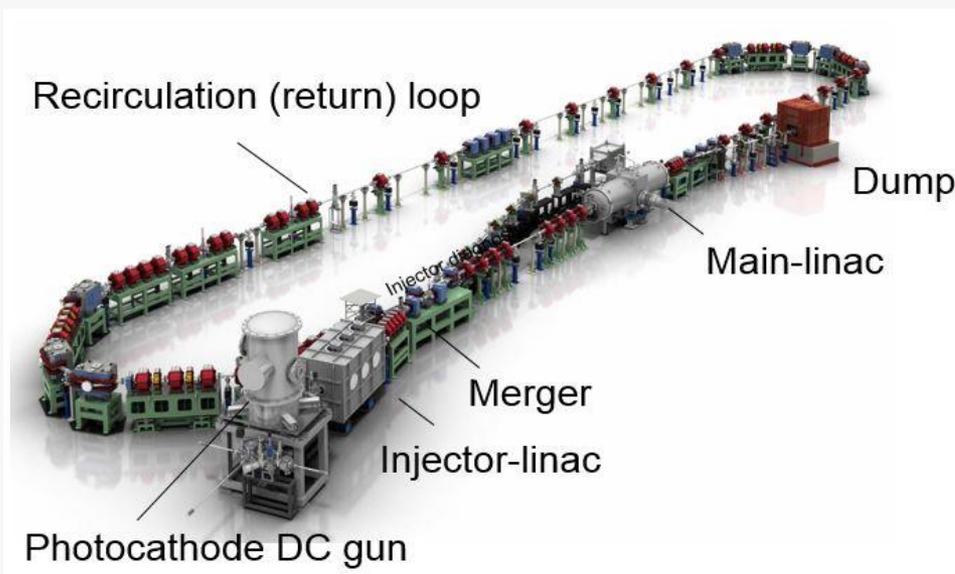


コンパクトERLにおける ビーム電流約1 mAの運転

坂中章悟^{A)}, 芳賀開一^{A)}, 羽島良一^{B)}, 原田健太郎^{A)}, 本田洋介^{A)}, 河田洋^{A)}, 小林幸則^{A)},
許斐太郎^{A)}, 松村宏^{A)}, 宮島司^{A)}, 中村典雄^{A)}, 西森信行^{C)}, 野上隆史^{A)}, 帯名崇^{A)}, 下ヶ橋秀典^{A)},
阪井寛志^{A)}, 島田美帆^{A)}, 田中オリガ^{A)}, 高井良太^{A)}, 梅森健成^{A)}, 山本将博^{A)}

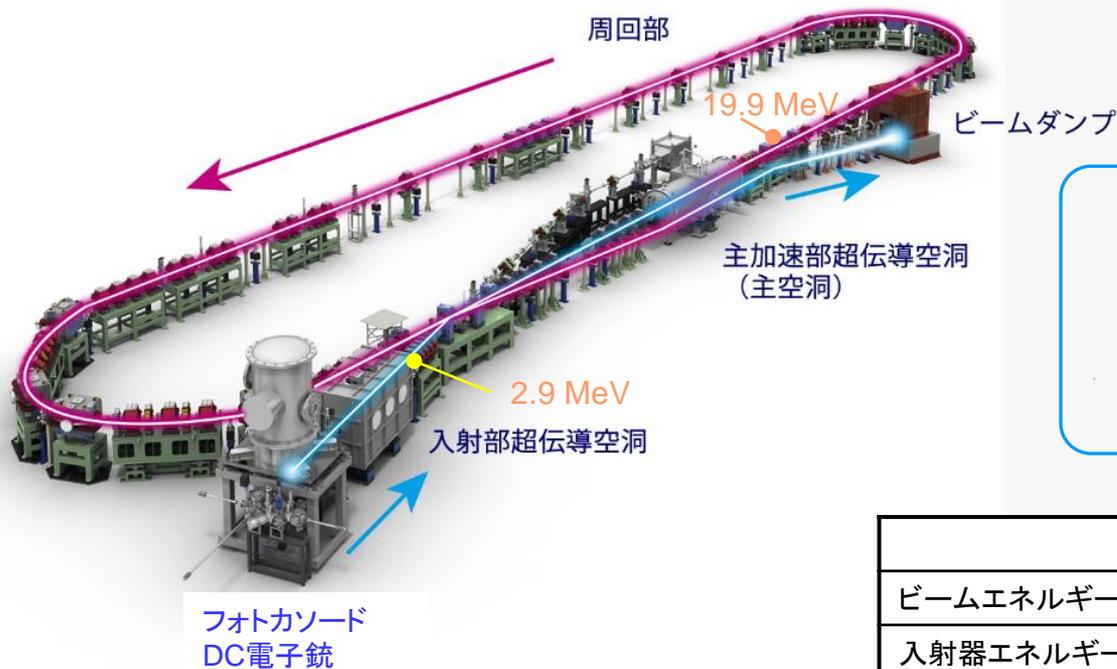
^{A)} 高エネルギー加速器研究機構(KEK), ^{B)} 量子科学技術研究開発機構(QST), ^{C)} 東北大学



内容

1. コンパクトERLの概要
2. ビーム電流増強の準備
3. 大電流運転時のビーム調整
4. cERL大電流運転
5. まとめ

Section 1: コンパクトERL(cERL) の概要



目的:
ERL(エネルギー回収リニアック)
放射光源のために必要な加速器
技術の実証を行う。

必要な機能:

- 1) 低エミッタンス (< 1 mm·mrad)かつ
大電流(平均10 mA以上)のビーム
を生成・加速・周回・減速・ダンプする
- 2) 非常に低いビーム損失率:
< 0.01% (周回部において)

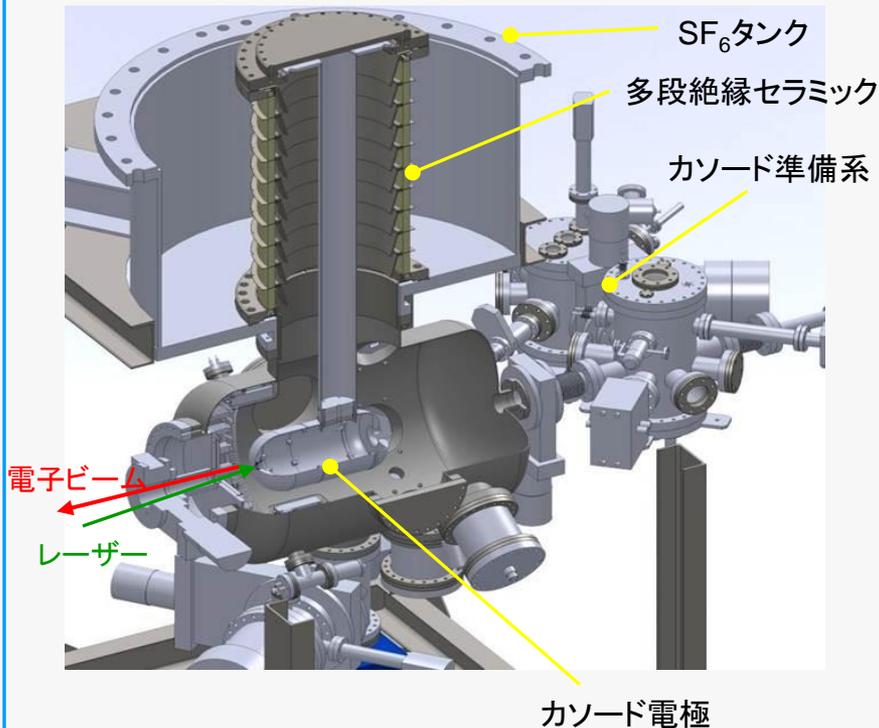
	目標値	実績(2016年3月末)
ビームエネルギー E	35 MeV	20 MeV
入射器エネルギー E_{inj}	5 MeV	2.9 - 6 MeV
ビーム電流	10 mA	0.95 mA
規格化エミッタンス [mm·mrad]	0.1 (@7.7 pC/bunch) 1 (@77 pC/bunch)	0.3 (@0.5pC/bunch) 1-2 (@7.7pC/bunch)
バンチ繰り返し周波数	1.3 GHz	1.3 GHz (usual) 162.5 MHz (for LCS)
バンチ長 (rms)	1-3 ps : 通常 ~ 100 fs : バンチ圧縮	1-3 ps: usual ~ 150 fs (?): バンチ圧縮
主加速空洞での 加速勾配 E_{acc}	15 MV/m	8.2 MV/m
電子銃電圧	500 kV	390 - 450 kV

中核となる高度な技術

フォトカソードDC電子銃

電子のバンチを、高繰り返し(1.3 GHz)で連続的(CW)に生成できる

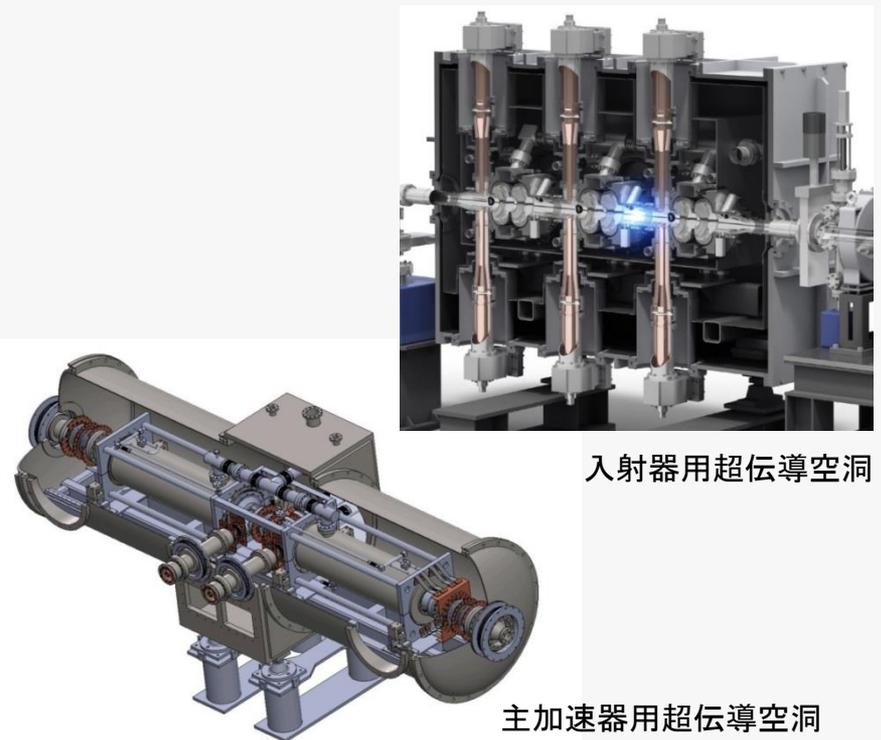
- 低エミッタンス ($< 1 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$)
- 大平均電流 ($\geq 10 \text{ mA}$)



