

# ATF2 (ATF Final Focus Test) 1~2月の報告

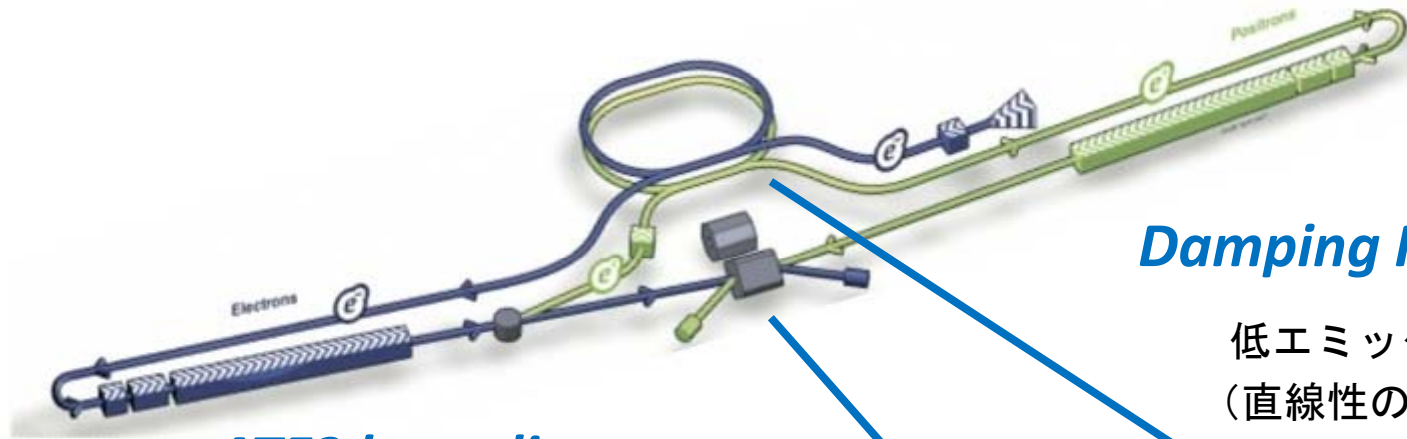
奥木敏行  
2013年2月14日  
LC推進会議

1. 物理学会での講演のあらまし。
2. 前回(2012年12月)の推進委員会からの進捗。

物理学会での講演のあらまし。

# ATF (Accelerator Test Facility)

ILCの衝突点でビームを絞るための技術開発を進める施設



**ATF2 beamline**

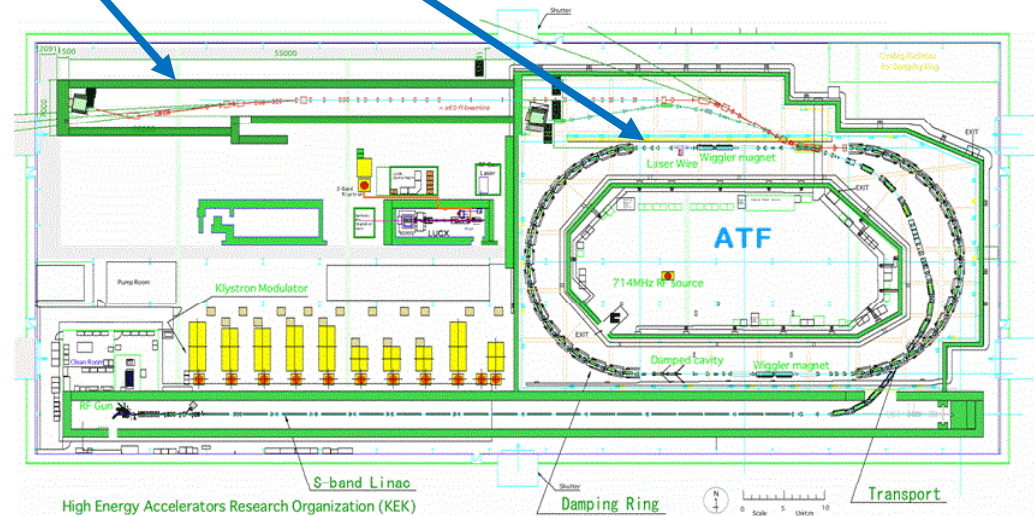
**Damping Ring**

低エミッタンスビームの生成  
(直線性の良いビームをつくる)

ILCの最終収束系の試験施設

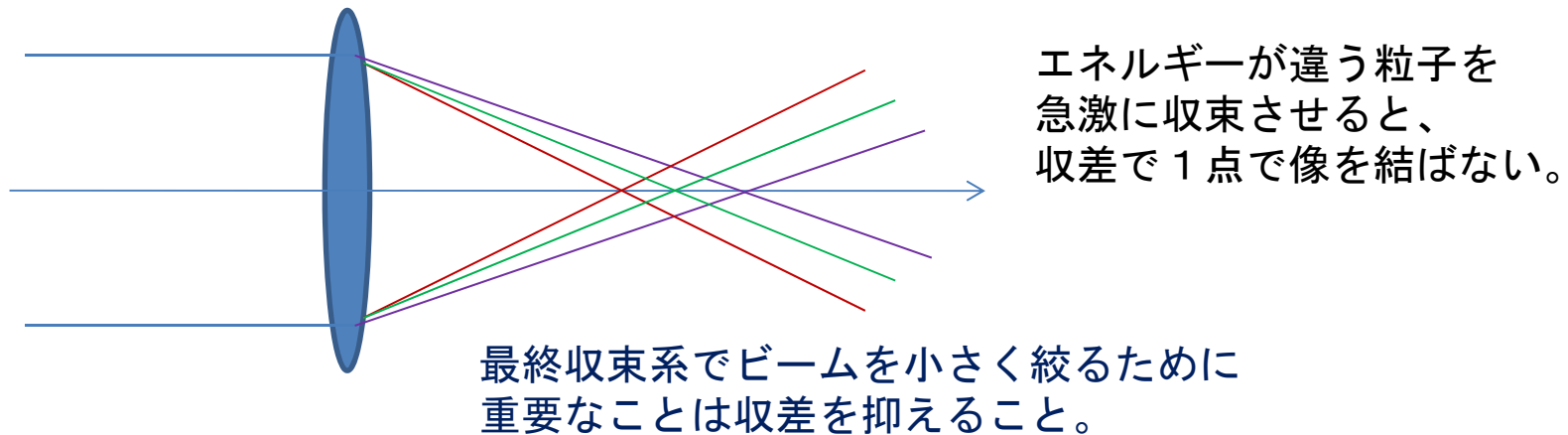
- ビーム収束技術の確立 (Phase1)
- ビーム衝突技術の確立 (Phase2)

現在はPhase1を進めている。



# ATF2 Phase 1

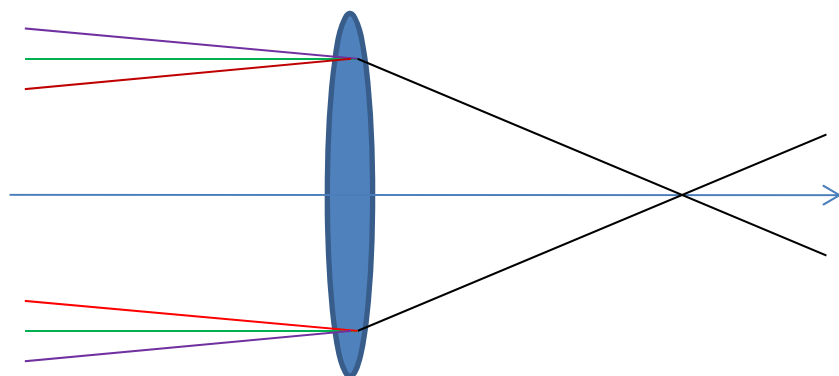
## ILCの焦点におけるビーム収束技術の開発



どのように収差を抑えるかが大きな課題となる。

その為には、ビーム光学系(レンズ系)が重要！

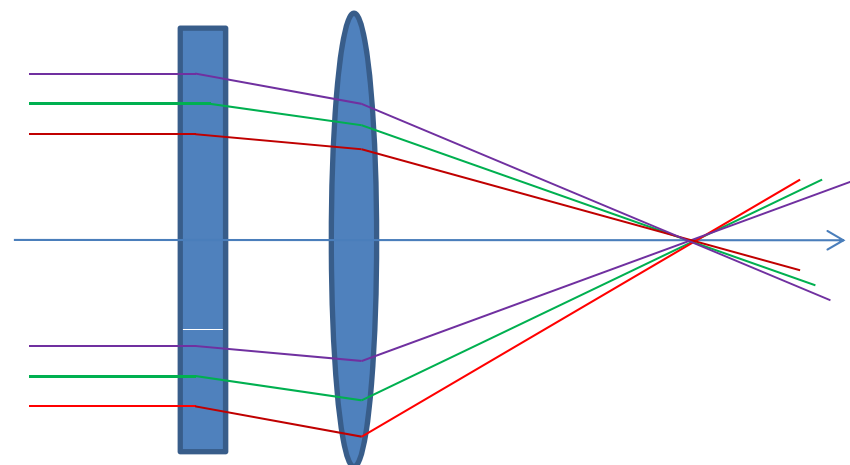
## Global Chromaticity Correction



エネルギーの違う粒子が最終収束電磁石で同じ焦点を結ぶように、上流でエネルギーが違うビームが違った拡がり角で最終収束電磁石に入るようにする。

ビームライン全体で収差の補正をするので、**Global Correction** と呼ぶ。

## Local Chromaticity Correction



1. エネルギーの違う粒子が最終収束電磁石を通過するとき軌道差を付ける。
2. 電磁石の近くに、軌道差があると収束力に差が出る電磁石(6極電磁石)を置く。
3. 最終収束電磁石のエネルギーの違いによる収束力の差を6極電磁石で補正する。

