

cERLのコミッショニング現状報告

ERL推進委員会

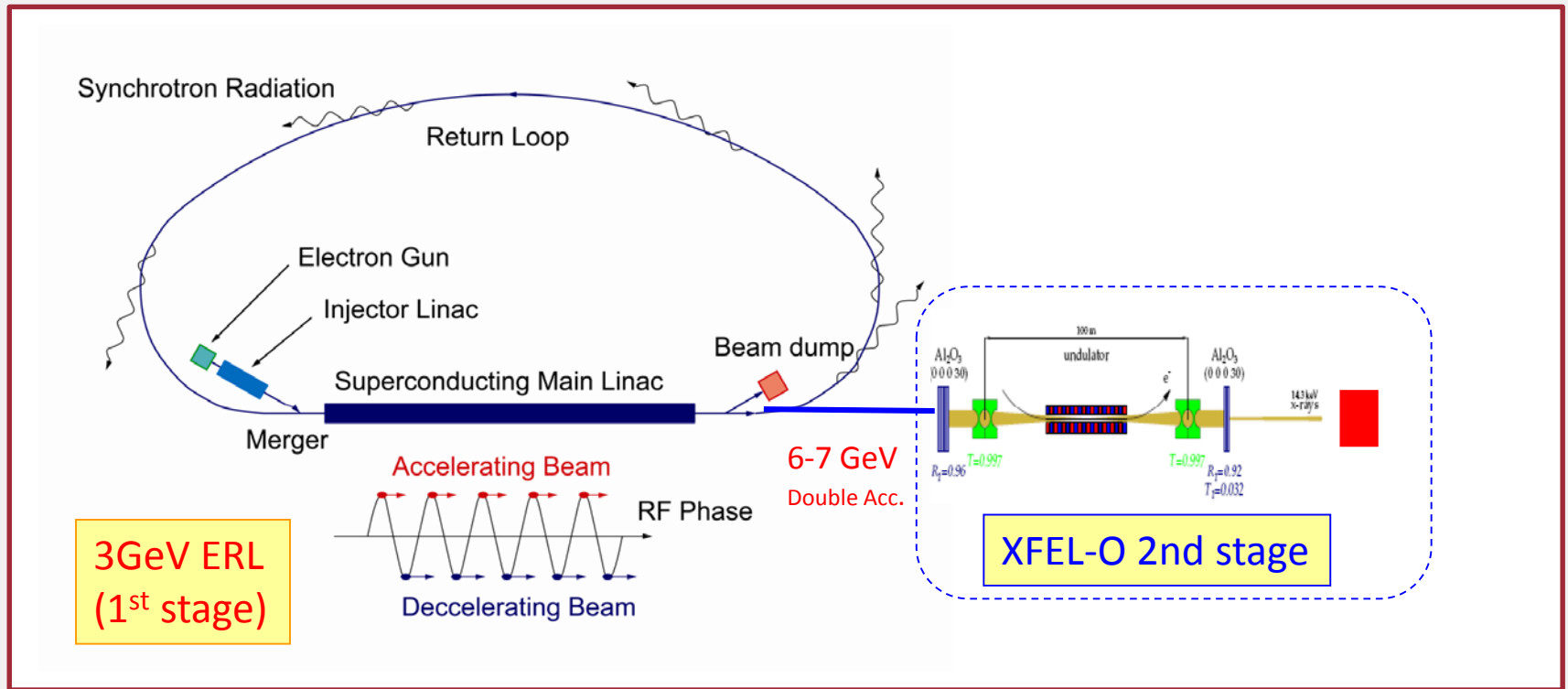
2014年3月20日（木）

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設 第7研究系

島田 美帆

Energy Recovery Linac, ERL計画



ERL計画

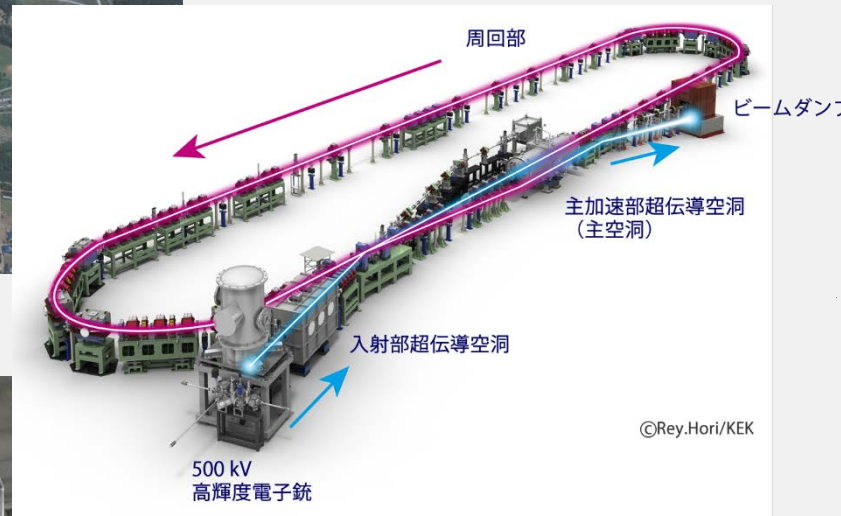
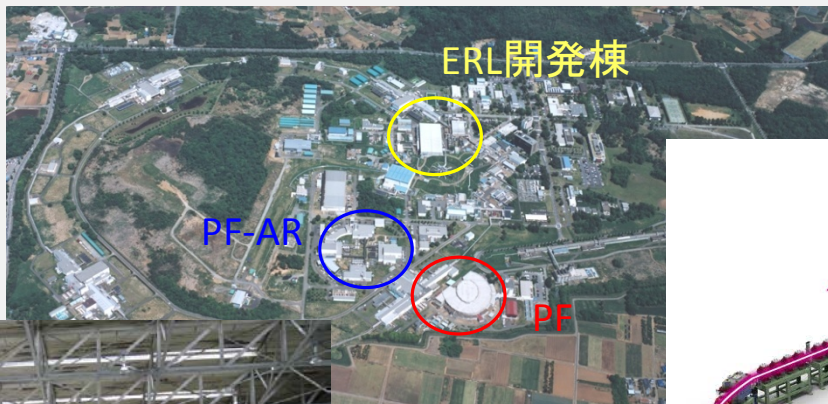
- 回折限界X線光源
- 極短パルスX線光源
- 共振型X線自由電子レーザー(XFELO)
- Echo-Enabled Harmonic Generation (EEHG)



ERLの試験器としてのCompact ERL

- エネルギー回収の実証
- 低エミッタンス化・短バンチに向けたビームダイナミクス
- CW超電導空洞・高輝度電子銃の開発
- 大電流とビームロス

コンパクトERL



ERL開発チーム



High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

S. Adachi, M. Adachi, M. Akemoto, D. Arakawa, S. Asaoka, K. Enami, K. Endo, S. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, K. Hozumi, A. Ishii, E. Kako, Y. Kamiya, H. Katagiri, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, Y. Kondou, O. Konstantinova, T. Kume, T. Matsumoto, H. Matsumura, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao, K. Nigorikawa, T. Nogami, S. Noguchi, S. Nozawa, T. Obina, T. Ozaki, F. Qiu, H. Sakai, S. Sakanaka, S. Sasaki, H. Sagehashi, K. Satoh, M. Satoh, T. Shidara, M. Shimada, K. Shinoe, T. Shioya, T. Shishido, M. Tadano, T. Takahashi, R. Takai, T. Takenaka, Y. Tanimoto, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, K. Watanabe, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida



Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

R. Hajima, S. Matsuba, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, T. Shizuma



The Graduate University of Advanced Studies (Sokendai)

E. Cenni



Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo

H. Takaki



UVSOR, Institute for Molecular Science

M. Katoh



Hiroshima University

M. Kuriki, Y. Seimiya



Nagoya University

Y. Takeda, Xiuguang Jin, M. Kuwahara, T. Ujihara, M. Okumi



National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

D. Yoshitomi, K. Torizuka



JASRI/SPRing-8

H. Hanaki



Yamaguchi University

H. Kurisu



ダブル・ループ compact ERL

Main parameters

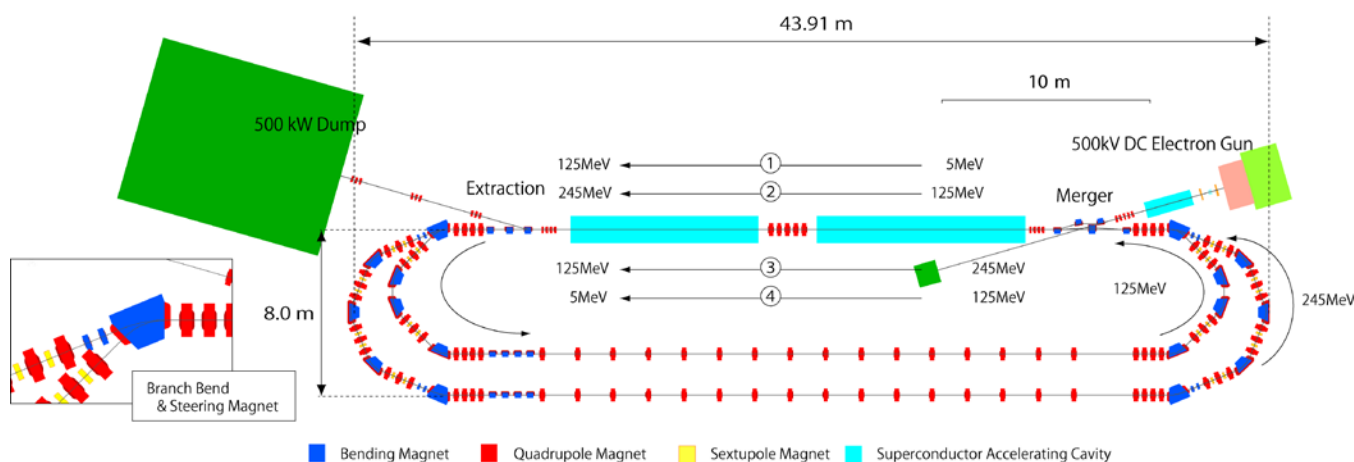
Injection energy	5- 10 MeV
Full energy	245 MeV
Electron charge	77 pC
Normalized emittance	< 1 mm-mrad
Bunch length	1-3 ps
Momentum spread	< 1e-3