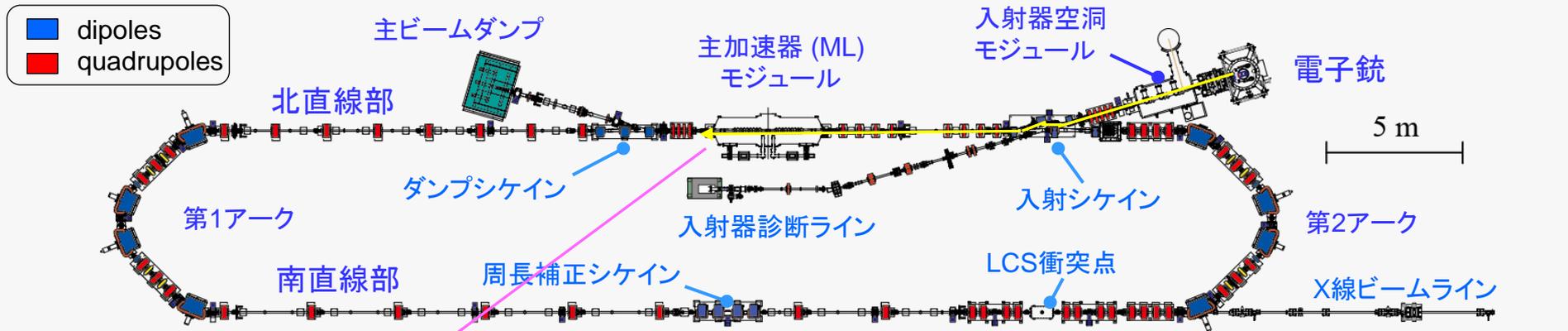
超伝導加速空洞

高電界で連続的(CW)にビームを加速できる

- 入射器空洞: $E_{\text{acc}} \leq 7 \text{ MV/m}$
- 主加速空洞: $E_{\text{acc}} \leq 8.5 \text{ MV/m}$

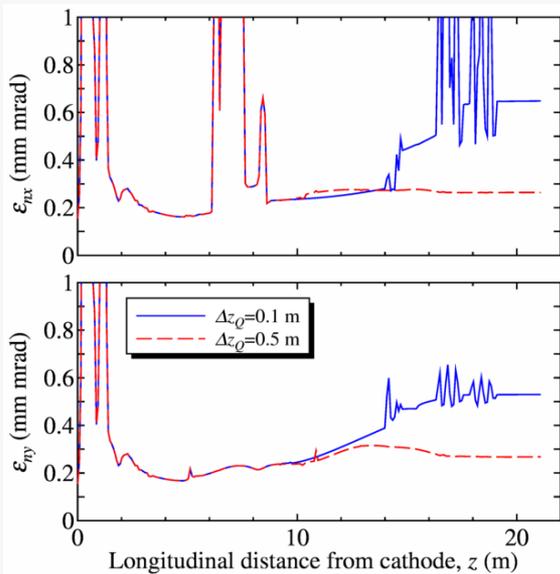


cERLのビーム光学系

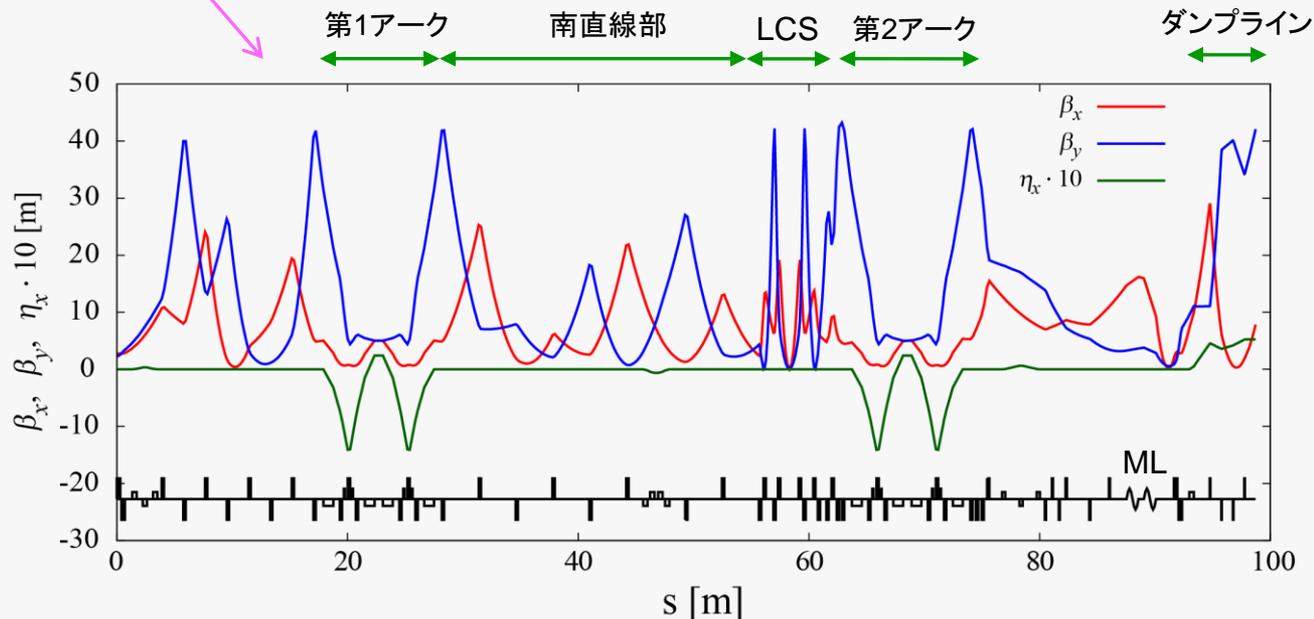


空間電荷効果を考慮
(GPTコード)

空間電荷効果を考慮せず (elegantコード)



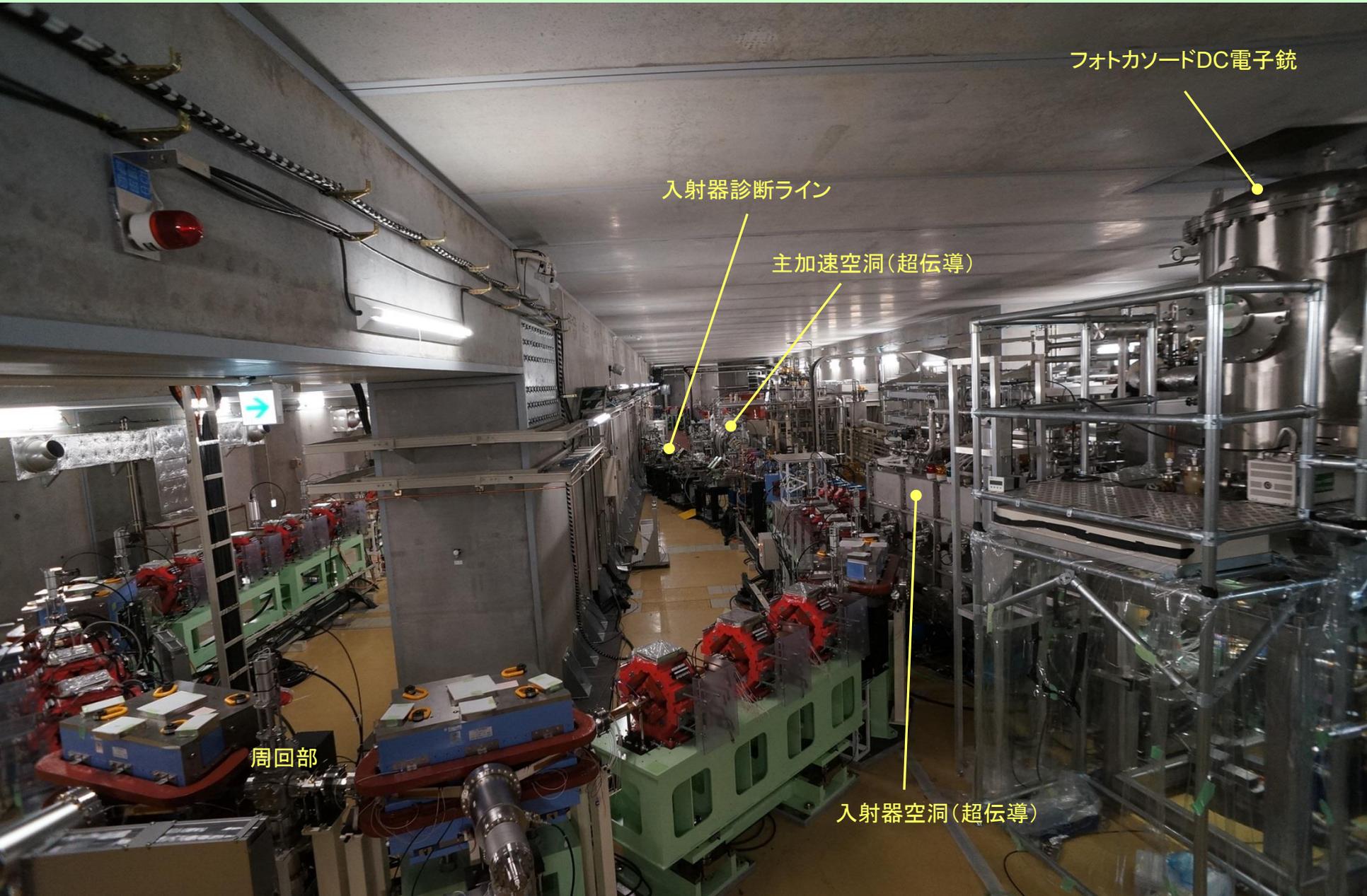
電子銃 ~ 主空洞出口



主空洞出口 ~ ビームダンプ
(LCS optics)

コンパクトERL

2013年12月: ビーム周回を開始



フォトカソードDC電子銃

入射器診断ライン

主加速空洞(超伝導)

周回部

入射器空洞(超伝導)

