

バンチ圧縮スタディについて

ビームダイナミクスWG
2016年1月28日(木)

加速器第7研究系
島田 美帆、中村 典雄

バンチ圧縮studyの目的

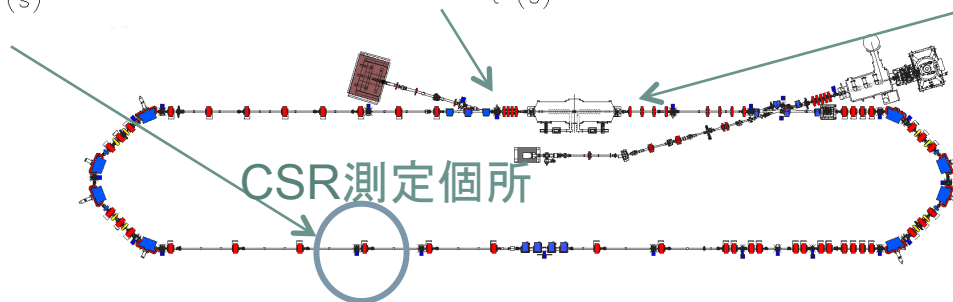
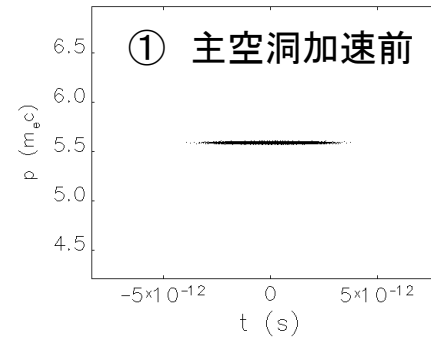
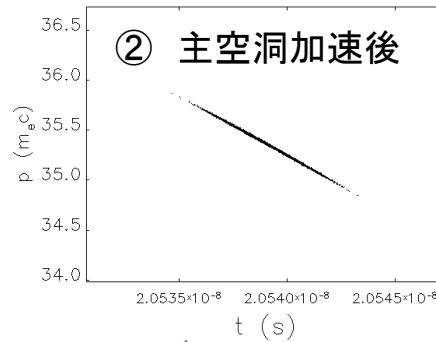
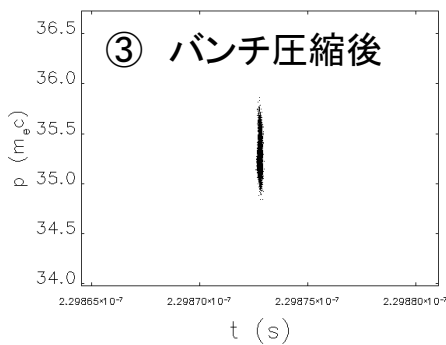
バンチ圧縮のopticsで
エネルギー回収・ダンプまでの誘導を行う。

- バンチ圧縮のoptics (non isochronous) のエネルギー回収は初めて。
- エネルギー回収に成功していない状態では、「ERLでCSR・CTRの測定に成功した」と言えないのでは？

バンチ圧縮

- バンチ圧縮はCSR (cam18) の強度で判定
- 3つのノブ (主空洞位相・ ϕ 、第1アークR56・Q、2次項補正・SX)
- 最適化は2段階*
 1. Qと ϕ の調整、SX=0設定
 2. SXのみ

* ϕ の調整で中心エネルギーが変わるため軌道がずれる。
Qの収束力は軌道が多少ずれても影響が少ないが、SXの水平方向は影響が大きいため同時調整を行わない。
この手順は、中村さんの計算手順と異なるため注意。