なぜダブル・ループなのか？

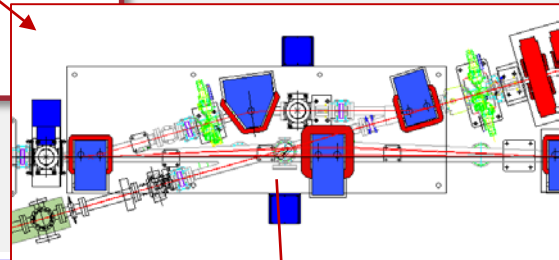
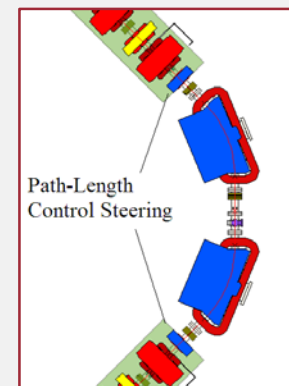
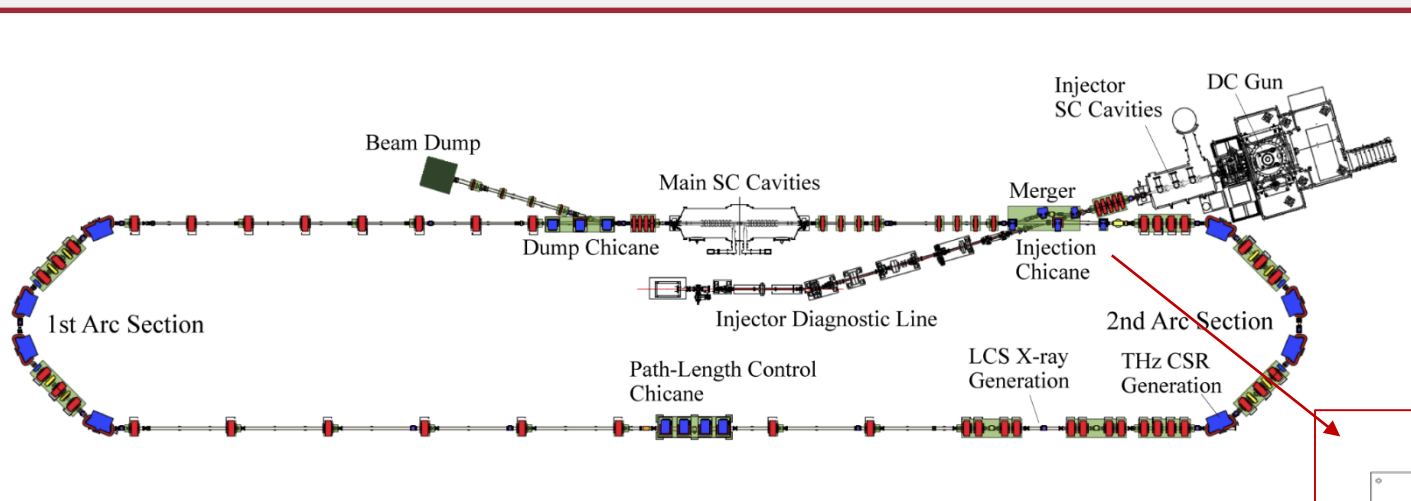
- 建設費や冷凍機運転費のコストダウン
- 限られた空洞数で高い電子エネルギーの実現

光源利用

- レーザー逆Compton散乱によるx線・ガンマ線光源
- 短バンチ電子ビームによるテラヘルツ光源

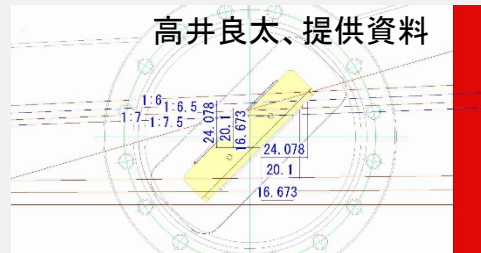
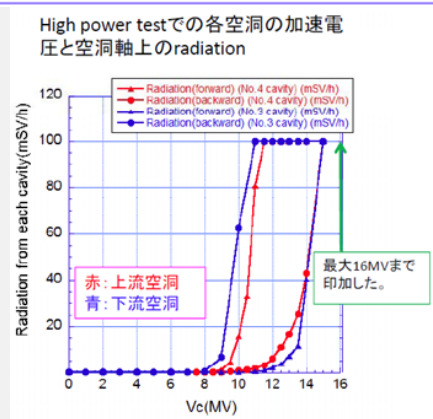


Single Loop cERLのコミッショニング



電子エネルギー, E
 周回部: 20 MeV
 入射部: 2.9 MeV

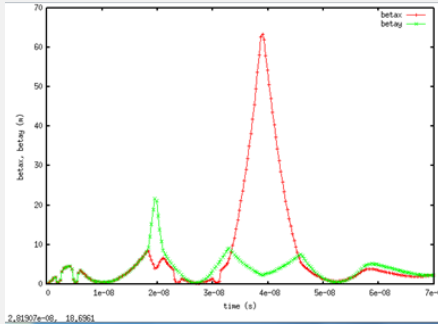
加速電圧は $V_c = \sqrt{4 \cdot \text{Pin} \cdot R / Q \cdot QL}$ を使用。



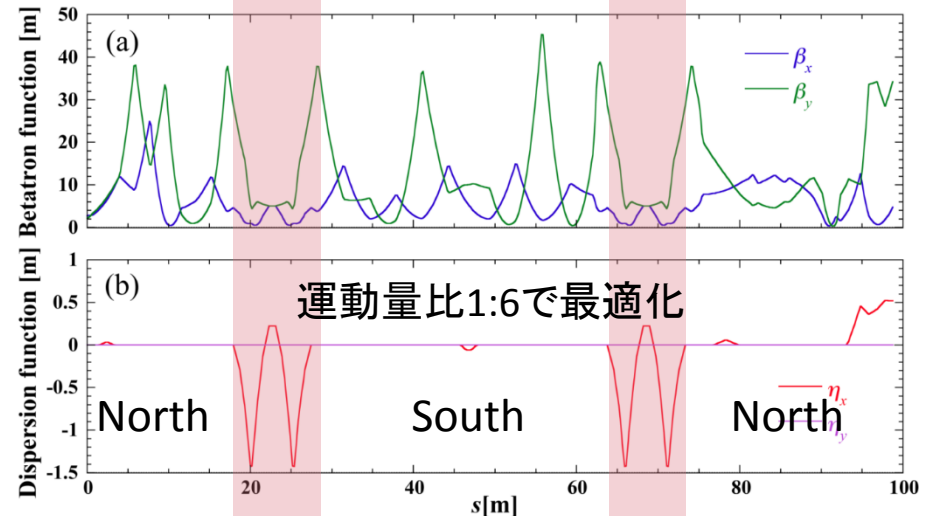
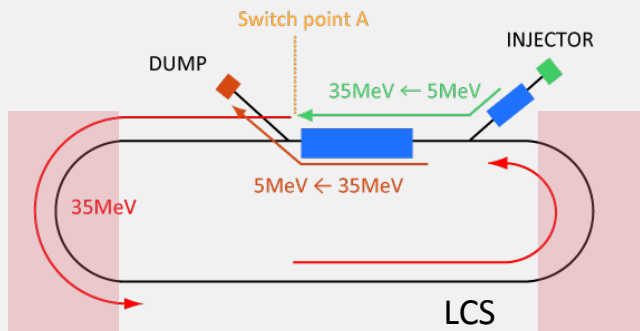
20MeVビームのスクリーンの測定
 運動量比1:7:測定可能。
 運動量比1:6:測定不可能。

- 2014年3月14日時点の運転エネルギー
- 主空洞縦測定の結果をもとに8-9MV/cavとし、周回エネルギーを20MeVと決定。
- 入射シケインで20MeVビームがスクリーンで観測できるように運動量比を1:7に。
- 電子の速度変化に対応し、周回部の軌道長調整
 - ✓ 電磁石設置場所の再検討。
 - ✓ シケイン、アーク内のステアリングによる周長補正

入射部・周回部の設計optics



入射部のoptics
(2/3にoptics変更後)



アーク中心 : $\beta_x = \beta_y = 5\text{m}$, $\alpha_x = \alpha_y = 0$

□ Start-to-end simulation

- 主空洞加速前は空間電荷効果の影響を取り入れて最適化：計算コードはGeneral Particle Tracer
- 主空洞加速後はCSR wakeの効果を一れつつ迅速な計算：計算コードはelegant

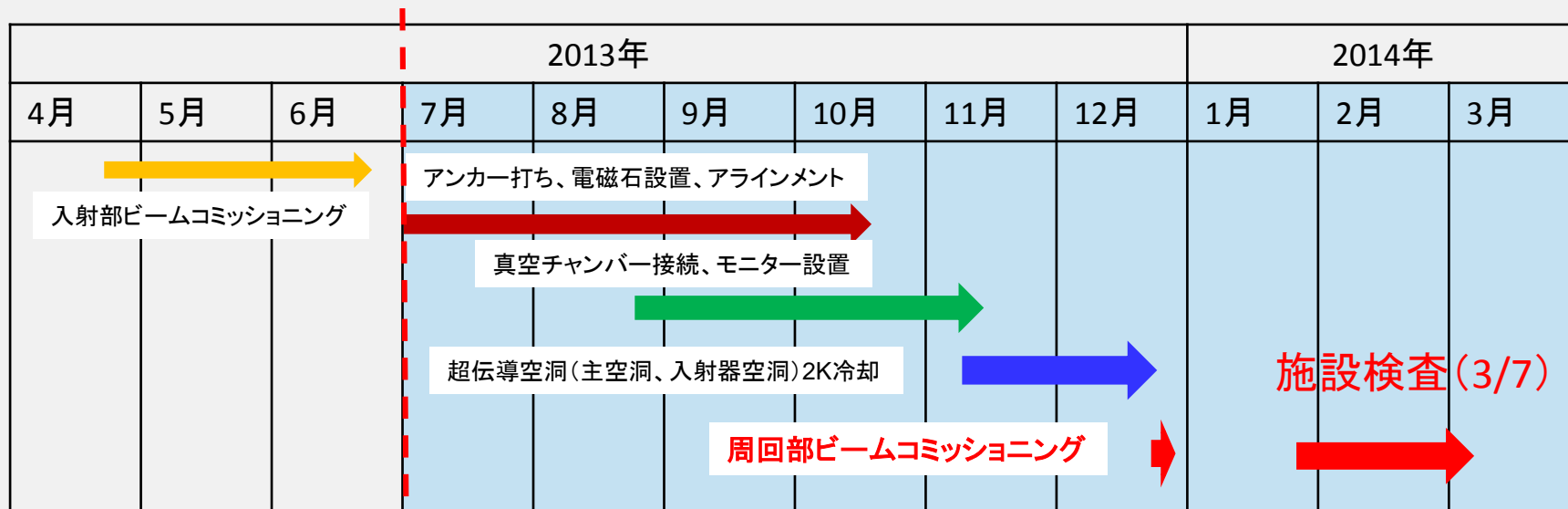
□ 周回部基本構成

- 2つのIsochronousのTBAのアーク部からなり、■の部分はopticsを固定。

□ マッチング

- 2つのビームが通過する場所はエネルギーの小さいビームに合わせて最適化。
- 入射ビームに対するマッチング→北直線部(North)のみで行う。
- LCSなどの放射光利用に対するマッチング→南側直線部(South)のみで行う。