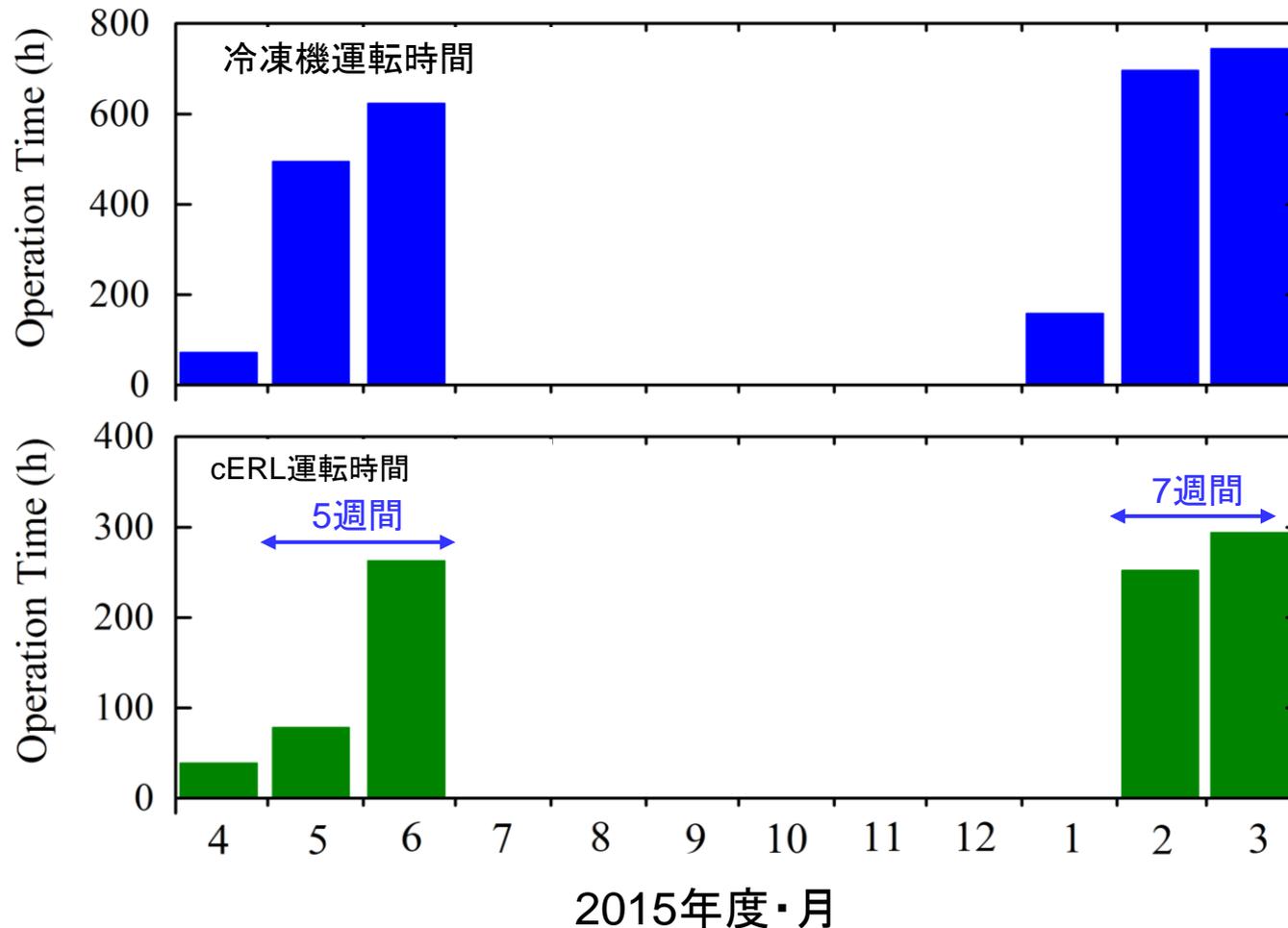
2015年度の運転と改造

ビーム電流100 μ Aまでの運転、
性能向上のマシスタディ

ビーム電流増強の準備、放射線変更申請

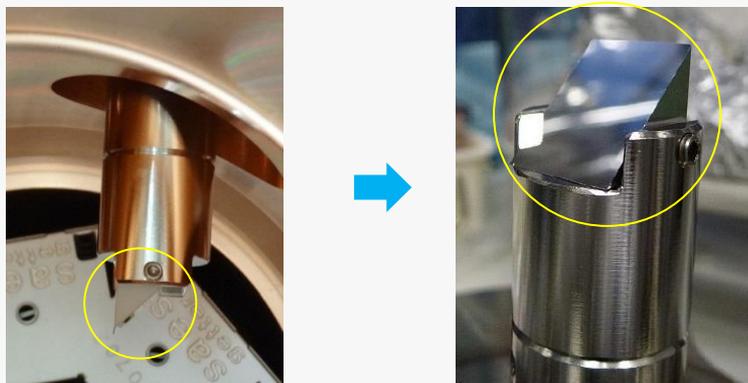
最大電流: 0.1 mA \rightarrow 1 mA

ビーム電流1 mAまでの運転、
性能向上のマシスタディ



Section 2: ビーム電流増強の準備(1)

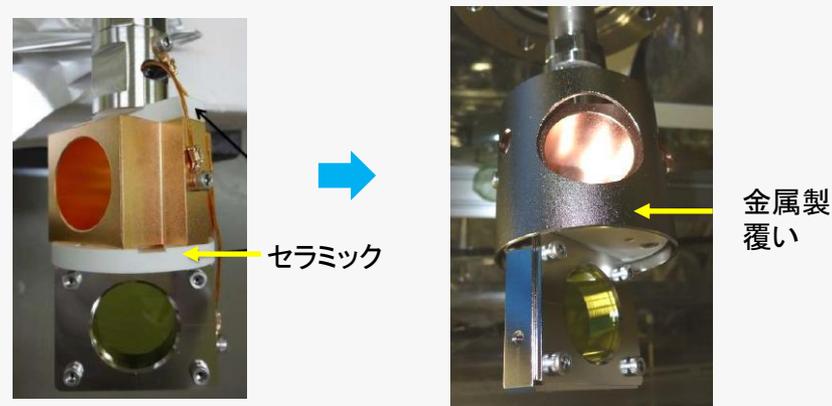
① 電子銃へのレーザー導入鏡の交換 (帯電対策)



アルミ蒸着ガラス鏡

金属鏡

② 電子銃ファラデーカップのセラミックへの覆い (空洞からの暗電流による帯電対策)



セラミック

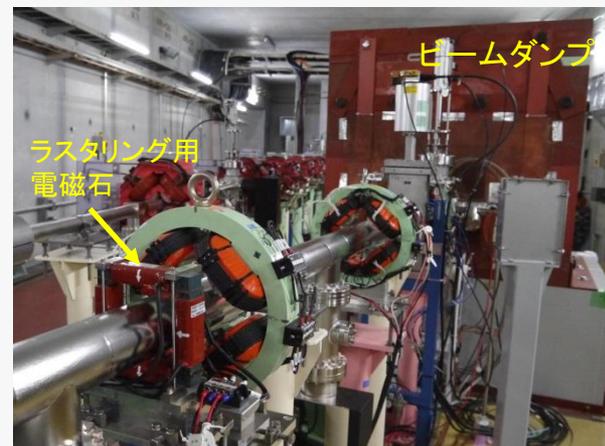
金属製覆い

③ ビームロスモニターの新設



高速ロスモニター

④ ダンプラインでのビームのラスタリング



ラスタリング用電磁石

ビームダンプ

ビーム電流増強の準備 (2)

⑤ 追加遮蔽の設置



合流部コリメータへの遮蔽



空調機貫通孔への遮蔽

⑥ 放射線変更申請

最大ビーム電流: 0.1 mA → 1 mA
最大エネルギー: 26 MeV

2015年秋	変更申請
2016年1月19日	承認
2016年2月15日	調整運転開始
2016年3月8日	施設検査 (3/10付け合格)

変更申請書はKEKレポート(松村宏 他、KEK Internal 2015-6)で公開

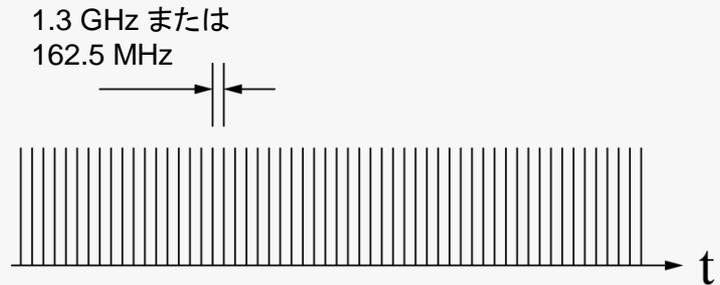
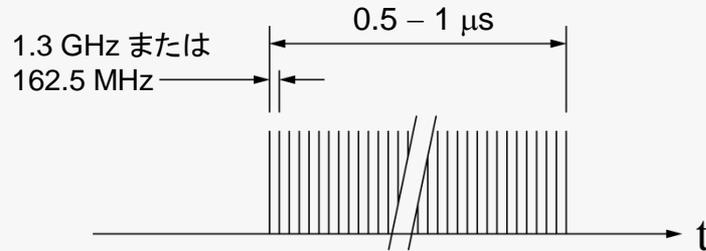
Section 3: 大電流運転時のビーム調整(1)

バーストビームで調整

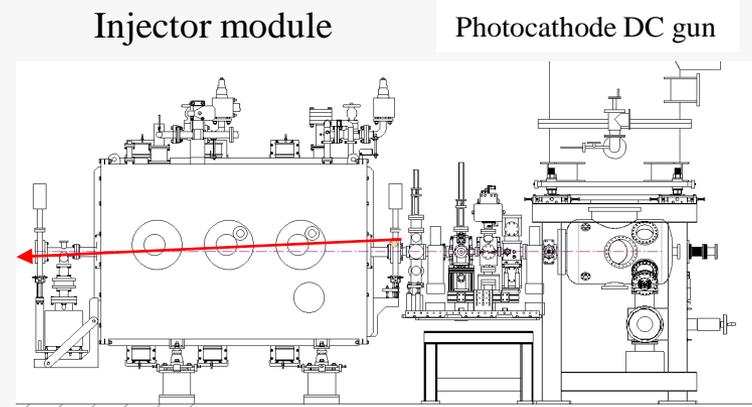
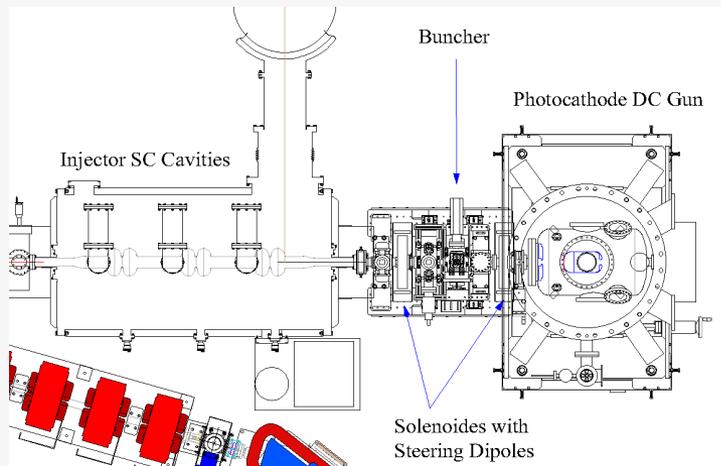


