

NanoTerasu加速器コミッショニング

令和5年8月29日

QST 次世代放射光施設開発センター 加速器グループ

西森信行



NanoTerasu

NanoTerasu加速器 設計・製作・設置・運転メンバー

西森 信行, 安積 隆夫, 上島 考太, 小原 脩平, 菅 晃一, 保坂 勇志 (QST)

青木 駿堯, 浅野 博之, 伊藤 優仁, 伊原 彰, 岩下 大器, 及川 治彦, 門脇 聖弥, 小林 創, 小林 秀樹, 齋田 涼太, 櫻庭 慶佑, 杉本 兼人, 高橋 隼也, 土山 翼, 西川 雅章, 芳賀 浩一 (QST, NAT)

渡部 貴宏, 石井 美保, 糸賀 俊郎, 岩井 瑛人, 大石 真也, 大島 隆, 近藤 力, 櫻井 辰幸, 小路 正純, 杉本 崇, 高野 史郎, 田村 和宏, 深見 健司, 細田 直康, 馬込 保 (高輝度光科学研究センター, 理研 放射光科学研究センター, QST)

青木 毅, 安積 則義, 上田 庸資, 岡田 謙介, 川瀬 守弘, 清道 明男, 佐治 超爾, 谷内 努, 谷内 友希子, 出羽 英紀, 濱野 崇, 藤田 貴弘, 正木 満博, 増田 剛正, 松原 伸一, 柳田 謙一, 山口 博史 (高輝度光科学研究センター, QST)

斗米 貴人 (高輝度光科学研究センター)

稲垣 隆宏, 早乙女 光一, 高橋 直, 田中 隆次, 前坂 比呂和 (理研 放射光科学研究センター, 高輝度光科学研究センター)

田中 均, 原 徹, 平岩 聡彦, 福井 達, 松井 佐久夫 (理研 放射光科学研究センター)

井上 忍, 熊澤 寛介, 酒井 康平, 住友 博史, 勢納 敏雄, 竹迫 涼一, 田中 信一郎, 森谷 佳津貴, 山本 龍, 横町 和俊, 吉岡 正倫 (スプリングエイトサービス)

恵郷 博文 (高エネルギー加速器研究機構)

アウトライン

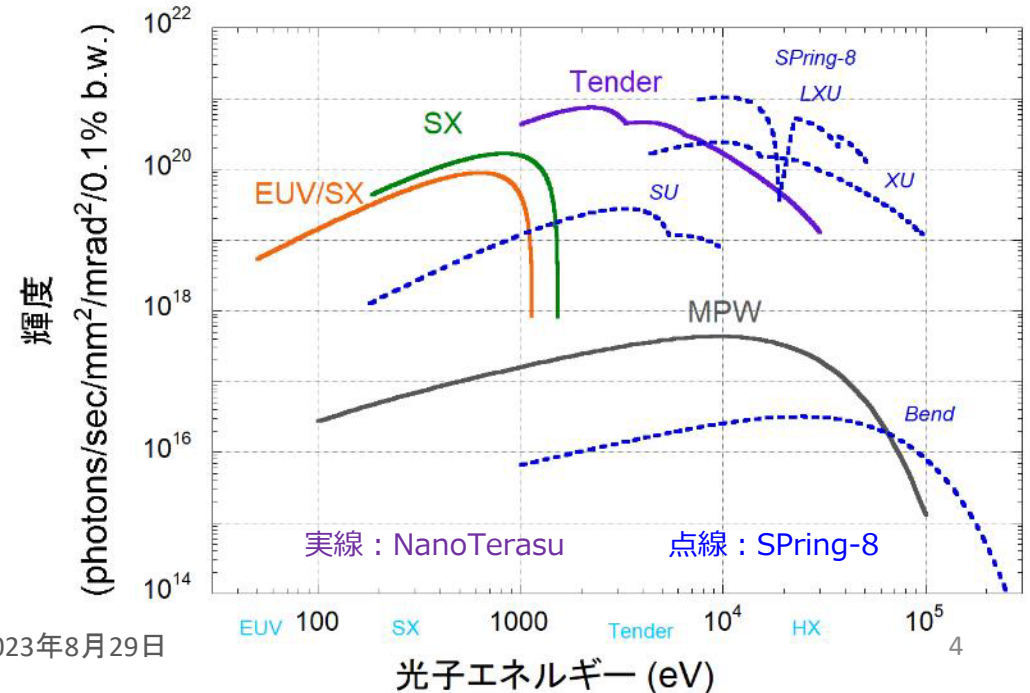
1. はじめに
2. 線型加速器
3. 円型加速器システム
4. 円型加速器コミッショニング
5. 加速器据付調整、世界の中での位置づけ
6. まとめ

1. ナノテラスの使命

- 2024年4月1日から特定先端大型研究施設として運用開始
- 2024年度に年間3500時間のユーザータイム
 - ※SPring-8 年間3500時間以上のユーザータイムは運転開始5年目から
- 軟X線に強みを持つ光源（SPring-8と相補的）
 - 輝度： $\sim 10^{21}$ for 1-3 keV (SPring-8の1~2桁高)
 - フラックス： $\sim 10^{16}$ photons /sec/0.1% b.w. for 1-3 keV
 - コヒーレント比： 10%弱 for 1keV
 - MPW硬X線源： 輝度 $10^{17\sim 18}$, フラックス $10^{11\sim 12}$ for 数10keV
 - 将来の軟X線FELへの拡張性



ナノテラスパラメータ	
電子ビームエネルギー	3 GeV
自然エミッタンス	1.14 nm.rad
電子ビーム蓄積電流	400 mA
最大アンジュレータ-BL本数	14
最大MPW-BL本数	14

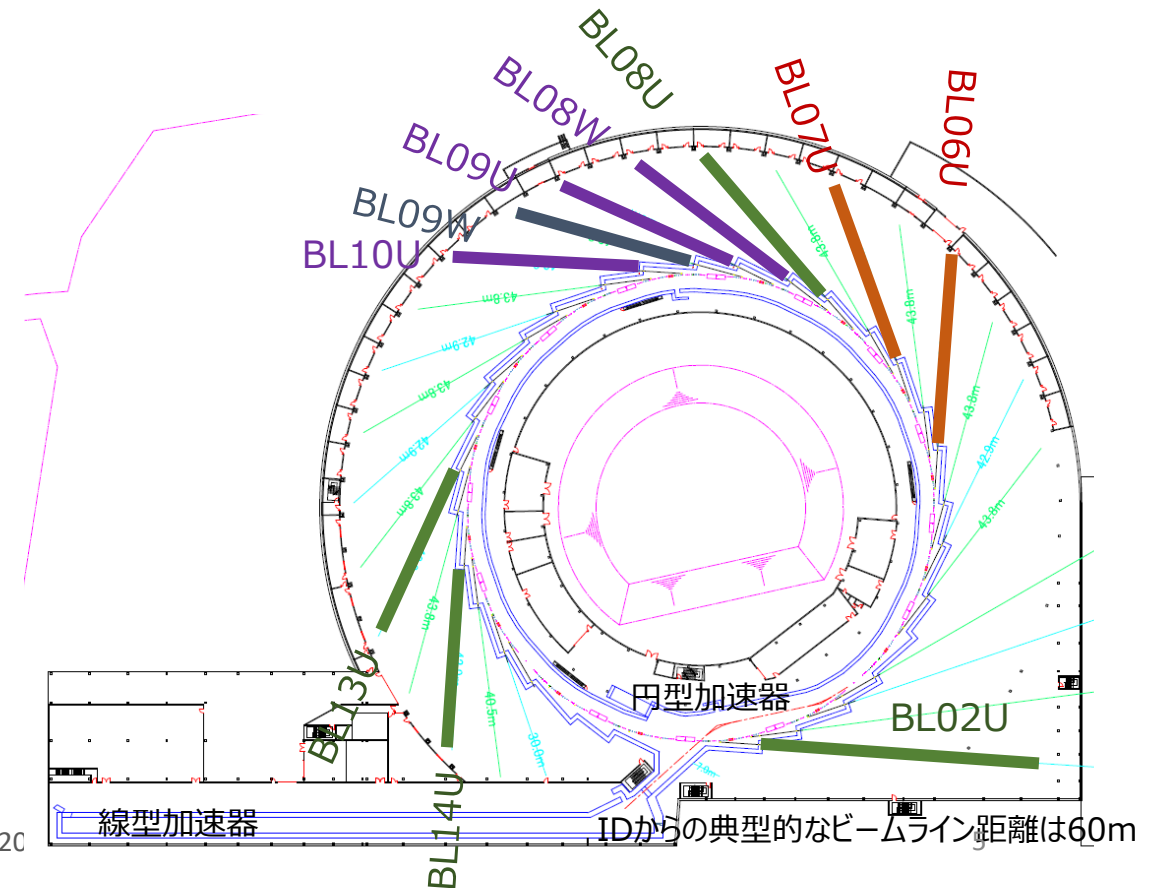
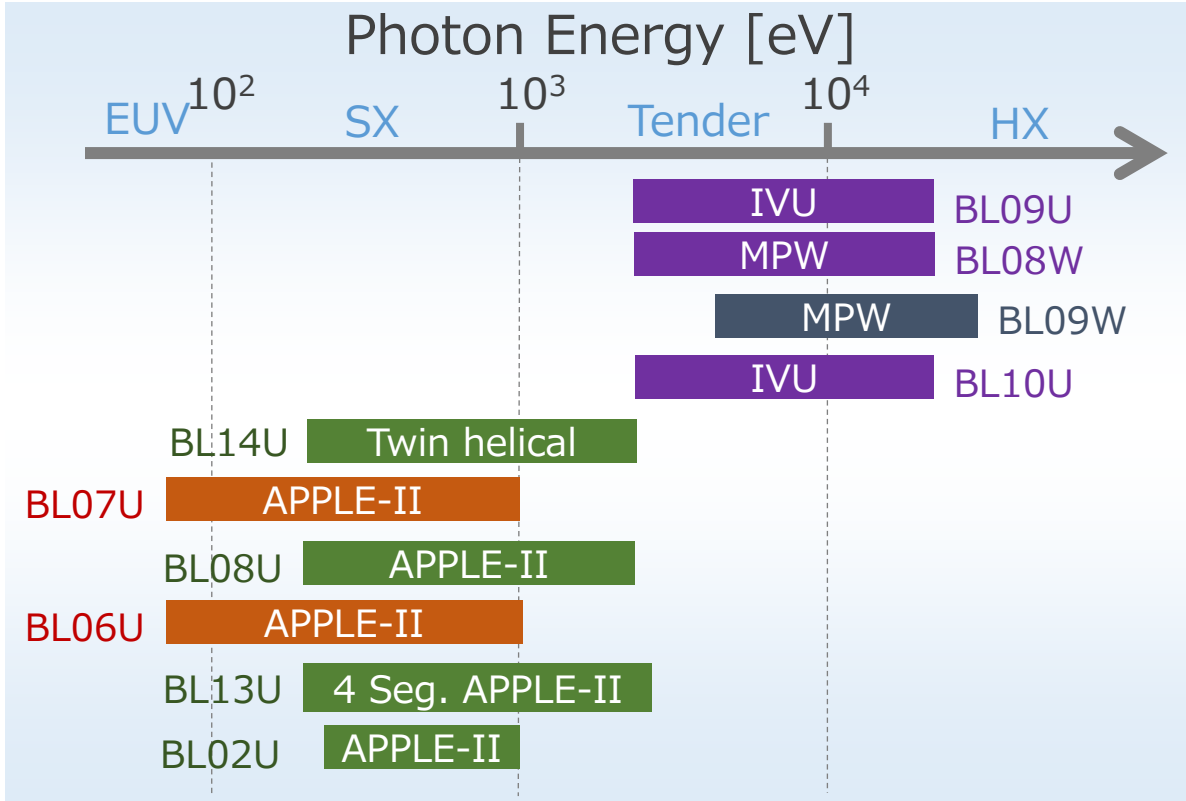


1. 初期光源10本

特徴

- 軟X線で偏光制御のためにAPPLE-IIを多数採用

BL	ID	I_w (mm)	N_w
02U 07U	APPLE-II	56	71
06U 08U	APPLE-II	75	53
13U	4 Seg. APPLE-II	56	11 x 4



1. ナノテラス 加速器 -コンパクトかつ高性能-

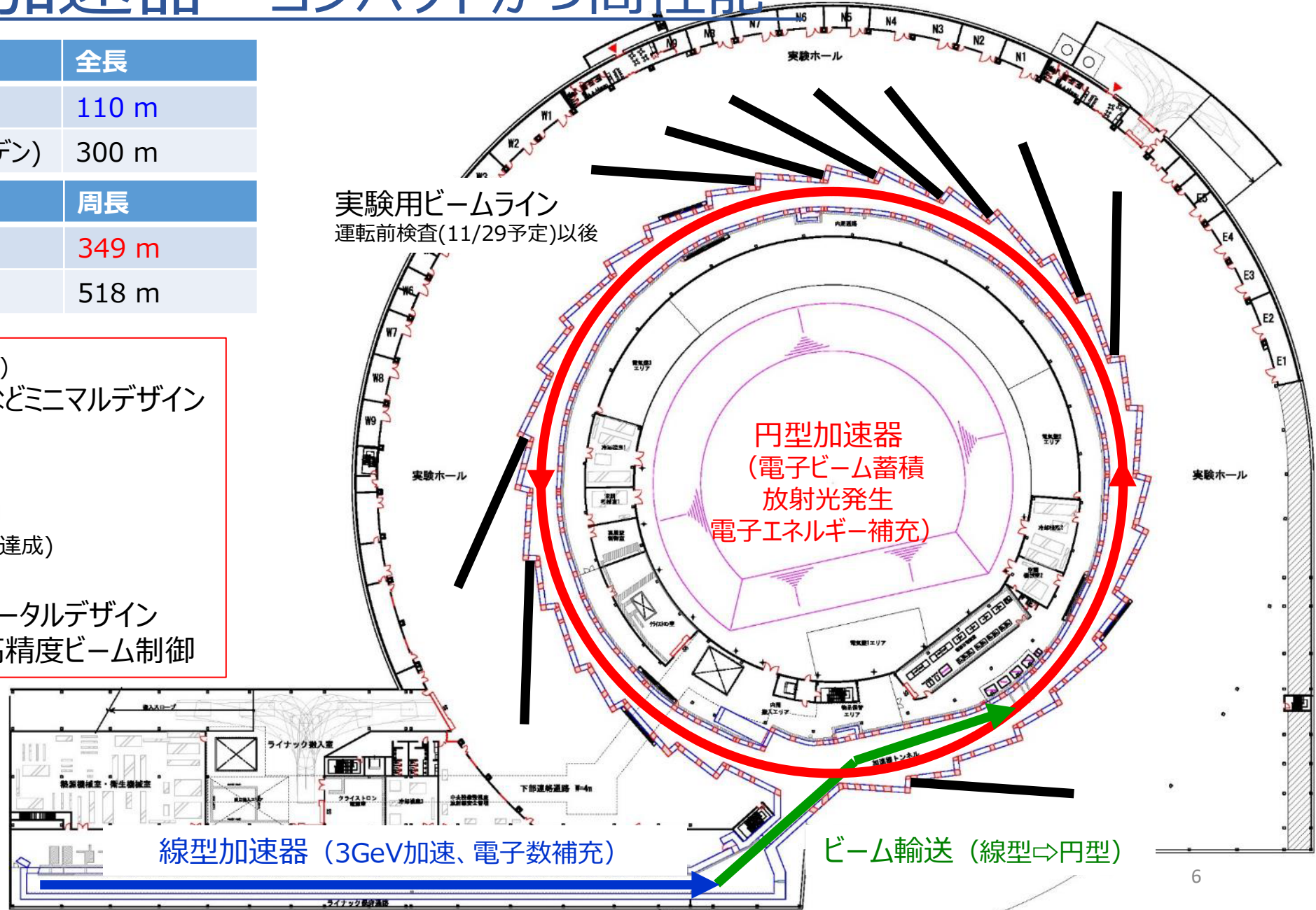
線型加速器	全長
ナノテラス3GeV線型加速器	110 m
従来型3GeV (例: MAX IV スウェーデン)	300 m
円型加速器	周長
ナノテラス3GeV円型加速器	349 m
従来型3GeV (例: TPS 台湾)	518 m

線型加速器 (2023.4.27: 3GeV達成)

- 新型電子源、Cバンド加速器などミニマルデザイン
- 機器の精密制御・アライメント
- 将来の軟X線FEL

円型加速器 (2023.6.16: 3GeV蓄積達成)