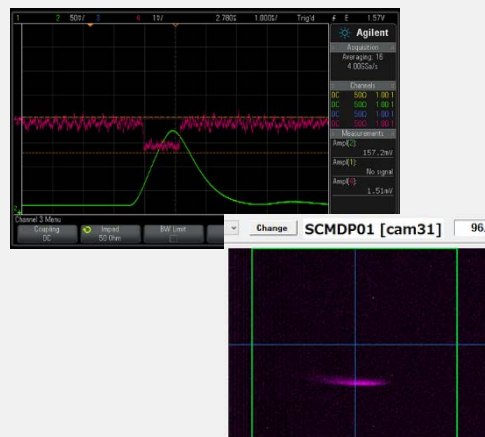
本年度のスケジュールとコミッショニング開始



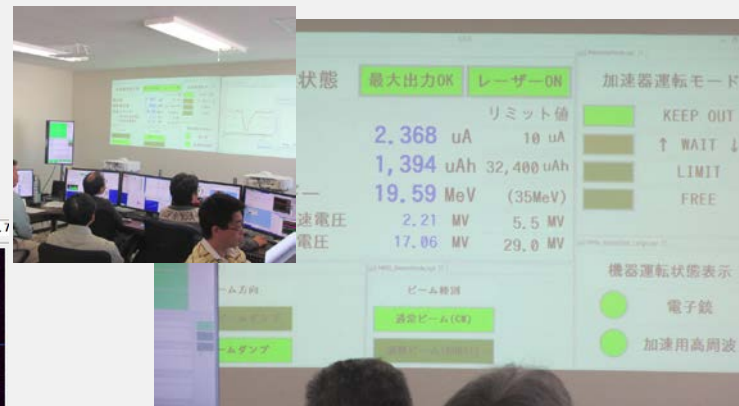
JSR14 宮島氏発表資料参考 ← 本発表内容



(2013.12)周回部ビームコミッショニング開始

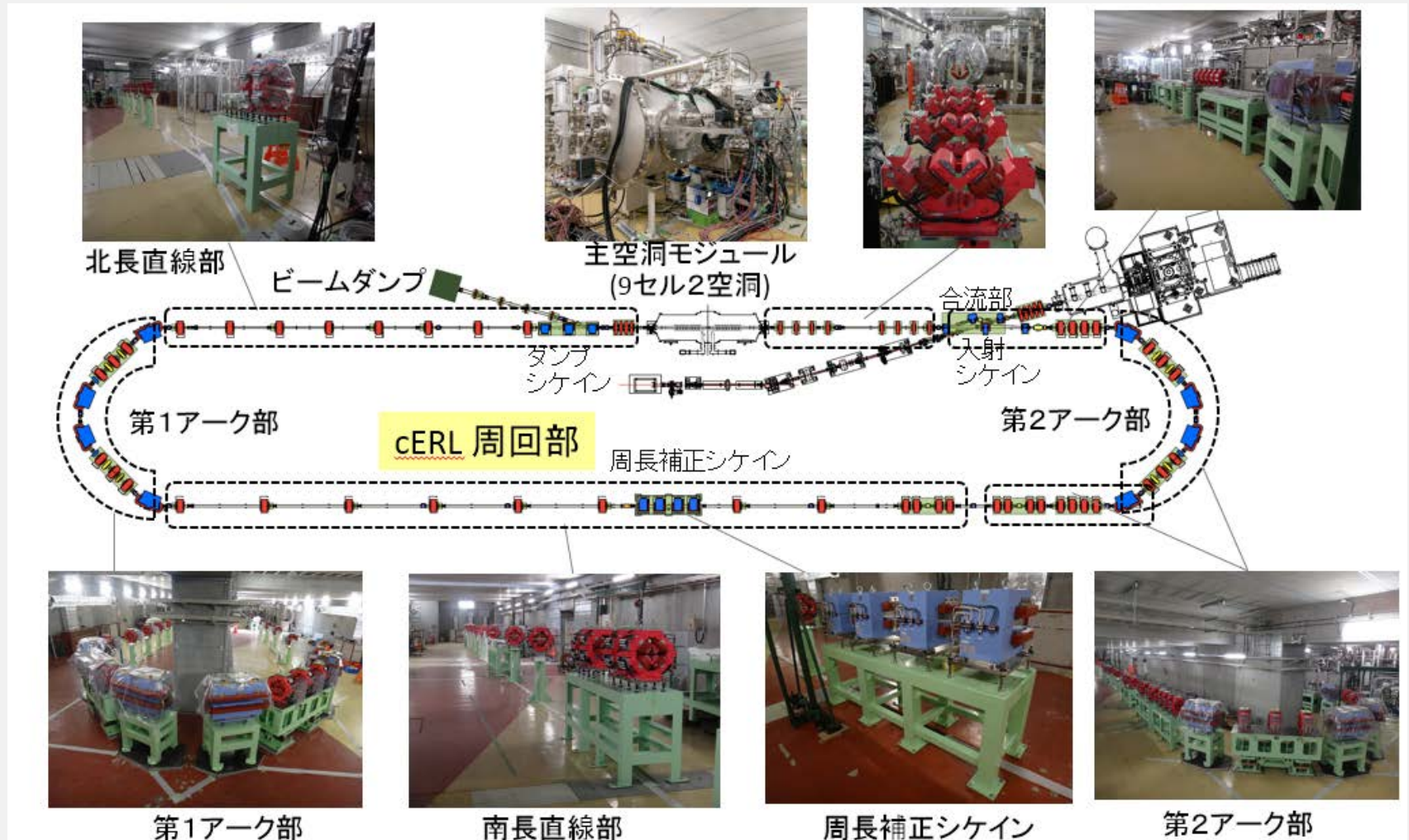


(2014.2.6) 減速ビーム確認



(2014.3.7) cERL周回部施設検査

電磁石の設置



周回部電磁石設置とアライメント



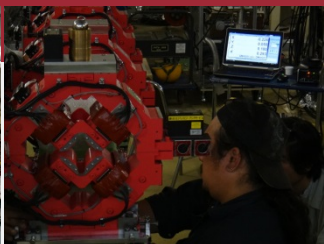
1. 壁面上基準点の精密測量



2. 床面上基準点と基準線の罫書き



3. ティルティングレベル(N3), トータルステーション(NET05X), レーザトラック(T3)を用いた電磁石精密設置



4. 電磁石半割後のビームパイプ設置

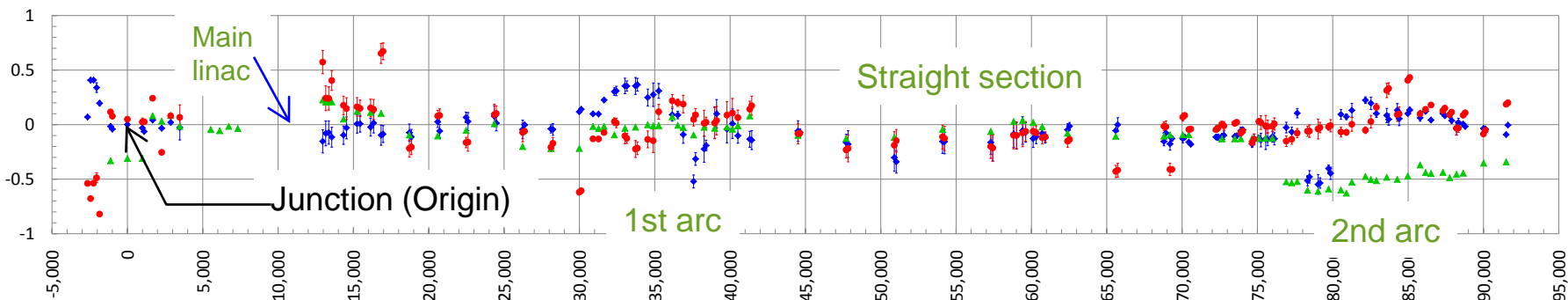


5. 最終測量

- 工期・工程の制約により、ビームパイプ設置前に電磁石を精密設置した
- ± 0.1 mm程度に調整したずれ量が一部の範囲で、 ± 0.5 mm程度となったが、性能上の問題は見られない

設計値との差(mm)

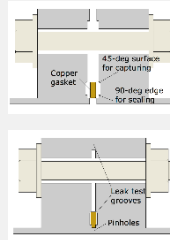
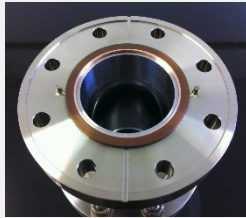
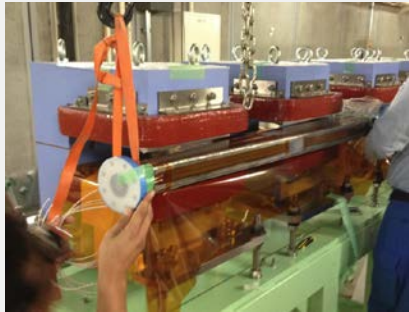
◆: dx(ビーム進行直交方向水平面内のずれ), ▲: dy(ビーム進行直交方向鉛直面内のずれ), ●: dz(ビーム進行方向ずれ)



合流点を原点として反時計回りにとった周回ビームライン上位置(mm), マイナスは入射ビームライン上位置

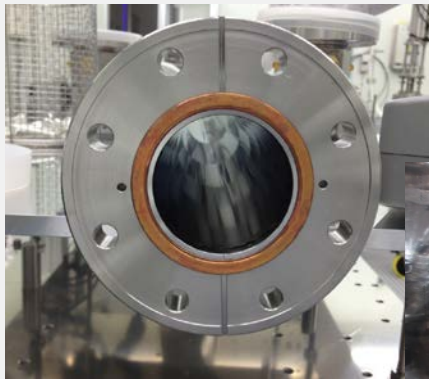
真空ダクト・Faraday Cup・ダンプの 設置・準備状況

ダクトの設置



チャンバー間
“ゼロギャップ”フランジ
Impedanceを減らす。

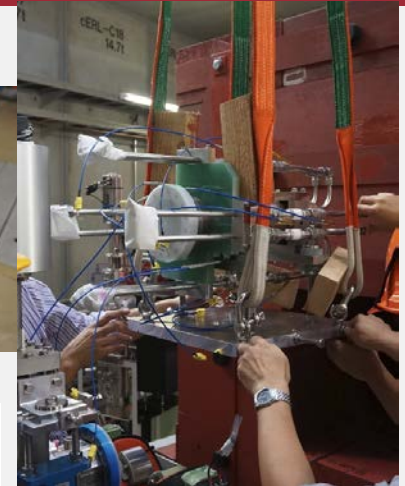
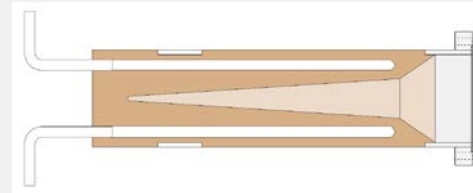
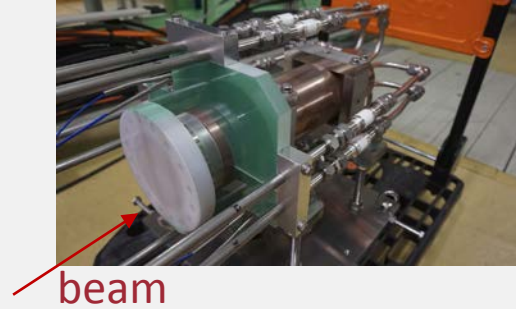
超電導加速空洞近くの真空作業