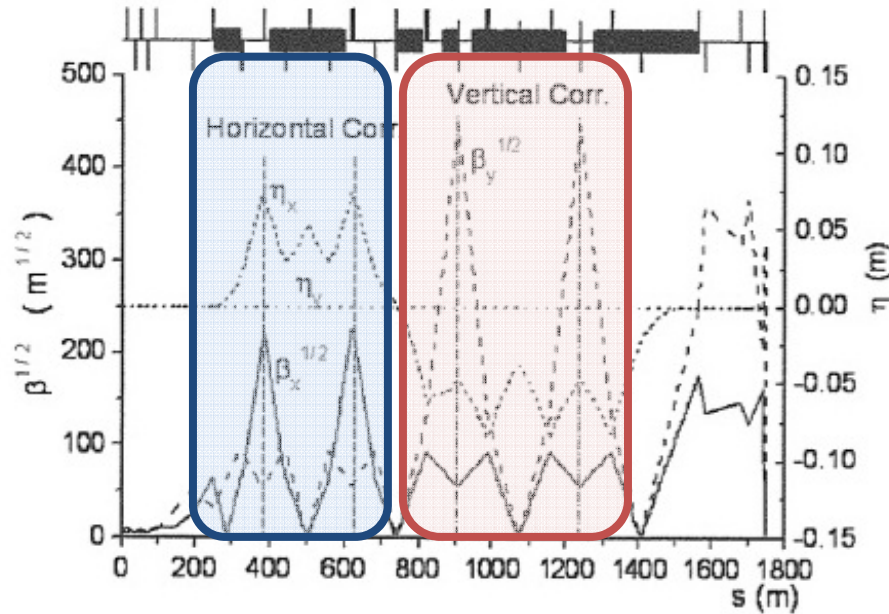
収差が大きい電磁石の近くで補正をするので、**Local Correction** と呼ぶ。

# Global & Local Chromaticity Correction

- Horizontal Chromaticity Correction
- Vertical Chromaticity Correction

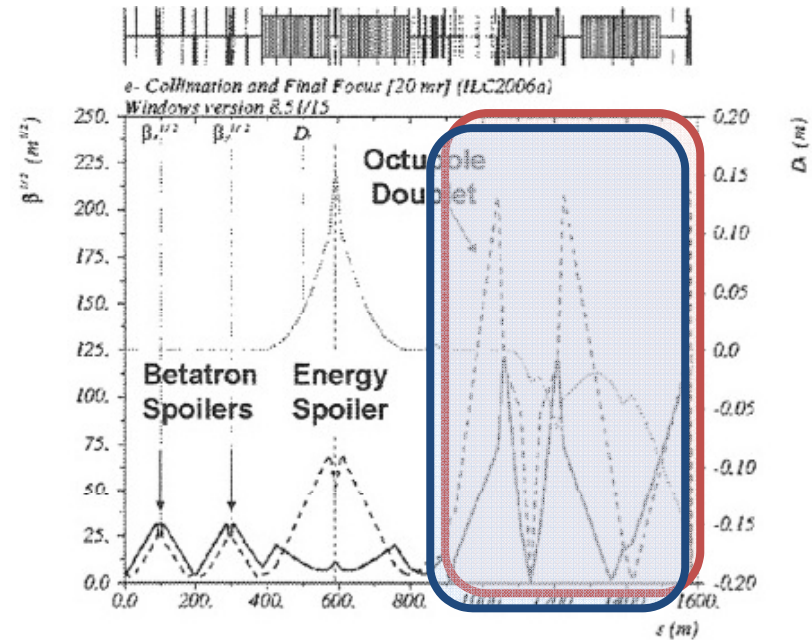
- Compact
- Large energy acceptance
- Small beam tail
- ( Large  $L^*$  )

**Global Chromaticity Correction System**



- 水平、垂直方向の補正は独立な電磁石でおこなえる。
- エネルギーが違った粒子も焦点では同じ位置と角度。
- 1994年にFFTBで既に試験がされている。

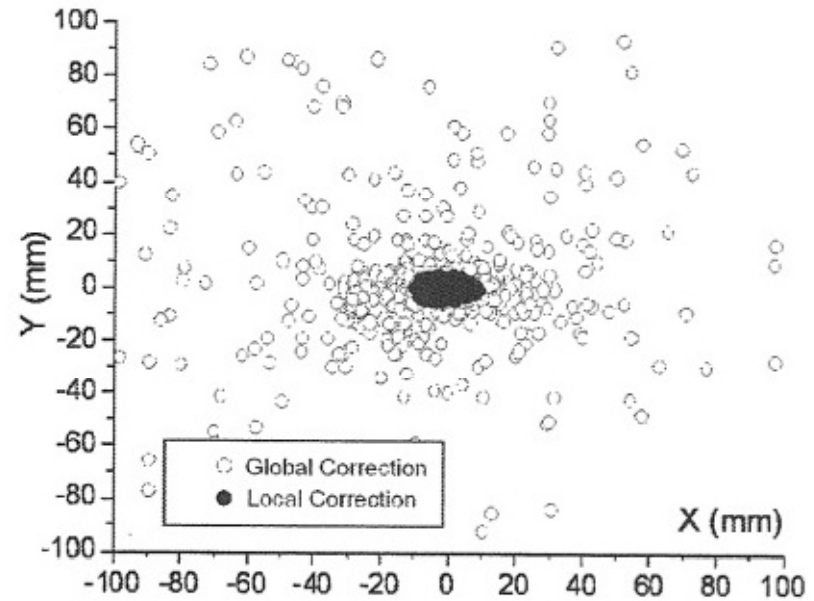
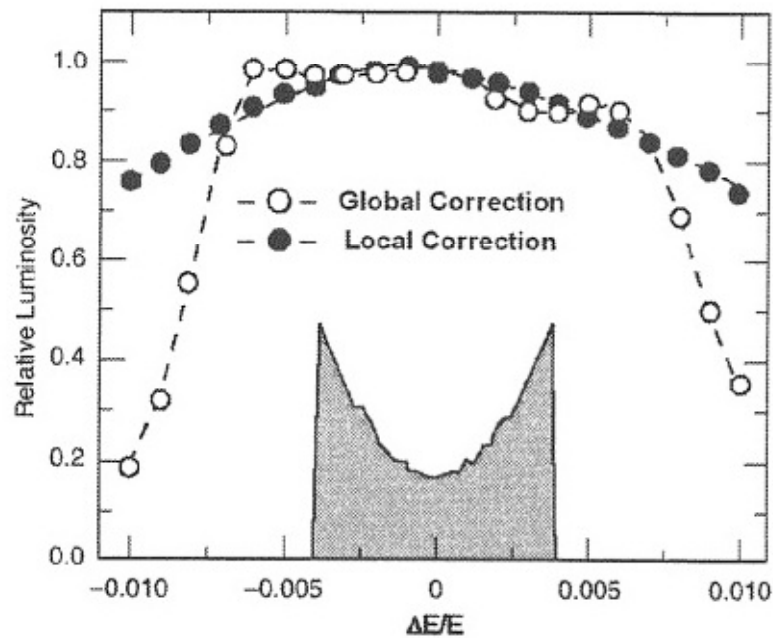
**Local Chromaticity Correction System**



- 水平、垂直方向の補正は同じ電磁石を使っておこなう。
- エネルギーが違った粒子軌道は角度が違って焦点に入る。
- ATF2ビームラインが出来るまで試験されていなかった。