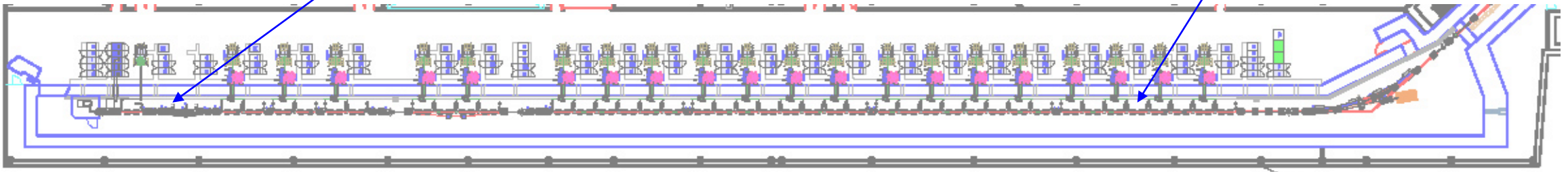
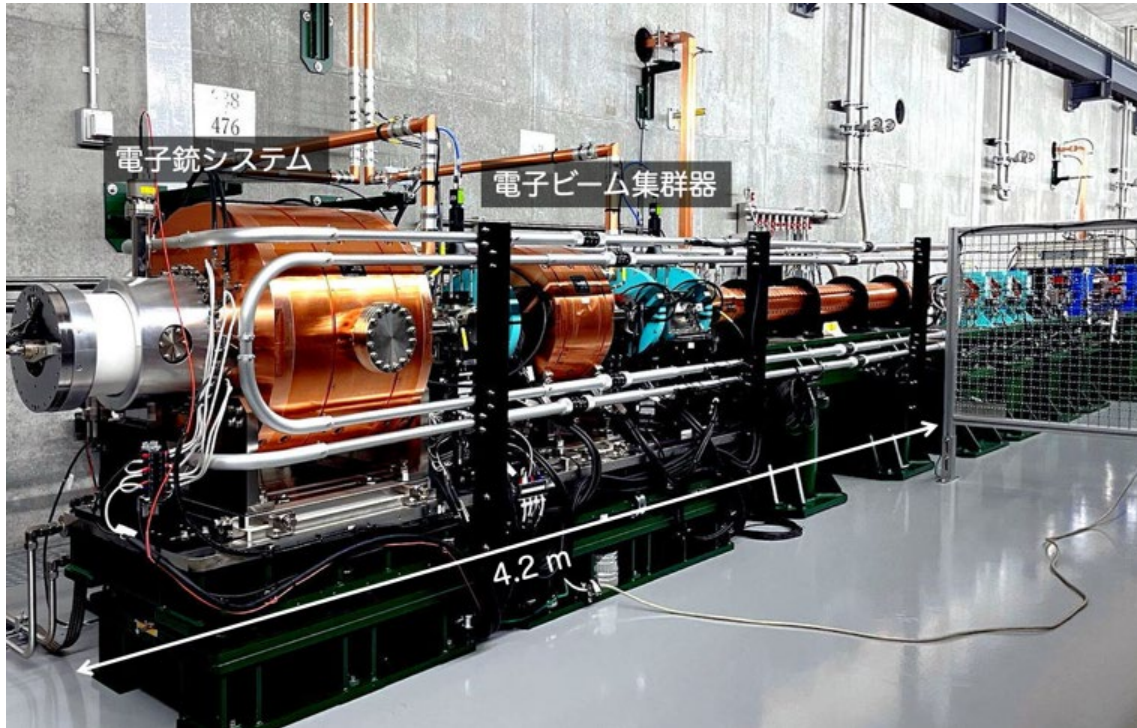
- MBAラティス
- 建屋・ユーティリティを含めた トータルデザイン
- 新型蓄積用加速空洞・高速高精度ビーム制御



2. 線型加速器-完全制御 (計算と測定の良い一致) -

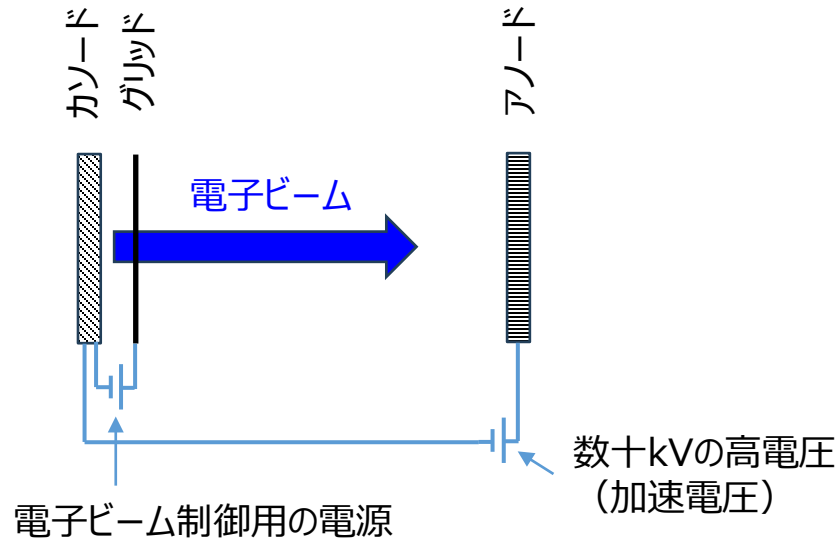
新型の透明グリッド熱カソード電子源を用いたコンパクトな入射器
 将来の軟エックス線FELも視野

25年来の日本加速器技術の結晶：Cバンド加速管40本
 40×2m×40MV/mで3GeV加速



2. 新型電子源とコンパクト入射器

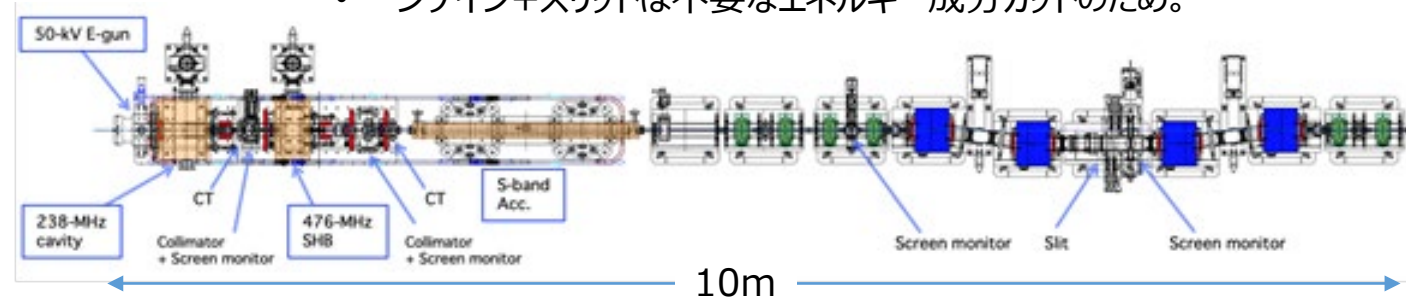
透明グリッド熱カソード電子源 原理



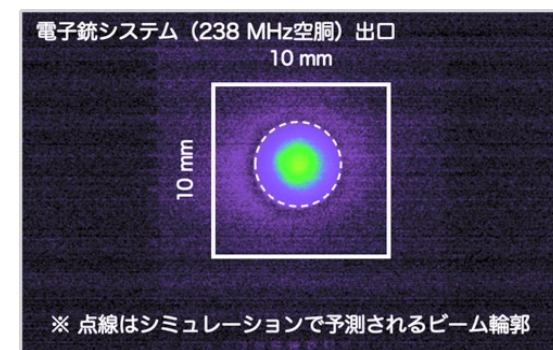
- 3極電子管
- グリッドでビームが広がりエミッタンス劣化するとされていた。
- SACLAはグリッド無熱電子銃で、下流キッカーで1ns幅に切り出す。
- カソード・グリッドとカソード・アノード電場を適合させグリッドを透明化。低エミッタンスビーム生成に成功。ただし、50kV加速。
- 238MHz空胴で直ぐに500kVまで加速してエミッタンス劣化防止。

コンパクト入射器

- 476MHz空胴とドリフトでバンチ圧縮。
- SB加速管で40MeV加速。
- SB加速管後のQでエミッタンス計測。
- シケイン+スリットは不要なエネルギー成分カットのため。



電子源出口の集束ビームプロフィール

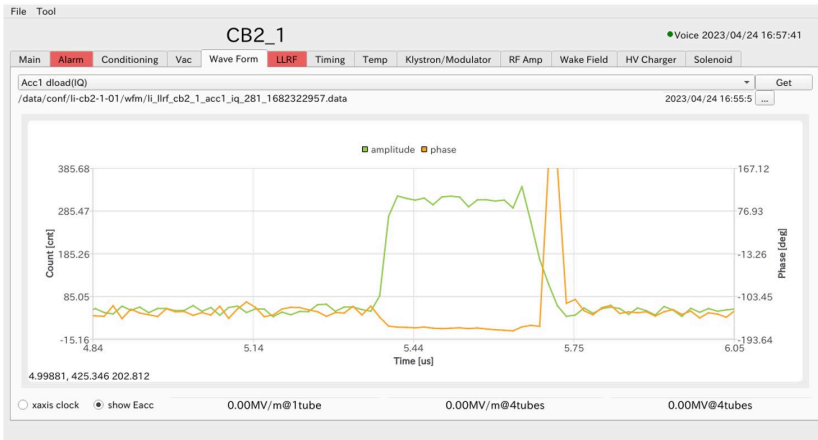


磁気レンズを動かしてもビームサイズが変わるだけで重心位置は変わらない
⇒アライメント精度が良く、計算との一致が得られやすい

2. Cバンド加速管による3GeV加速

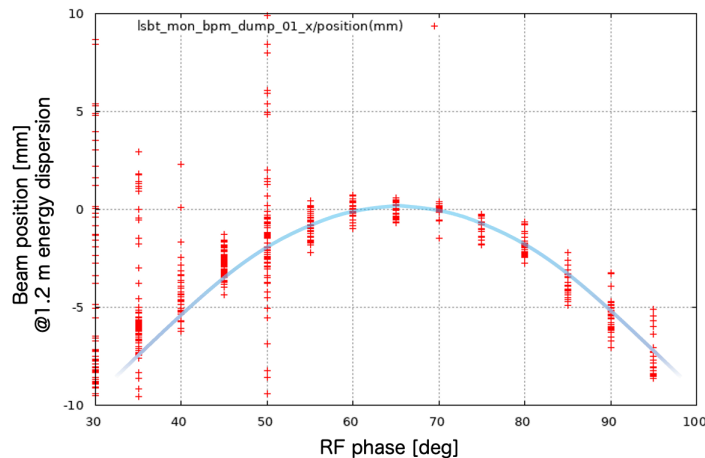
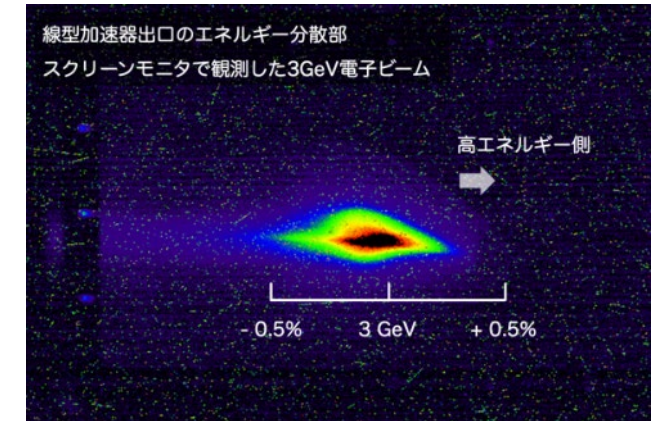
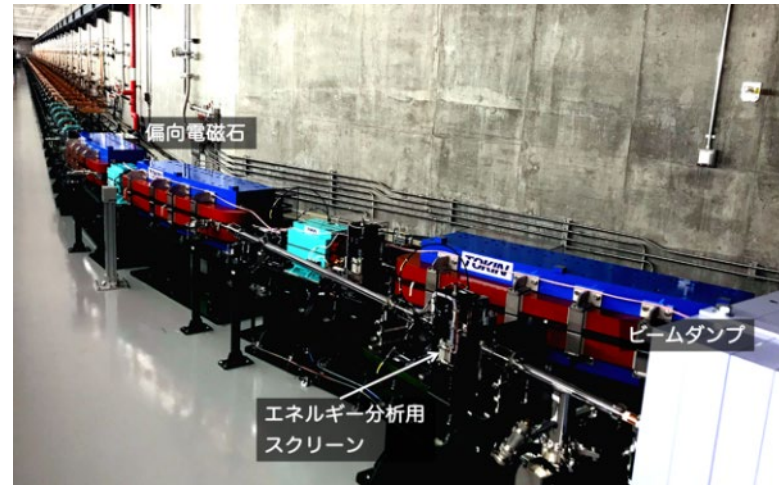
Cバンド加速管のビーム輸送

- 加速管のビーム誘起電場測定でビーム確認と加速管位相決定
- ビーム誘起測定時は加速管パワー入力なし
- ダミーロードパワー測定用のモニタで信号観測



電子ビーム診断部：エネルギー分析

- 全加速管を電子ビーム通過後、偏向電磁石後のSCMでエネルギー分析
- 各加速管の位相スキャンでエネルギーを最大化
- 電場振幅も調整し、最終的に3GeV到達



	目標	達成
エネルギー(GeV)	3	3
バンチ電荷 (nC)	>0.3	0.4
規格化エミッタンス(μmrad)	<10	6.7/8.3
エネルギー幅(FWHM)	<0.2%	0.12%
エネルギー安定度(σ)	<0.1%	0.02%

月日	イベント
2023.4.17	安全ITLK検査完了 電子源からビーム生成
2023.4.27	3GeV電子ビーム加速成功

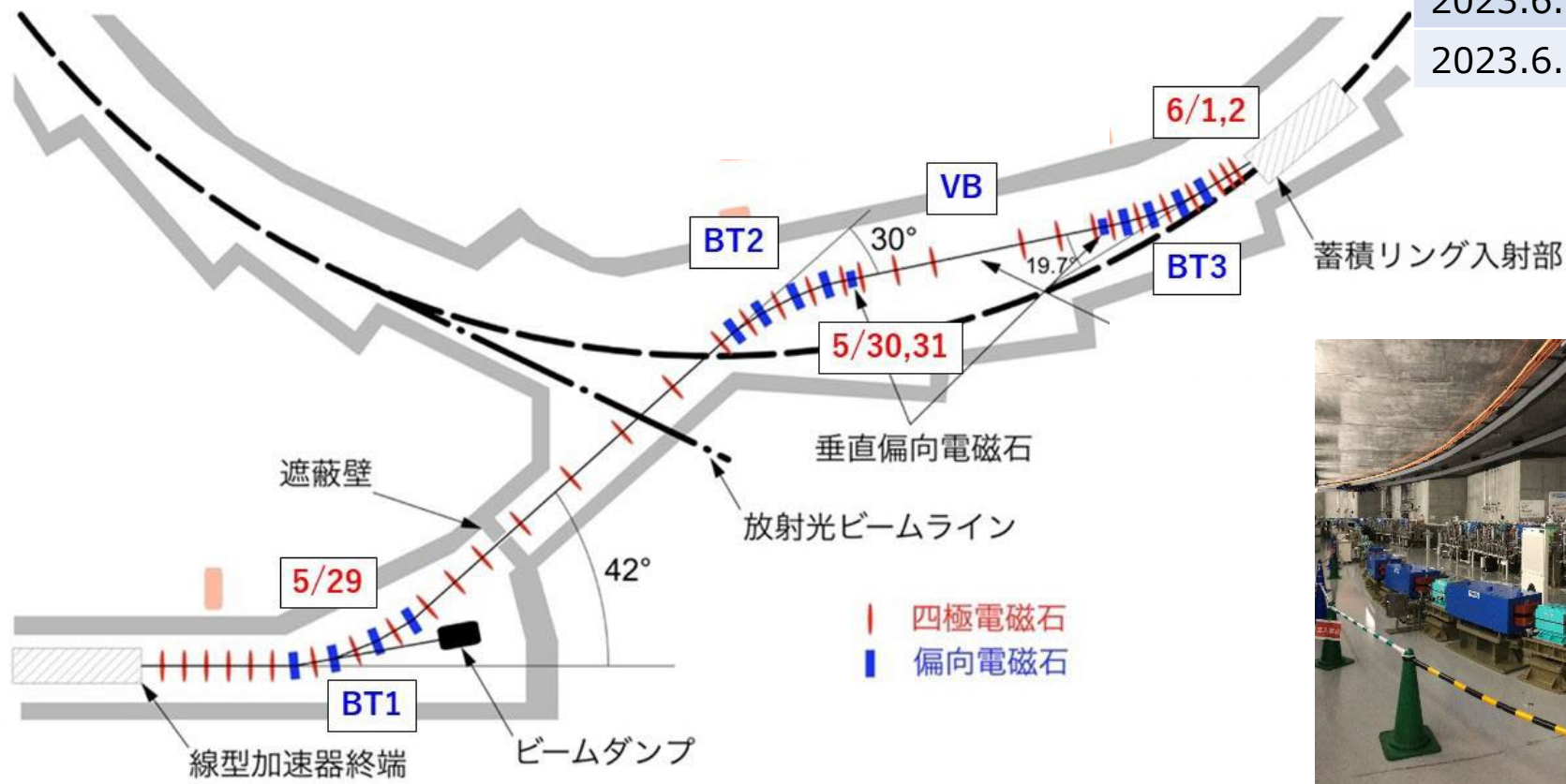


2. ビーム輸送部

【特徴】

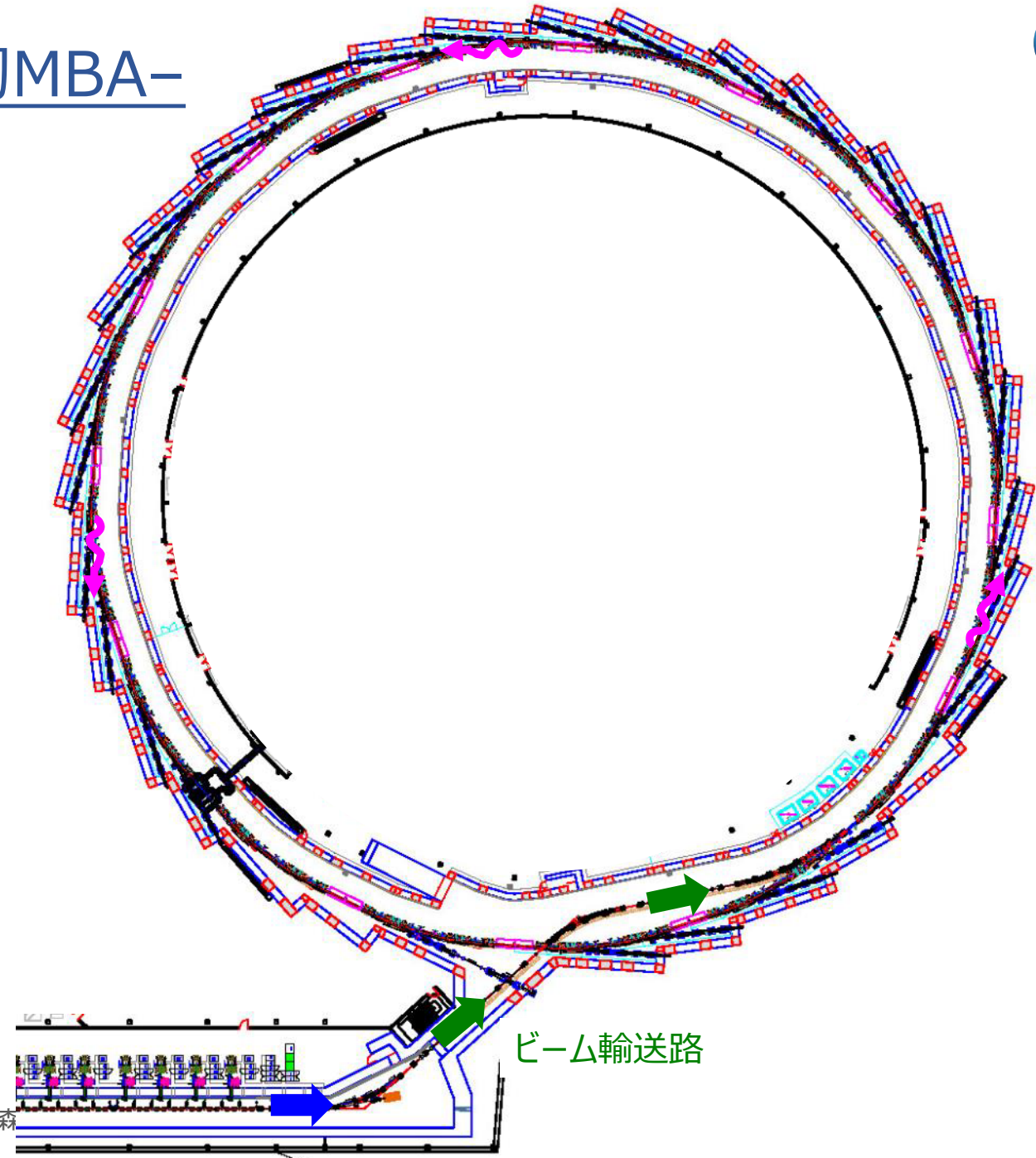
- BL本数を最大化するためリング内側から入射。
- リング・BL (床上1.2m) 交差部で下 (床上0.6m) を潜り、途中で持ち上げる。

