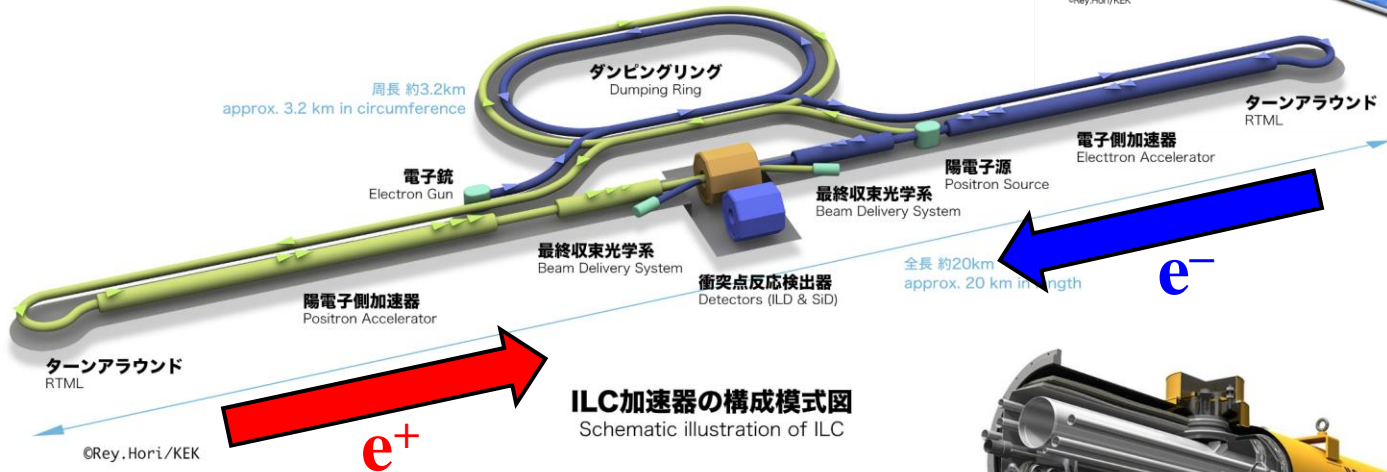
Summary

- STF-2では、ILCのための超伝導加速を実証してきた。
- 加速空洞運転:
 - 14台の加速空洞での運転達成
 - 最大エネルギー384.9MeVでの運転達成
 - 加速勾配33.0MV/mでの運転達成: ILCスペックの5%マージン
- ビーム運転:
 - ILCスペックと同等のパルス長(726 μ sec)での安定運転達成
 - ILCスペックと同等のバンチ電流(5.8mA)での安定運転達成
 - 加速勾配30.06MV/mでの726 μ sec, \sim 5.8mAの運転実証
 - 加速勾配を上げた場合のクエンチの調査が必要
- 種々のコンポーネントを調査した結果、
 - エミッタンス 0(10[mm mrad]) \rightarrow 3-7 [mm mrad]
 - 空洞のエミッタンス増大効果は小さい
 - まだデザインより大きいので、調査が必要

backups

ILC Project

- Higgs factory machine (250 GeV @ E_{CM})
- Superconducting cavity/cryomodule technology as mass production
 - ~750 Cryomodules (challenging number, but not impossible!)
- Nano beam technology
- Candidate site: Kitakami in Japan



ILC Spec.	E_{acc}	Q_0
Vertical Test	35 MV/m	0.8×10^{10}
Cryomodule test	31.5 MV/m	1.0×10^{10}

>90% (successful rate)

Brief history of STF-2 project

Date	Content
2010	Fabrication of cavities / power couplers
2011 ~ 2013	V.T. for 12 cavities / RF conditioning for 12 couplers
Jun/2013	Cleaning up STF tunnel
Jul/2013 ~ Apr/2014	Cavity string assembly (three times)
Oct/2013 ~ Jun/2014	Module assembly (CM1/CM2a)
Jul/2014	Complete certification for High pressure Gas Code
Oct/2014 ~ Dec/2014	1 st cool-down / low power test
Apr/2015 ~ Jul/2015	5MW Klystron / Single waveguide system completed
Jul/2015 ~ Sep/2015	Coupler conditioning at room temperature
Oct/2015 ~ Dec/2015	2 nd cool-down / high power test (single cavity operation, performance check)
Jan/2016 ~ Jul/2016	Multi-beam Klystron & Waveguide system completed (selection of 8 cavities)
Jul/2016 ~ Sep/2016	Coupler conditioning at room temperature
Sep/2016 ~ Nov/2016	3 rd cool-down / LFD, Q ₀ measurement, 8 Cavities Operation & LLRF study
Aug/2018 ~ Dec/2018	Beamline construction
Jan/2019 ~ Mar/2019	4 th cool-down / Beam commissioning w/ 10+2 cavities , Machine study
Aug/2019 ~ May/2020	CM2a disassembly / Cavity exchange (Cavity #9: MHI-24 → MHI-31) / CM2a reassembly
Jul/2020	Acceptance of pass certificate for high pressure gas regulation
Aug/2020 ~ Sep/2020	5 th cool-down / low power test
May/2020 ~ Dec/2020	Waveguide system construction / Upgrade for beam dump system / RF Gun improvement and operation
Jan/2021	High power test for waveguide system / RF conditioning for power couplers at room temp.
Feb/2021 ~ Apr/2021	6 th cool-down / high power test, beam operation w/ 12+2 cavities
Nov/2021	Inspection on inside CM1/2a by telescope
Nov/2021 ~ Dec/2021	7 th cool-down / high power test, beam operation w/ 12+2 cavities