中村氏、バンチ圧縮&復元.pptx
(BDWG2014.10.16)の図を一部改変

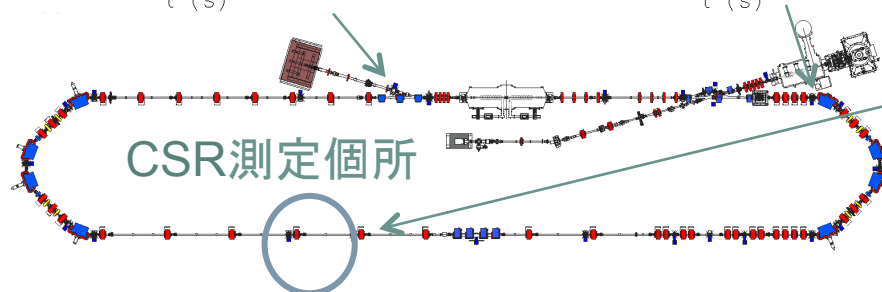
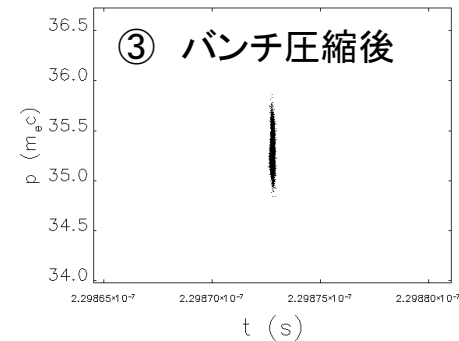
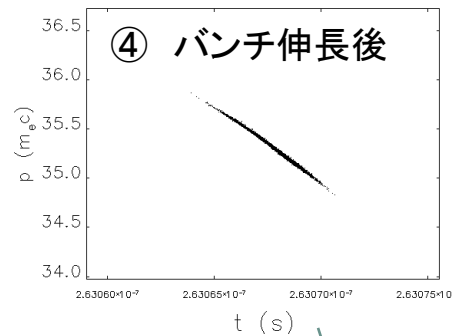
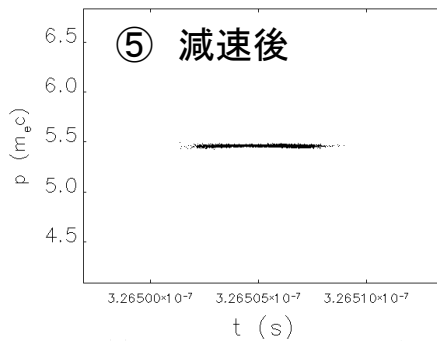
バンチ伸長・エネルギー回収

• 周長補正

- ダンプエネルギーが入射ビームと等しくなるように周長補正。
 - およそ3MeVになることをエネルギー測定パネルで確認。
 - 通常の運転と異なり、エネルギー最小になる点が最適な解ではない。

• バンチ伸長

- 第2アーク出口でバンチ長を測定する手段は(今のところ)ない。
- ダンプシケインで十分小さいエネルギー広がりになっているかどうかで判定。
- そのほか、BPMによるR56の測定を検討中。(特に第2アーク出口)



中村氏、バンチ圧縮&復元.pptx
(BDWG2014.10.16)の図を一部改変

バンチ伸長・エネルギー回収の手順

- バンチ長が元に戻っていないときの影響

- a. ダンプのエネルギー広がりが大きくなる。
- b. 短バンチによる主加速空洞の発熱。
- c. RFが不安定になる。
- d. その他

⇒ bとcは低電流で軌道調整をしている時ではわからない。

- 第2アーク調整手順

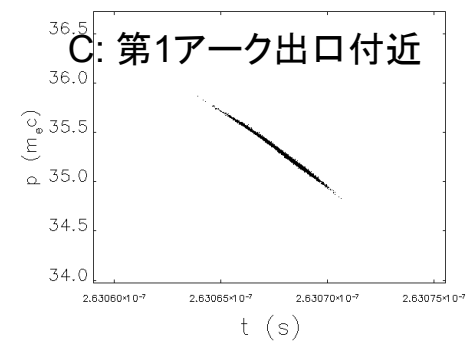
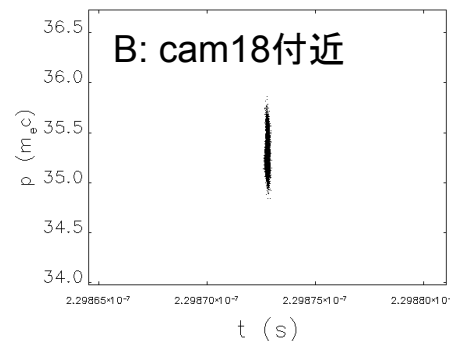
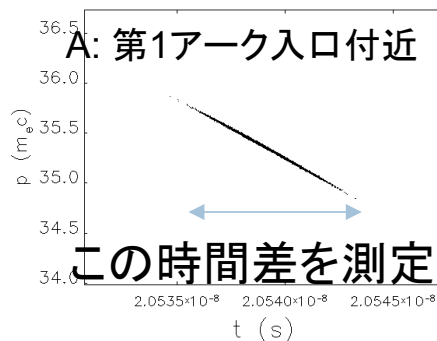
1. 周長補正(B) → ダンプ中心位置
2. 第2アークR56(Q) → ダンプのエネルギー広がり
3. 2次項補正(SX) → ダンプのエネルギー広がり