月日	イベント
2023.5.29	蓄積リング棟 放射線管理区域 3GeV加速ビームを蓄積リング棟へ
2023.5.31	BT2中央Qを発散⇒集束に修正
2023.6.1	BT3中央Qを集束⇒発散に修正
2023.6.2	リング入射部パルスセプタム極性を反転



3. 円型加速器 -国内初MBA-

(蓄積リング)

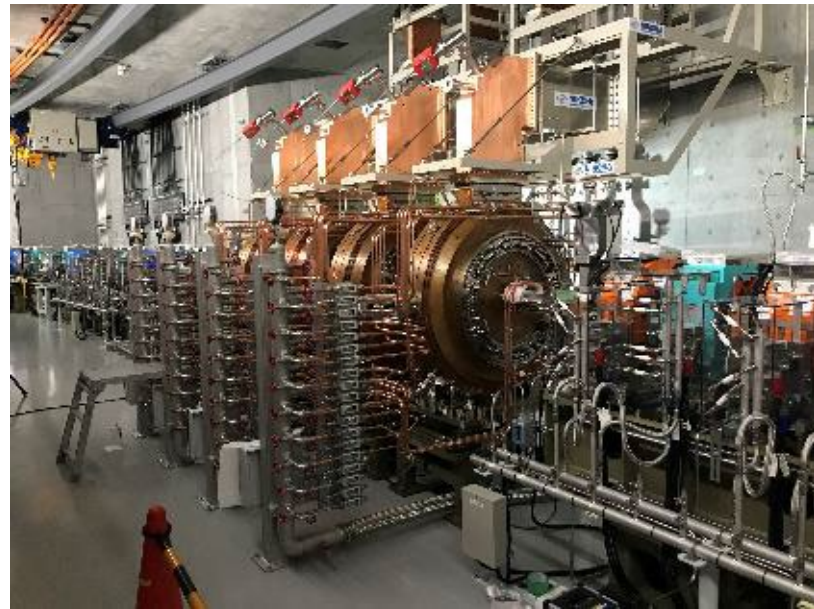
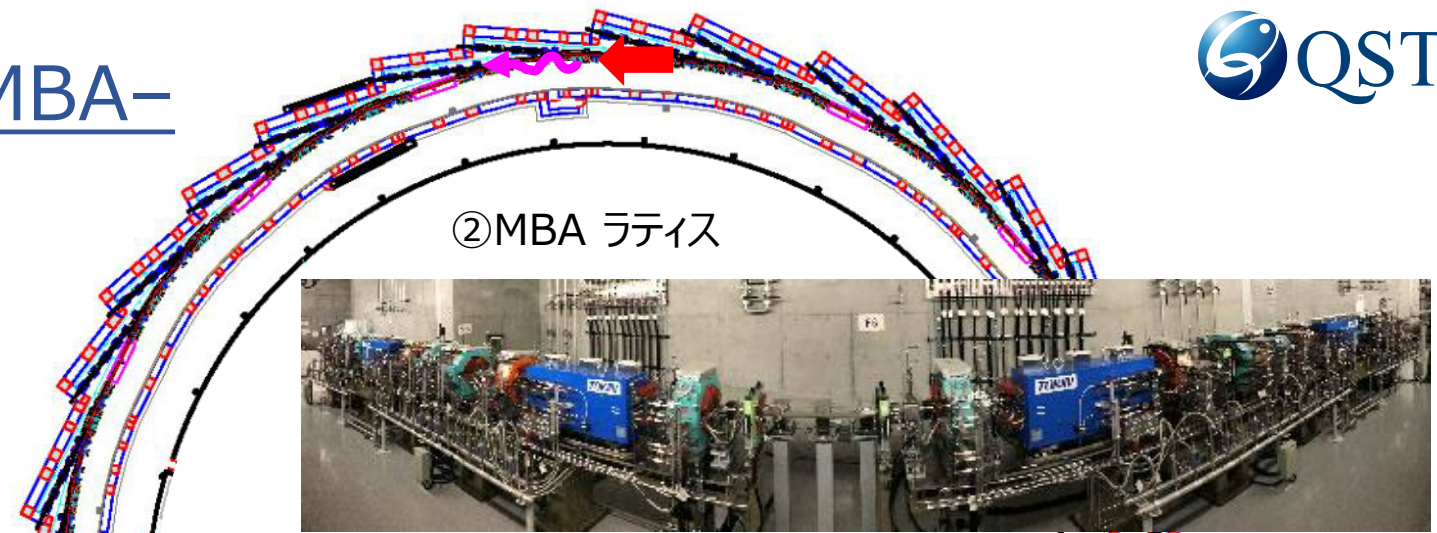


3. 円型加速器 -国内初MBA-

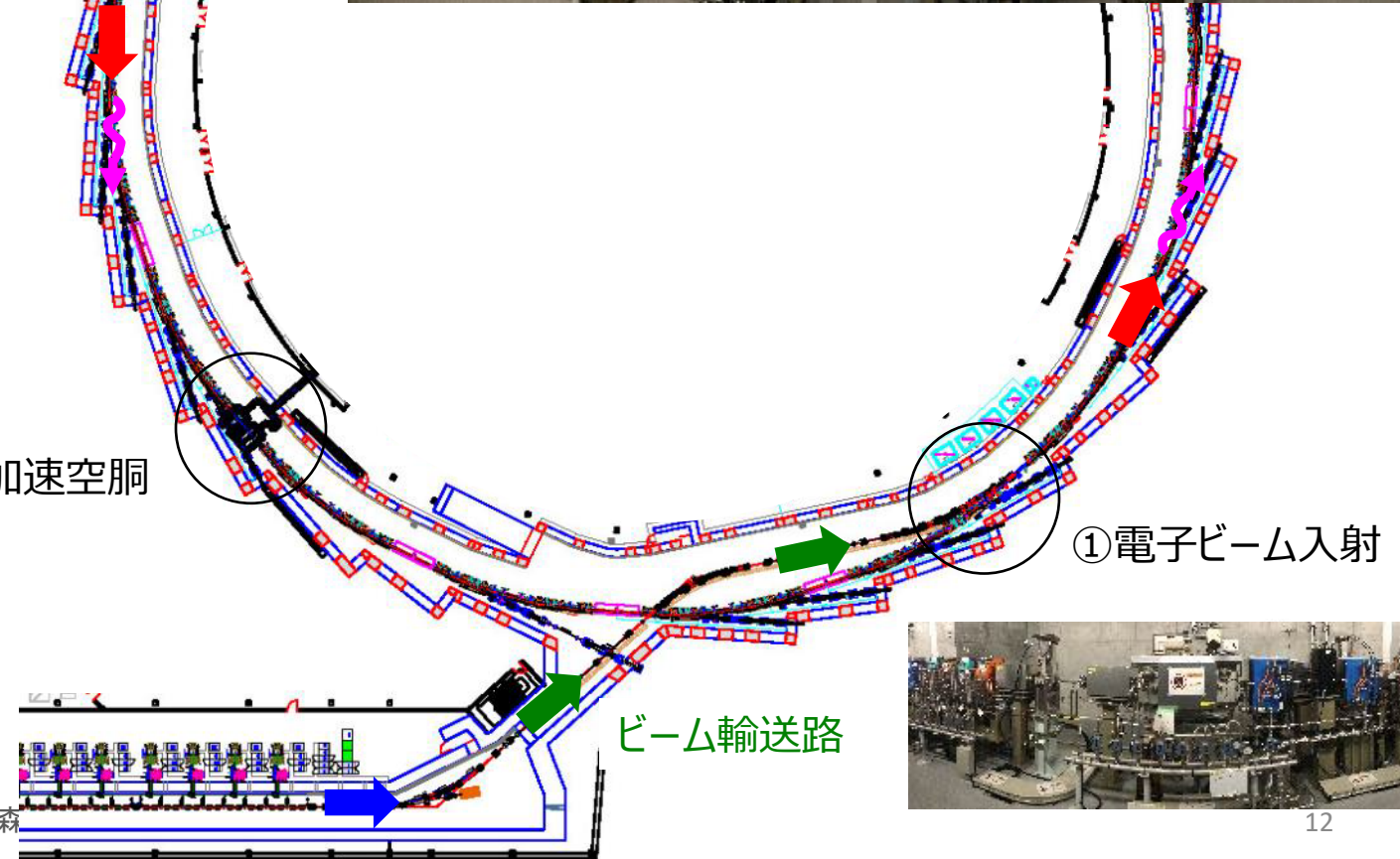
(蓄積リング)

特徴

- 小振幅かつ透明入射
- MBAラティス
- 新型蓄積用加速空洞・高速高精度ビーム制御
- 建屋・ユーティリティを含めた トータルデザイン



③蓄積用加速空洞



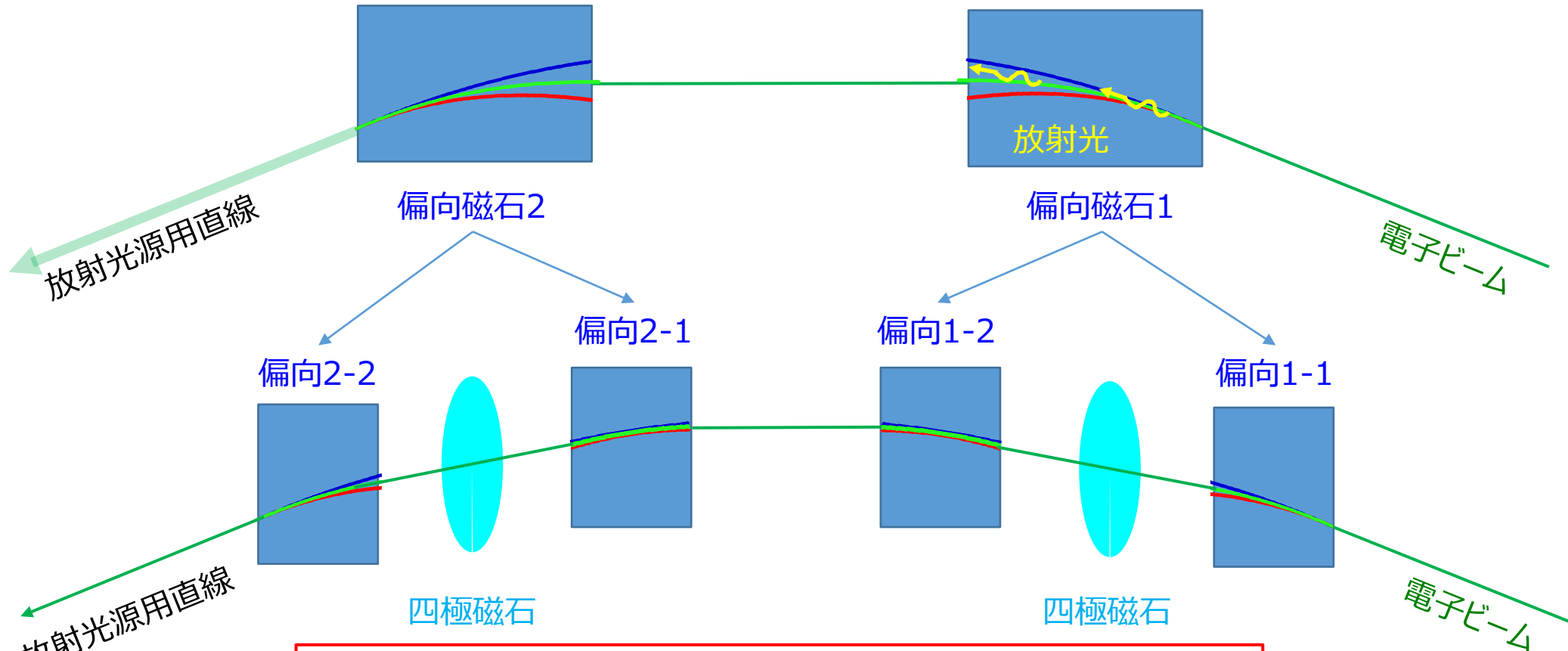
①電子ビーム入射

ビーム輸送路



3. MBAラティスとは

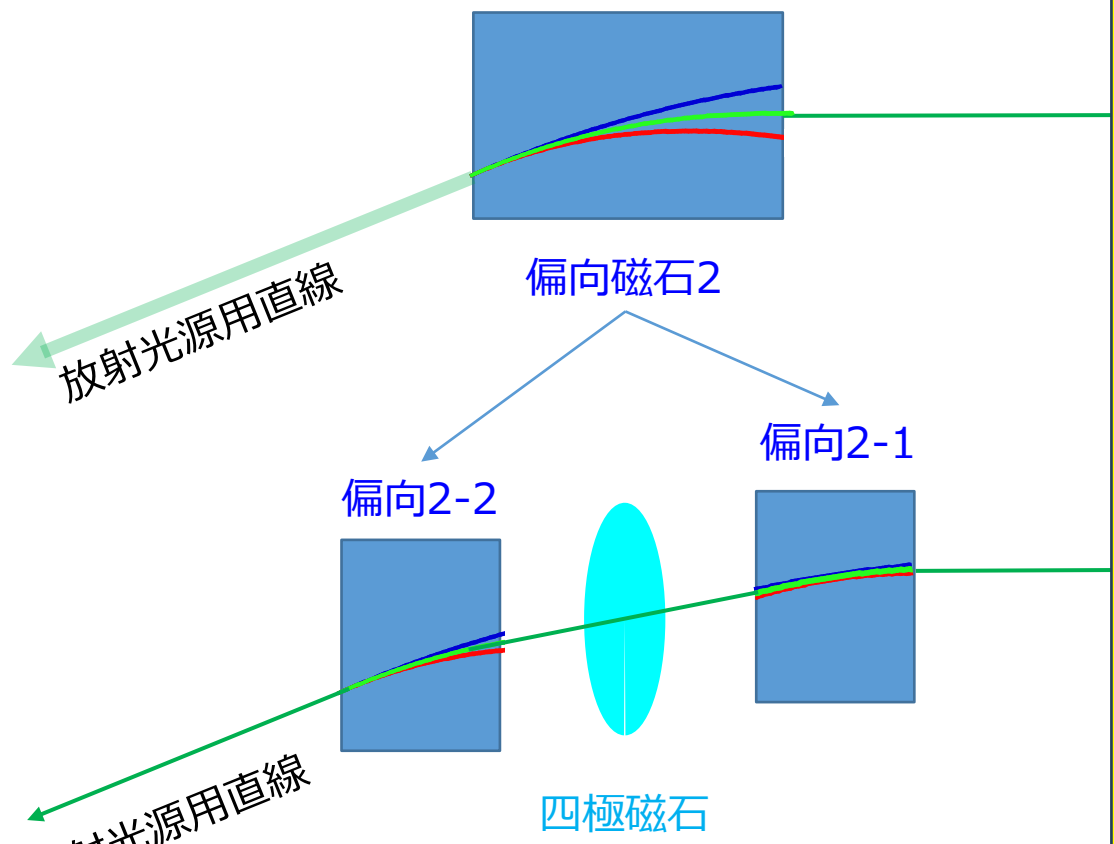
DBA(Double bend achromat): TPS
 分散関数による電子ビーム空間広がり ⇒ 放射光輝度低下