# Global Correction と Local Correction の性能の例

*Simulated energy acceptance for local and global correction*

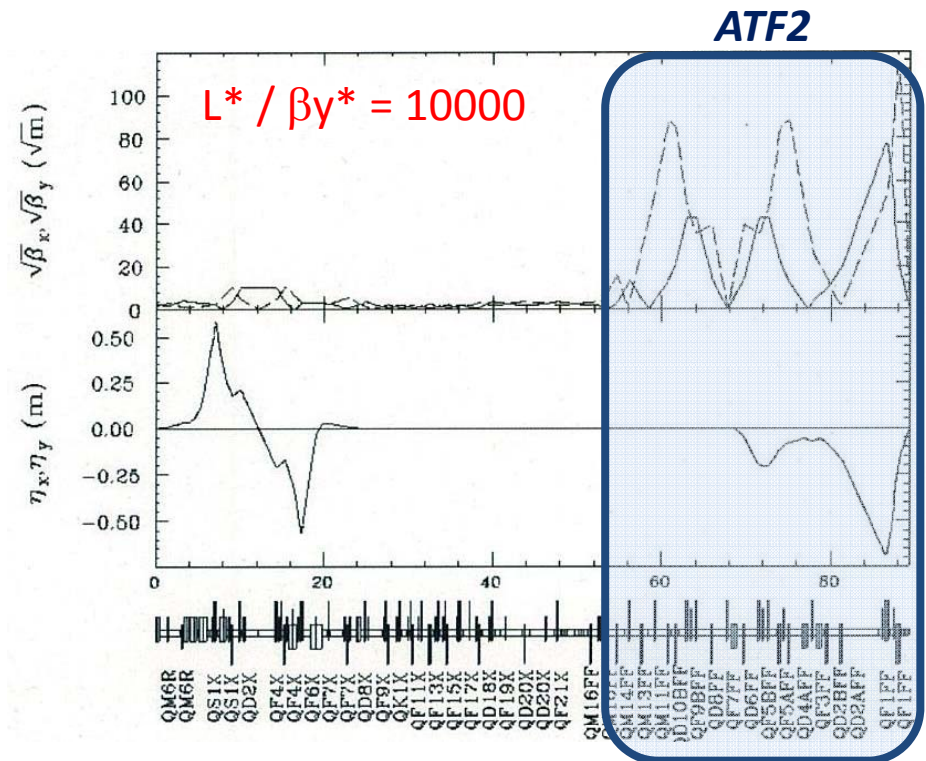
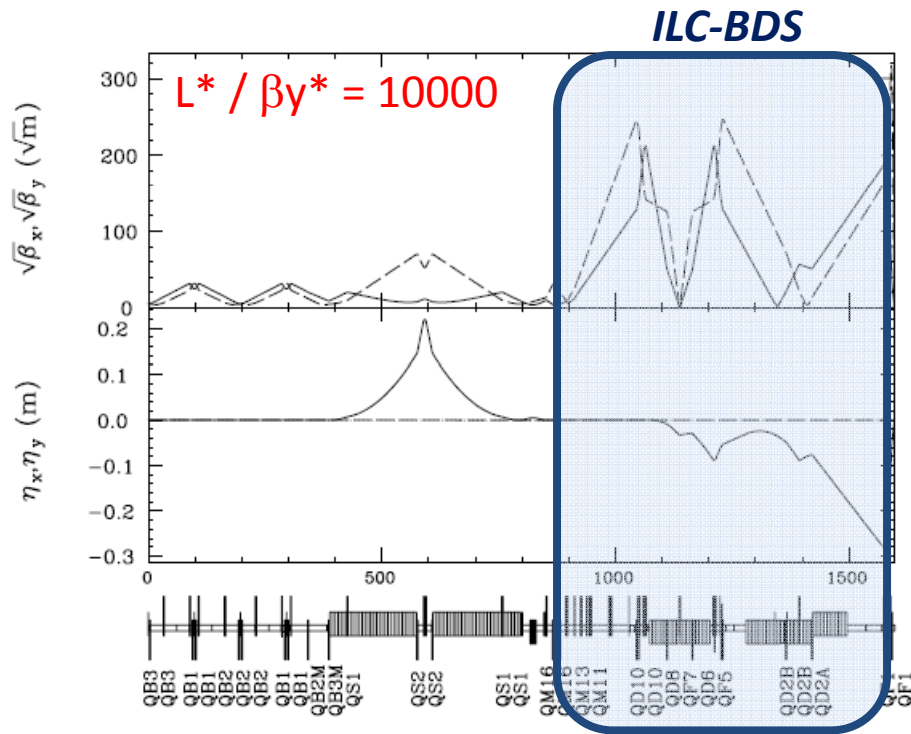


*Simulated beam tail for local and global correction*



# ATF2 Beam Line

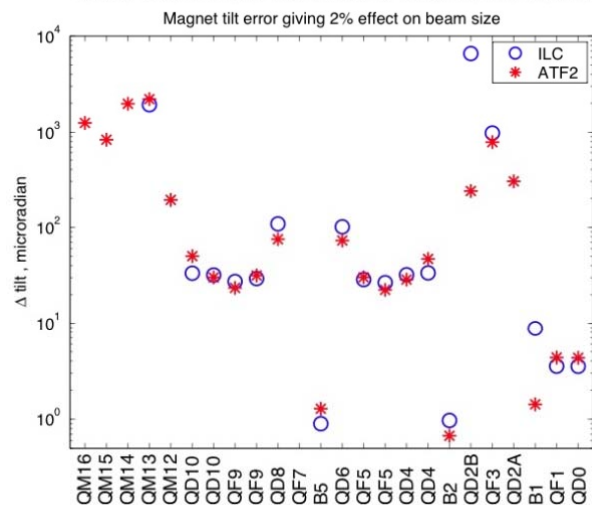
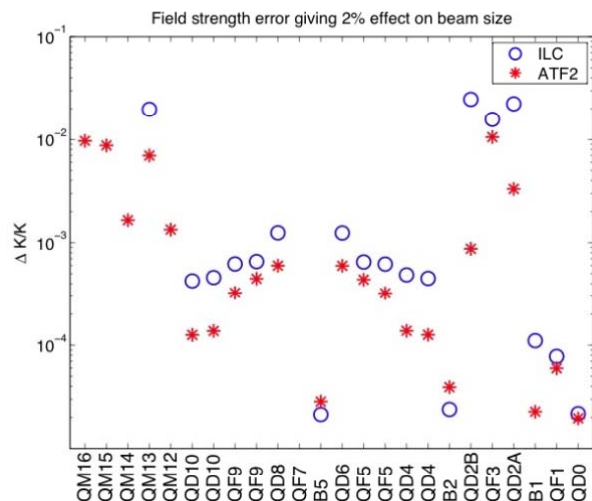
- Same requirement of the magnet alignment and stability to the ILC FF
- Same strength of the chromaticity to the ILC FF
- Same magnet tolerances to the ILC BDS
- Same beam tuning method to the ILC FF





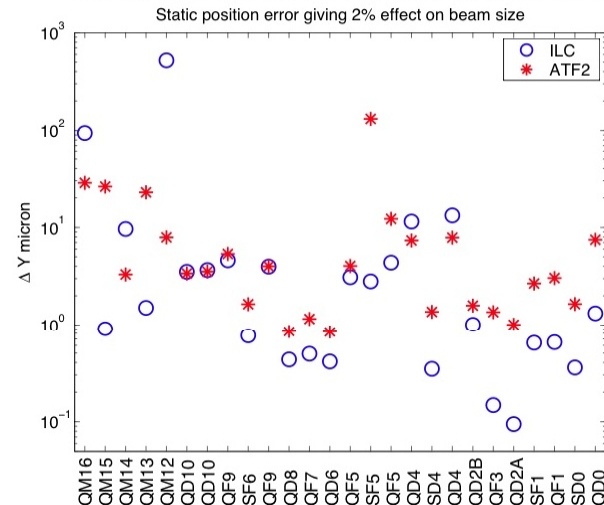
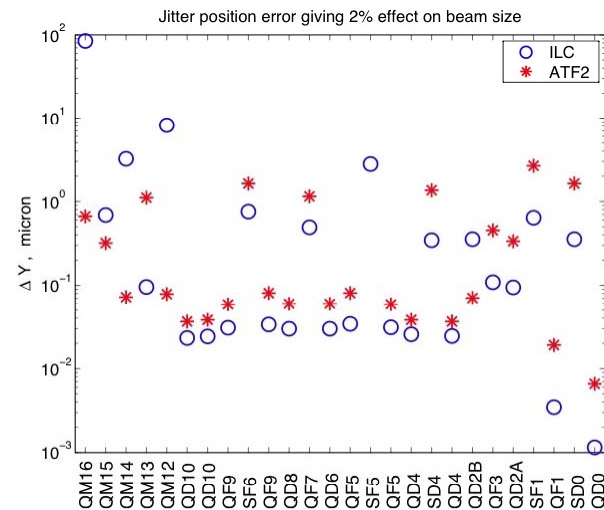
# ILC と ATF2 の線形磁場の影響の比較

## Strength Error



## Rotation Error

## Vibration



## Position Error

線形磁場の影響を考えると、電磁石への要求はILCとATF2は同等である。

# 非線形磁場の影響

ATF2はエネルギーが低いため、ILCよりも非線形磁場の影響を受けやすい。

高次の非線形磁場の影響を軽くするため、  
現在ATF2では焦点での水平方向のビームサイズを大きくして運転している。

		ILC	ATF2(Design)	ATF2(現在)
線形	$\alpha_y$	1	1	1
	$\eta_y$	1	1	1
	$\langle x y \rangle$	1	1	3.3
	$\langle x' y \rangle$	1	1	0.33
2次	T346	1	1	1
	T324	1	7	2.3
	T322	1	7	0.7
	T326	1	1	0.33
	T366	1	1	1
	T344	1	7	7
3次(水平)		1	49	1.8
4次(水平)		1	343	4.1
5次(水平)		1	2401	9.4