NEGコーティングの
チャンバーを設置

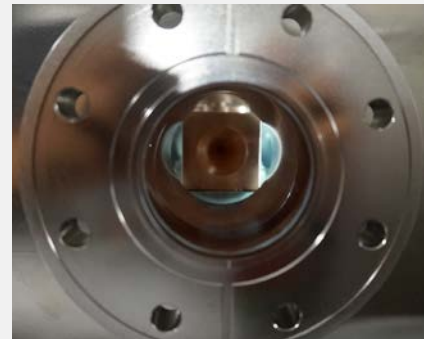


主ダンプ



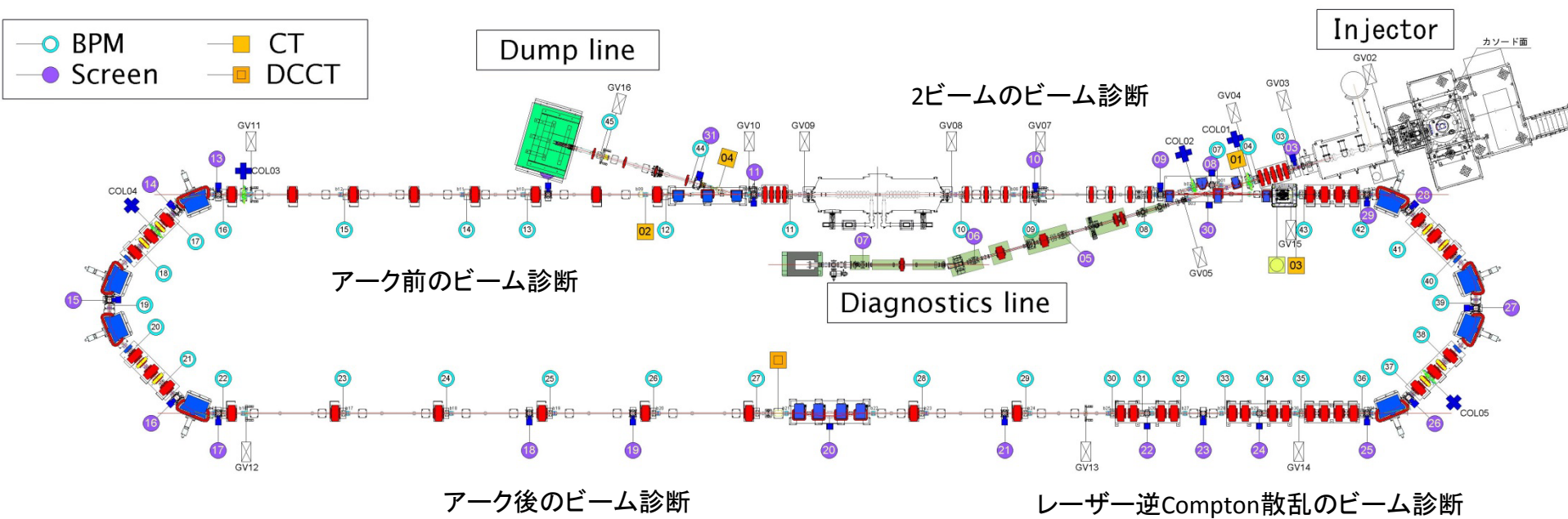
40kW対応 (φ40mmの電子ビームの場合)

可動Faraday Cup

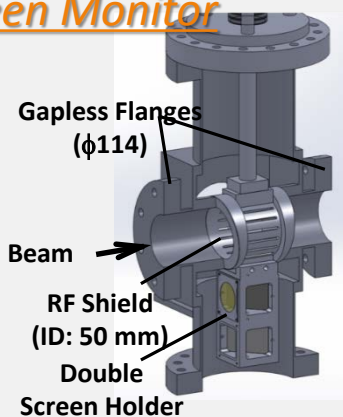


主なモニターの配置図

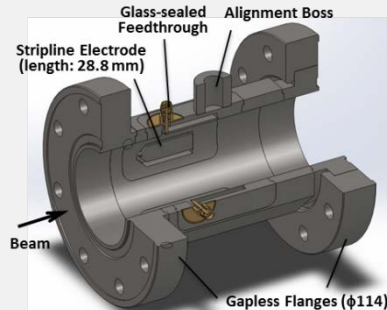
帯名崇、高井良太、山本将博：資料提供



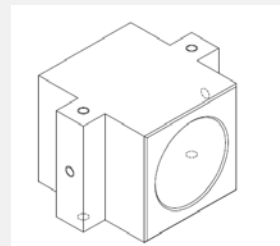
Screen Monitor



BPM

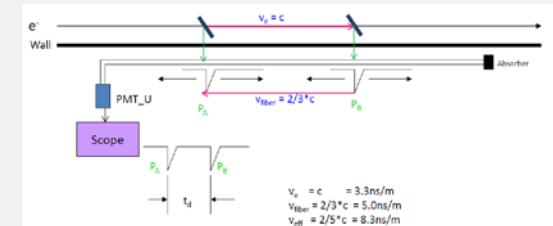


Faraday Cup



件名：ファラデーカップ本体
 材質：無酸素銅
 数量：1
 表面処理：化学研磨および脱脂処理

Fiber Loss Monitor

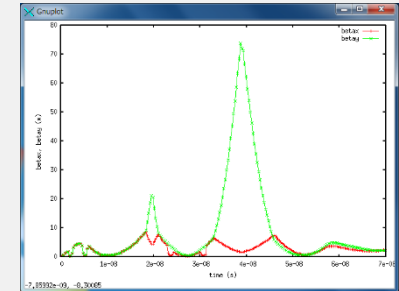


2013年12月-2014年3月のコミッションングで主に使用したもの

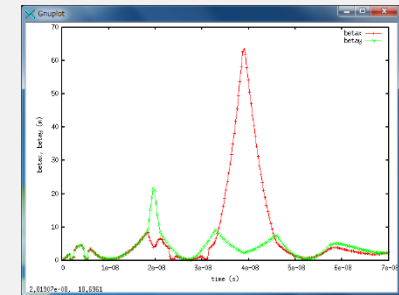
低エネルギー入射ビームに対する磁場の影響

- 周回部側シケインのBMAG05の調整中に、漏れ磁場によって入射ビームが蹴られ、軌道調整に影響した。
 - 1月のシャットダウン中に磁気シールドを追加。効果あり。
- CCGの磁石がビームに非線形な効果と数10mradのキックを与えていることが判明。
 - 入射シケインから主空洞手前までの4つのCCGを取り除く。
 - さらに入射部のopticsを β_x と β_y を入れ替えたところ、xy couplingが少なくなった。(合流部の後で β 関数の大きなピーク)
 - 主空洞直近のCCGは遮蔽したが、磁場の影響が残っている。