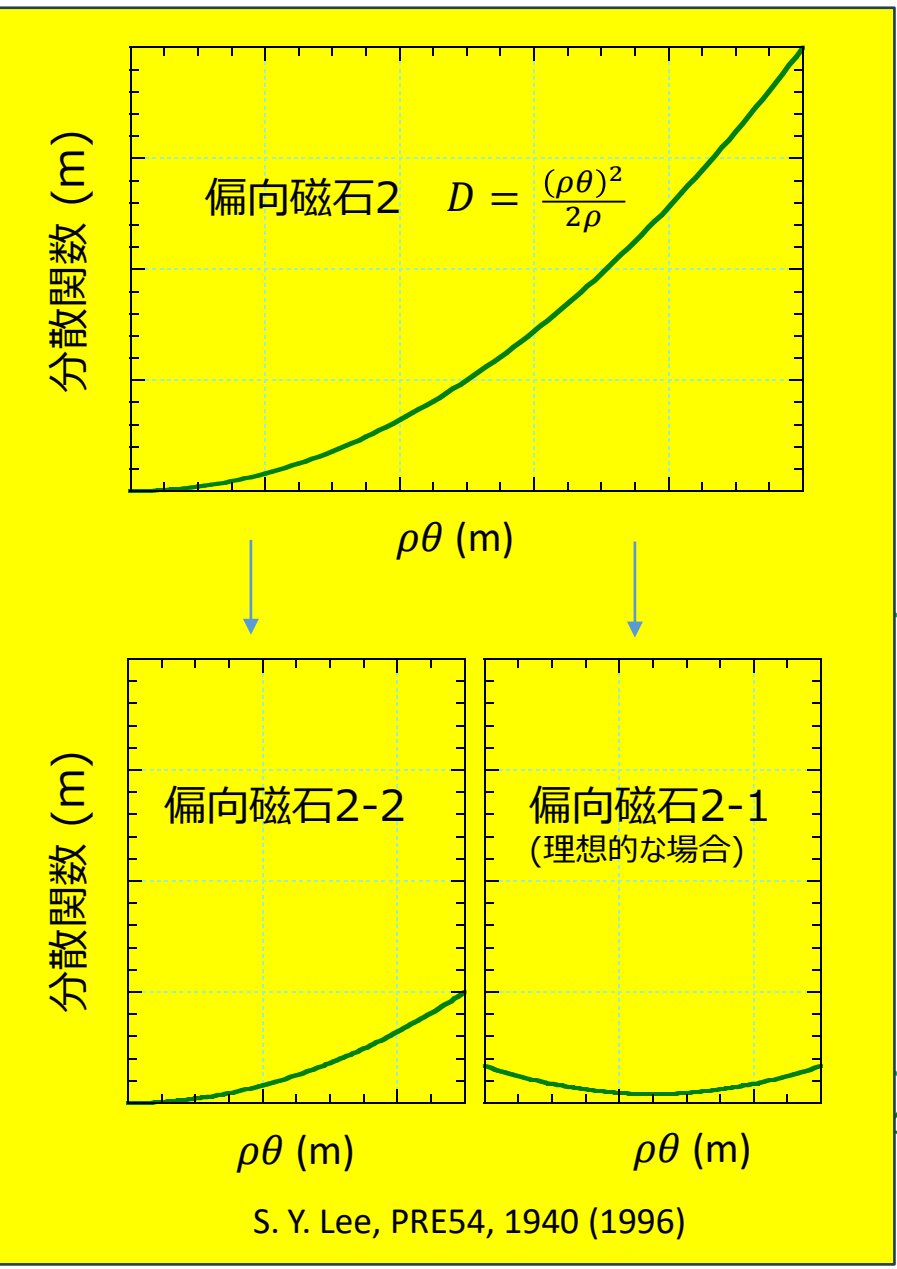
MBA(Multi bend achromat): ナノテラス
 偏向磁石分割と、四極磁石挿入で分散関数抑制 ⇒ 放射光輝度向上

3. MBAラティスとは

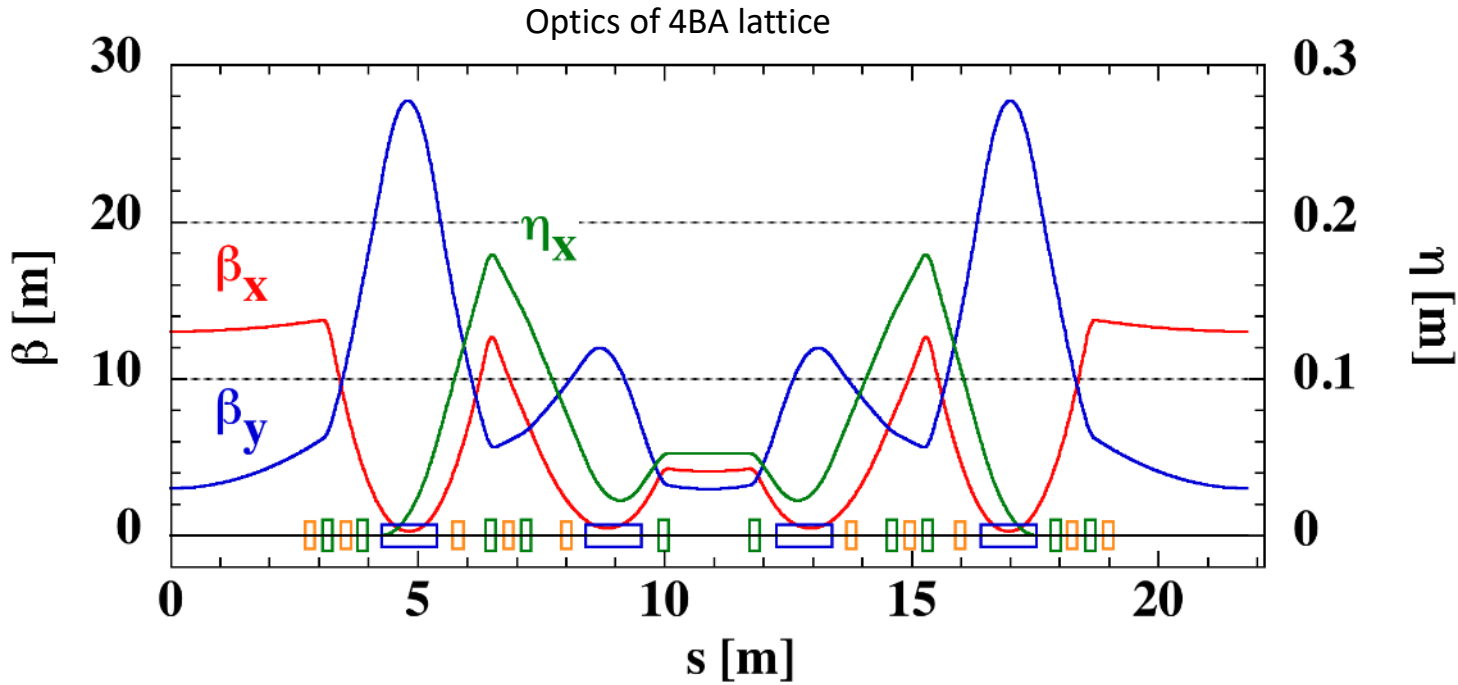
DBA(Double bend achromat)
分散関数による電子ビーム空間広がり



MBA(Multi bend achromat)
偏向磁石分割と、四極磁石挿入で分散



3. ナノテラス4BAラティス



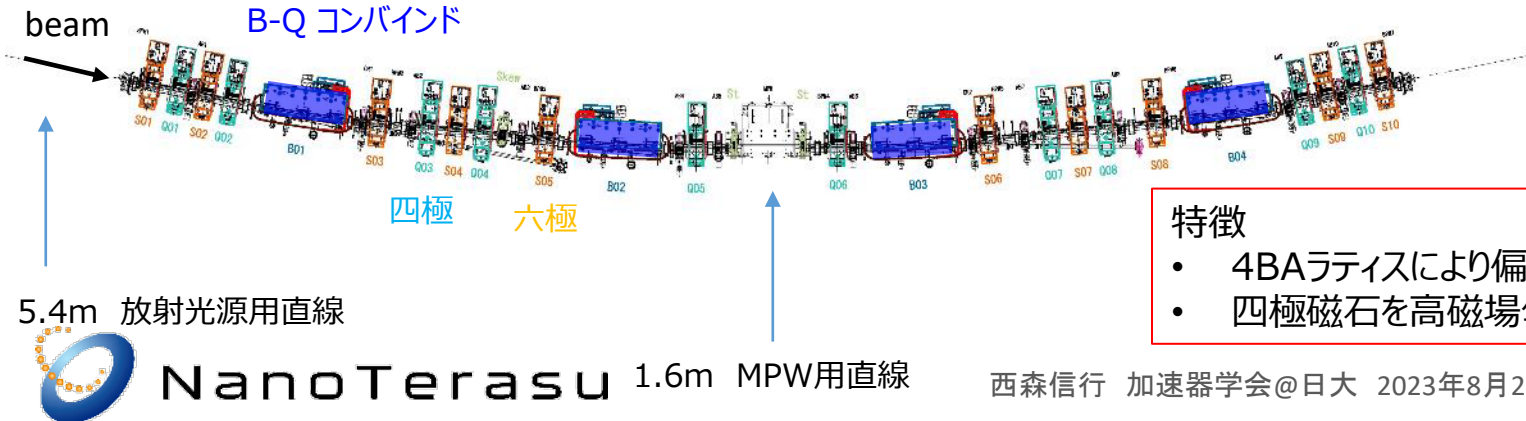
リングパラメータ	
自然エミッタンス	1.14 nm.rad
自然エネルギー広がり	0.084 %
ベータatronチューン (ν_x, ν_y)	(28.17, 9.23)
自然クロマチシティ (ξ_x, ξ_y)	(-60.50, -40.99)
減衰分配数 (J_x, J_y, J_z)	(1.389, 1.0, 1.611)
高周波加速周波数	508.759 MHz
ハーモニック数	592
自然バンチ長	2.92 mm (9.74 ps)

磁石	最大磁場	数/セル	数/リング
B-Q コンバインド	0.87 T -7.1 T/m	4	64
四極	49 T/m	10	160
六極	1540 T/m ²	10	160

水平収束: 四極8台
 垂直収束: B-Qコンバインド4台、四極2台

特徴

- 4BAラティスにより偏向磁石内のビーム広がりを抑制し高輝度電子ビームを実現
- 四極磁石を高磁場勾配にするため、狭小な電子ビーム室 (SP8の約1/3)



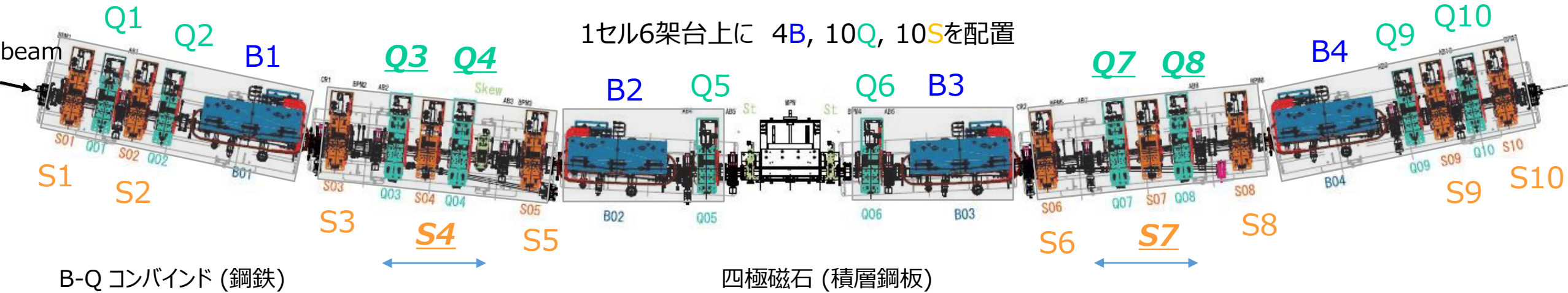
3. ナノテラス蓄積リング電磁石

小原脩平 THOB11
近藤力 THOB14

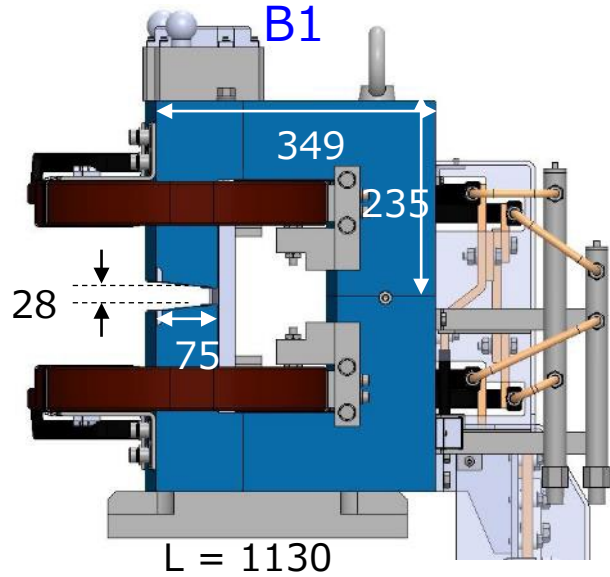


コンセプト

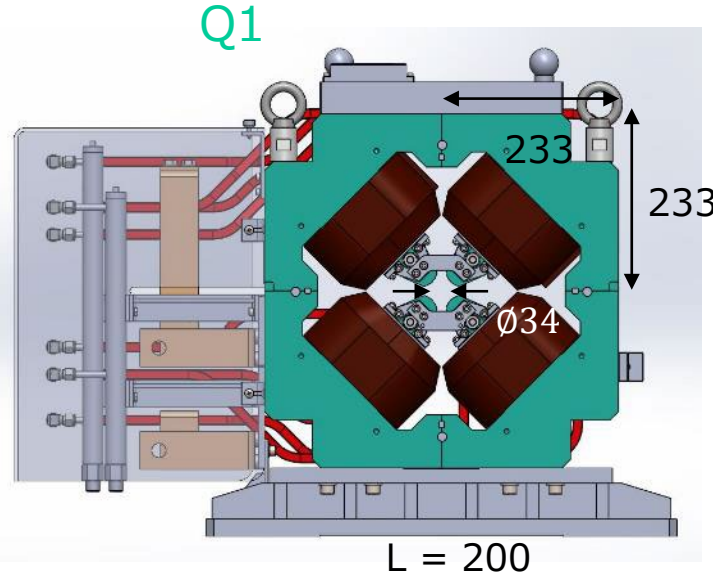
- 低コストと高保守性を念頭に、できるだけ同じタイプの電磁石と電源を設計・製作・設置



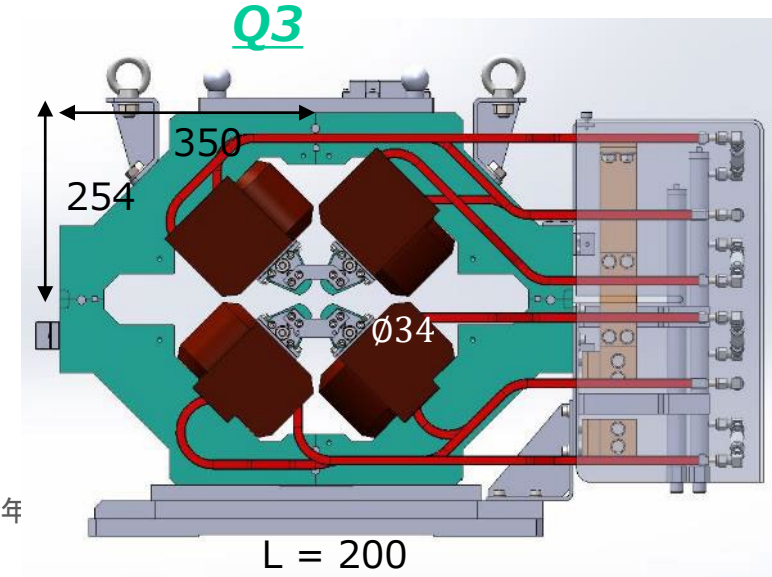
B-Q コンバインド (鋼鉄)



四極磁石 (積層鋼板)