色収差

6極電磁石を使うことで  
生じる磁場の影響

電磁石の形状で  
大きくなりうる磁場の影響

# 線形オプティクスの調整

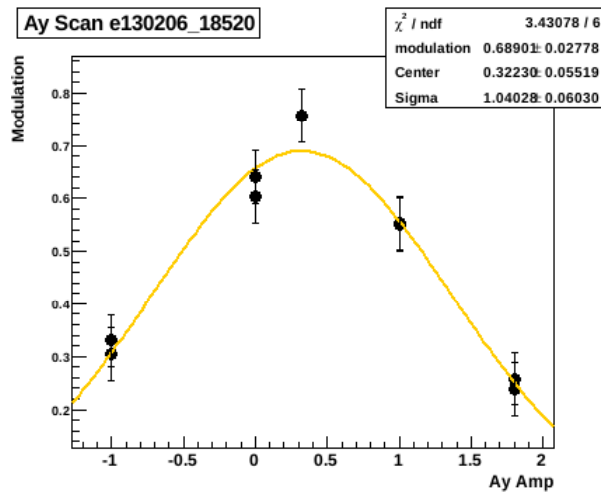
ATF2の線形オプティクスの補正方法は基本的にILCと同じ。

最終収束光学系にある色収差補正用の6極電磁石の位置を”適切な比”で動かすことによって

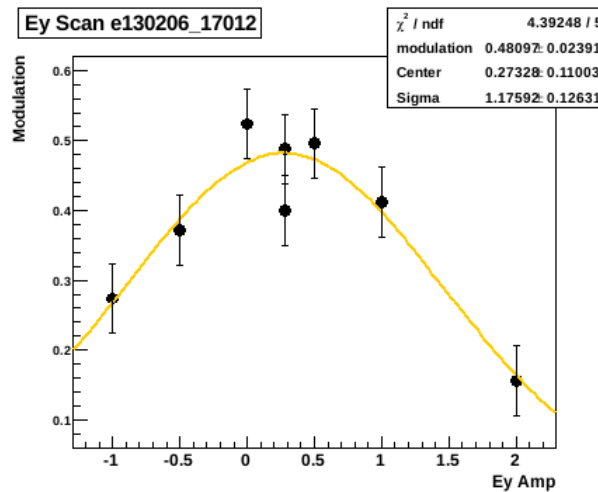
- ビームウエストの位置
- 焦点におけるエネルギー分散
- 水平方向とのカップリング

だけを独立に動かすことが出来る(線形knob)。

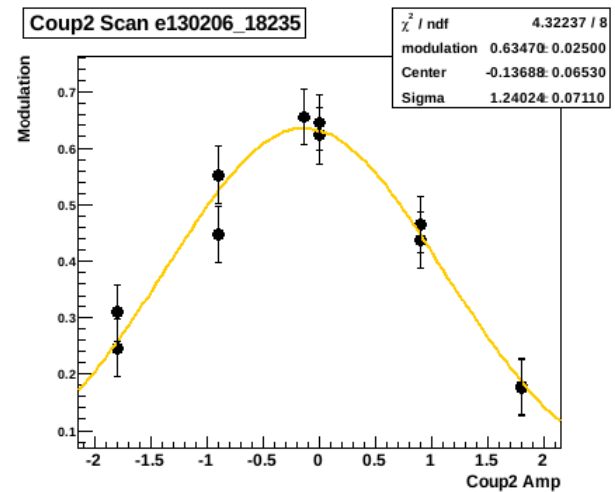
## 線形オプティクスの調整の例



ビームウエストの最適化



エネルギー分散の最適化

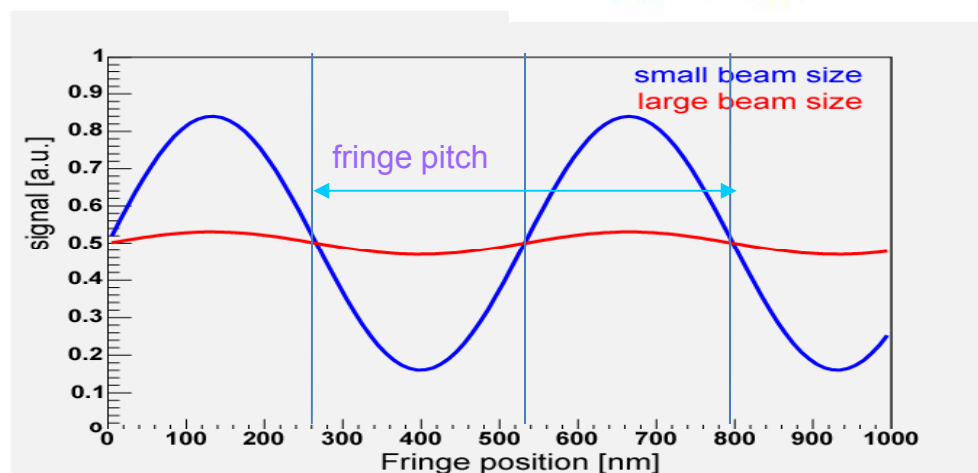
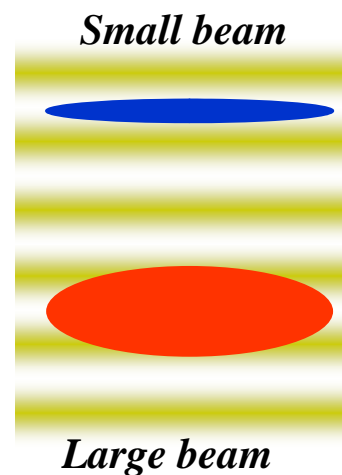
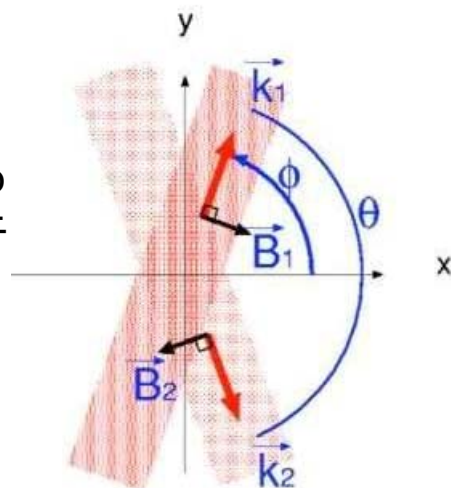


カップリングの最適化

# レーザー干渉計を利用したビームサイズモニター

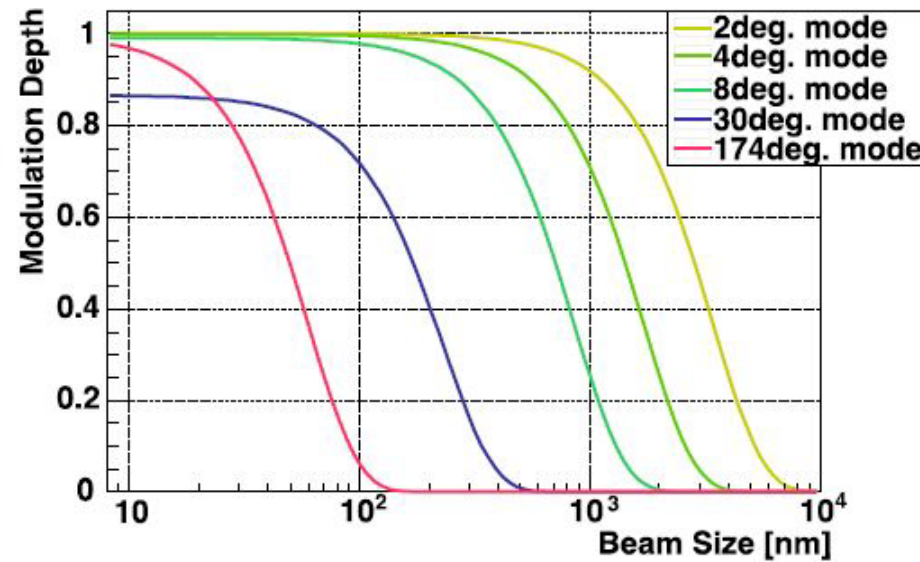
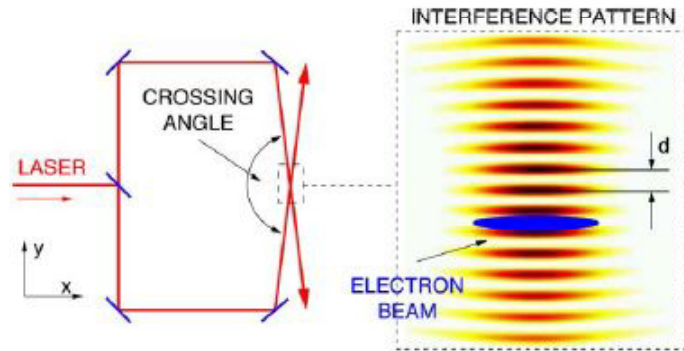
Collaboration with Univ. of Tokyo