⇒ エネルギー広がりだけが頼り。

手がかかり・測定可能な情報が少ないため、
BPMによるR56の測定をしたい

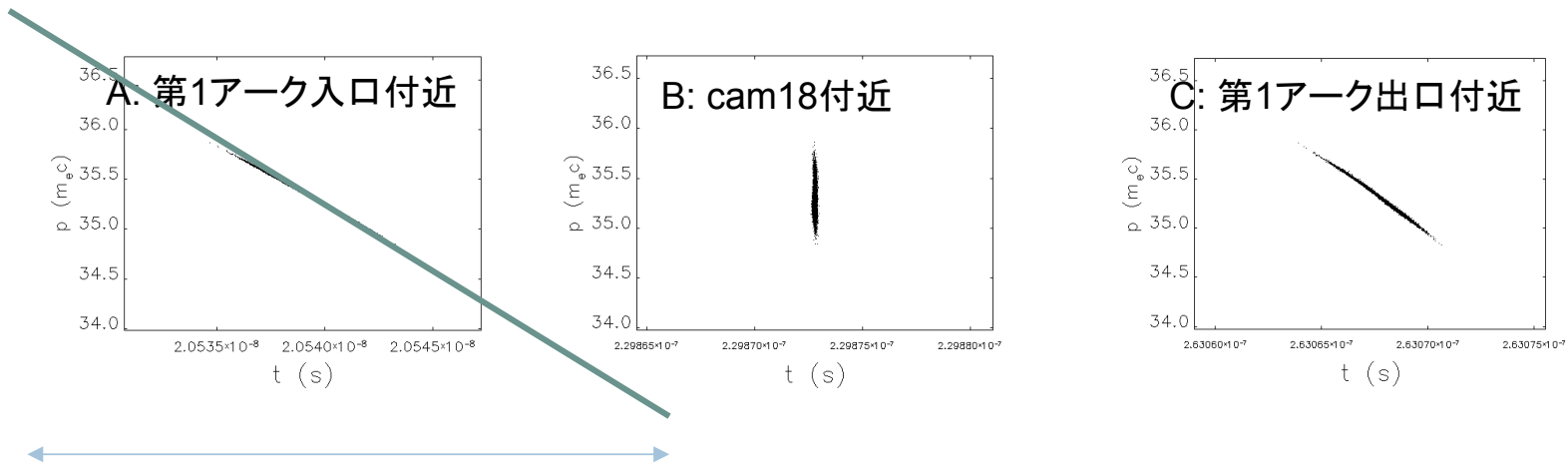
BPMによるR56の測定1

- アークのR56が設計通りになっているか確かめたい。
 - 第2アーク出口でバンチ長が伸びていることをCSRで確認することができない。
 - CSRの測定は入射合流部のビームプロファイルにも依存するため。
 - 縦方向のビームプロファイルは伸び縮みするだけで、形状に変化なく重心の位置は変化なしと仮定。
- BPMによるタイミング測定を実施
 - 主加速空洞の位相を変化させた前後の到着時間の差を測定
- 場所は3か所
 - A) バンチ圧縮前の第1アーク入口付近
 - B) バンチ長が最短になるcam18
 - C) バンチ長を元に戻す第2アーク出口付近



しかし、1ps -> 数100fsの時間差はBPMの分解能以下

BPMによるR56の測定2



外挿して、この時間差を測定
しかし、あまり $\Delta E/E$ が大きいとアークを通過しない。

- アークのエネルギーアクセプタンス $\Delta E/E$: $\sim 2\%$
 - これまでの測定結果より
- 位相 φ 、 $\sin\varphi$: 15~25 deg、0.25~0.42
 - 中村さんのシミュレーション結果より
- 測定可能な Δt : 9.4~5.8 ps, BPMタイミング測定分解能: $\sim 1\text{ps}$
 - Δt が大きすぎるとアークを通過しない。
 - 通常運転で $\Delta t \sim 9.4\text{ps}@15\text{deg}$ となるように位相差 $\Delta\varphi$ を求め、バンチ圧縮opticsでは1psになることを測定可能か？

$$\Delta t \sim \Delta E/E / 2\pi f \downarrow RF \sin\varphi$$

シミュレーション結果 (2)