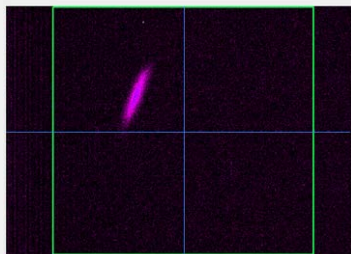
赤： β_x 、緑： β_y



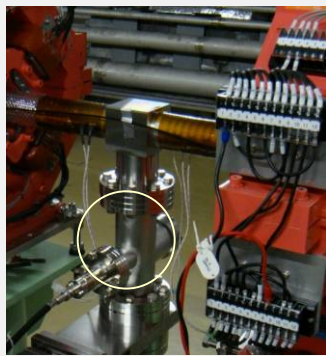
↓ 入れ替え



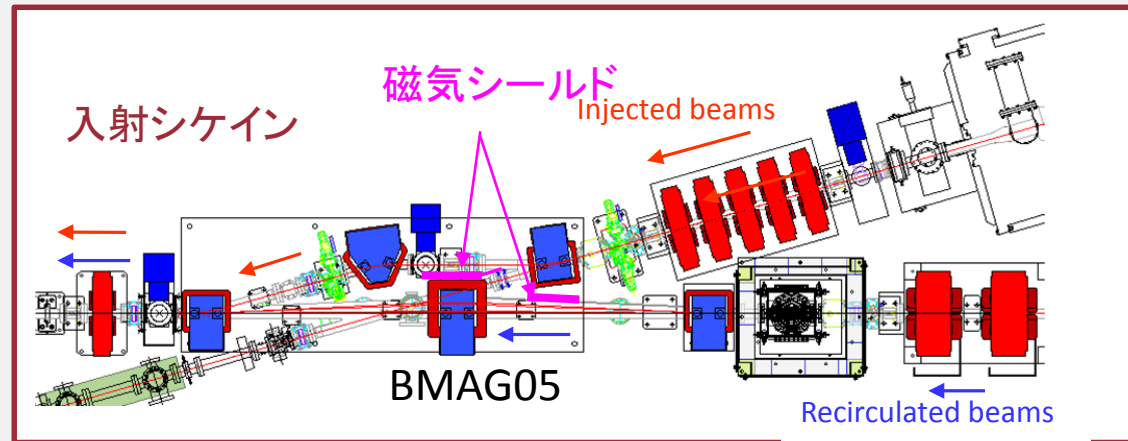
Change SCMAG05 [cam10] 55.9



主空洞加速直前のxyカップリング

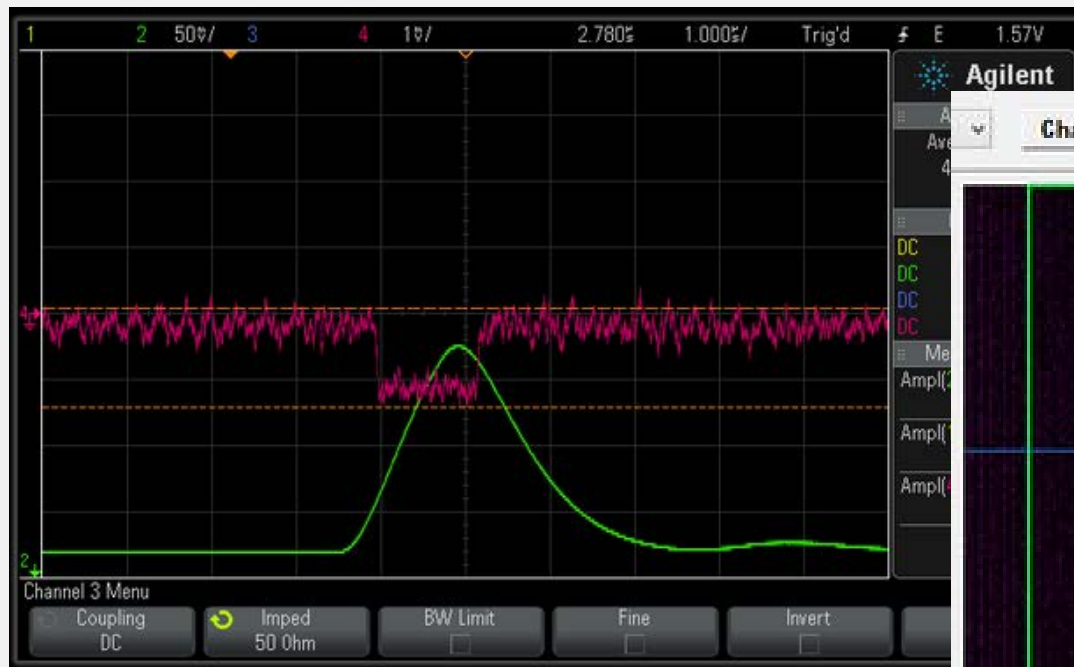


真空ダクトに近いCCG

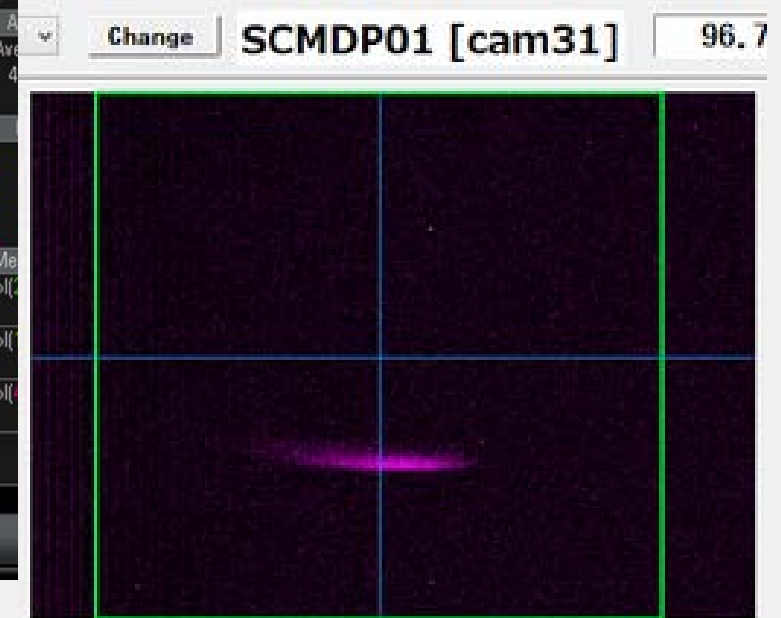


ダンプラインと主ダンプの信号

- 主ダンプFCでビームを確認。
- 少ないビームロスでダンプに成功。
- ダンプエネルギーは入射エネルギー2.9MeVに近いことも確認。



主ダンプのFaraday Cupの応答



ダンプライン入口のスクリーン

減速ビームを初観測 (2014/2/6)

Beam energy (E)

- Injector: 2.9 MeV
- Recirculating loop: 19.9 MeV

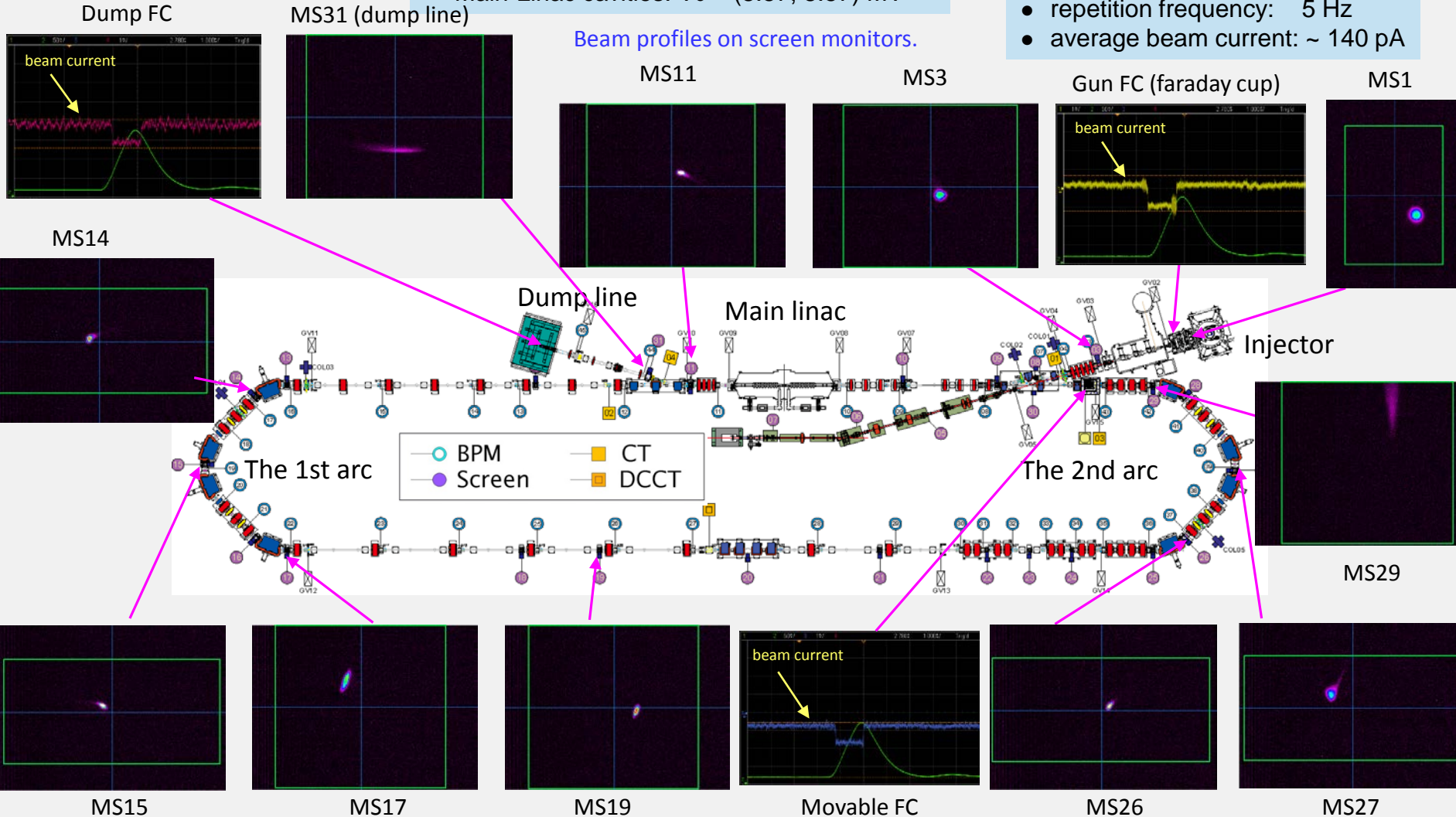
Parameters

- Gun voltage: 390 kV Buncher: OFF
- Injector cavities: $E_{acc} = (3.3, 3.3, 3.1)$ MV/m
- Main-Linac cavities: $V_c = (8.57, 8.57)$ MV

Beam pulses (macropulse)

- peak current: $\sim 24 \mu\text{A}$
- macropulse width: $1.2 \mu\text{s}$
- repetition of bunches: 1.3 GHz
- repetition frequency: 5 Hz
- average beam current: $\sim 140 \text{ pA}$

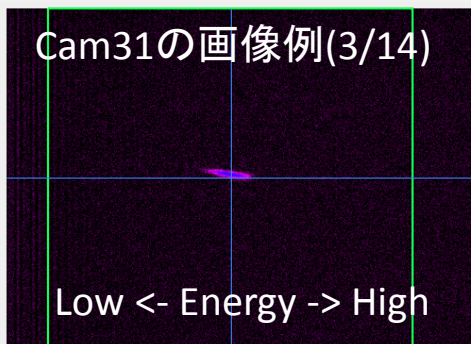
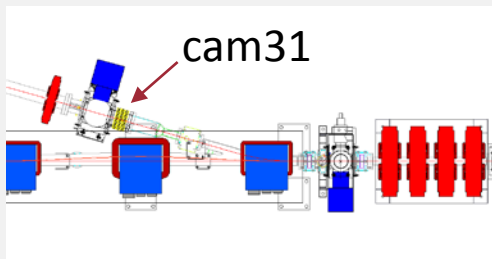
Beam profiles on screen monitors.