同じレーザーからの光を2つに分けて干渉させることで干渉縞を作る。



ビームサイズの違いによって、レーザーの位相を変えたときのモジュレーションに差が出る

# IPBSM 交差角と測定可能ビームサイズ



Modulation

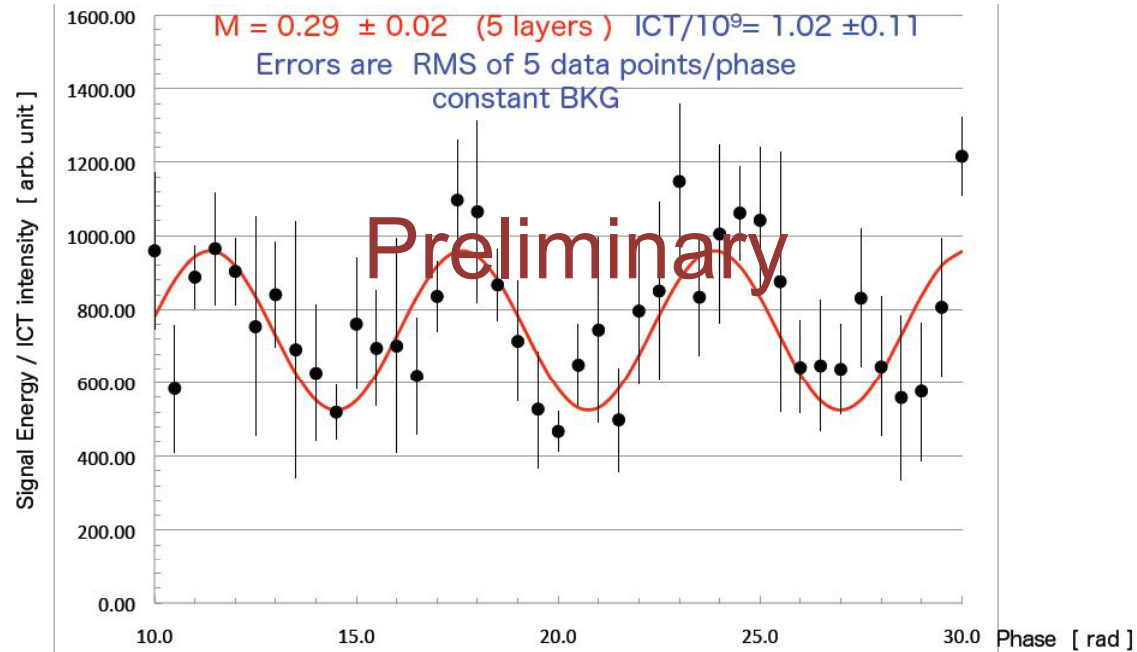
$$\equiv \frac{\text{peak} - \text{bottom}}{\text{peak} + \text{bottom}}$$

	174°	30°	8°	2°
Fringe pitch	266 nm	1.03μm	3.81μm	15.2μm
Minimum	25 nm	100 nm	360 nm	-
Maximum	100 nm	360 nm	-	6 μm

# 現在のATF2の状況

2013年3月の運転の状態をみて、内容は変わります。

## 2012年12月の174度モードでのモジュレーション



現在、ATF2では約70nmのビームサイズが測定されている。



## FFTB と ATF2の測定結果の比較

	FFTB		ATF2	
	Design	Result	Design	Result
Correction Method	Global Chromaticity Correction		Local Chromaticity Correction	
Beam Energy	46.6 GeV		1.28 GeV	
$L^*$	0.40 m		1.00 m	
$\sigma_p/p$	0.30 %	0.05 %	0.08 %	0.06%
$\beta_x^* \times \beta_y^*$	10mm $\times$ 0.1mm	10mm $\times$ 0.1mm	4mm $\times$ 0.1mm	40mm $\times$ 0.1mm
$\epsilon_x \times \epsilon_y$	0.33nm $\times$ 33pm	0.33nm $\times$ 20pm	2.0nm $\times$ 12pm	2.0nm $\times$ 20pm
$\sigma_y^*$ (linear)	57nm	70nm (45nm)	35nm	70nm (45nm)
$L^*/\beta_y^* \times \sigma_p/p$	12	2	8	6

色収差の強さの指標

FFTBとATF2双方で線形光学系では45nmを期待されるどころ70nmのビームサイズが測定された。

FFTB, ATF2共に、デザインのパラメータよりも易しい条件で測定されている。

光学系の色収差の厳しさを比較すると、ATF2の方がFFTBよりも3倍厳しい条件である。

# 現在のATF2のビーム光学系の問題

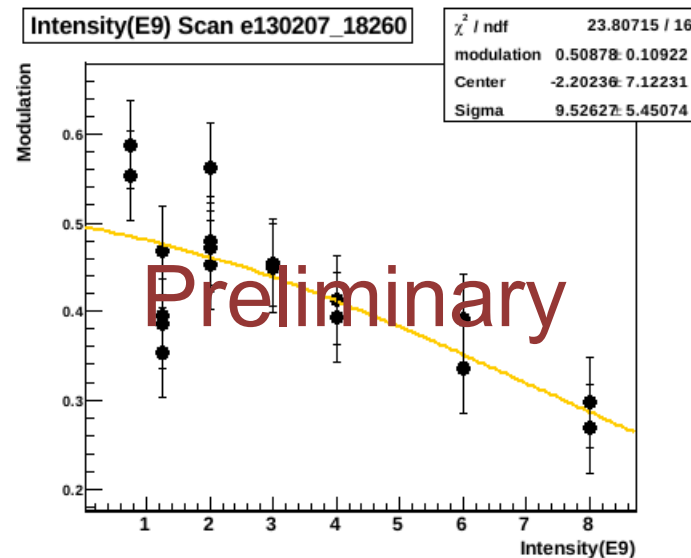
水平方向のベータ関数がデザインよりも10倍大きい。

- $\langle x'y \rangle$  や T326など一部の高次磁場の影響がILCの最終収束系よりも少ない。
- 2013年春までの運転は、このビーム光学系を使う。

垂直方向ビームエミッタンスがデザインよりも大きい。

- ダンピングリング内のエミッタンスはデザイン値(12pm)まで小さくなっている。
- ダンピングリングから取り出すとエミッタンスが増える。

焦点でのビーム強度依存性が大きいいため、低電流での測定になっている。



# Wakeの影響をILCと比較

Evaluated by K.Kubo (15<sup>th</sup> ATF2 Project Meeting)

## Cavity BPMの場合

### アライメントへの影響

	ILC	ATF2
1/E_beam (1/GeV)	1/250	1/1.3
Effect of bunch length	0.3 ?	1
$1/\sqrt{\varepsilon_y}$ (m <sup>-1/2</sup> )	$1/\sqrt{8 \times 10^{-14}}$	$1/\sqrt{1.2 \times 10^{-11}}$
$\sum_{Q\text{-mag.}} \sqrt{\beta_y}$ (m <sup>1/2</sup> )	3,000	1,000
Total (Relative to ATF)	0.057 ?	1

### ジッターへの影響

	ILC	ATF2
1/E_beam (1/GeV)	1/250	1/1.3
Effect of bunch length	0.3 ?	1
$\sum_{Q\text{-mag.}} \beta_y$ (m)	350,000	63,000
Total (Relative to ATF)	0.0087 ?	1

ILC の Cavity BPM の影響はATF2より弱い。

## Resistive Wallの場合

### アライメントへの影響

	ILC	ATF2
1/E_beam (1/GeV)	1/250	1/1.3
Effect of bunch length	20 ?	1
$1/\sqrt{\varepsilon_y}$ (m <sup>-1/2</sup> )	$1/\sqrt{8 \times 10^{-14}}$	$1/\sqrt{1.2 \times 10^{-11}}$
$\int ds \sqrt{\beta_y}$ (m <sup>3/2</sup> )	89,000	4,000
Total (Relative to ATF)	28 ?	1

### ジッターへの影響

	ILC	ATF2
1/E_beam (1/GeV)	1/250	1/1.3
Effect of bunch length	20 ?	1
$\int ds \beta_y$ (m <sup>2</sup> )	8,900,000	1,100,000
Total (Relative to ATF)	0.84 ?	1