CW運転

ビームの輸送条件とビームロス低減



① 入射部における調整



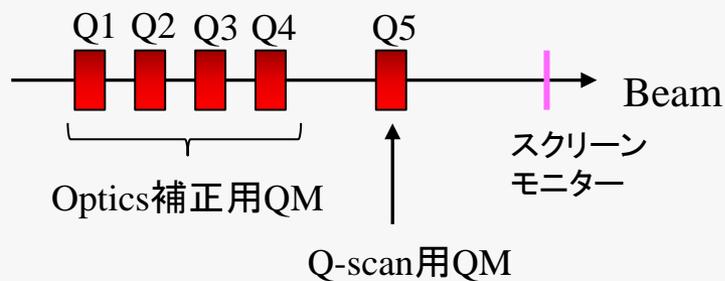
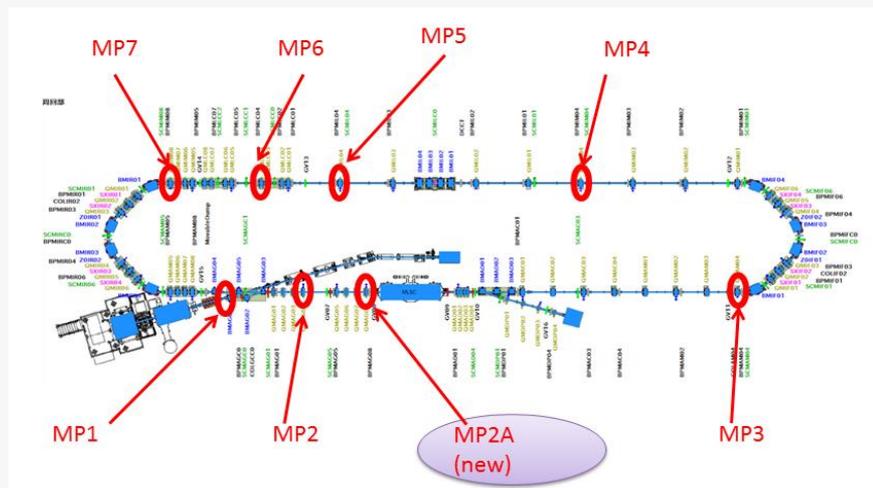
- GPTシミュレーションで見つけた良いビーム輸送条件に合わせる
- できる限り機器の中心にビームを通す
- ソレノイド中にある補正電磁石を弱くした

- 入射器空洞にビームを少し角度を付けて入射する (ビームテールを落としやすくする)

大電流運転時のビーム調整(2)

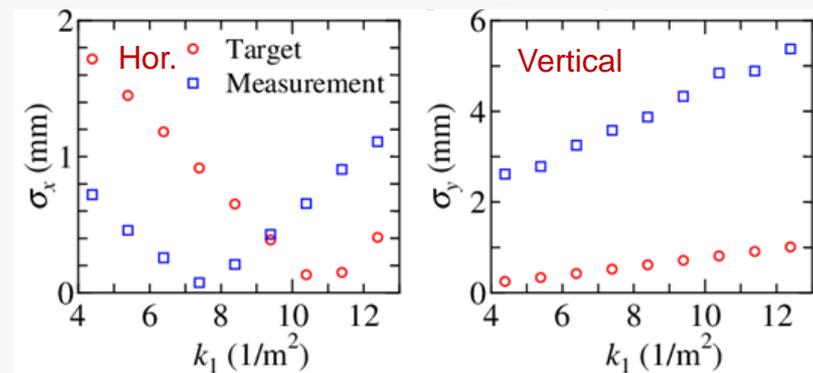
宮島司 他、ポスター TUP064

② オプティクスマッチングと軌道補正

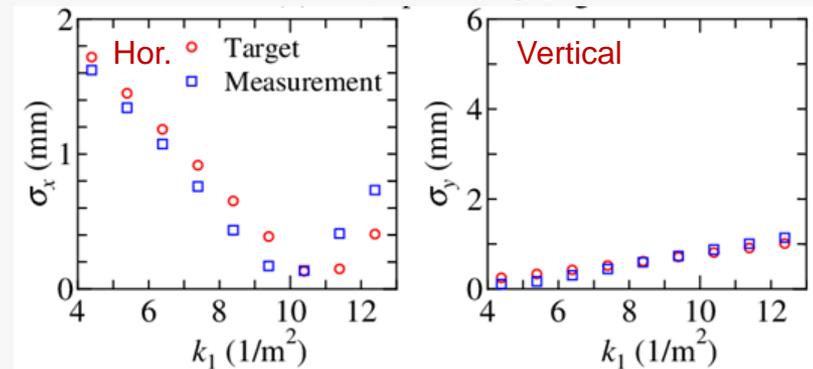


- 上記の点でQ-scan (waist scan)測定を実施
- 測定された応答を設計値に近づけるよう、上流のQMを調整
- 軌道は、beam-based alignmentで調整した基準軌道に近づけるよう補正する。
- 分散関数の補正も行った

マッチング前



マッチング後

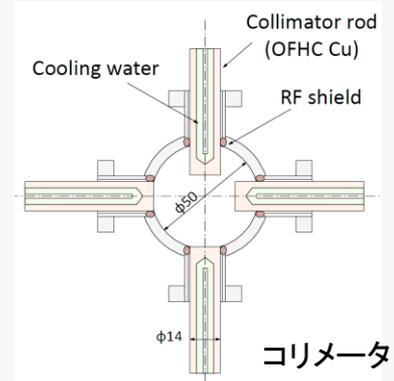


オプティクス調整の結果、
ビーム損失が減った

大電流運転時のビーム調整(3)

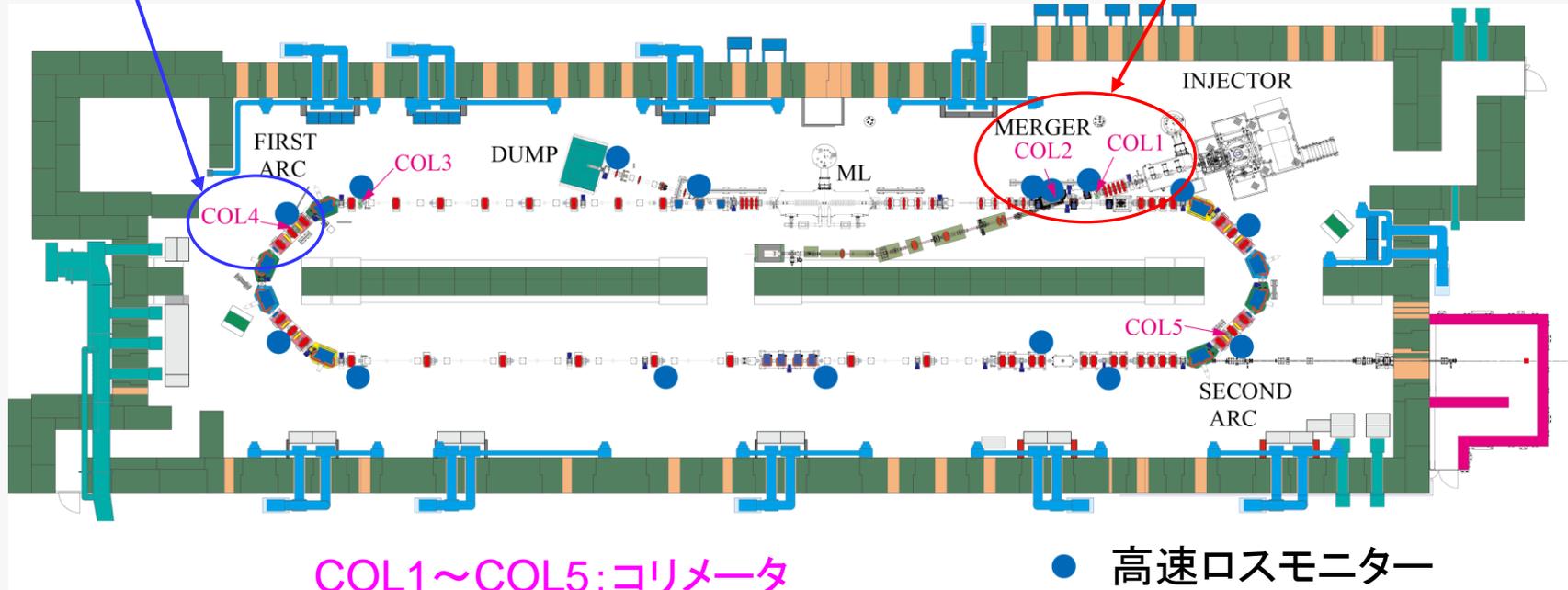
③ ビームコリメータの調整

ビームロスが小さくなるようにコリメータを挿入し、
ビームハロー(テール)を落とす



第1アークのコリメータ(COL4)を併用
(E = 19.9 MeV)