2023年



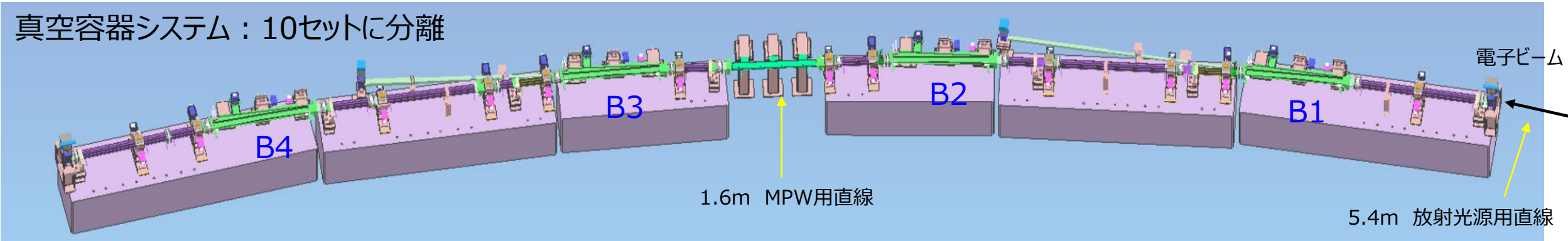
3. 蓄積リング真空

目標: 400mAで20hのガス散乱寿命

保坂勇志 FRP28

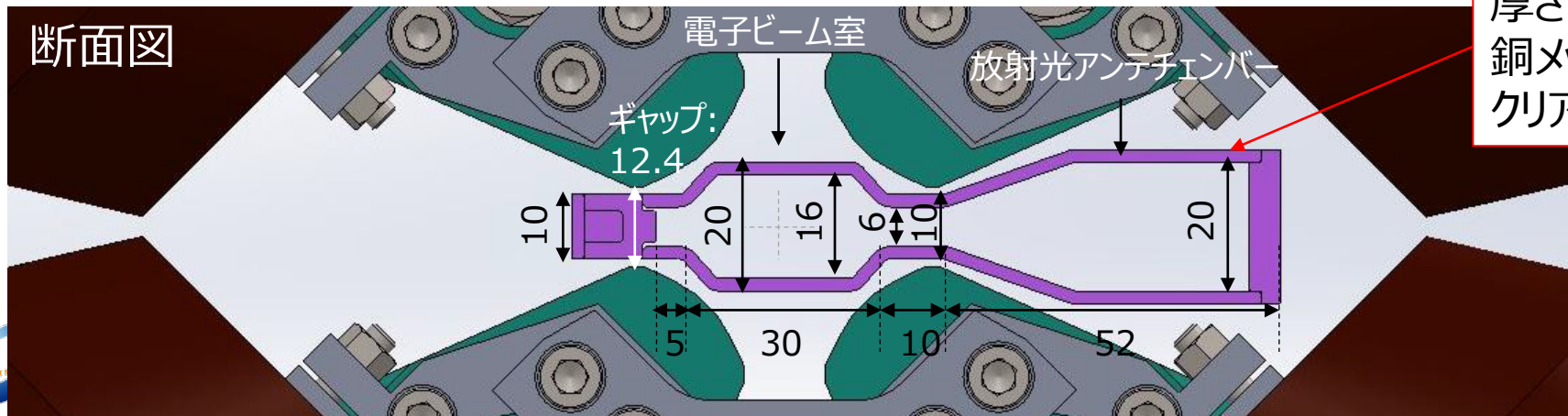


真空容器システム：10セットに分離



特徴

- 厚さ2mmのステンレス（316L）容器を採用：狭小ギャップ対応のため。インピーダンス抑制のため内面に銅メッキ。

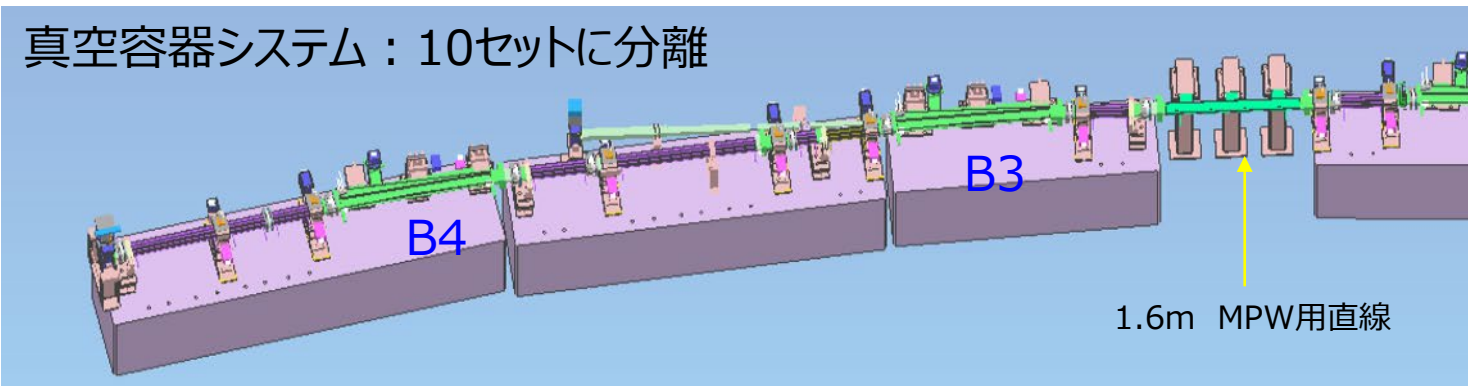


SUS 316L
厚さ: 2mm
銅メッキ: 0.1mm
クリアランス: 1.2mm

3. 蓄積リング真空

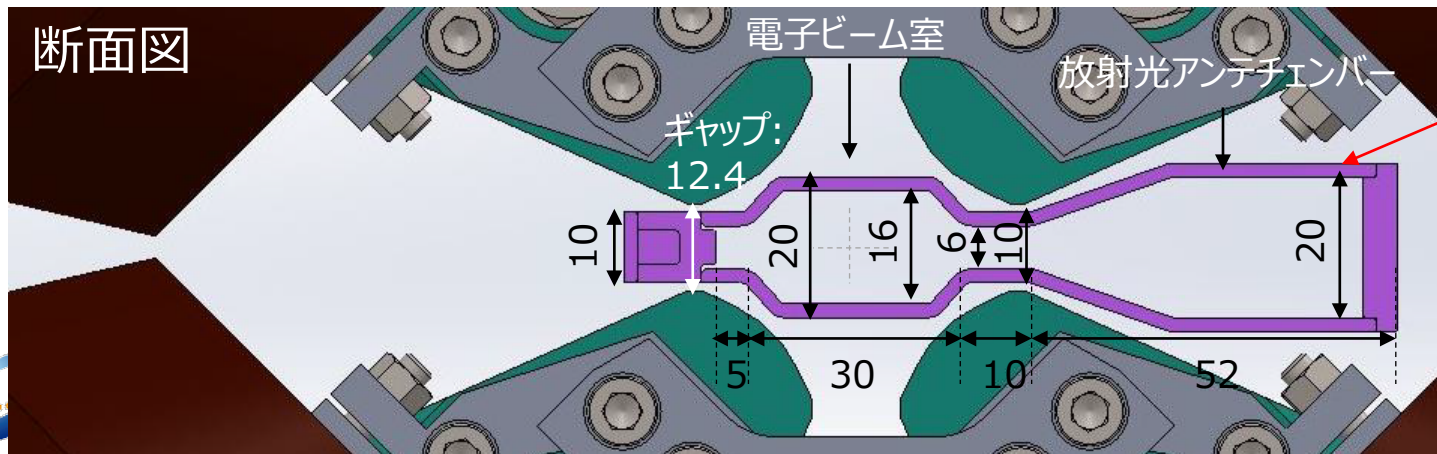
目標：400mAで20hのガス散

真空容器システム：10セットに分離



特徴

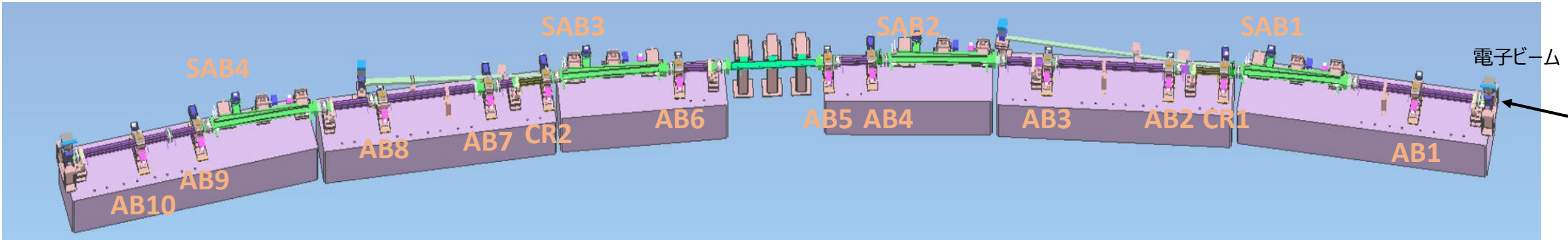
- 厚さ2mmのステンレス（316L）容器を採用：狭小ギャップ対応のため。インピー



3. 蓄積リング真空

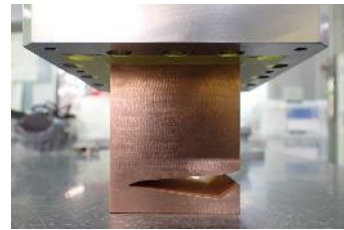
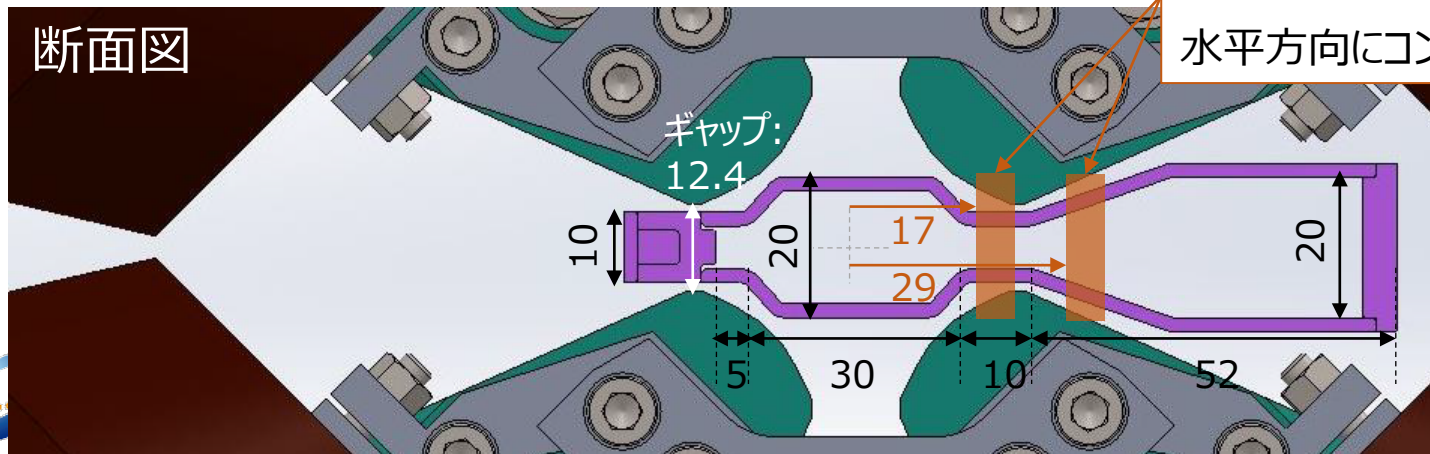
目標: 400mAで20hのガス散乱寿命

保坂勇志 FRP28



特徴

- 厚さ2mmのステンレス (316L) 容器を採用: 狭小ギャップ対応のため。インピーダンス抑制のため内面に銅メッキ。
- 光アブソーバと真空ポンプのセットを16箇所配置し、効率的に放射光を吸収。
- 水平方向にもコンパクトな真空容器。



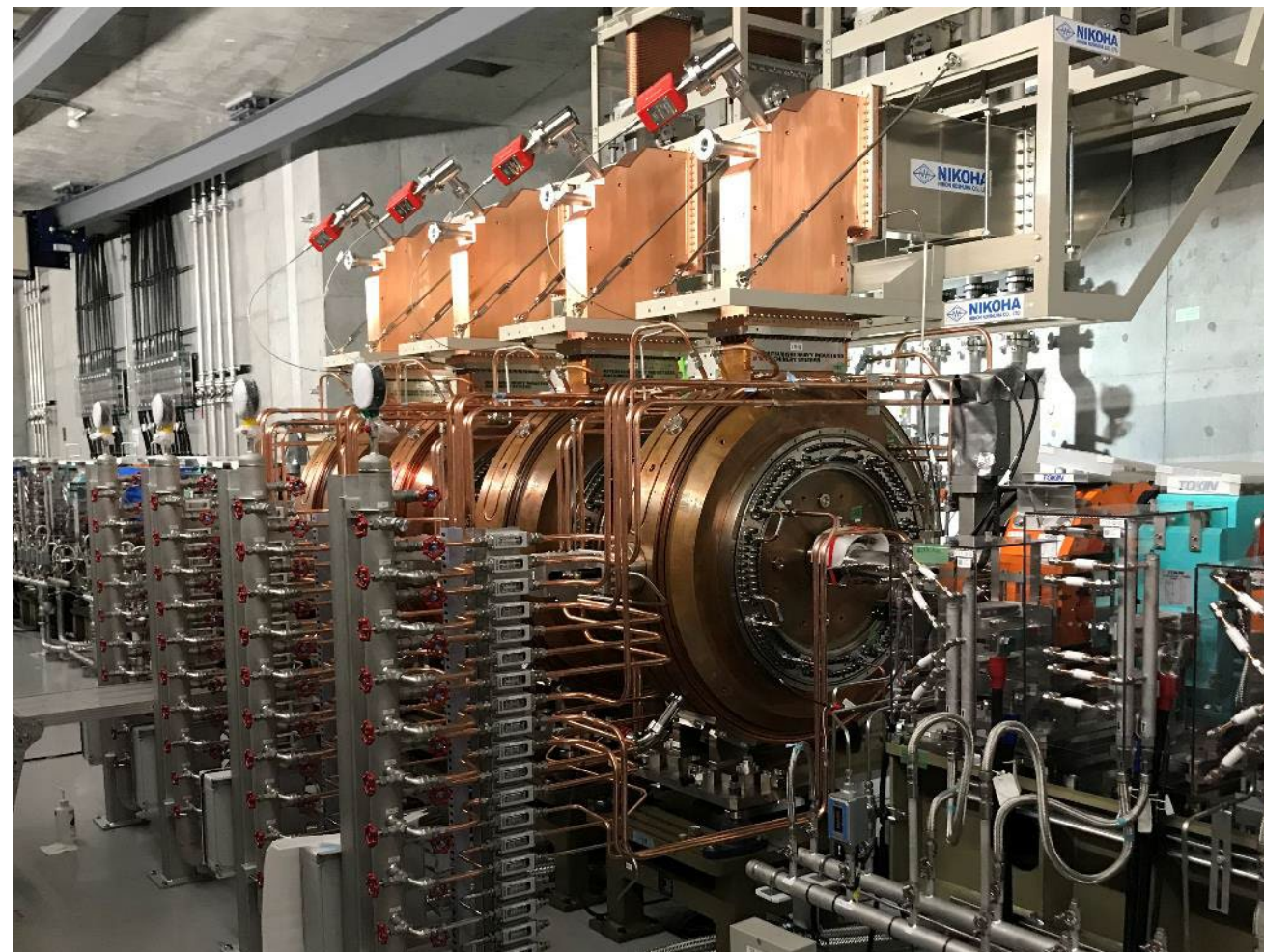
1500Ahドーズ後の平均真空度は400mAで 6×10^{-8} Pa (CO) と評価され、22hガス散乱寿命に相当。

3. 蓄積リング空洞

特徴

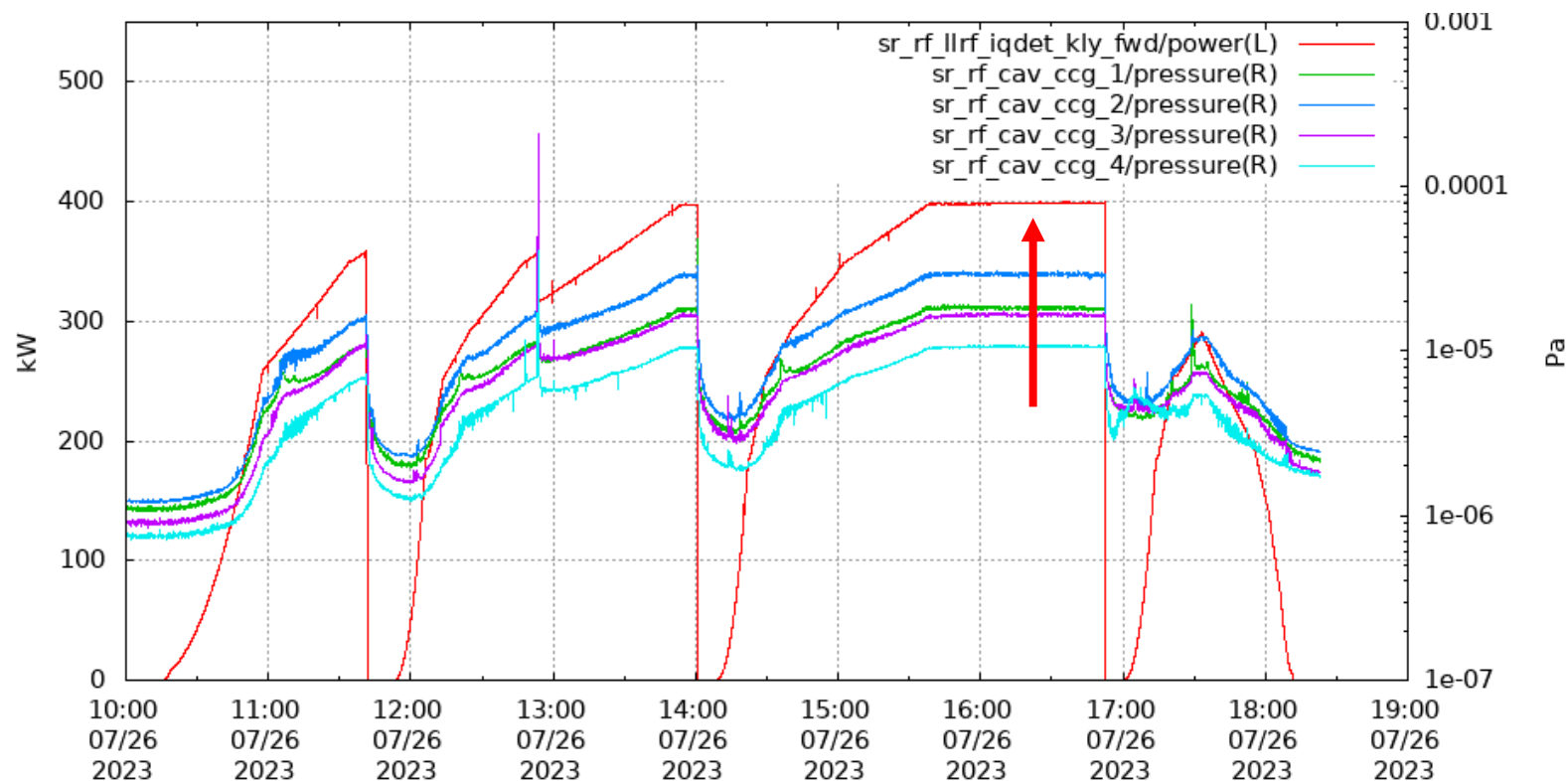
- HOM damped TM020空洞 (世界初実装)
- 4空洞で3.2MV加速 10時間以上のタウシエック寿命

パラメータ	仕様
周回周波数	859.4 kHz
RF周波数	508.759 MHz
エネルギーロス	1.26 MeV/turn (0.62 MeV for bend, 0.64 MeV for ID)
空洞電圧	3.2 MV (0.8 MV per cavity)
シンクロナス位相	160 - 170°
シンクロトロン周波数	6.0 kHz
熱損失	400 kW/4空洞
入力RFパワー	900 kW/4空洞
空洞長 (s方向)	0.45 m/空銅