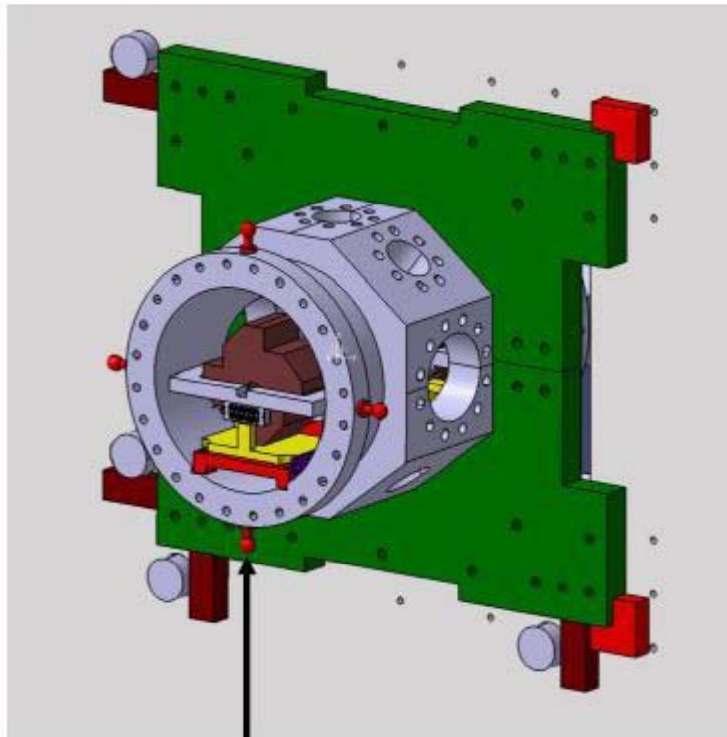
ILC の Resistive Wall の影響はATF2より強い。

# ATF2 Phase 2

衝突点でビームの位置を制御するための研究

ATFでは、現在、Phase 1 の研究と並行して、Phase 2 のための準備を進めている。

**New IP-BSM Chamber** *made in LAL, France*



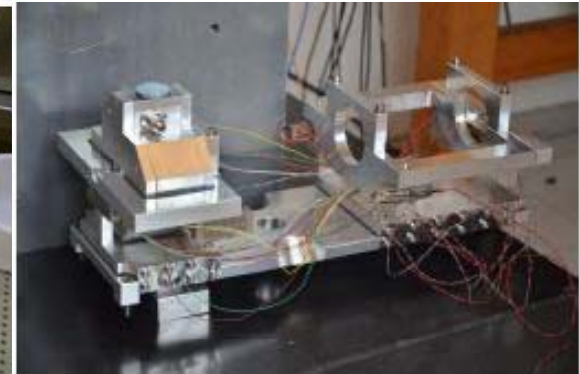
Mires

LALで新しいIP-BSM用のチェンバーを作っている。

- IP-BSM の測定と共存できる。
- チェンバーにはIP-BPM 3台が付いている。
- それぞれのIP-BPMはピエゾムーバーが付いている。

Phase2用のIP-BPMは2013年6月にインストールする。

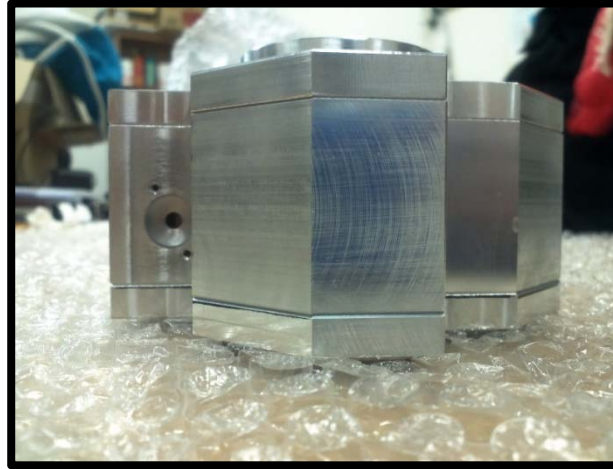
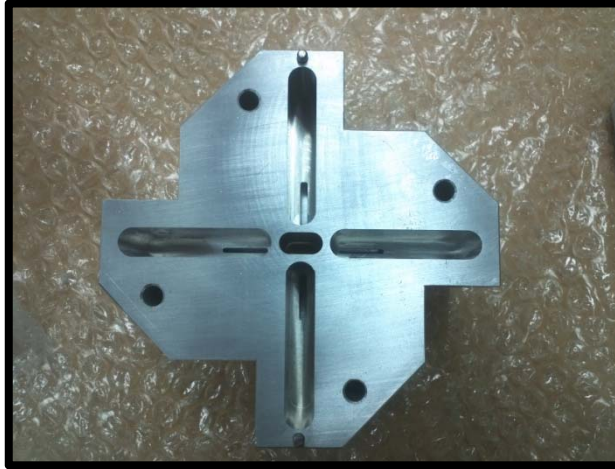
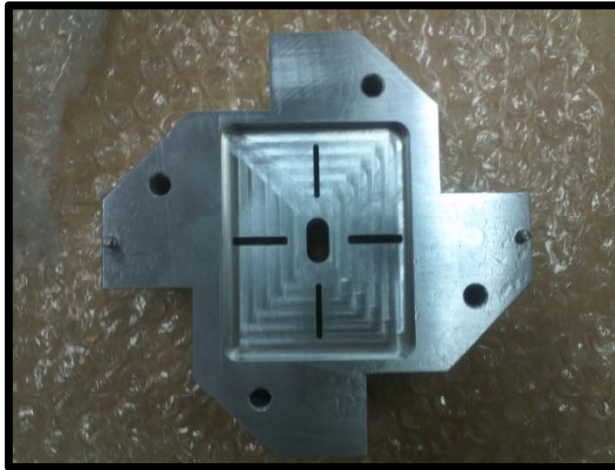
(このための話し合いを現在LALでおこなっています。)



# 高分解能BPMの開発

*Collaboration with KNU*

- **Made by Aluminum (2kg for double block)**

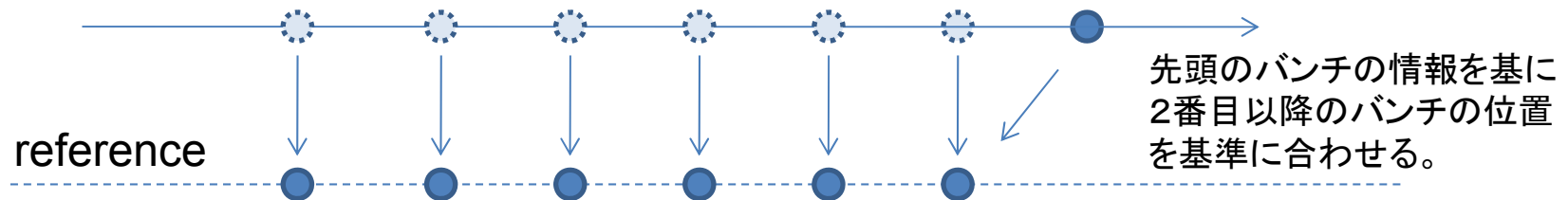


インストール予定のBPMブロックはATF Linac で予備試験をおこなった。

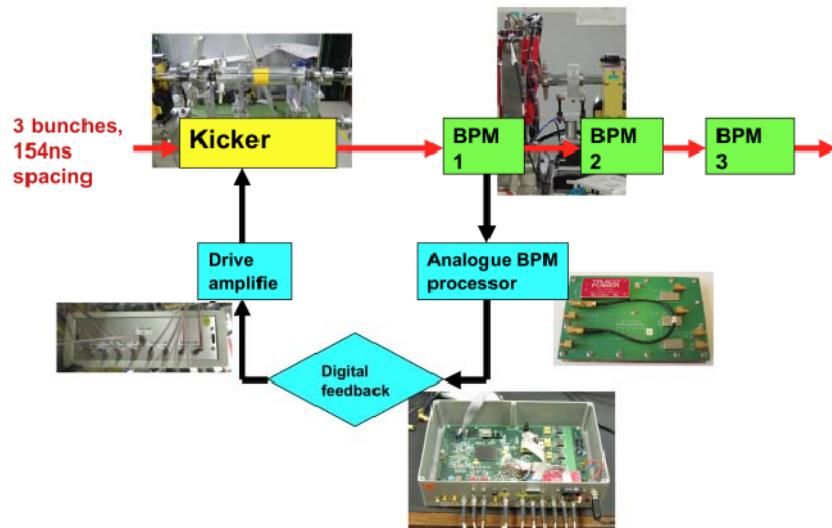
# Intra-train高速フィードバックの開発

Collaboration with Oxford University

全く違った加速器から作られたビーム同士を衝突させるために必要な技術



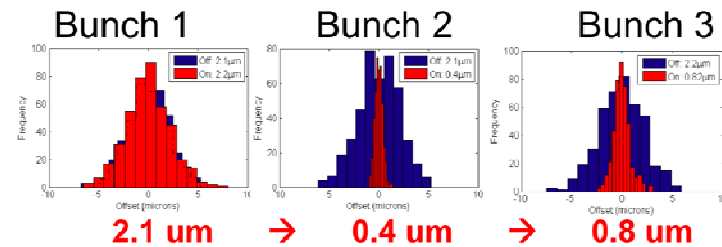
ATFでは、2-3バンチのビームを使って、Intra-trainフィードバックの技術を研究する。



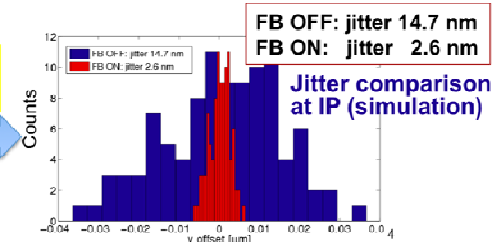
Feedback試験のセットアップ

## Results of P2 → K1 loop (measured)

(April 16 2010)



Assuming perfect lattice, no further imperfections (!)