中村氏、ビームダイナミクスWG
「バンチ圧縮&六極電磁石」より
初期パラメータ依存性

	バンチ長 σ_i [fs]	運動量幅 σ_p/p	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場 K_2 [m ⁻³]	RF位相 ϕ_{RF} [deg]	T566 (arc)	T166 (arc)	T266 (arc)
All SX ON	60.64	0.00512	1.13, 1.16	-14.9, -33.3 -21.0, -22.2	16.46	0.466	-1.16	-0.12
Q→0.77 pC	59.93	0.00509	1.03, 1.16	-17.7, -29.1 -22.1, -22.2	16.59	0.552	-0.69	-0.11
$\sigma_{i0} \rightarrow 1\text{ps}$	59.25	0.00256	1.02, 1.05	-4.55, -43.4 -17.3, -22.7	16.46	0.495	-2.12	-0.20
$\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$	117.95	0.00512	1.04, 1.16	-13.8, -33.2 -20.9, -22.2	16.49	0.554	-1.08	-0.14
SX1 ON	65.74	0.00516	1.60, 1.35	-106.4	16.47	0.433	-6.44	1.83
Q→0.77 pC	65.23	0.00507	1.44, 1.35	-104.3	16.53	0.575	-6.33	1.78
$\sigma_{i0} \rightarrow 1\text{ps}$	62.72	0.00253	1.28, 1.12	-117.3	16.12	-0.300	-7.03	2.07
$\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$	119.52	0.00518	1.61, 1.36	-106.3	16.38	0.443	-6.44	1.83
SX2&4 ON	60.94	0.00514	1.13, 1.15	-42.4, -40.1	16.51	0.434	-0.96	0.03
Q→0.77 pC	60.02	0.00510	1.03, 1.14	-41.2, -40.2	16.64	0.536	-0.81	0.02
$\sigma_{i0} \rightarrow 1\text{ps}$	61.54	0.00261	1.20, 1.05	-63.2, -28.0	16.07	-0.253	-5.10	0.14
$\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$	117.53	0.00517	1.13, 1.15	-47.2, -35.5	16.43	0.437	-2.15	0.04

バンチ電荷7.7pC、バンチ長2psではCSR wakeの影響は大きくない(0.77pCと大きな差はなかった)。

シミュレーション結果

初期パラメータ値: $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_{i0}=1\text{ps}$, $\sigma_{p0}/p_0=0.001$

	バンチ長 σ_t [fs]	運動量幅 σ_p/p	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場 K_2 [m ⁻²]	RF位相 ϕ_{RF} [deg]	T566 (arc)	T166 (arc)	T266 (arc)
	上:バンチ圧縮時 下:バンチ復元時			上: SXIF 下: SXIR	上: 加速 下: 減速	上: 第1アーク 下: 第2アーク		
SX2&4 ON	45.2	0.00384	1.16, 1.20	-52.3, -35.0	24.62	0.053	-2.85	0.08
	1195	0.00115	1.15, 1.19	-64.4, -40.8	205.95	-0.438	-3.84	-0.01
SX2 ON	50.1	0.00401	1.34, 1.20	-89.8	25.11	-0.048	-12.0	0.22
	1287	0.00116	1.18, 1.28	-109.7	205.30	-0.515	-14.4	-0.22
SX2&4 ON	42.7	0.00390	1.03, 1.20	-51.3, -35.7	25.07	0.066	-2.64	0.08
Q → 0.77 pC	1242	0.00103	1.01, 1.19	-62.7, -40.8	204.84	-0.309	-3.63	-3e-3
SX2 ON	48.9	0.00391	1.25, 1.19	-88.6	25.10	0.055	-11.8	0.21
Q → 0.77 pC	1252	0.00104	1.04, 1.27	-109.2	204.74	-0.476	-14.3	-0.22
SX2&4 ON	45.3	0.00777	1.34, 1.54	-52.2, -35.1	25.18	0.047	-2.83	0.08
$\sigma_{i0} \rightarrow 2\text{ps}$	2387	0.00114	1.21, 1.82	-56.6, -46.3	205.13	-0.297	-2.22	-0.03
SX2 ON	69.4	0.00779	4.90, 1.56	-89.8	25.33	-0.041	-12.0	0.22
$\sigma_{i0} \rightarrow 2\text{ps}$	2648	0.00383	2.42, 1.75	-116.5	204.80	-1.062	-15.2	0.28

上表の全ての場合に、バンチ圧縮は可能であった ($K_2 < 200[\text{m}^{-2}]$, $L_{SX}=10[\text{cm}]$)。

上表のほとんどの場合、バンチ復元は可能であった ($K_2 < 200[\text{m}^{-2}]$, $L_{SX}=10[\text{cm}]$)。

$Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_{i0}=2\text{ps}$ では分散によるビームサイズが大きくなり、エミッタンスも増加する。