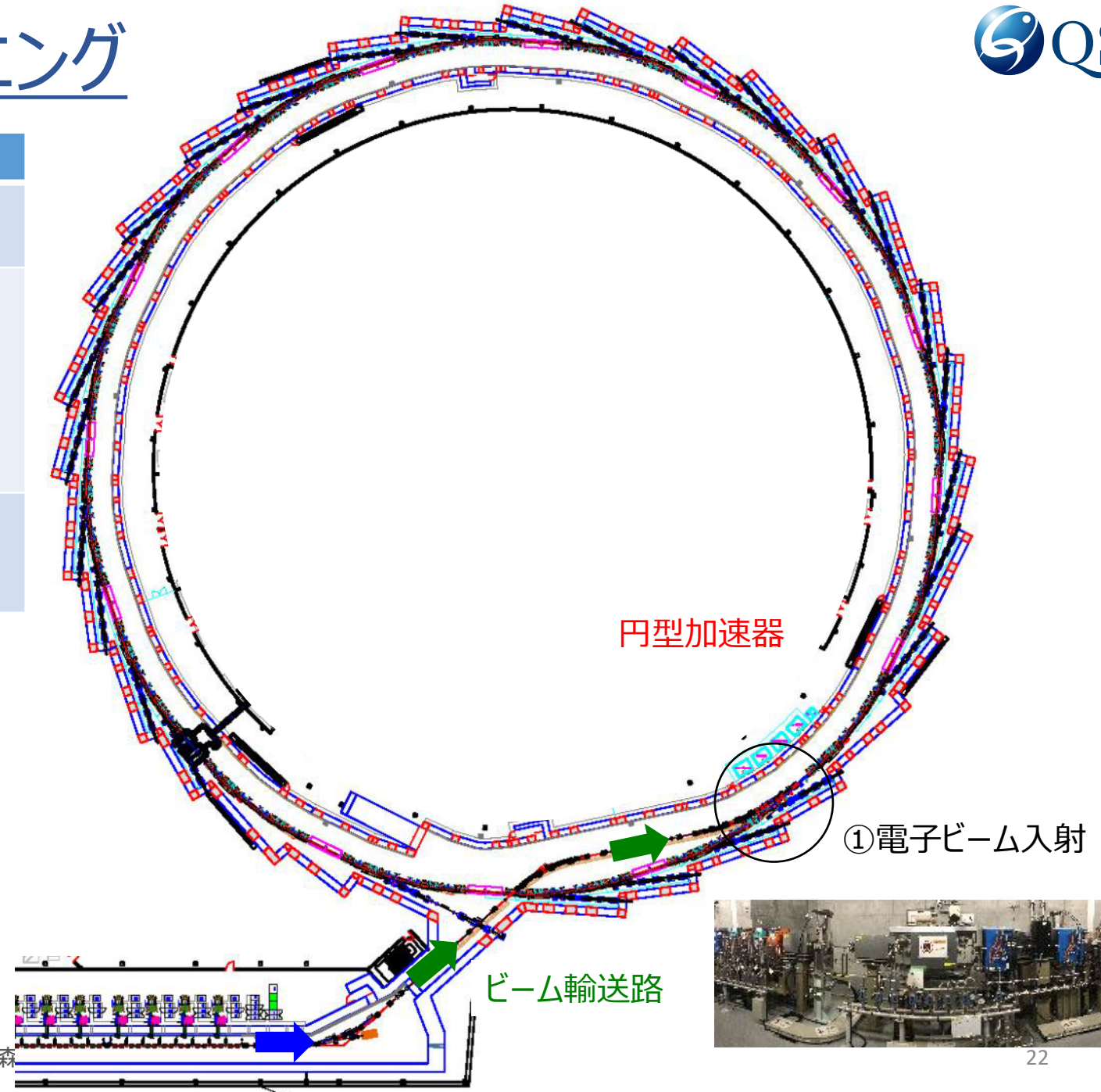
3. 蓄積リング空洞コンディショニング

月日	イベント
2023.5.29	蓄積リング棟 放射線管理区域 空洞RFコンディショニング開始
2023.7.27	399kWで1時間維持に成功
2023.8.1~	260kWで通常運転 夜間運転時にも落ちることはない



4. 円型加速器コミッショニング

月日	イベント
5月29日	円型加速器トンネルの放射線管理区域設定 円型加速器へ向けた電子ビーム輸送開始
6月8日	円型加速器へのビーム入射開始



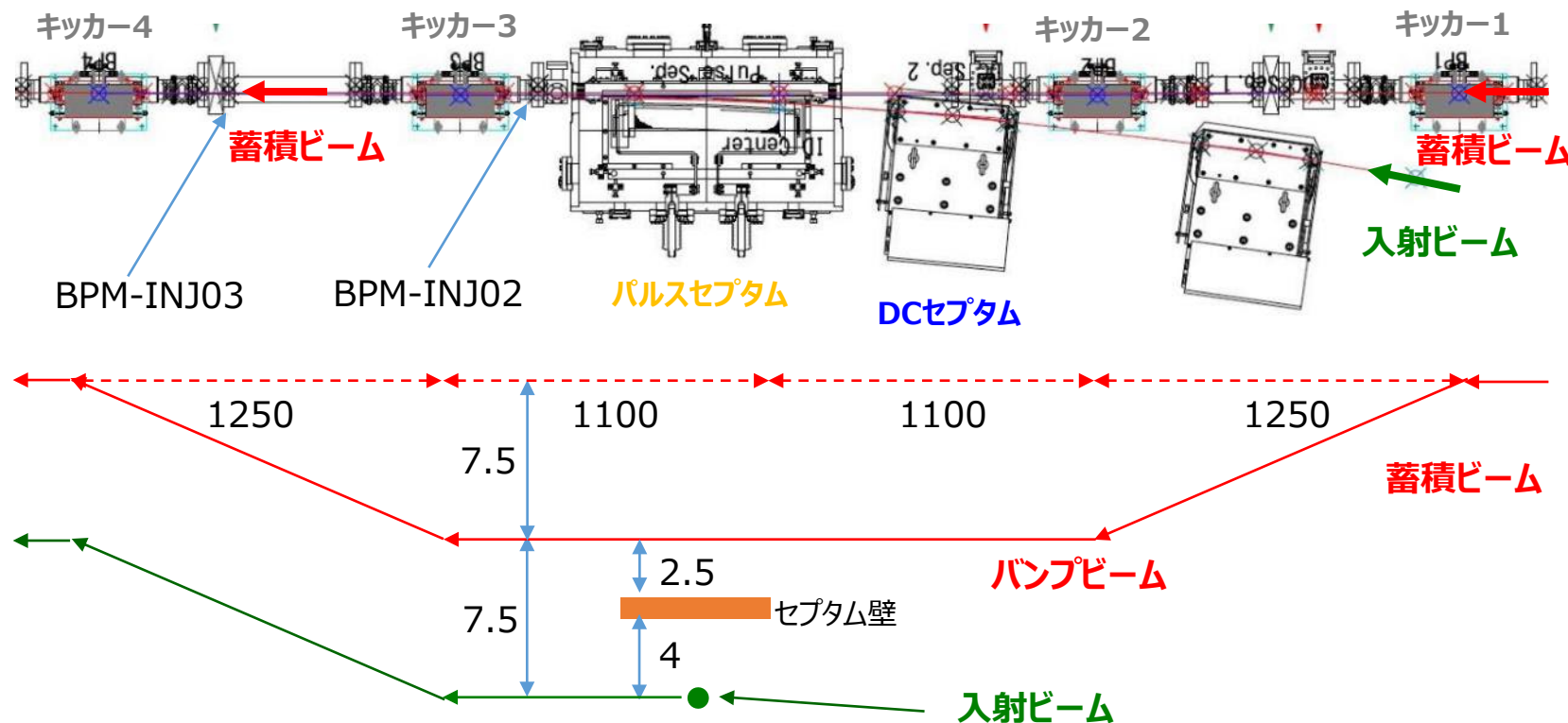
4. 電子ビーム入射 (off-axis入射)

小原脩平 THOB11



特徴

- 小振幅 (真空封止パルスセプタム) パルスセプタムギャップは2mm
- 蓄積ビームを揺らさない透明入射 (電源1台でキッカー2台駆動)



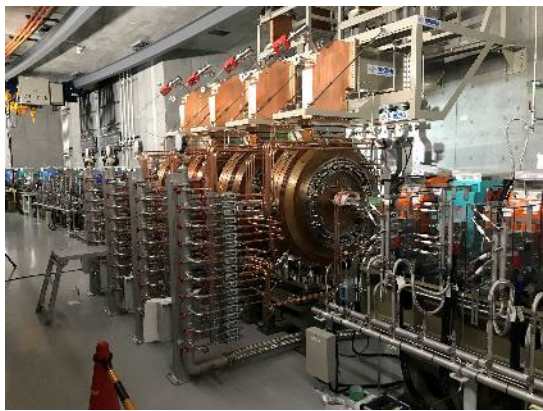
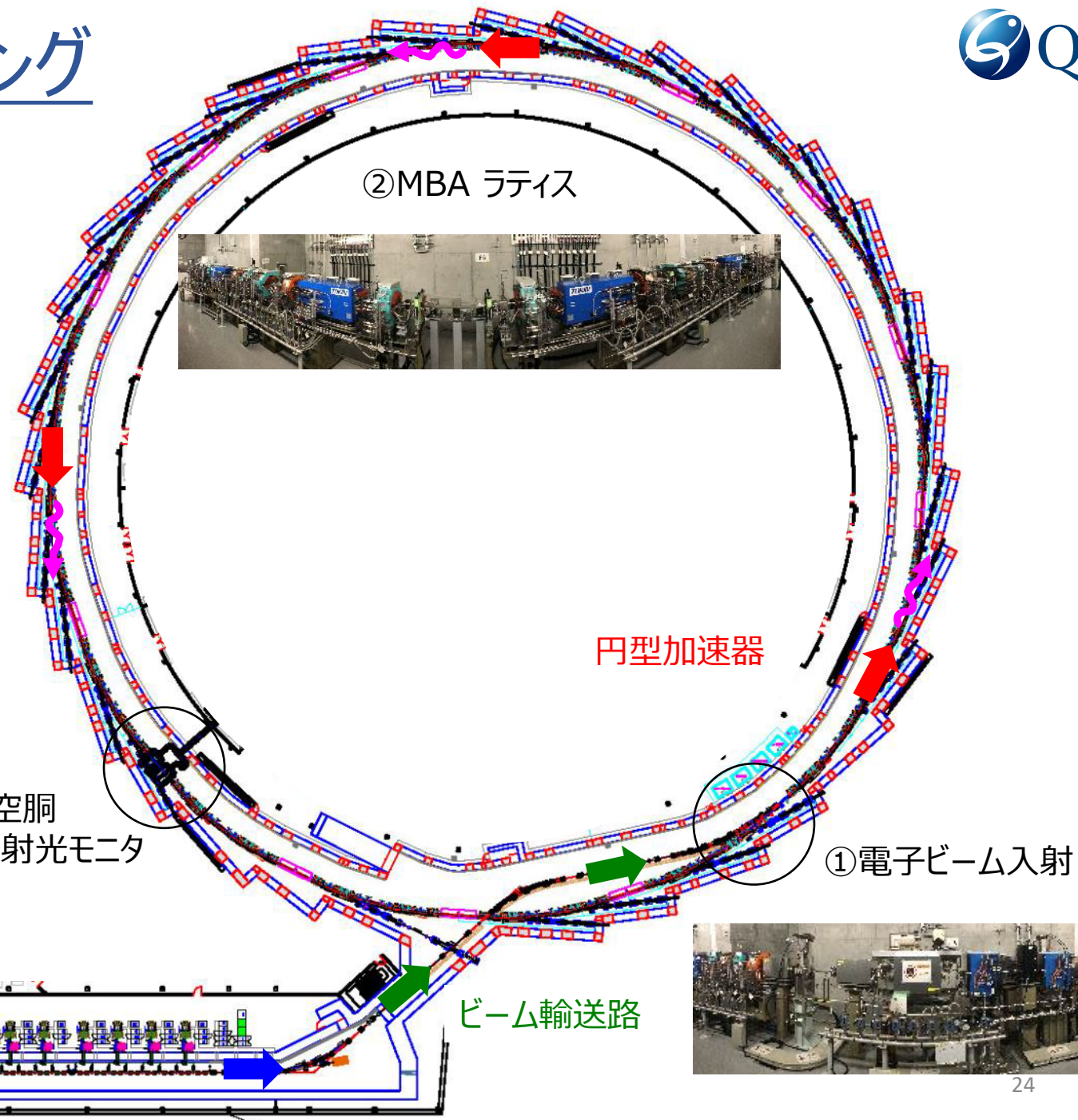
磁石	B (T)	長さ (mm)	角 (mrad)	パルス幅 (μs)
DCセプタム	1.2	400	48	-
パルスセプタム	1.4	500	70	10
キッカー	0.2	300	6	3

コミッシュニング

手順	調整事項	モニター	備考
1	パルスセプタムのタイミング (ビームが最も曲げられるよう)	BPM-INJ02	キッカー-OFF
2	パルスセプタムの磁場強度 (INJ02と03で同じ水平位置)	BPM-INJ02 BPM-INJ03	キッカー-OFF
3	キッカー3,4のタイミング (ビームが最も蓄積軌道側になるよう調整)	BPM-INJ03	キッカー-ON
4	キッカー3,4の磁場強度 (リング最初のBPMで位置確認)	BPM-C04-01	キッカー-ON

4. 円型加速器コミッショニング

月日	イベント
5月29日	円型加速器トンネルの放射線管理区域設定 円型加速器へ向けた電子ビーム輸送開始
6月8日	円型加速器へのビーム入射開始 蓄積用加速空洞オフで 300周回 を観測 ※電子ビームは1周で約600個の1keV-X線相当の放射光を発生(3GeVの0.02%相当) 300周回で6%、 $\eta=0.18\text{m}$ で11mm内側に移動 ※高精度アライメントによる
6月16日	蓄積用加速空洞オンで 電子ビーム蓄積 に成功 電子ビームモニタ用の 放射光 を観測