FeedbackをONすると、ビームのジッターが減少する。





# 今後の予定

## 短期の予定

正式にはまだ決まっていないが、5月にATF2のみに特化した連続運転が入る公算が高い。学会までには予定が固まると思う。

現在、LALにて、Phase2用チェンバーのインストールの予定を話し合っている。これも学会までには予定が決まると思う。

4 2013						
Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30				

5 2013						
Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

6 2013						
Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

## 長期の予定

学会までに関係者と話し合っ、その結果を踏まえて発表する。

## 2012年12月の推進委員会からの進捗

1. ATF2 Project Meeting で決まった今後の進め方
2. 6極電磁石の入れ替えと、その影響。
3. Wake の影響 (前回推進会議からの進捗)

# ATF2 Project Meeting で決まった今後の進め方

ATF2 Project Meeting は、年2回(1回はKEK, もう一回は海外が基本)開催されている。

前回の推進会議以降、1/23 - 1/25 の3日間、KEK で第15回ATF2 Project Meeting をおこなった。

## 現在のATF2のビーム光学系の問題

水平方向のベータ関数がデザインよりも10倍大きい。

垂直方向ビームエミッタンスがデザインよりも大きい。

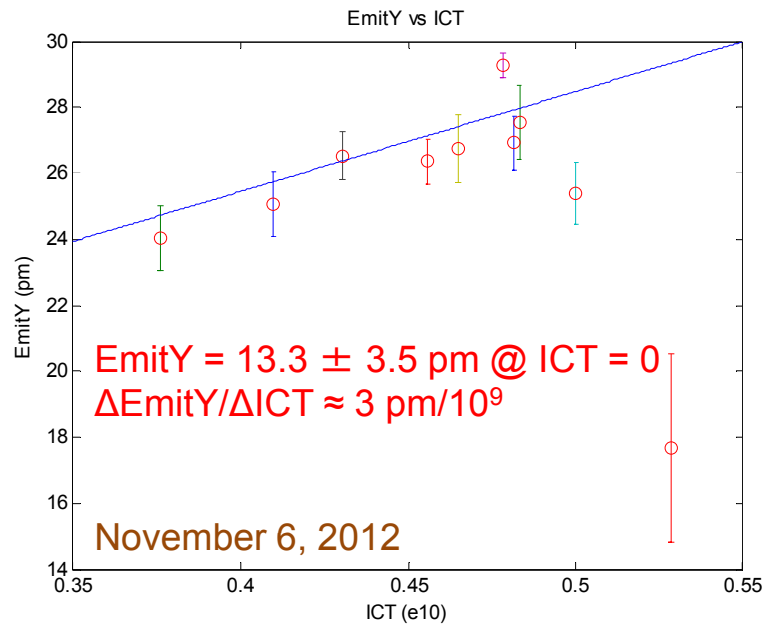
特に、ダンピングリングから取り出す際のエミッタンス増大が強い。

焦点でのビーム強度依存性が大きいいため、低電流での測定になっている。

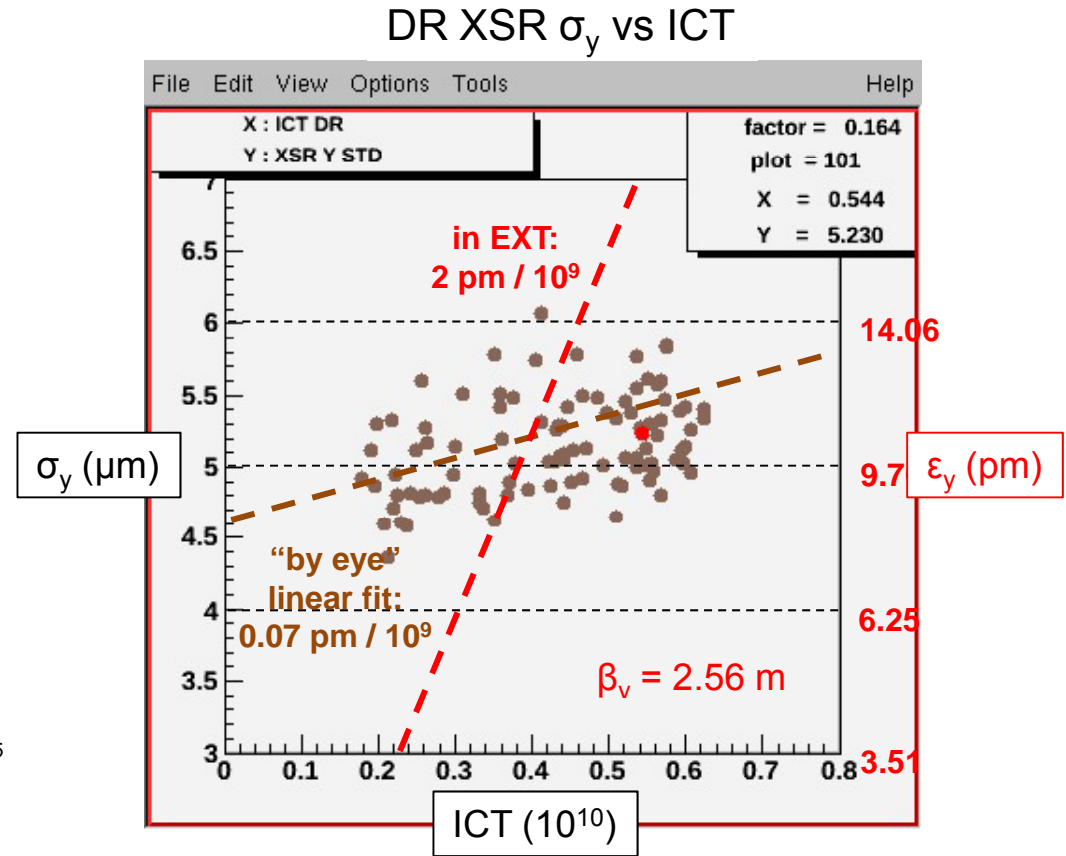
## 今後、数か月のATF2の進め方

1.  $10 \times 1$ 光学系で、 $N=0.1e10$  の低電流運転で出来るだけ小さいビームに絞る。
2. 取り出しビームのエミッタンス増大の問題、wakeの問題は、ハードウェアの改造が伴う可能性があるので、可能になったら随時おこなっていく。
3. 2013年5月に連続運転をする可能性を精査する。

# DR 内と取り出した後のエミッタンス



M. Woodley, 15<sup>th</sup> ATF2 Project Meeting

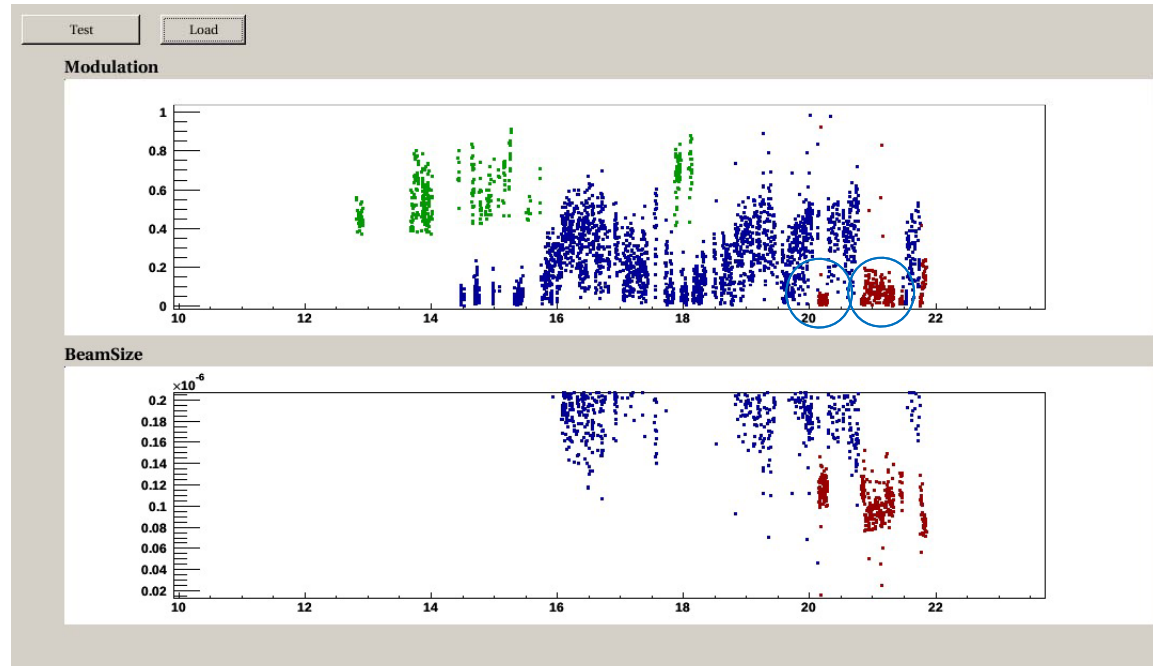


取り出した後の方がエミッタンスが大きく、ビーム強度依存性も強い。

ダンピングリングから取り出す際のエミッタンス増大を抑えないと、ATF2でデザインビームサイズまで絞ることはできない。

# 6極電磁石の入れ替えと、その影響

2012年12月の運転におけるNonlinear knobの効果



12/19 ; 174度モードでの最初の測定をおこなった。  
明らかなモジュレーションは観測されなかった。

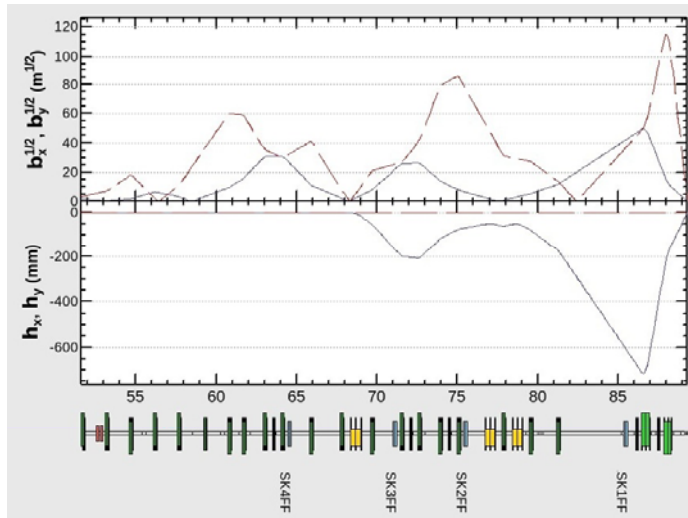
12/20 ; 174度モードでの2度目の測定をおこなった。  
モジュレーションが観測された。