六極電磁石各アーク部1台の場合は、2次の分散やエミッタンスの増加が見られた(特に $\sigma_{i0}=2\text{ps}$ の場合)。

バンチ圧縮パラメータ

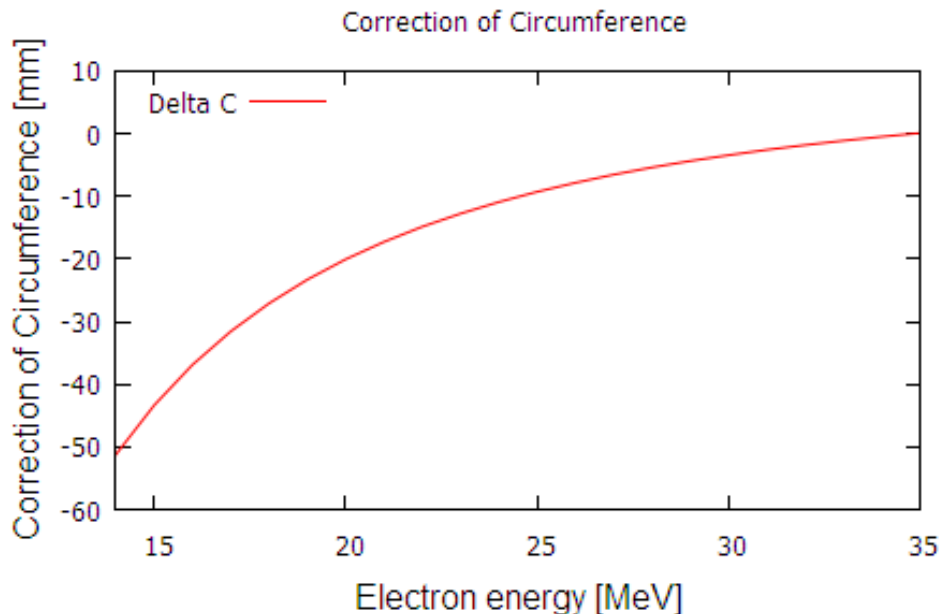
- バンチ長が最短となるときの R_{56} とバンチ長 σ_z^f

$$R_{\downarrow 56} \sim c / 2\pi f_{\downarrow RF} \cdot 1 / \tan \varphi_{\downarrow RF} \quad \sigma_{\downarrow z}^{\uparrow f} \sim R_{\downarrow 56} \sigma_{\downarrow z}^{\downarrow i} \delta^{\uparrow f} \sim 2\pi f_{\downarrow RF} / c \tan \varphi_{\downarrow RF} \sigma_{\downarrow z}^{\uparrow i}$$

上付き文字 i: バンチ圧縮前 f: バンチ圧縮後

- SXの台数について
 - 7.7 pC/bunch, 2 psの条件では2台(SX2、SX4)の方がエミッタンス増加を避けることができる。
 - それ以外の条件では1台(SX2)のみで十分
- 6極の強さ
 - SXIF02:-90[m-2], SXIR02:-100[m-2]@RF 25deg.

オフレスト加速と周長補正



30度オフレスト加速



およそ10mmの周長補正
(片側アークの最大補正量)

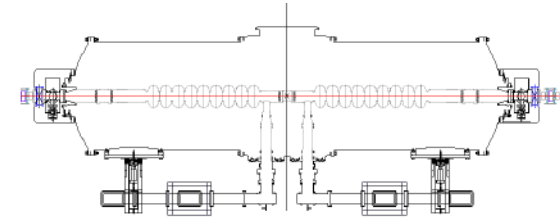
基準エネルギーが20MeVの場合

周回エネルギー [MeV]	入射エネルギー [MeV]	加速エネルギー [MeV]	補正量 [mm]
14.463	2.463	12	-47.38
15.658	2.658	13	-38.97
16.854	2.854	14	-32.28
18.050	3.050	15	-26.88
19.247	3.247	16	-22.45
20.444	3.444	17	-18.78
21.642	3.642	18	-15.69
22.840	3.840	19	-13.08
24.038	4.038	20	-10.85

運動量比が1:6の場合の補正量

位相をずらしすぎると周長補正の限度を越えることも。(第1アークも使えば、可能ではある。)