周長補正によるダンプエネルギーの調整

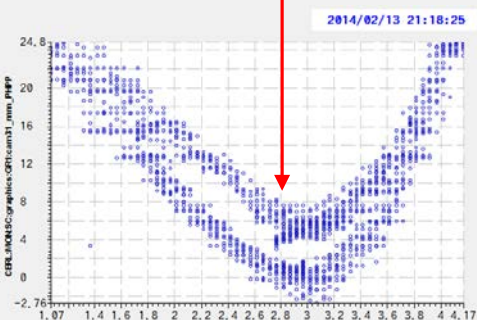
ダンプエネルギー・エネルギー広がりが最小となるように周長を調整

10uA以下の低い電流では空洞のビームローディングでの測定が困難。



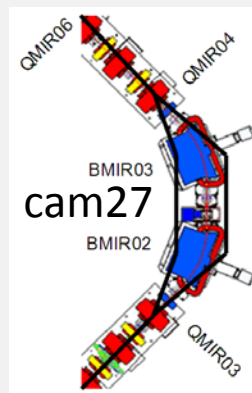
Cam31のビーム水平位置

ダンプエネルギー最小

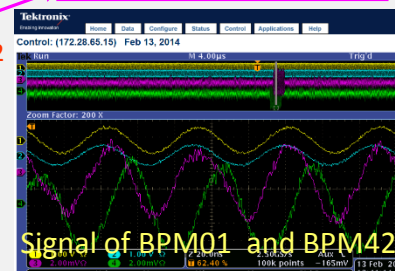
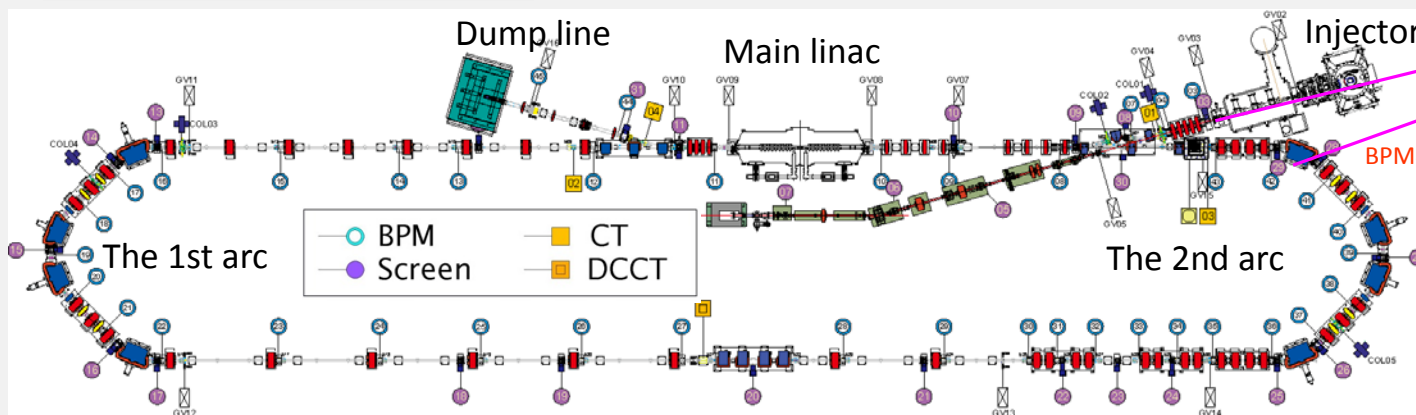


周長補正シケインの主コイルの電流

周長補正シケイン(±5mm)
微調整。Hysteresisがある。
第2アーク(±10mm)
大幅な調整。Hysteresis少ない。



外側を通す必要があった。

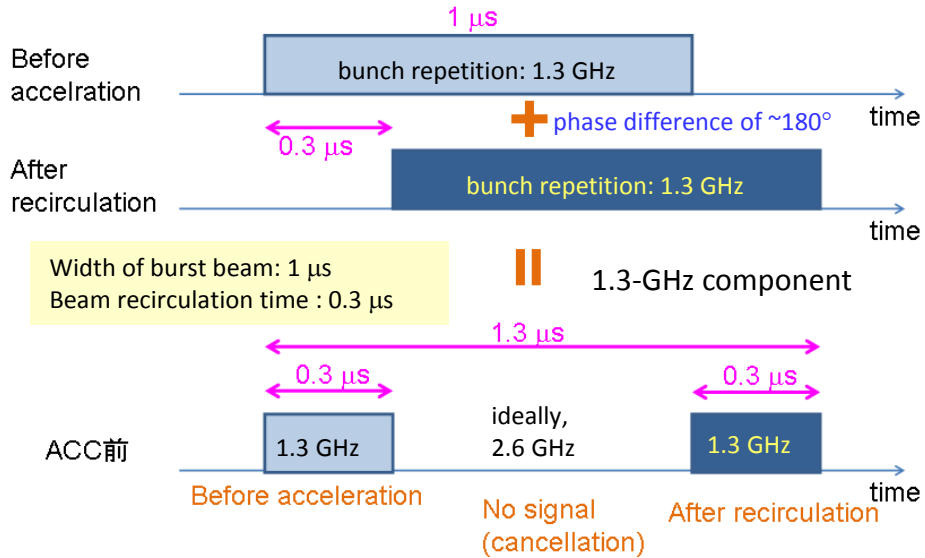


本田洋介:資料提供

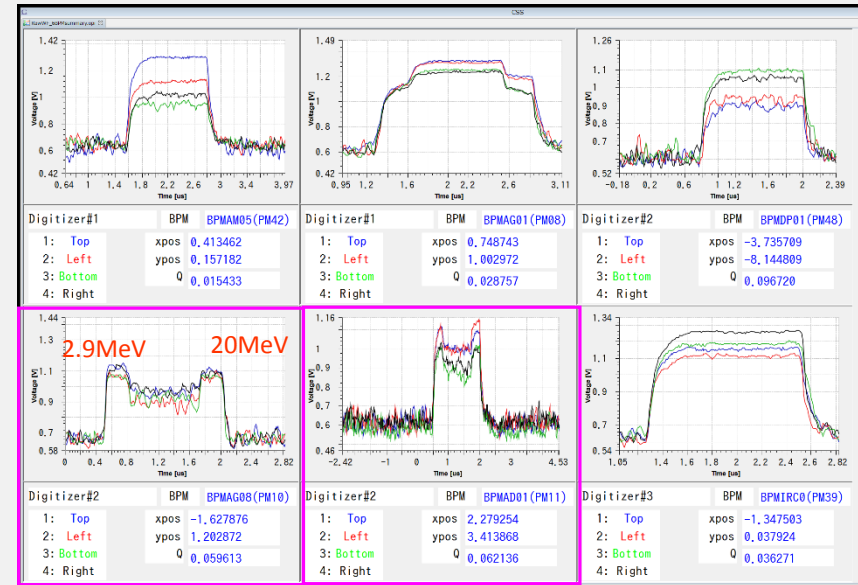
BPMによる加速・減速の2ビームの測定

帯名崇: 資料提供

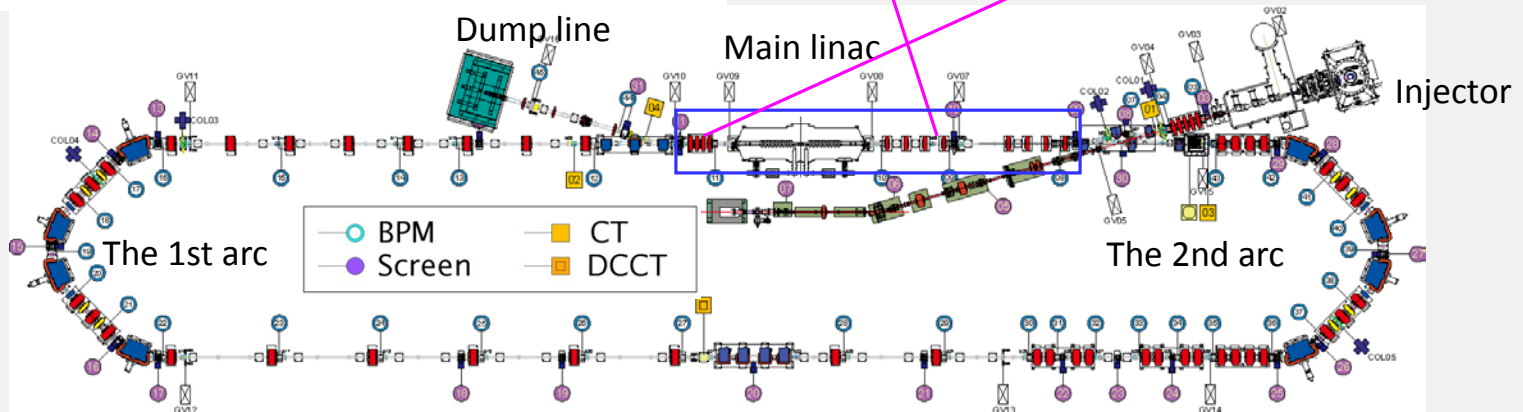
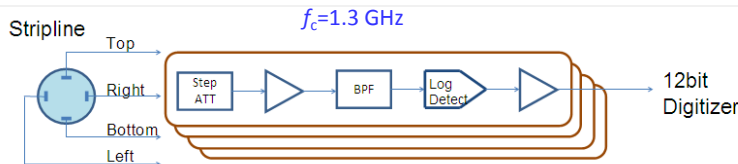
Method of BPM for two beams (burst mode)



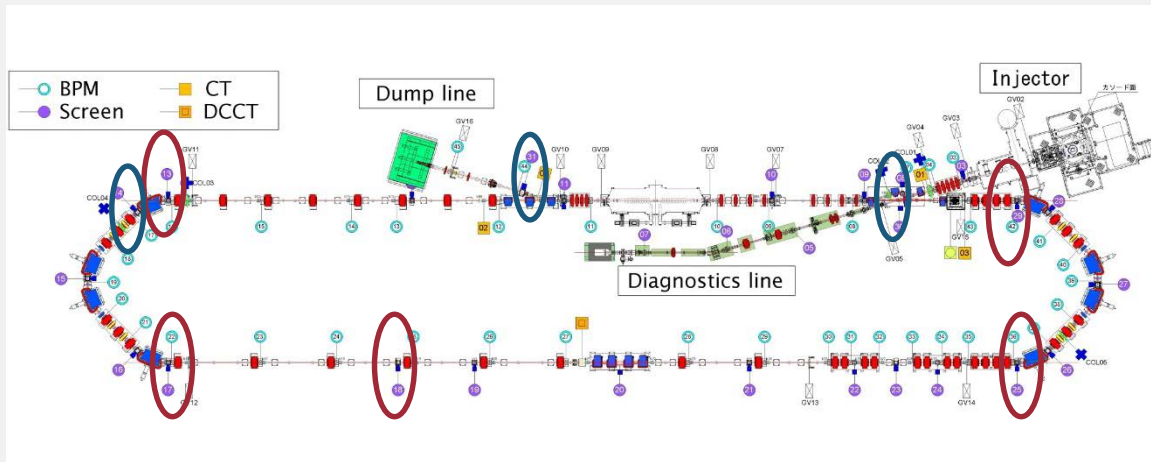
BPMの応答例



Block diagram

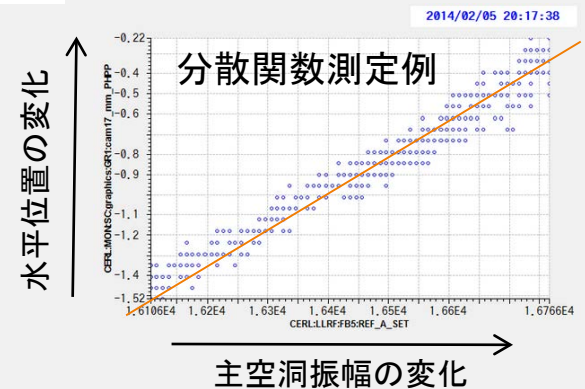


分散関数およびエネルギー広がり



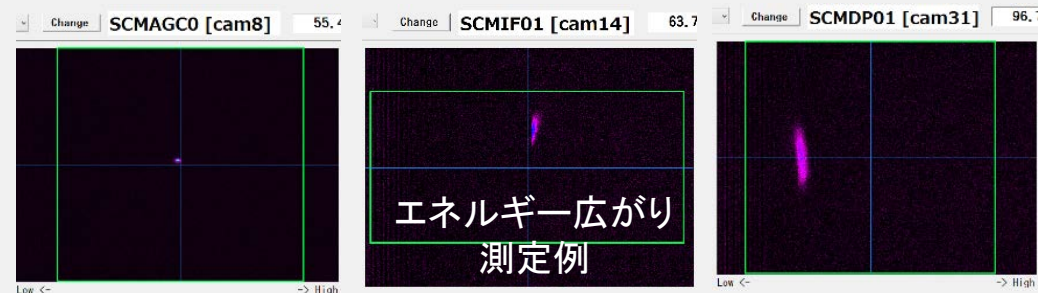
- 分散関数測定箇所
- エネルギー広がり測定箇所

測定: 2014/2/6-7	η_x [m]	η'_x	η_y [mm]	η'_y
第1アーケ前	25	-	13	-
第1アーケ後	69	0.019	100	0.015
第2アーケ前	32	-	13	-
第2アーケ後	68	-	340	-