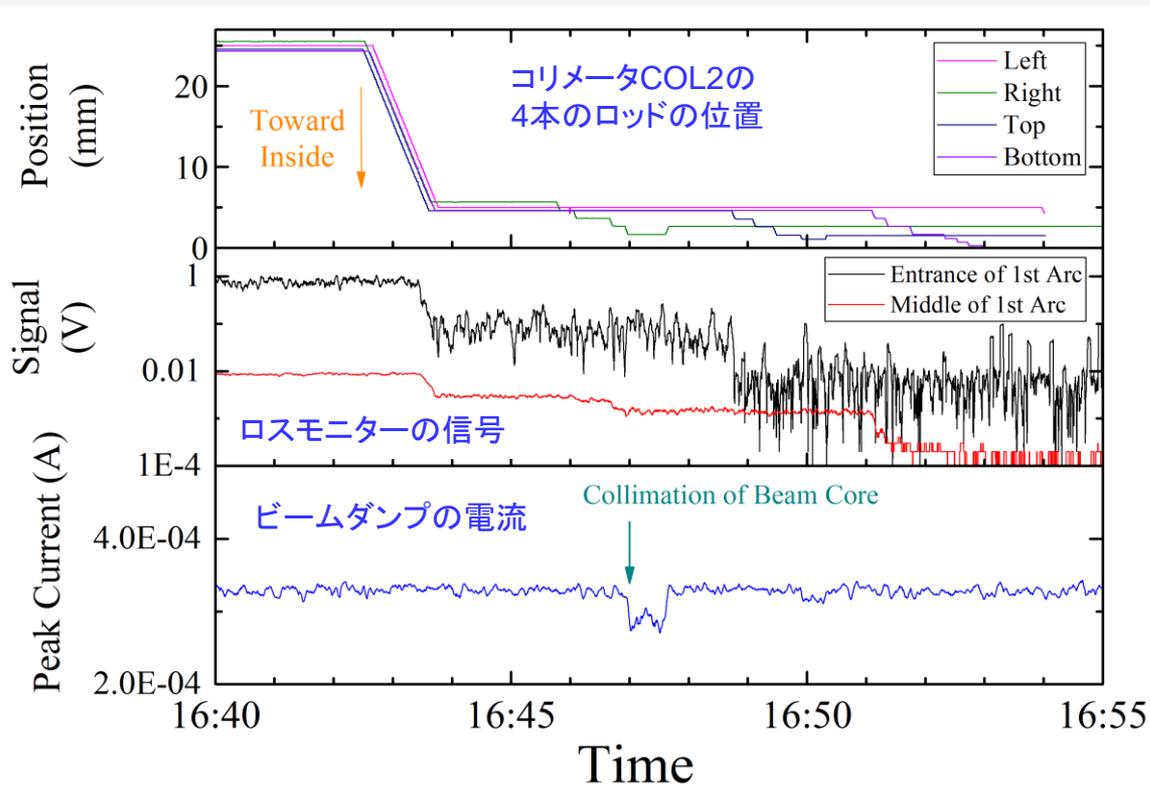
低エネルギー部のコリメータ(COL1, 2)を主に使用
(E = 2.9 MeV)



大電流運転時のビーム調整(3)

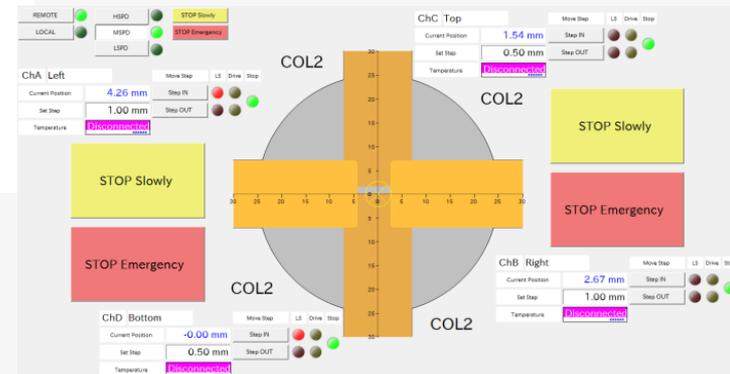
③ ビームコリメータの調整

コリメータ調整の例 バーストビーム(ピーク電流300 μ A)をダンプまで輸送中



この方法で、コリメータ COL1, COL2, (COL4)を調整

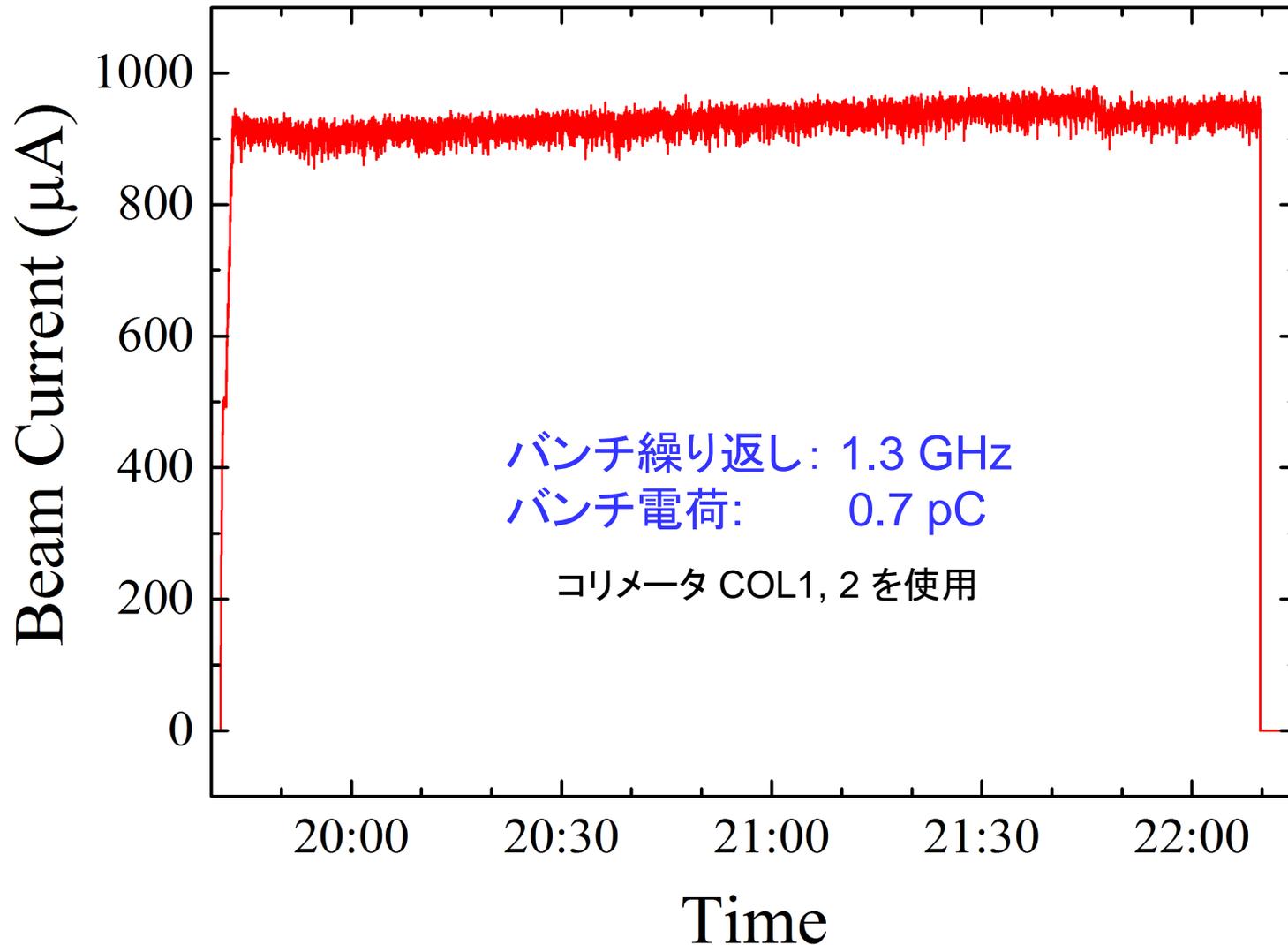
典型的なコリメータ設定:
中心から先端まで 2 ~ 4 mm



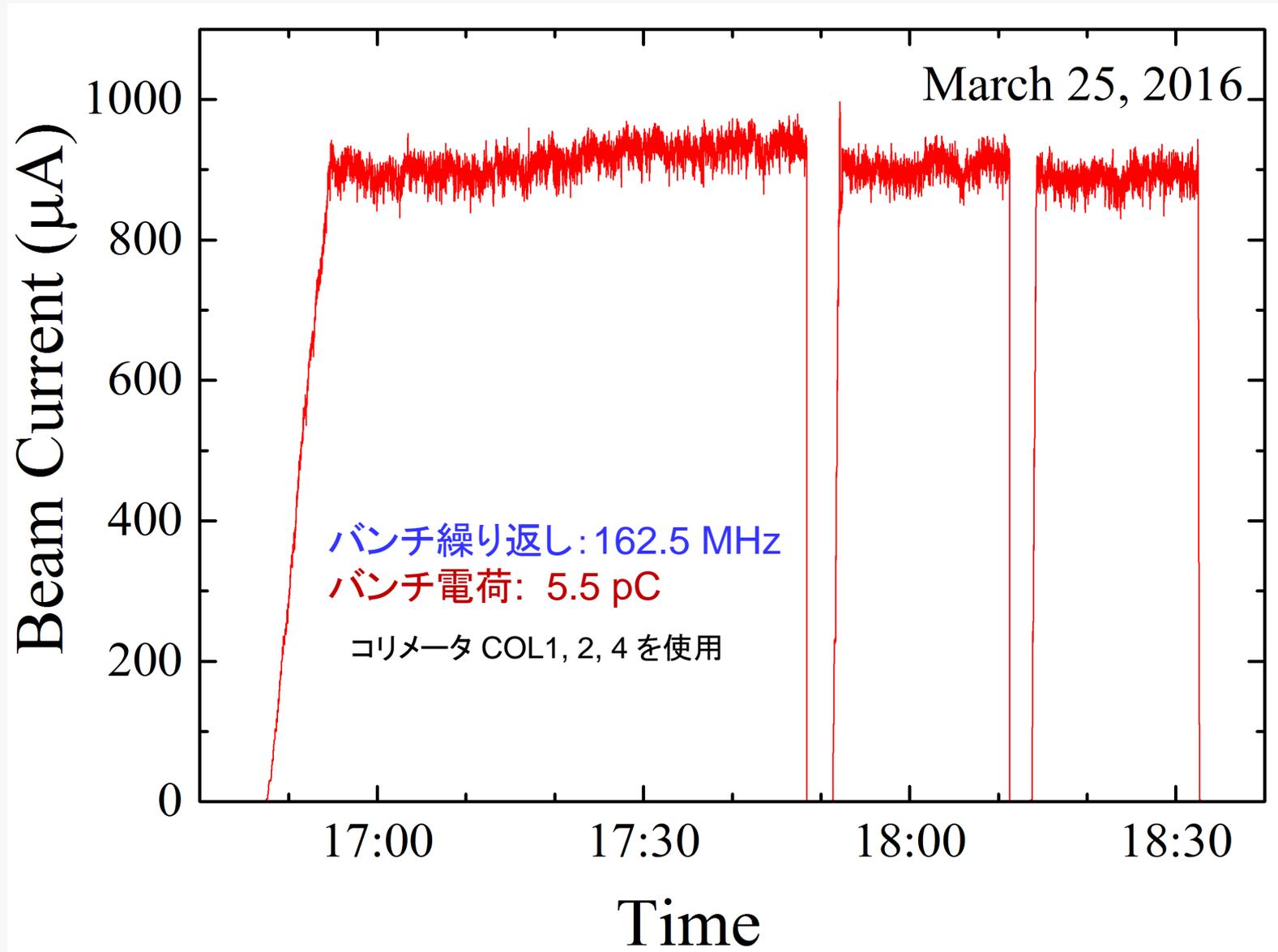
Section 4: cERL大電流運転
平均ビーム電流900 μA の周回に成功(1.3 GHz)