主加速空洞の位相



正しい位相 φ_0 から φ だけずれているとの
空洞に回収されるエネルギー E

ML1はon crest, ML2で $2\varphi_0$

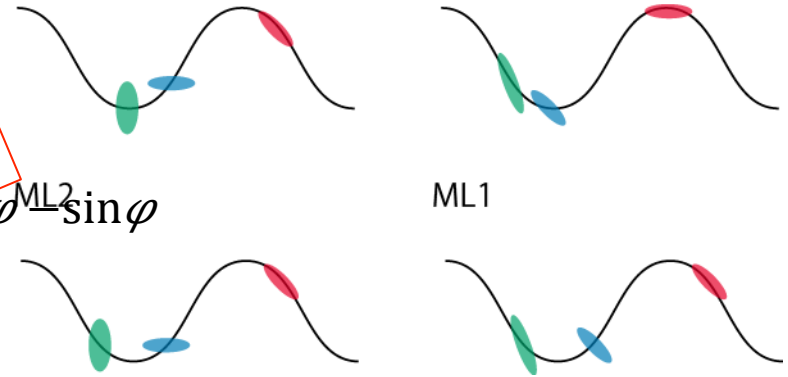
$$E_{\downarrow 1} = \cos(2\varphi_{\downarrow 0} + \varphi) + \cos(\varphi)$$

$$\partial E_{\downarrow 1} / \partial \varphi = -\cos 2\varphi_{\downarrow 0} \sin \varphi - \sin \varphi$$

$$\sim -\sin 2\varphi_{\downarrow 0}$$

ML2

ML1



ML1はon crest, ML2で $2\varphi_0$

$$E_{\downarrow 2} = 2\cos(\varphi_{\downarrow 0} + \varphi)$$

$$\partial E_{\downarrow 2} / \partial \varphi = -2\cos \varphi_{\downarrow 0} \sin \varphi - 2\sin \varphi_{\downarrow 0} \cos \varphi$$

$$\sim -2\sin \varphi_{\downarrow 0} \quad (\varphi \ll 1)$$

主加速空洞の位相と空洞出口の
縦方向位相空間の模式図

青と緑でダンプエネルギーが等しいが、
その周長差はおよそ2cm。

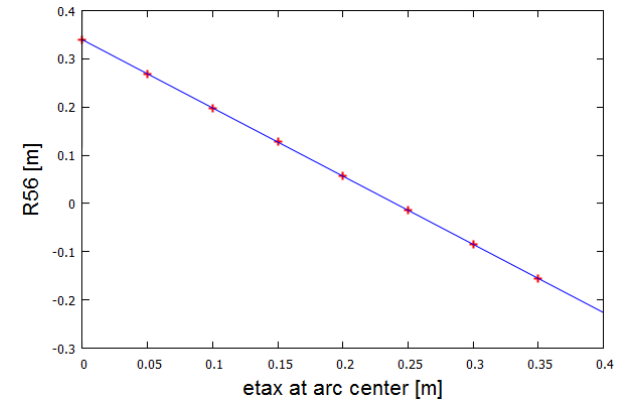
赤: 加速、青: 正しい位相で減速、
緑: 間違った位相で減速

計算では2つの加速空洞の位相をずらしている。
ML2だけをずらすときには、換算が必要。

- 目標とする $\partial E / \partial \varphi$ (つまり加速後)が2つのケースで同じため、周長補正の難易度 (減速後の $\partial E / \partial \varphi$ に依存)はどちらも同じであろう。
- ダンプエネルギーが3MeVになる点は2か所だが、周長の差が2cmなので間違った位相になることはないだろうと楽観視。

R56の自動調整パネル

- R56を自動的に調整するパネルを作成。
 - 通常の調整・バンチ圧縮で実施済み。
 - 寄与が大きいQMIF01とQMIF02を変数とする。
 - マッチングの条件: アーク中心で $\eta'x=0$, ηx でR56が決まる。
 - QMIF05=02, QMIF06=01と対象に設定。
 - QMIF01:02の変化量は-1:2である。
 - アークの残留磁場相殺電流は最大0.01[A]。