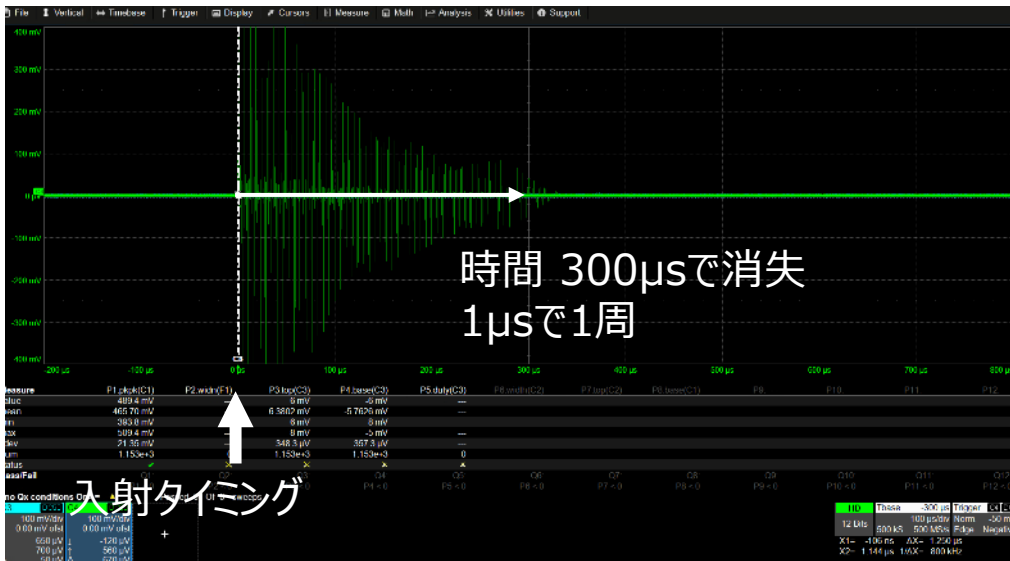
③蓄積用加速空洞
電子ビーム用放射光モニタ



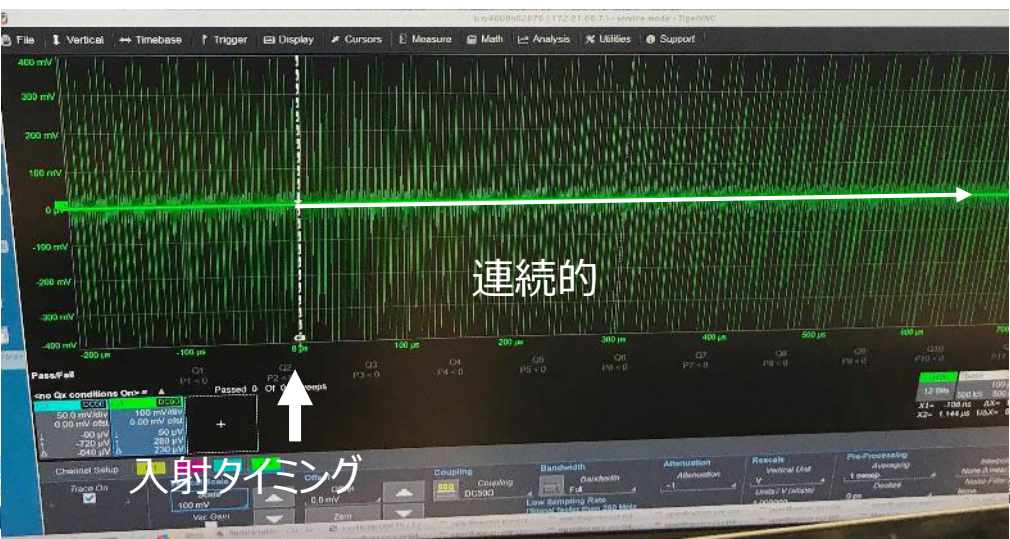
①電子ビーム入射

4. ファーストライト

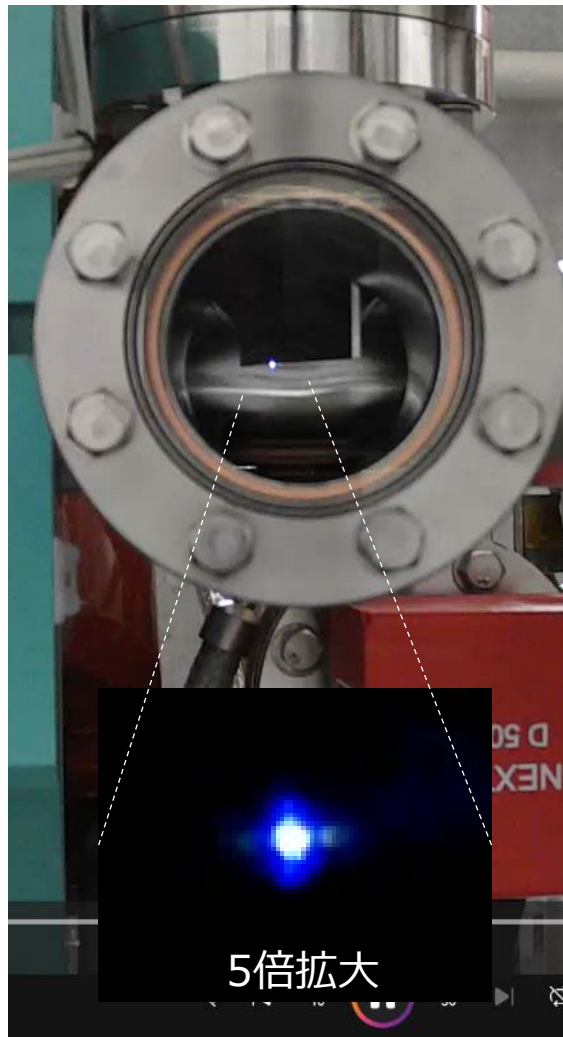
BPM信号 300周回時



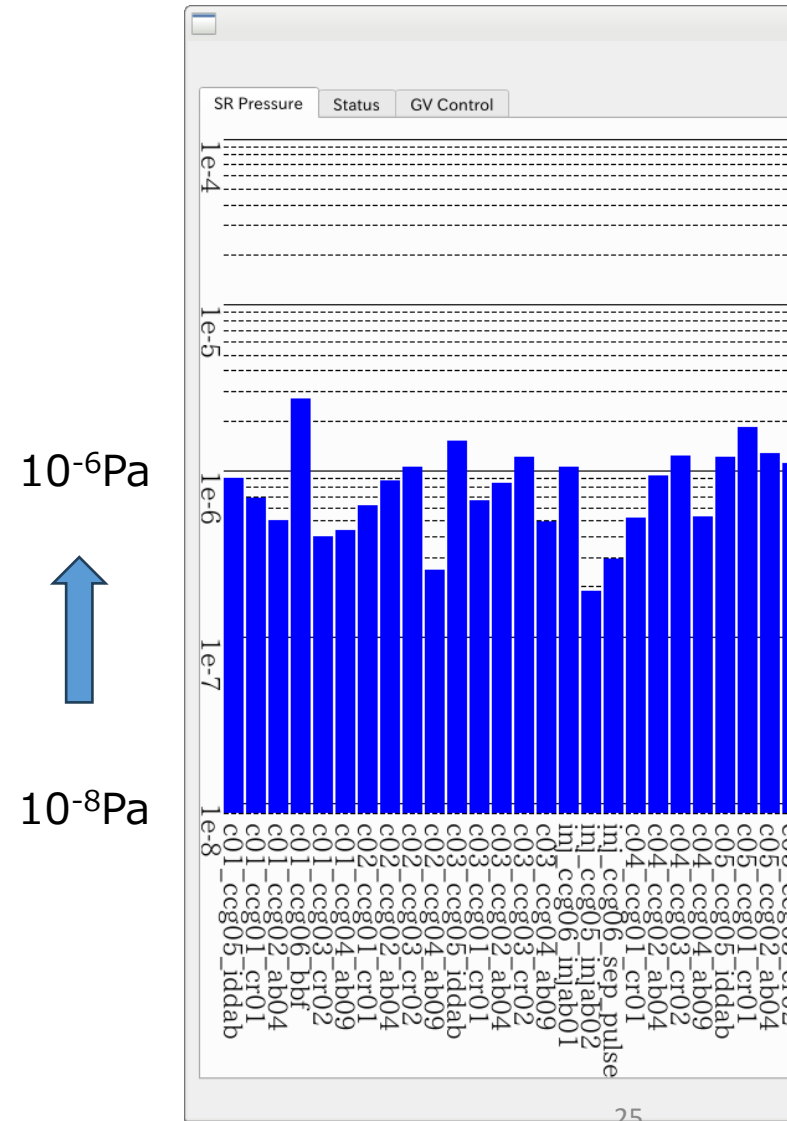
BPM信号 蓄積時



3PWウイグラー光

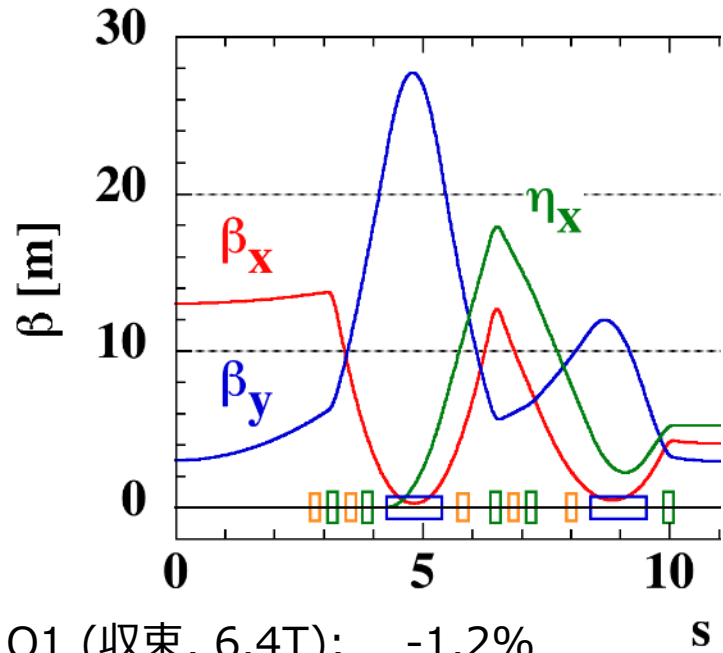


リング真空度



4. チューン、COD、周波数補正

【チューン補正】



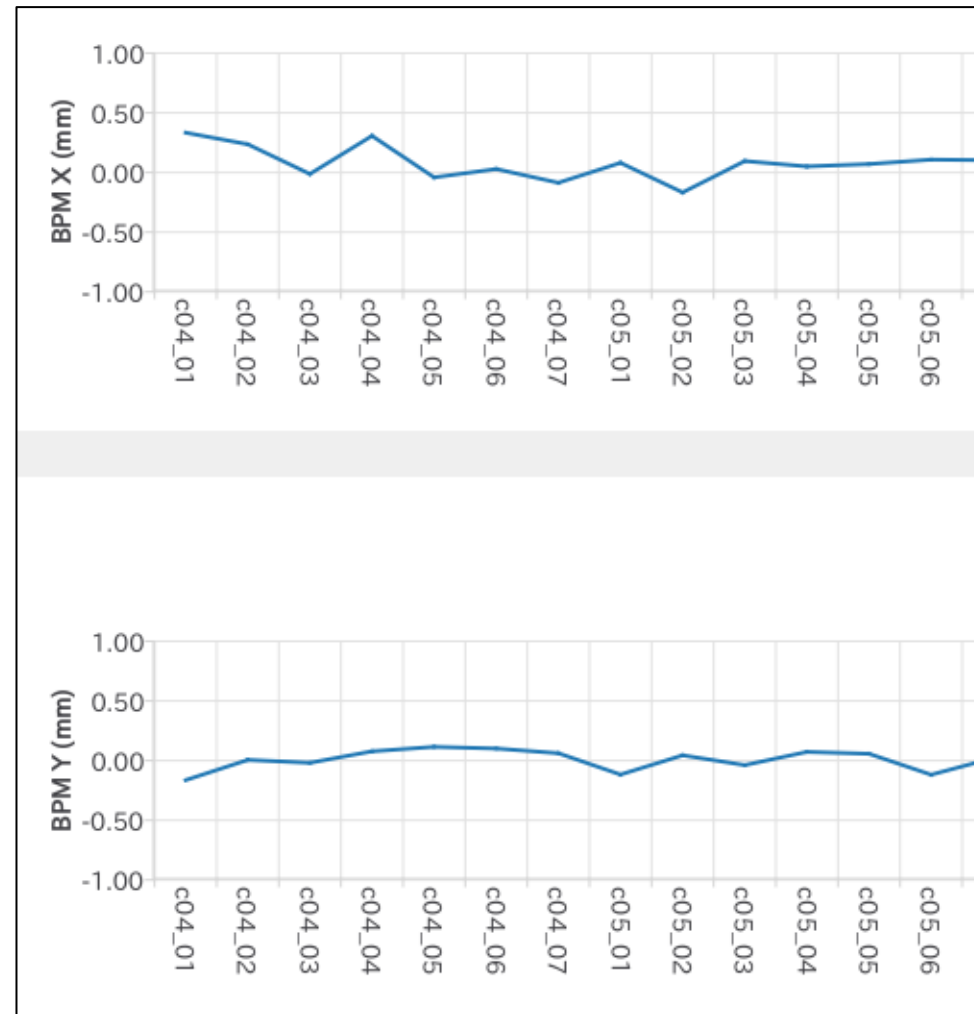
Q1 (収束, 6.4T); -1.2%

Q2 (発散, -0.47T); -11%

	v_x	v_y
model	28.17	9.23
BBF	.1675	.2264
COD変化	28.13	9.23

【COD補正】

±0.5 mm 以内の軌道



【周波数補正】

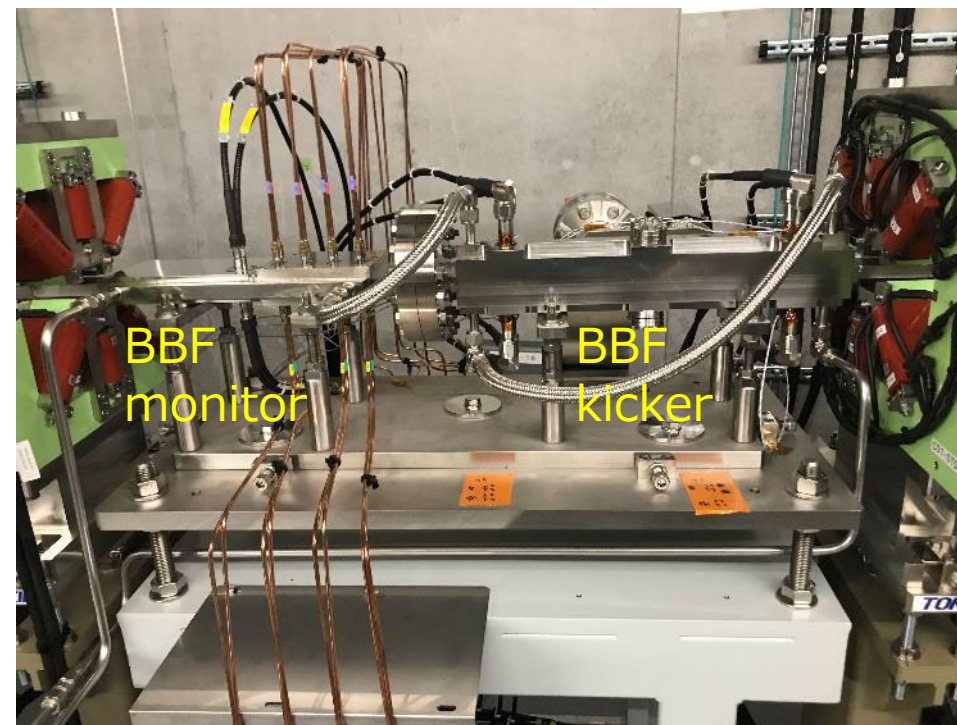
初期状態でビーム軌道が外側 ($\Delta C \sim 1\text{mm}$)

→SR-RF周波数を+1kHzにして補正

4. 電子ビームモニタ

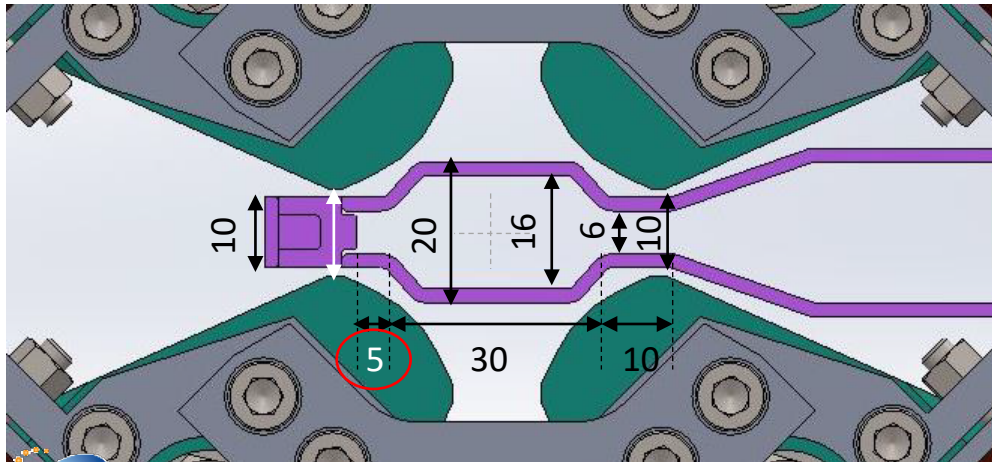
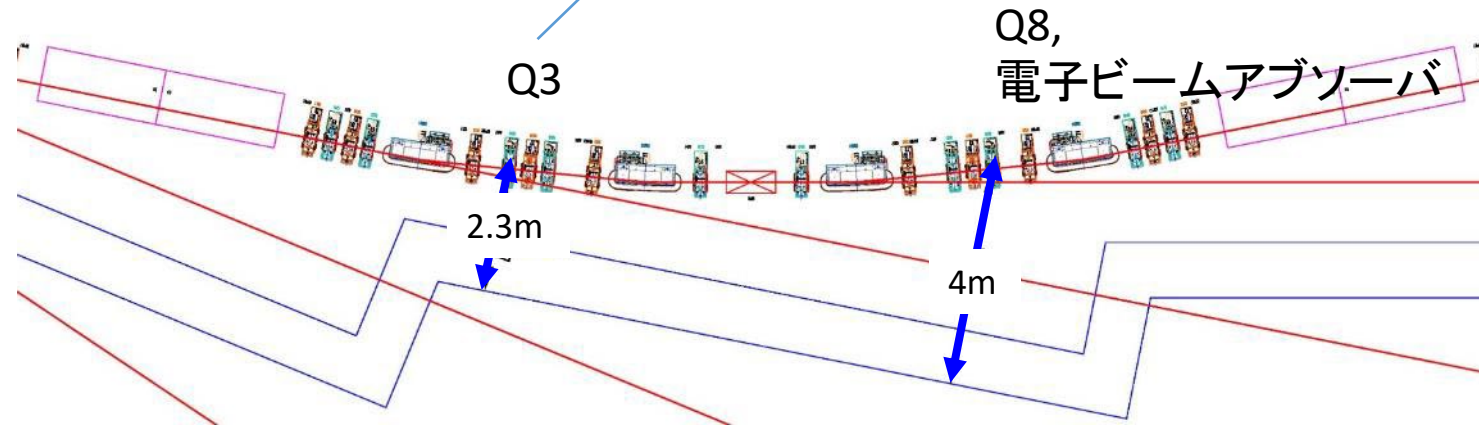
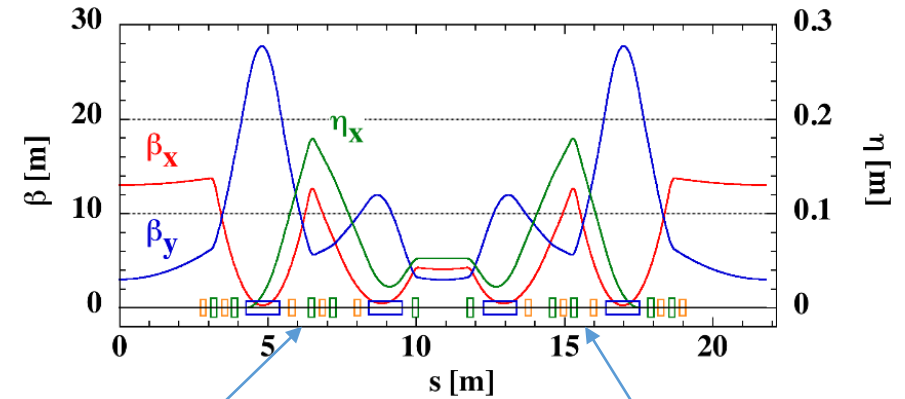
機器	数量	用途
BPM (Beam Position Monitor)	7台×16セル	COD、チューン、周長、ディスパージョン、…
XPC (X-ray Pinhole Camera)	1	電子ビームサイズ (エミッタンス)
DCCT	2	蓄積電流
BBF (Bunch by Bunch Feedback)	1	チューン、横方向不安定性抑制
バンチ電流測定用BPM	1	アドレス毎のバンチ電流