エネルギー広がり

入射ビーム(cam8)	$< 7e-4$
周回ビーム(cam14)	$< 4e-4$
ダンプビーム(cam31)	$< 2e-3$

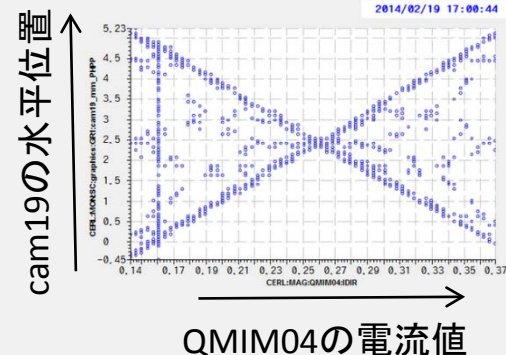


QUAD電磁石の応答とエミッタンス測定を試み

QのK値

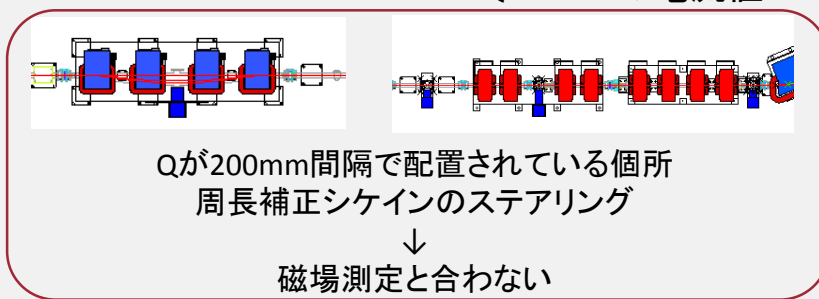
2か所で測定		ビームによる測定 [m ⁻²]	磁場測定 [m ⁻²]	誤差
Case1	水平	3.42	3.48	~2%
	垂直	3.42	3.55	~2%
Case2	水平	3.42	3.55	~2%
	垂直	3.42	3.48	~2%

厚レンズで計算
(磁極長200mm)
読み取り誤差~4%

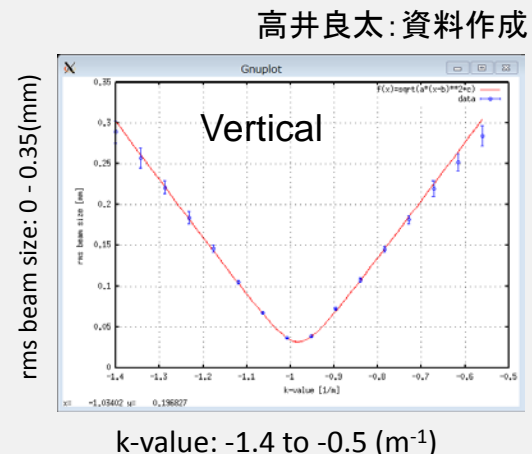
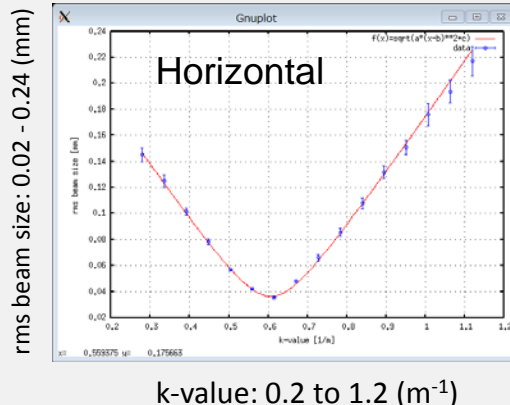
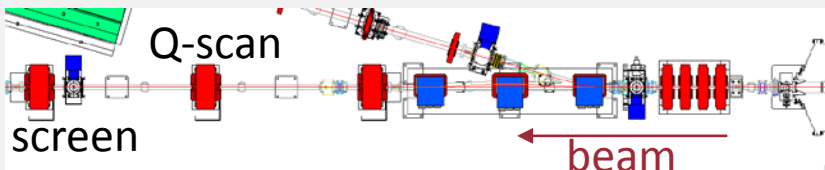


ステアリング

	ビームによる測定	磁場測定	誤差
水平	1.78	1.73	3%
垂直	1.82	1.85	1.6%

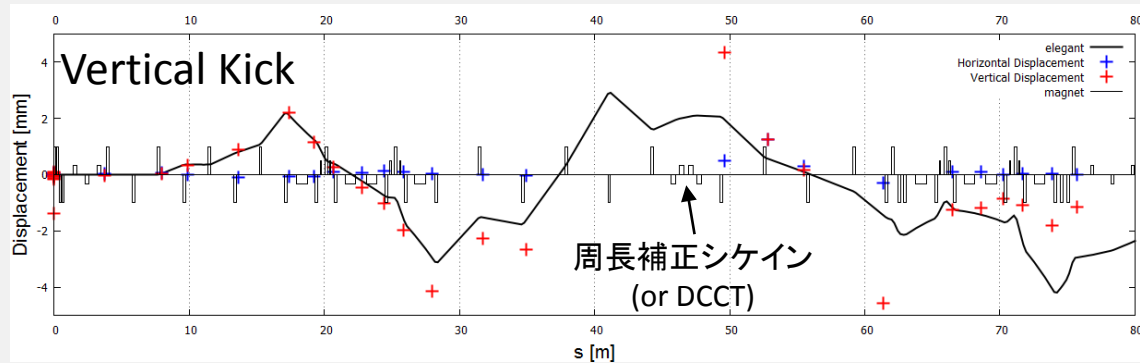
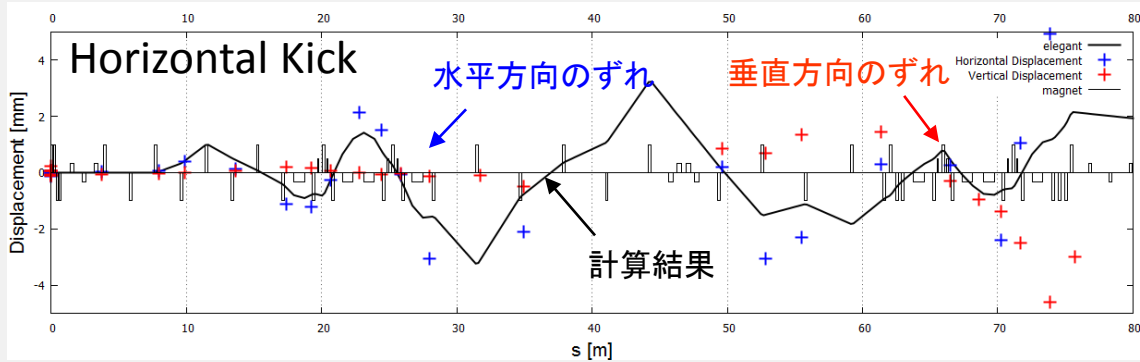


Q-scan によるエミッタンス測定を試み
複数の個所で測定、現在解析中。



高井良太: 資料作成

Single-Kick responseの測定

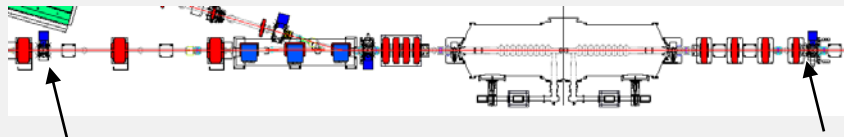


計算は磁場測定の結果をもとに elegantで行った。

キックは主空洞加速後で行った。

水平方向のキックで周長補正シケイン後からxy couplingがみられる。

垂直方向のキックで水平方向に蹴られることは少ない。

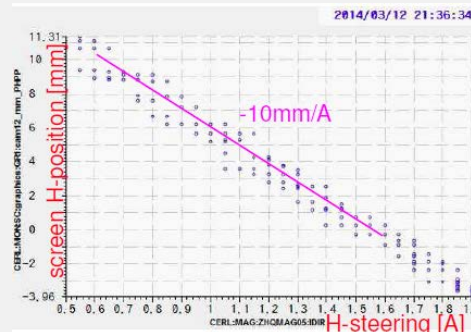


monitor

Single Kick

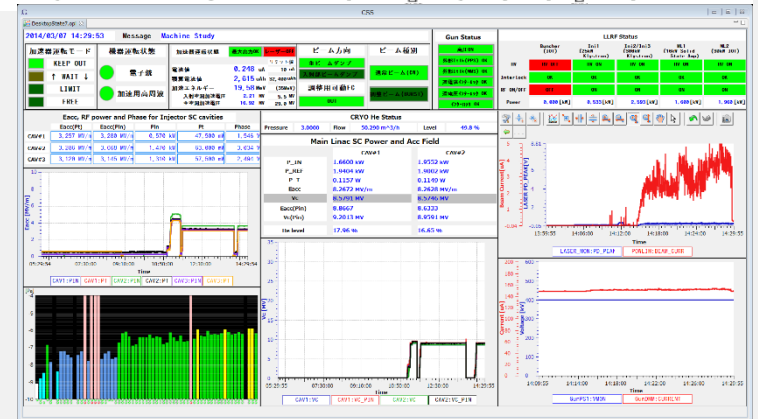
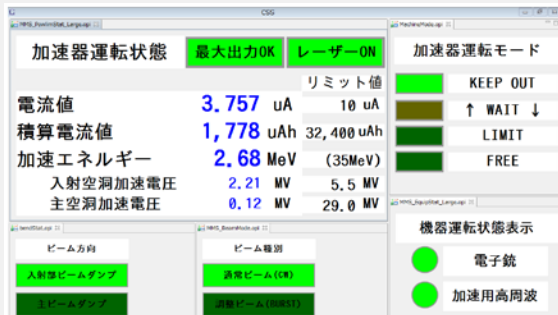
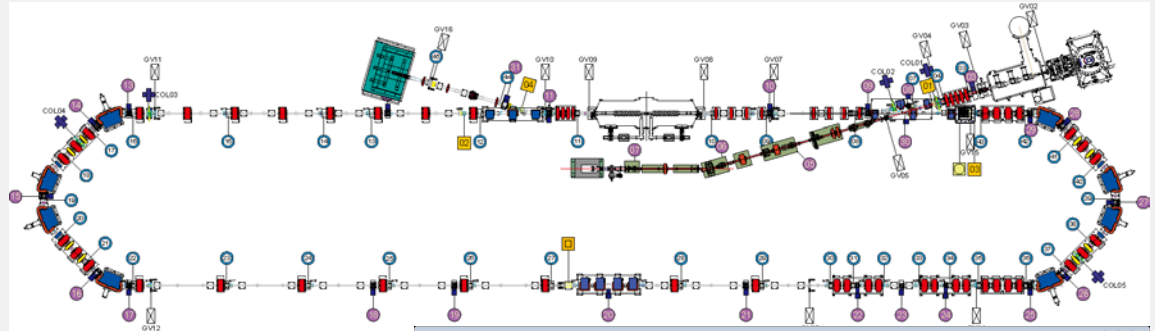
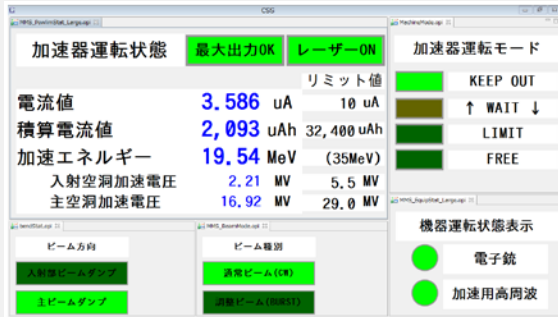
主空洞のresponseの応答結果より、xy両方向に同じ程度のFocus力が働いていそうである。