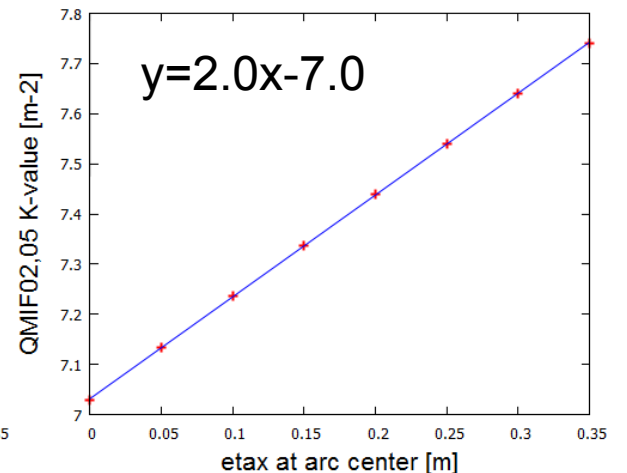
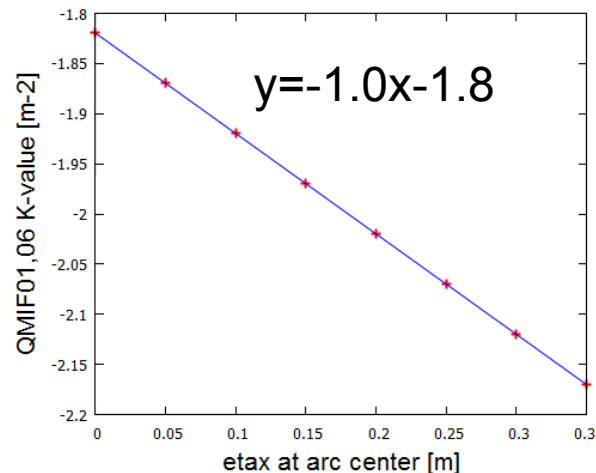
Longitudinal Dispersion Control

QMIF02-05(I) QMIF02-05(I) QMIF01-06(K) QMIF01-06(K)