Beamline components in STF-2 accelerator

Beam profile monitor



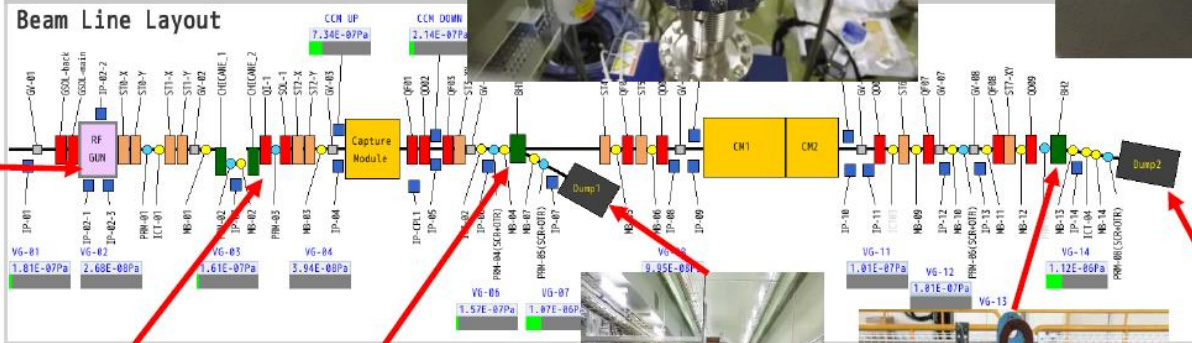
Beam current monitor



Beam position monitor



RF Gun



Chicane & Solenoid



Bend 1



Bend 2



Dump 2



Dump 1



第18回日本加速器学会年会論文発表会

超伝導加速器の産業・医療応用例

超伝導加速器の量子ビーム応用としては、エネルギー回収を活用するもの(量子ビームERL利用)と、大強度の電子ビームを照射するもの(量子ビーム照射型)に大別される。

cERL: エネルギー回収型ライナック 産業医療応用実験施設



照射型

KEKのcERLで核医学診断に利用するMo-99製造とテクネチウム抽出を実施(2019.10 KEKニュース)に掲載された。(民間企業からの受託研究)

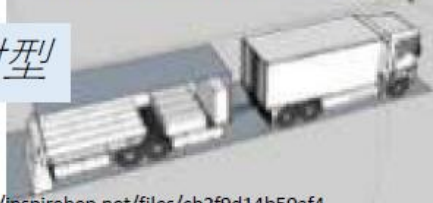
超伝導加速器による“分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発”、NEDO)

ERL利用



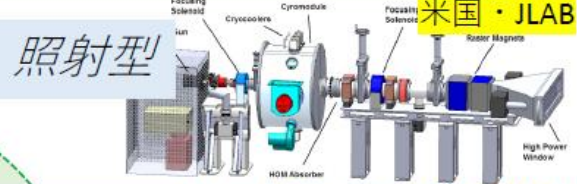
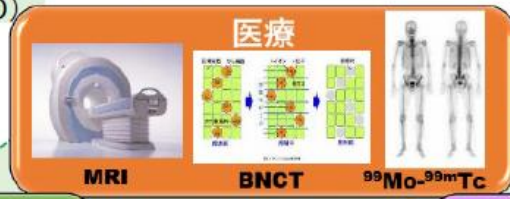
次世代リソグラフィは~10kWのEUV光源超伝導加速器によるERL-FELが有望

照射型



<https://inspirehep.net/files/cb2f9d14b50af4cd11b06064857b33cb>

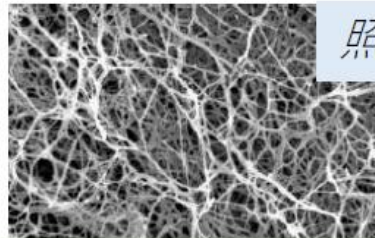
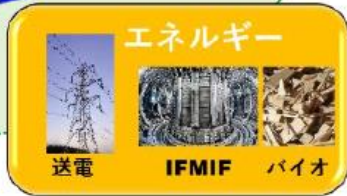
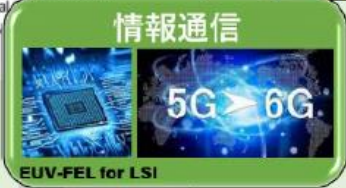
アスファルトに超伝導加速器からの電子ビームを照射して強靱化。(民間企業からの受託研究、共同研究)



照射型

<https://arxiv.org/abs/1802.08289>

電子線照射による水の浄化



照射型

電子線照射によるナノセルロースの高効率・低コスト製造(AISTとの共同研究、NEDO)