前坂比呂和 THOA6
上島考太 THOA5



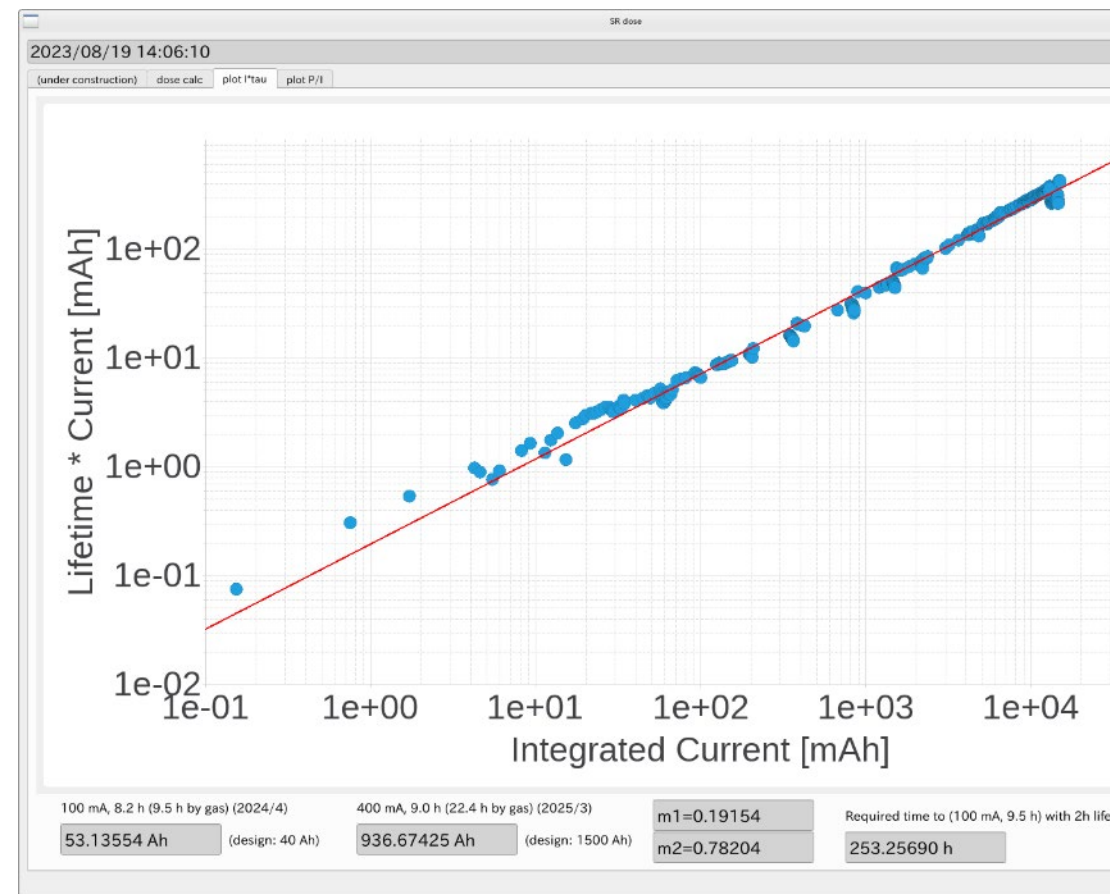
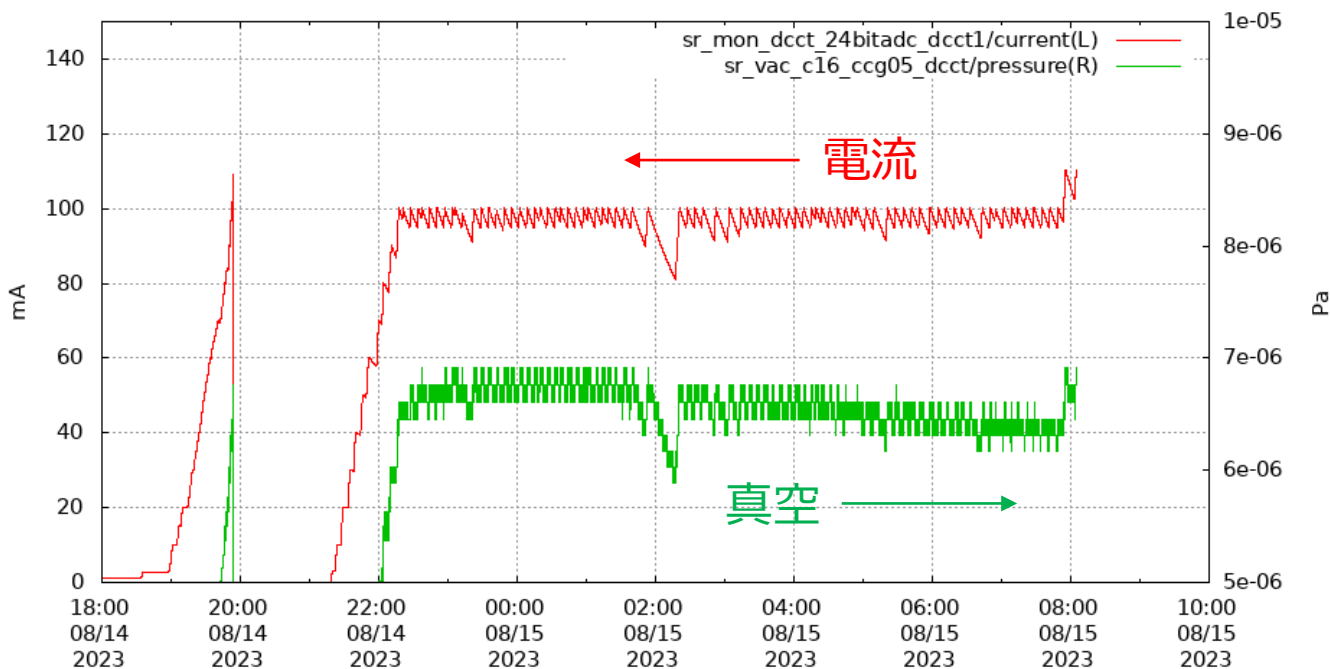
4. 電子ビーム廃棄システム

- 高密度蓄積電子ビームの廃棄時にビームを広げないと真空容器損傷を招く恐れ
- 安全な廃棄システム起動後に3mA以上の積上げ開始
- 廃棄プロセス：RF空洞断 ⇒ ビームシェーカーで垂直に拡大 ⇒ 電子ビームアブソーバと散乱してさらに拡大
 - グラファイト製電子ビームアブソーバを分散関数最大の場所に設置し、他より6mm突き出して最初にビームにあて拡大
 - BBFシステムをRF断と共に垂直ビームシェーカーとして起動し、垂直にビームを300倍に拡大



4. 焼出し運転

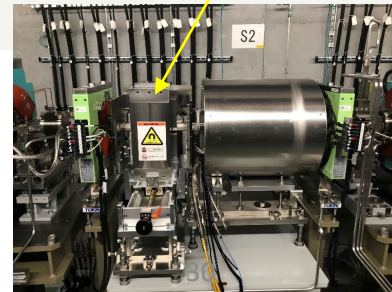
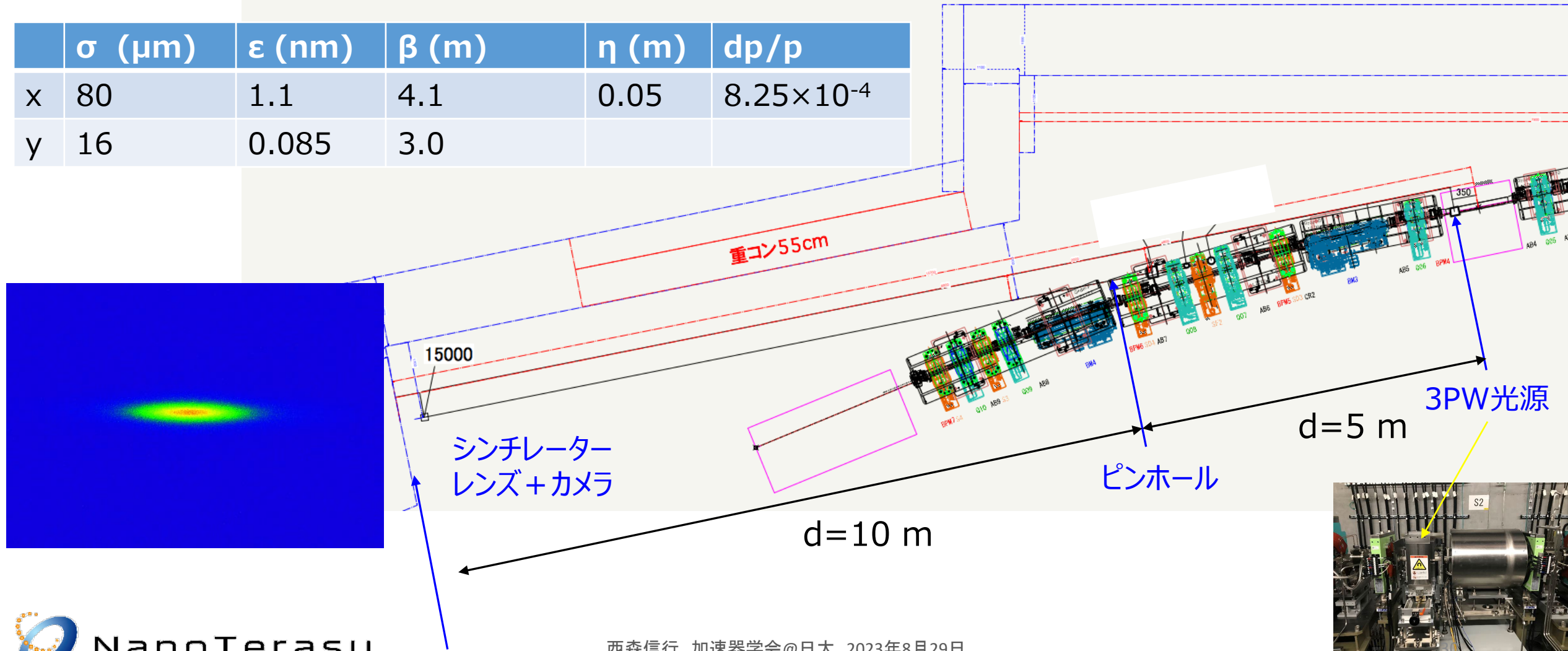
- 偏向磁石からの放射光でアブソーバ内の吸着ガスを光刺激脱離で枯らし、徐々に積み上げ電流を増やすプロセス
- Top-up自動積み上げ、線型加速器からの入射電荷は約0.1nC
- 焼出し時の真空の目安は円型加速器全てのCCGが 10^{-5} Pa未満
- 8/1から夜間焼出し運転を開始し、現在までに10Ah以上のdose、電流・寿命400mAh、蓄積電流100mA達成



4. エミッタンス

- 3PWからの硬X線像をピンホールカメラで撮像し3PW中の電子ビームサイズを測定@100mA
- 水平・垂直エミッタンス共に暫定測定値だが、水平は設計通り

	σ (μm)	ε (nm)	β (m)	η (m)	dp/p
x	80	1.1	4.1	0.05	8.25×10^{-4}
y	16	0.085	3.0		



5. 加速器装置の据付調整

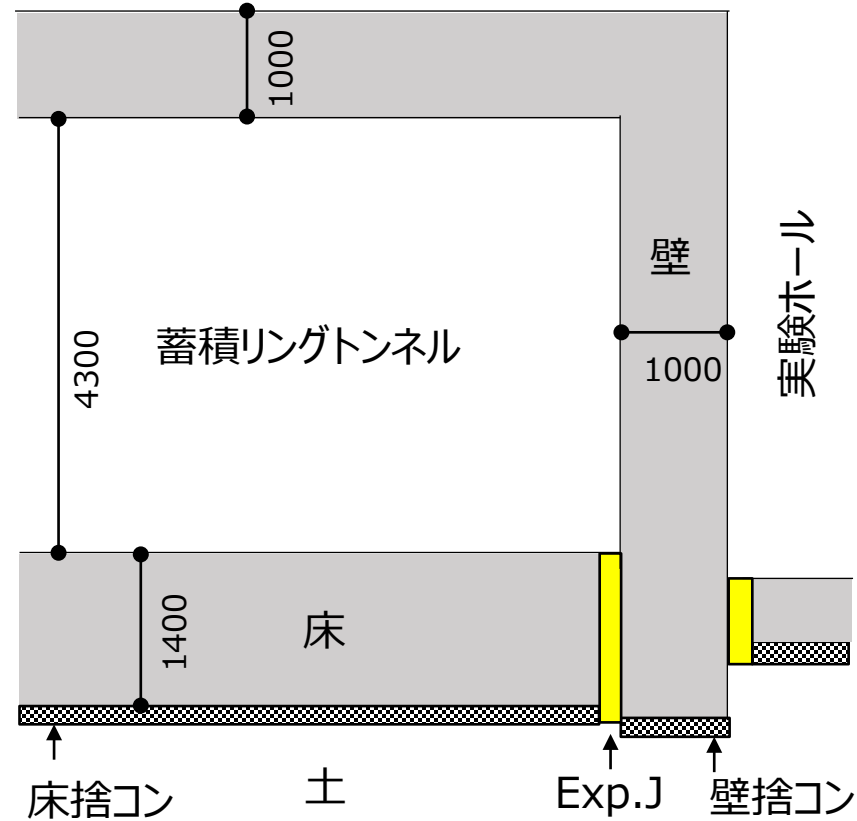
- 2021年12月～2023年5月まで延べ18ヵ月約30社の据付調整
- 綿密な作業調整・工程管理による安全確保
- 朝礼で日々の作業調整（繁茂期には100人以上の作業員）
- コロナ禍のなか 無事故・無災害で完了



	2022 4月	7月	10月	2023 1月	4月
電磁石 (B4,Q10,S10) ×16セル	搬入・アライメント	据付調整	配線	半割復旧	
真空 16セル		搬入設置	ベーキング	冷却水配管	
加速空洞 4台		CWクライストロン設置	導波管設置	空洞大電力試験@SP8	据付調整
入射部			据付調整		
輸送部			据付調整		
線型加速器 Cバンド40本 電源21セット		加速器据付調整	パルスクライストロン電源据付調整		

5. 建屋の工夫

- V字柱による広い実験ホール確保
- Exp. Jointによるリングトンネル床振動抑制
- 樹脂床施工による磁石架台振動抑制と 迅速な磁石架台設置
- 冷却水温度安定度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ を目標



5. 世界の次世代放射光施設

建設順	施設	国	稼働年	E (GeV)	I (mA)	ϵ (nmrad)	周長(m)	Lattice	セル数	入射器	直線	現ID数	現ID数/周長 (本/km)
1	MAX IV	スウェーデン	2016.6~	3	400	0.33	528	7BA	20	Linac	4.5m×20	9	17
3	Sirius	ブラジル	2020.10~	3	100 ⇨350	0.251	518.396	5BA	20	Booster LI:150MeV	7.5m×5 6.5m×15	6	11.5
4	NanoTerasu	日本	2024.4~	3	400	1.14	348.843	4BA	16	Linac	5.4m×16 1.6m×16	10	28.7
2	ESRF-EBS	EU	2020.8~	6	200	0.134	843.977	7BA	32	Booster LI:200MeV		多数	
5	APSU	USA	2024.4~	6	200	~0.03	~1104						
6	SPring-8 II	日本		6	200	~0.1	~1440	5BA	44	SACLA		~62	

【NanoTerasuの方向性】

- 高いユーザー利用 (BL) 数、稼働率
- 高いコストパフォーマンス
- 軟X線FELへの拡張性

【世界の方向性・新技術】

- On-axis入射
- 永久磁石

5. ナノテラス関連発表

講演番号	講演タイトル	講演者	所属
8/29 (火)			
TUP32	加速空洞立ち上げ時の周波数変調システム	大島隆	JASRI
8/30 (水)			
WEOA7	次世代放射光施設NanoTerasuの3GeV線型加速器ビームコミッショニング状況	安積隆夫	QST
WEP09	GigEカメラ制御システムの改良とSACLAおよびナノテラスのスクリーンモニタへの適用	清道 明男	JASRI
WEP12	NanoTerasu加速器安全インターロックシステムの構築	前川和久	日立造船
WEP32	ナノテラス向けCバンド高周波パルス圧縮器の高周波性能	奥山 恒幸	日本高周波
WEP56	高次共振モード減衰型空洞の高次モードの測定とシミュレーションとの比較	斗米貴人	JASRI
8/31 (木)			
THOA5	ナノテラスにおける3極ウイグラーを用いた電子ビーム診断システム	上島考太	QST
THOA6	ナノテラス蓄積リング用ビーム位置モニタシステムの構築と立ち上げ	前坂比呂和	理研
THOB9	NanoTerasu蓄積リング用大電力高周波加速システムの現状	高橋隼也	QST、NAT
THOB11	3GeV次世代放射光施設ナノテラスの蓄積リング電磁石及び入射部電磁石の設置と試運転状況	小原脩平	QST
THOB14	デジタル制御による電磁石電源の開発および次世代放射光施設への展開	近藤力	JASRI
THP10	NanoTerasu真空制御システムの構築	黒木教平	日立造船
THP49	次世代放射光施設NanoTerasu線型加速器・電子入射部のビーム性能	安積隆夫	QST
9/1 (金)			
FRP28	次世代放射光施設NanoTerasu蓄積リング真空チェンバの製作及び設置	保坂勇志	QST

【達成事項】

- ・ ナノテラス加速器の据付調整を無事故・無災害で完了
- ・ 線型加速器コミッショニングで3GeV達成
- ・ 国内初MBA円型加速器で蓄積に成功
- ・ 蓄積電流100mAに到達し、焼出し運転も順調に進捗
- ・ 水平エミッタンス@100mAは1.1nmrad(設計値)

【今後の予定】

- ・ 挿入光源調整
- ・ BBA後、精密軌道調整
- ・ 400mA大電流化

【謝辞】 ナノテラス加速器に関わった全ての皆様に感謝致します。

【ナノテラス加速器Grは人材募集中】