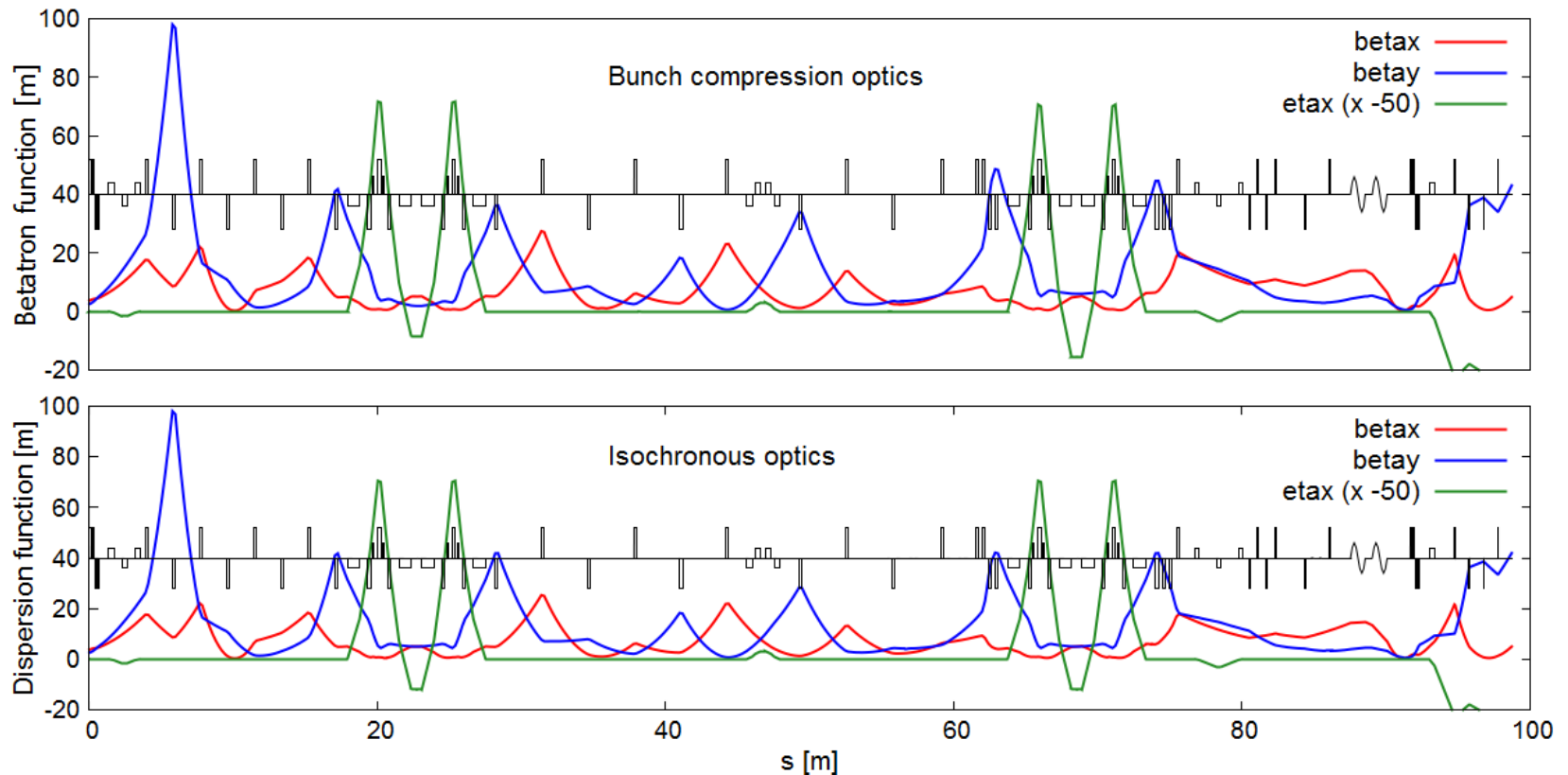
Δ R56[m] 0.000

IncVal[A] 0.01 Reset

Name	Ratio	Base	Delta	I[A]
QMIF01	0.5	0	0	0.000 A
QMIF02	4	0	0	0.000 A
QMIF03	3	0	0	0.000 A
QMIF04	3	0	0	0.000 A
QMIF05	4	0	0	0.000 A
QMIF06	0.5	0	0	0.000 A



マッチング



- **特別なマッチングは必要ない。**

- デザインオプティクスからアークのトリプレットだけを変更したが、大きなベータ関数の乱れは見られない。
- 第1アーク: $R_{56} = 0.1\text{m}$, 第2アーク: $R_{56} = -0.1\text{ m}$
- Off crest加速によって周回エネルギーが変わるが、QMAD**の入射エネルギーとの比は変えていない。
- 強いTHz光を見ようとしてcam18でビームを絞る影響のほうが大きいのでは。→第2アークを通そうとするときはもどに戻す。

Study手順詳細1

1. 入射・ダンプエネルギー

1. 若干周回エネルギーが下がるが、入射エネルギーは通常の運転と同じとする。
2. (念のため)デチューンでダンプまで導き、BMADのダンプエネルギー測定結果が入射ビームと同じであることを確認

2. Optics調整(1次、第1アーク)

1. SXはOFFにする。
2. 主空洞の位相を調整
 1. Off crestで加速。位相の調整*。
 2. Cam14で中心を通るようにPSBMIFを下げる。(周回エネルギーが下がるため)
 3. エネルギー設定パネルを修正してQやSXの強さを更新
3. アークtripletの調整
 1. CSRが強くなるように、R56(アーク中心の η_x)を調整。
 2. 分散関数を測定し、アクロマートにする。
 3. CSRを測定する位置(cam18)でビームをまとめる。
4. 中心軸通し
 1. アークの水平方向ではQよりもSXの中心を通す。手前のQのステアリングで調整。

*25度以上ずらすと、エネルギーが下がりすぎて周長補正可能な範囲を超える可能性がある。

Study手順詳細2

3. Optics調整(1次、第2アーク)

1. ダンプエネルギーが入射エネルギーと同じになるように周長補正(主空洞のキックは無視)
2. ダンプのエネルギー広がりが小さくなるようにリターンアークのR56を調整*

3. Optics Matching

4. Optics調整(2次)

1. CSRが強くなるようにアークのSXを調整。逆方向に設定して強度が小さくなることも確認。
2. リターンアークでは、エネルギー広がりが最小になるようにSXを調整。

5. ビームダイナミクスstudy

1. バンチ圧縮前後・SX使用前後のエミッタンス測定
2. Single Kickの測定
3. 1次・2次の分散関数の測定
4. BPMによるR56の測定(option)

まとめ

- cERLにおけるバンチ圧縮のoptics設計について検討した。
 - バンチ圧縮まで:これまでに実績あり
 - エネルギー回収:全く経験なし。難易度が高いか低いかも不明。
- 主空洞の位相
 - 30度以上ずらすと周長補正に支障がでる恐れあり。
- リターンアークの調整
 - ダンプのエネルギー広がりだけを頼りに、R56,T566を調整する必要あり。
 - BPMでR56を測定できるといい。
- 6極の調整
 - 0.77pC/bunchの運転であれば、6極は各アークで一台ずつで十分。
- オプティクスマッチング
 - バンチ圧縮のオプティクスに変更しても、あまり崩れない。