Beam current at the dump

Mar. 8, 2016

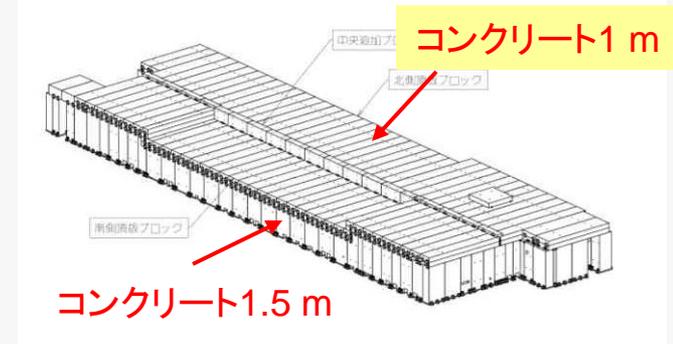


平均ビーム電流900 μA (162.5 MHz) の周回にも成功

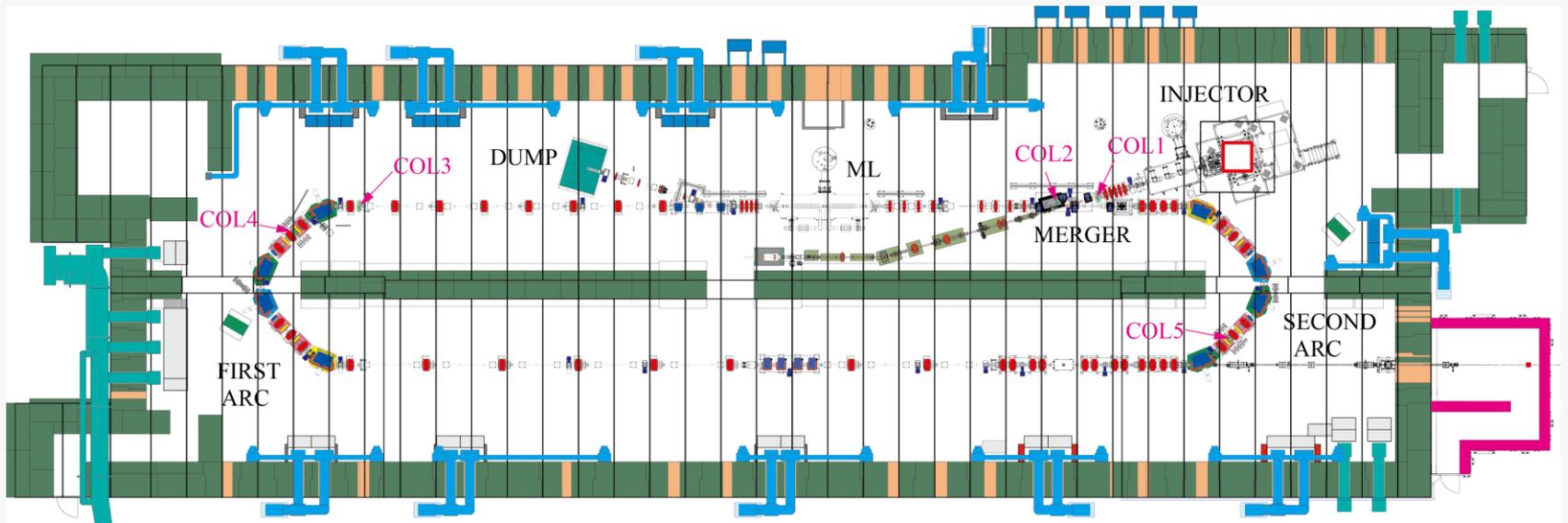


大電流運転中の放射線

天井の壁厚が最も薄い
天井上での線量率はビーム損失の分布を反映



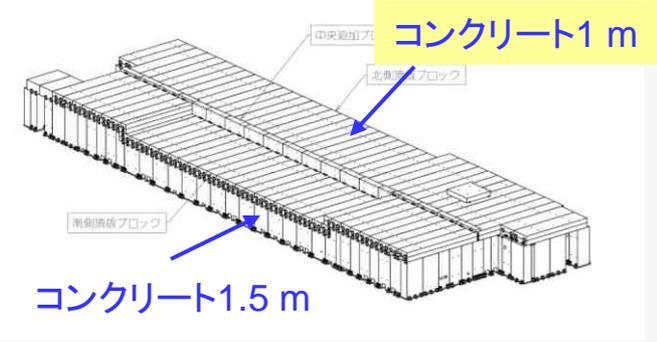
コンパクトERL加速器室



加速器室平面図（天井を透明にした図）

加速器室天井上での放射線量率 (900 μ A, 162.5 MHz)

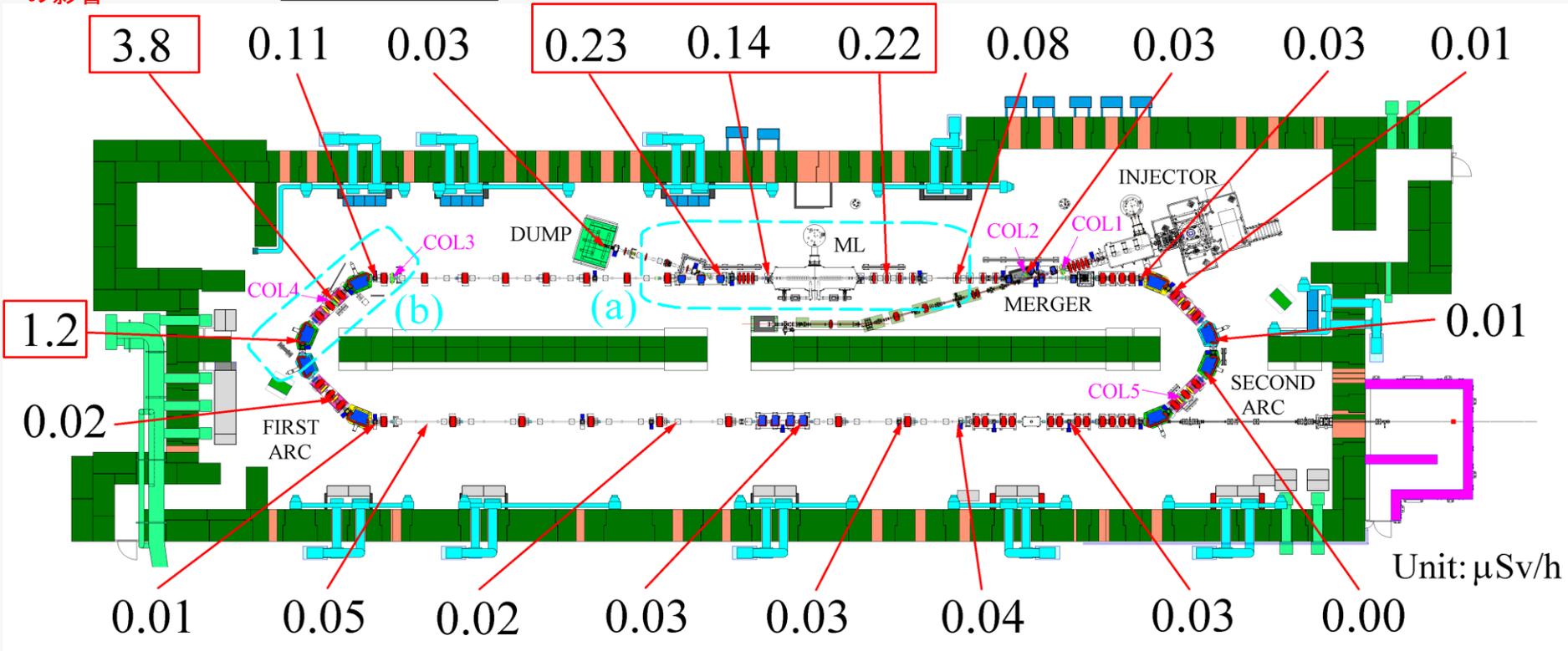
管理区域としては十分低い線量率
 ビーム電流10 mAも可能と考えられる



コリメータCOL4
 の影響

単位: μ Sv/h

主空洞暗電流の影響



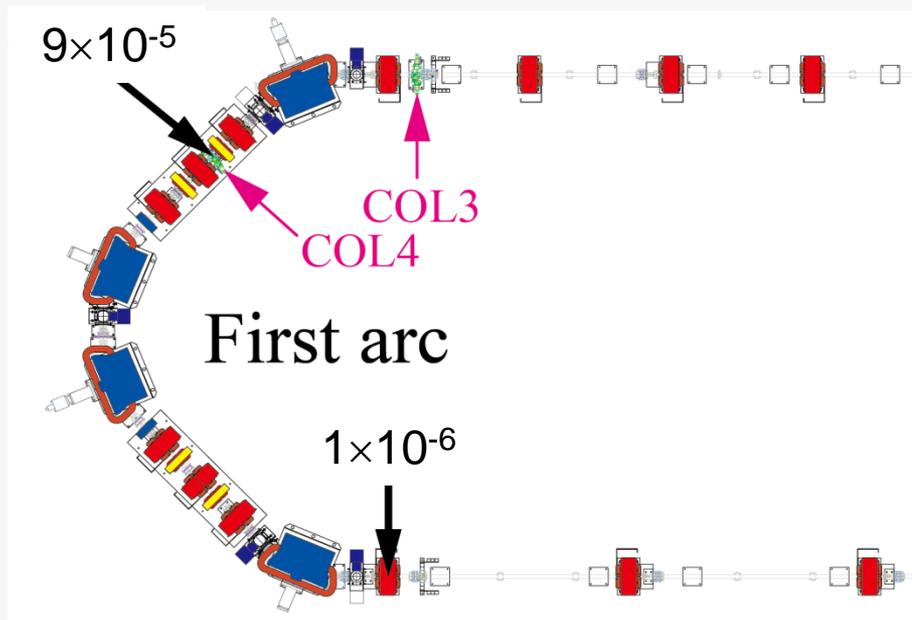
バックグラウンド差し引き後のデータ、NaIシンチレーション・サーベイメータ使用

測定された線量率からビーム損失率を推定 (900 μ A, 162.5 MHz)