本田洋介:資料提供



主空洞手前のKickと加速後のビーム位置の測定結果

施設検査



□ 周回部：

- CW運転、エネルギー減速あり
- 申請出力35MeV・10uAの2割 → 運転エネルギー20MeV, 3.6uA

□ 入射部：

- CW運転、診断ライン
- 申請出力6MeV・10uAの2割 → 運転エネルギー3MeV, 3.6uA

□ 可動Faraday Cup (10nA制限) やInter lockの試験など

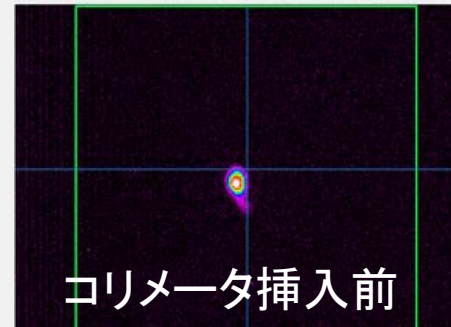


ビームロス

□ コリメータの導入 (3/6)

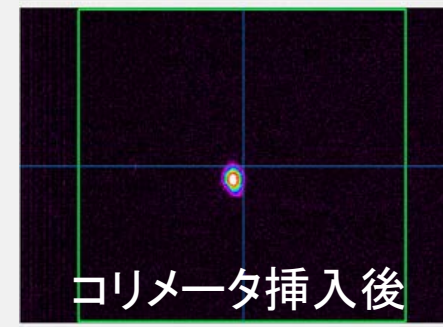
- 合流部分散部のコリメータ
- 中心から3.48mmまで入れたところ、ビームのテールらしきものをカット。
- Fiber Loss monitorの応答が減少した。

Change SCMAG05 [cam10] 55.



コリメータ挿入前

Change SCMAG05 [cam10] 55.

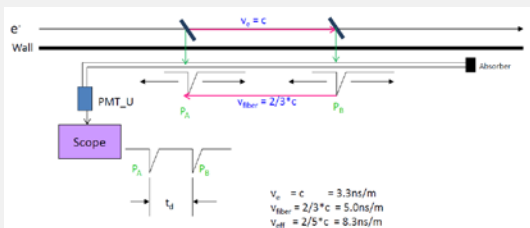


コリメータ挿入後

□ バンチャーの導入 (3/14)

- ビームロスの低減?
- エネルギー広がり为数分の一に減少。
- レーザーのタイミングのトレランスの増加

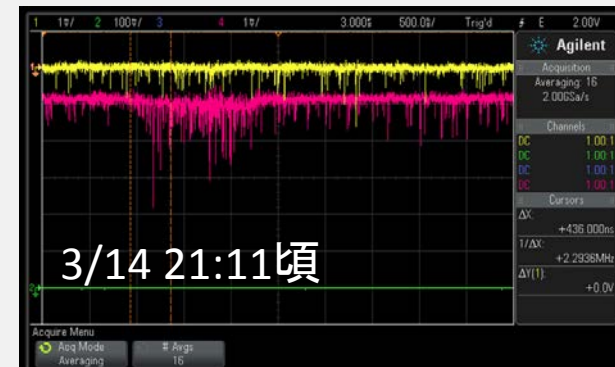
Fiber Loss Monitor



ピンク: 第1アーク
黄色: 第2アーク



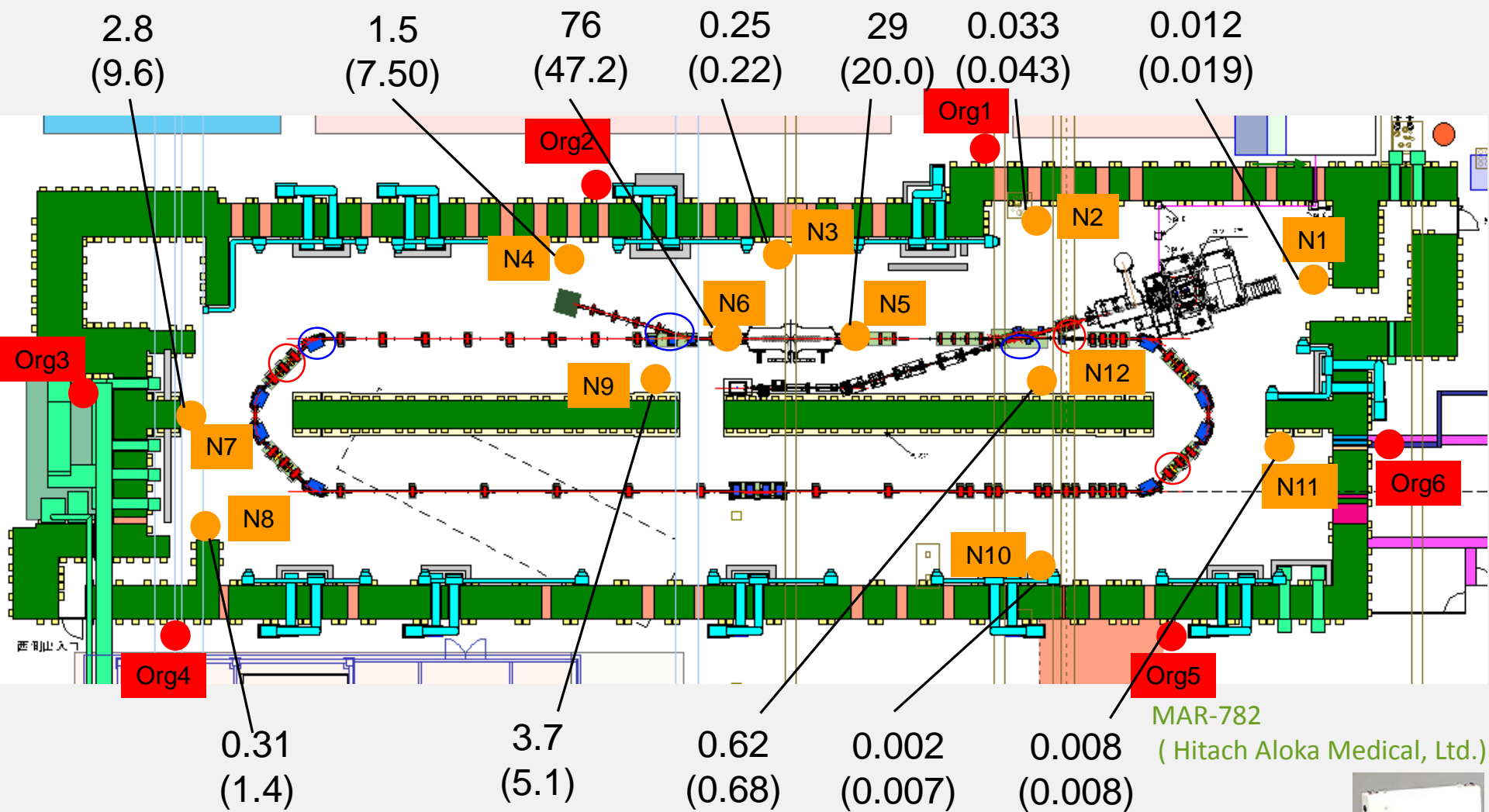
3/7 15:25頃



3/14 21:11頃

バンチャーの導入でビームロスが減ったように見える。
(しかし、レーザーの強度を未確認。)

周回部6.5 μ A, バンチャー $V_c=30$ kV (2014/03/14 20:35:26)
 () 内は、以前の周回部CW運転時 $I=4.5$ μ A (2014/02/21 16:47頃)
 (運動エネルギー: 周回部 $T=19.4$ MeV、入射部 $T=2.4$ MeV) 単位: mSv/h



3/14測定時:

入射器空洞: $E_{acc}(Pt) = (3.24, 3.29, 3.12)$ MV/m 主空洞: $V_c = (8.58, 8.59)$ MV



今後の運転スケジュール

- レーザー逆コンプトン散乱の実施や電力使用量の見積もりからスケジュールを調整。

5/7 –	超電導空洞冷却
5/19-6/20	エイジング・コミッショニング運転
6/22-12/12	LCSビームライン・実験室の建設 共振器の設置・安全系の変更など
12/15-1/9	安全系検査
1/13/-	超電導空洞冷却
1/26-3/27	エイジング・コミッショニング運転

まとめ

- タイトなスケジュールの中、コンパクトERLの建設が昨年末に無事終了した。
- 2月6日に主ダンプで減速ビームを確認。ビームロスも少なかった。
 - 磁場漏れやCCGの対策などが功を奏した。
- その後、ビーム調整を進めていく。
 - 周長補正とダンプエネルギーの最小化
 - BPMによる2ビームの測定が機能した。
 - Opticsの測定（電磁石の磁場測定と照合、分散関数やSingle Kickの応答測定など）
 - そのほか、進行中のスタディ
- 今後の方針
 - 大電荷電子ビームの低エミッタンス化
 - レーザー逆Compton散乱によるX線生成
 - 100uA-1mAのCW運転の実現
 - テラヘルツビームラインの実現

今後も3GeV-ERL計画を実現するべく、開発を続ける。