周回部 (E=19.9 MeV) でのビーム損失率の推定

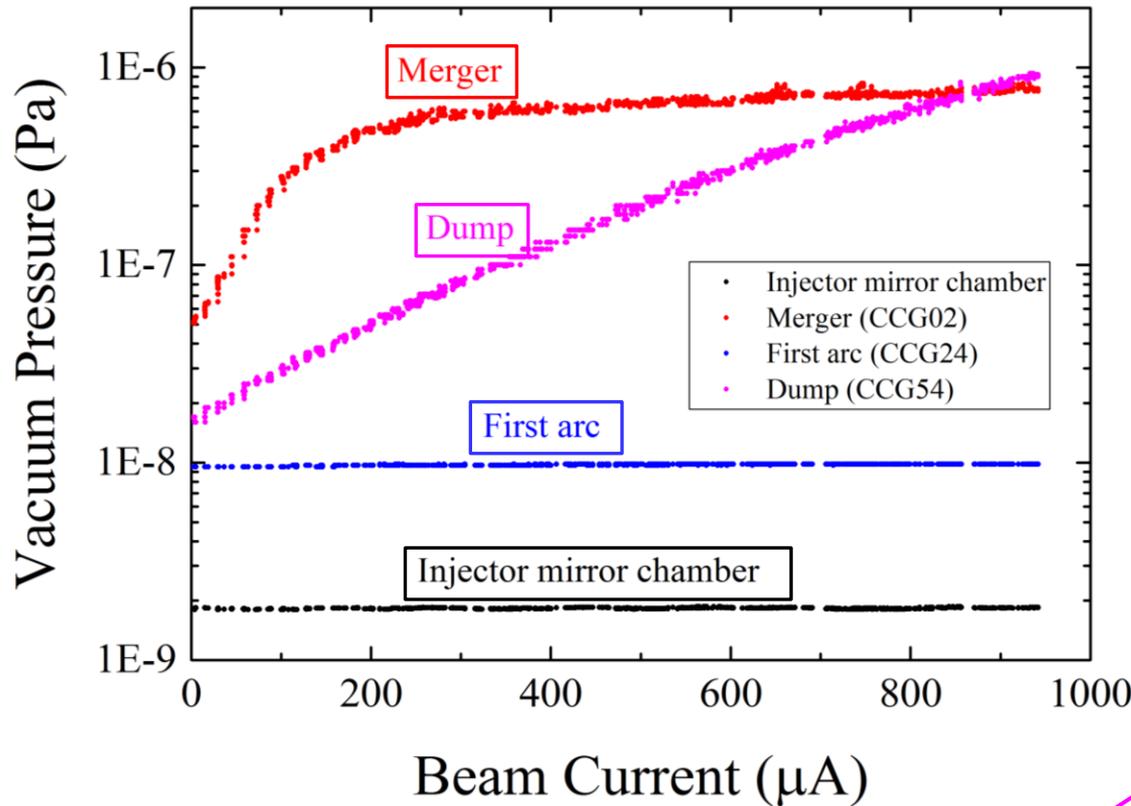
天井上で測定された線量率と放射線シミュレーションとを比較

- コリメータ COL4 の場所で約 9×10^{-5}
- それ以外の場所で、1箇所あたり $\leq 2 \times 10^{-6}$

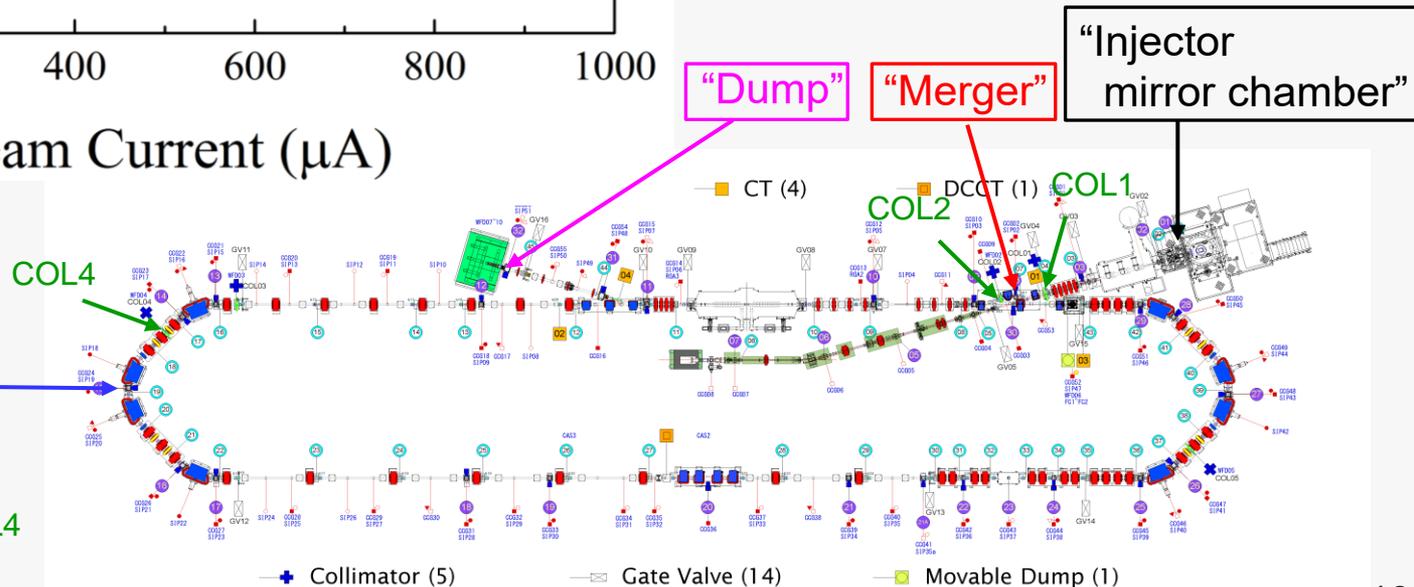


コリメータ以外の場所で、非常に低いビーム損失率 ($< 1 \times 10^{-5}$) を達成

大電流運転時のビームダクト真空度



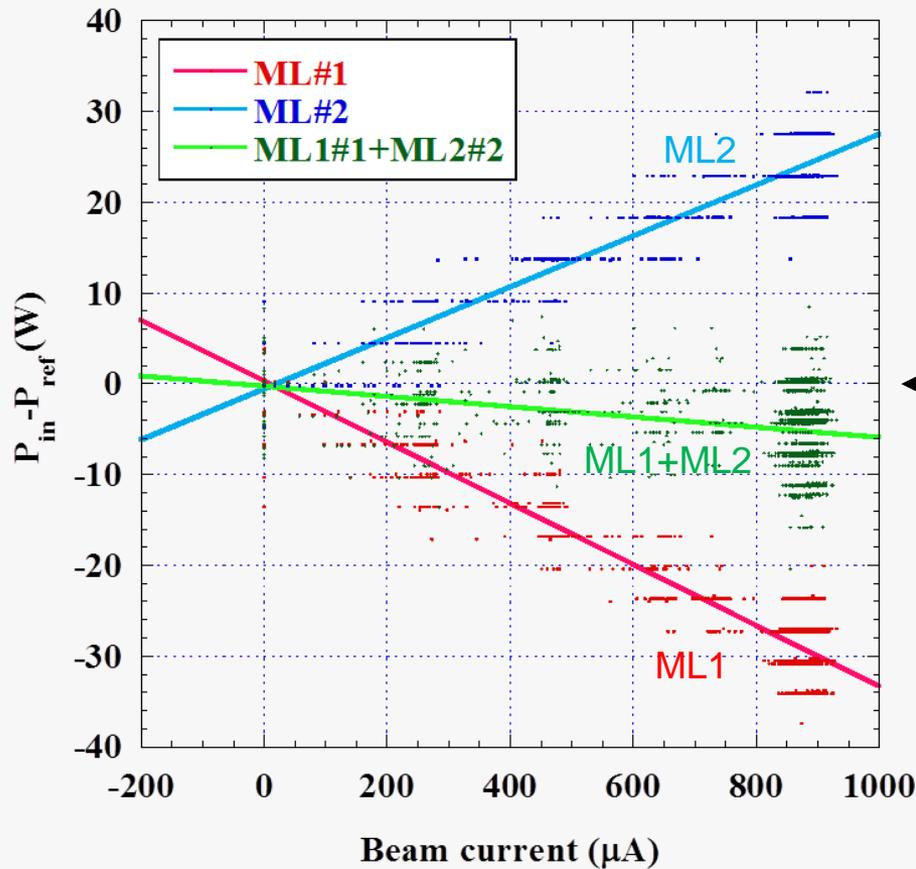
- ビームダンプと合流部(コリメータCOL1, 2近く)では、電子衝撃によるガス放出がある
- その他の場所では、圧力はビーム電流にほぼ依らない



コリメータ COL1, COL2, COL4
を使用した

主加速空洞におけるエネルギー回収

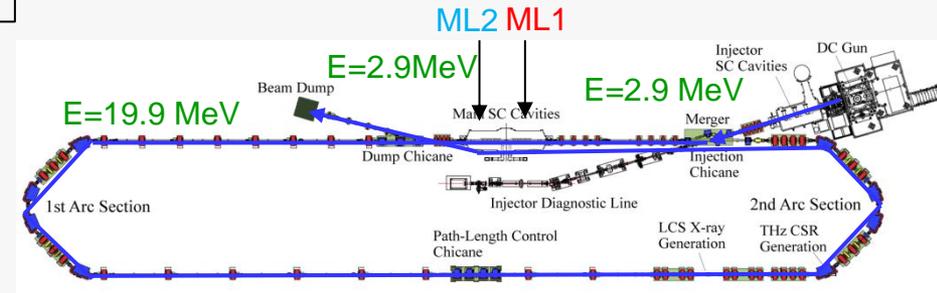
$$(空洞入力電力) - (空洞反射電力) = (空洞内で消費される電力)$$



条件:

- 空洞電圧: 8.56 MV (ML1), 8.57 MV (ML2)
- On-crest 加速

主空洞ML1, ML2では、加速(1回目通過)と減速(2回目通過)でエネルギーを回収(ER)



* 2台の9セル超伝導空洞を使用

← ビーム電流なしの時、オフセットをゼロと定義した

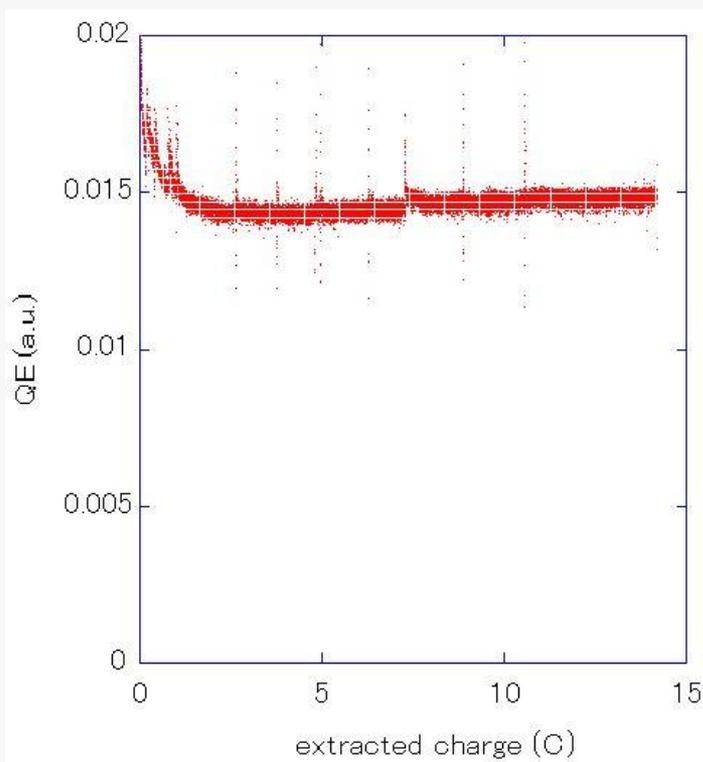
測定結果より:

- エネルギー回収なしで加速すると、空洞当たり約8.6 kWのビーム負荷があるはず(@1mA)
- エネルギー回収により、ビーム負荷は格段に小さい(~ 10 W)
- 個別の空洞(ML1, ML2)では、1回目と2回目の通過で電子の速度が異なるため、エネルギー回収率が100%から±0.35%ずれた。

フォトカソードの寿命は長い

NEA表面GaAsフォトカソードを使用

大電流運転中(2016/3/29)の
カソード量子効率(QE)の変化



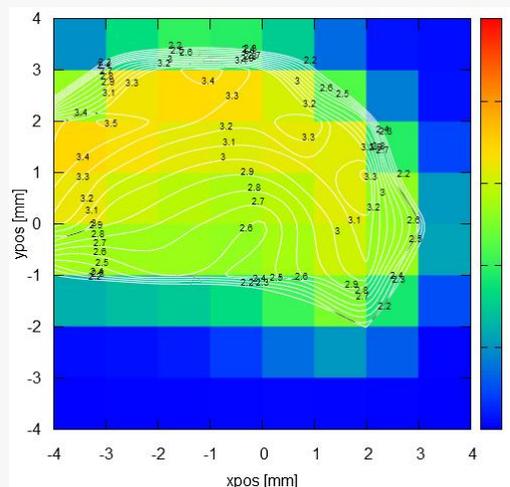
引き出し電荷量

QEは運転開始直後に急速に下がるが、その後は
上昇する傾向がある。

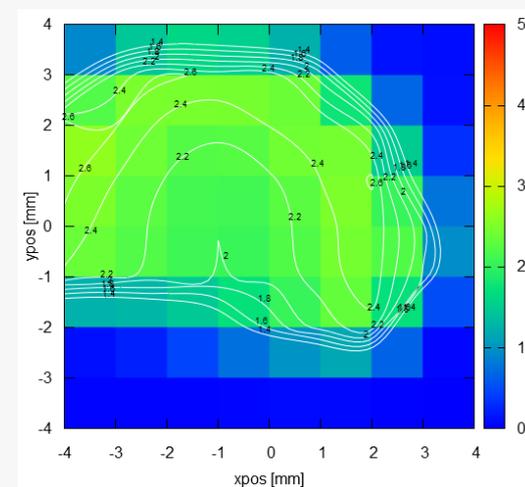
- 電子銃の到達圧力は約 1×10^{-9} Pa。
- 保管中のカソード寿命(dark lifetime)は1000時間程度¹⁾
- 運転中の operational lifetime も十分長い。

1) 2015年には約6000時間

カソード使用前後のQEマップ (Quantum Efficiency)



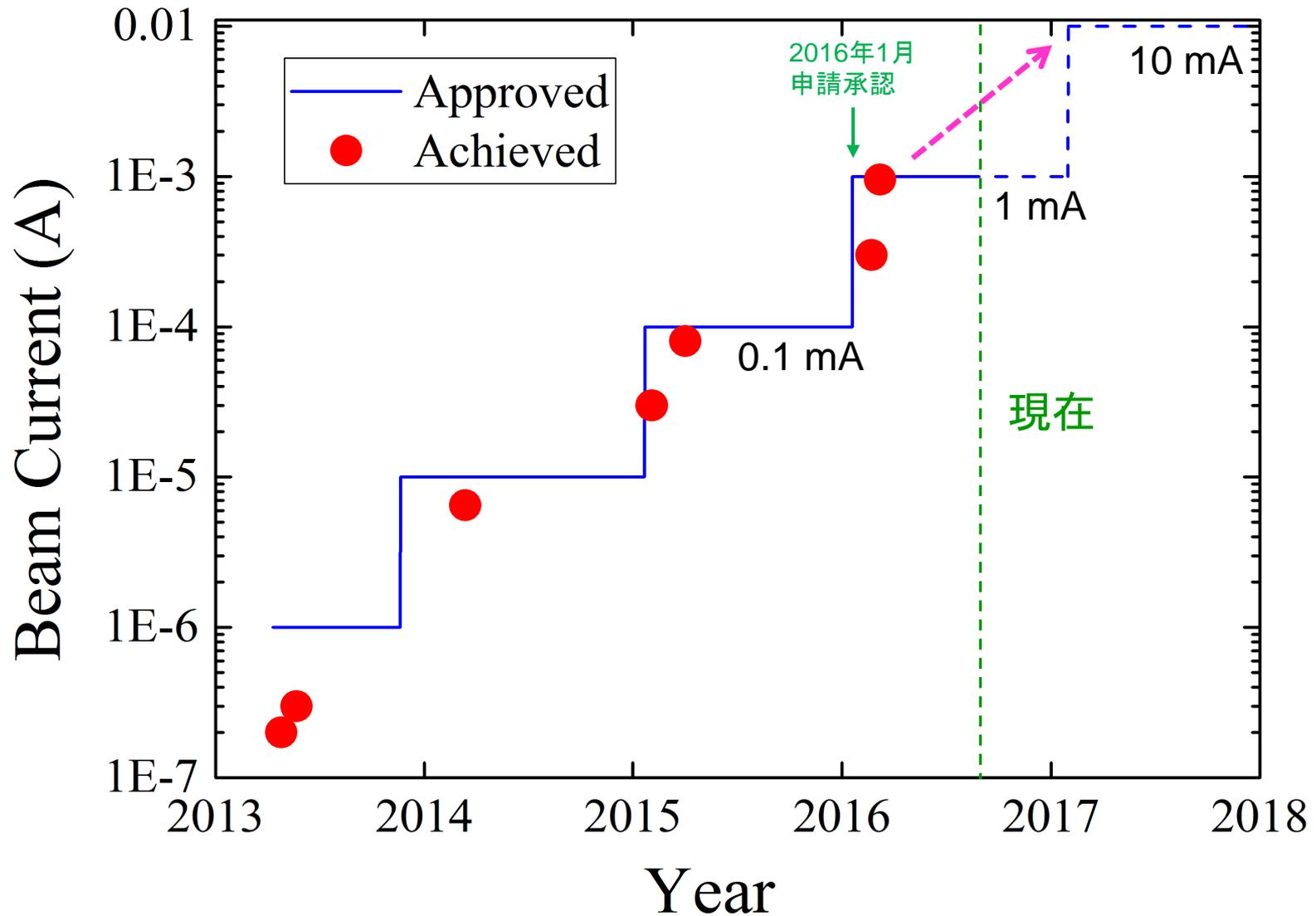
カソード(2個目)設置
直後(2016/3/15)
QE ~ 2.6%



運転に使用後
(2016/3/31):
QE ~ 2.1%

約380時間経過
引き出し電荷量 25.6 C

平均ビーム電流の進捗



Section 5: まとめ

- cERLで**ビーム電流0.9 mA**の周回に成功
 - バンチ繰り返し162.5 MHz、5.5 pC/bunch
- 加速器の調整とビームコリメータの使用により、**非常に低いビーム損失率** (コリメータ以外の周回部で 10^{-5} 以下)を達成
- バンチ繰り返しを1.3 GHzに上げることで、**10 mAへの増強が可能**
 - 放射線変更申請、遮蔽の一部増強などが必要
- 主加速空洞における**エネルギー回収率は、ほぼ100%**
- **フォトカソードの長寿命を達成** (引き出し電荷 ~ 25 C)
- レーザー導入鏡の交換、電磁石の標準化の徹底などにより、**運転条件の再現性と安定性が格段に向上**
- **大電流運転以外の研究成果** → **ポスター発表**
 - 1) ビーム調整による低エミッタンス化 (宮島司他、TUP064)
 - 2) サブピコ秒までのバンチ圧縮に成功 (本田洋介他、MOP077; 島田美帆他、TUP062)
 - 3) 電子銃の改造による500 kV達成 (西森信行他、MOP048)

...

cERLでは超伝導加速器に関する最先端の研究結果が得られている。
これらの技術は、**ERL-FEL光源**や**高繰り返しX-FEL**などへの応用が期待される。