この2日間での明らかな違いはNonlinear knob のパラメータだった。

12/19 ; Y22=-0.6, Y26= 0.0, Y44= 0.0

12/20 ; Y22=-0.2, Y26=-0.2, Y44= 0.0

# Skew 6極電磁石を使ったビームサイズ調整 (2012年10月の推進委員会で報告)



*SK1FF ; sensitive to T322, T326, T366*

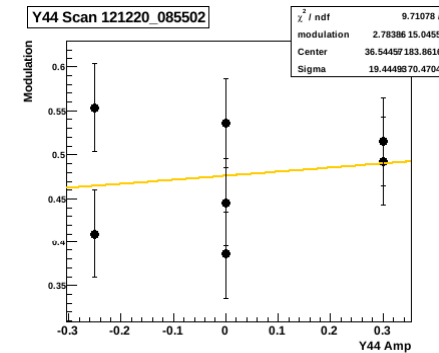
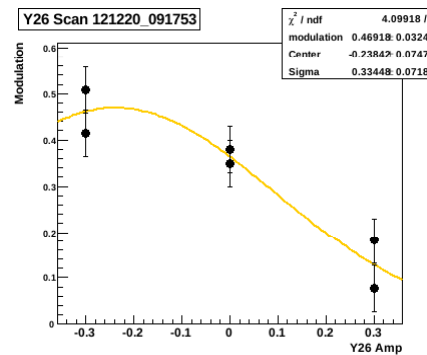
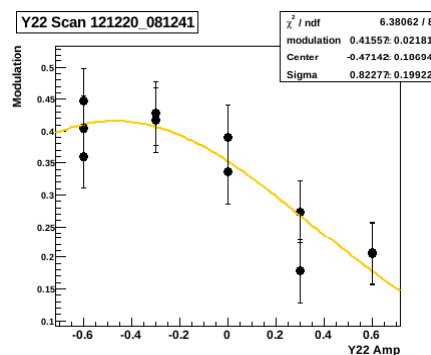
*SK2FF ; sensitive to T344*

*SK3FF ; sensitive to T322, T326, T366*

*SK4FF ; sensitive to T322*

**T322, T326, T366, T344 knobs  
are calculated by the combination  
of SK1FF, SK2FF, SK3FF, SK4FF.**

2012年12月の運転では、Skew6極磁場の補正を大きくかけなければ、ビームサイズは小さく絞れなかった。

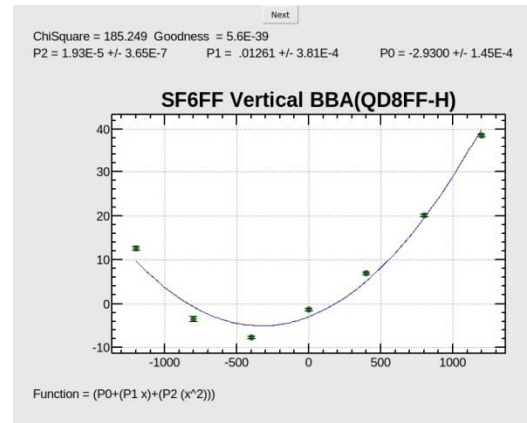
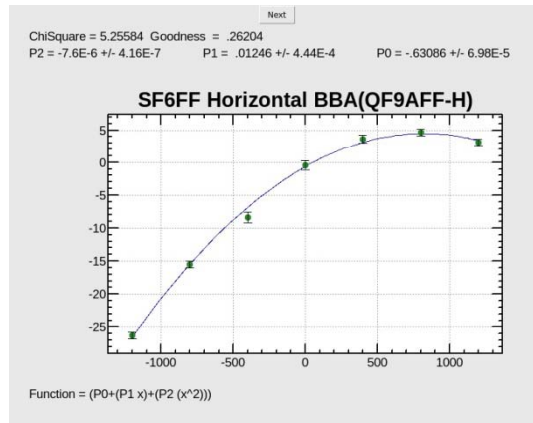




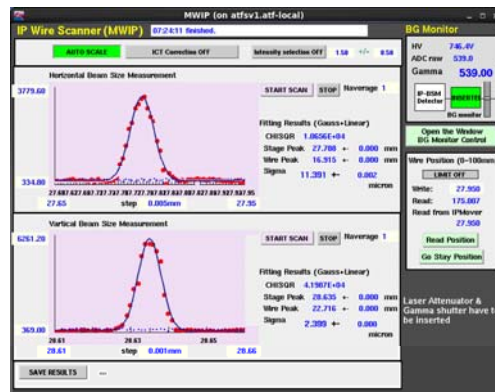
# 更に、2012年秋の運転で疑問が残ったこと。

6極電磁石を磁場中心にセットして6極電磁石の電源を入れると、焦点でのビームサイズが大きくなる。

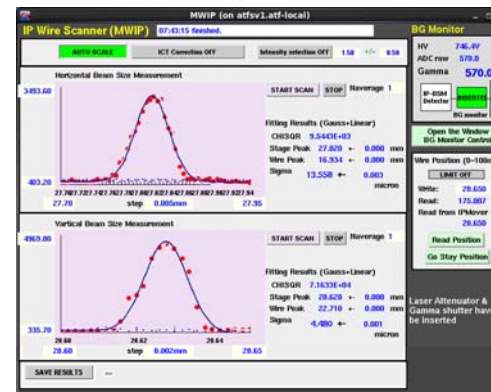
## 磁場中心を求める測定例(BBA)



## FF sextupoles turned off



## FF sextupoles turned on with BBA offset



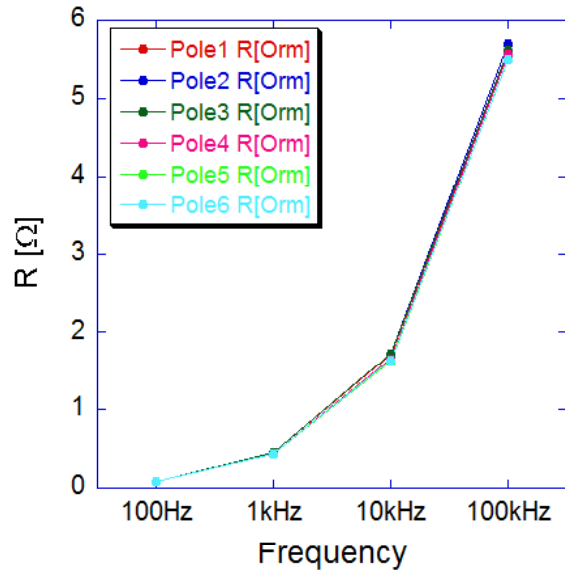
Vertical beam size

Sexts OFF 2.4um  
 Sexts ON 4.5um

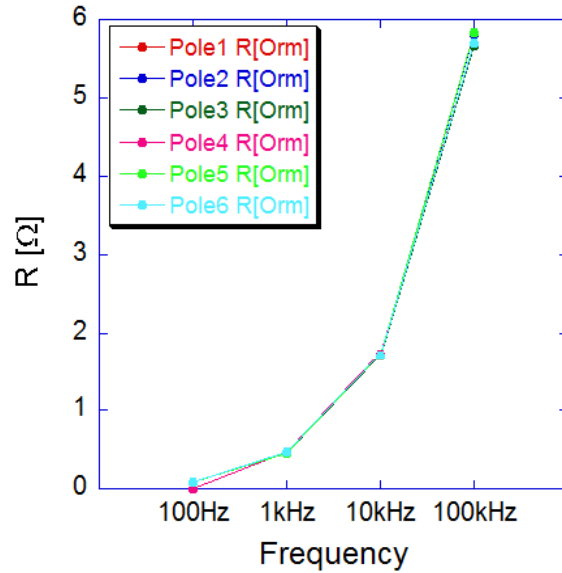
6極電磁石が変ではないか??

# 6極電磁石のインピーダンス測定

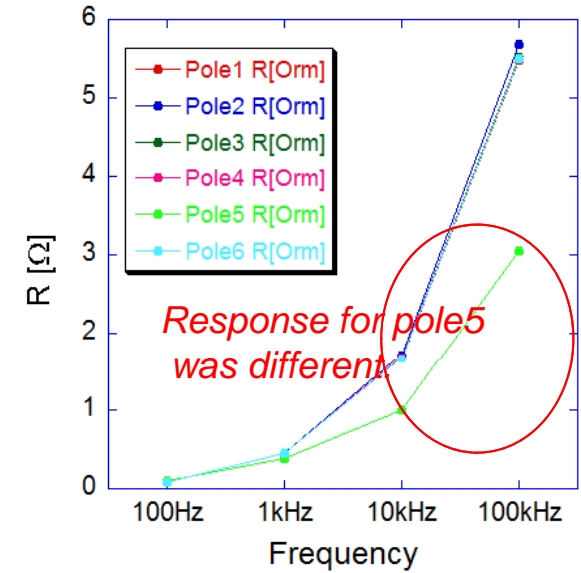
SF6FF Resistance



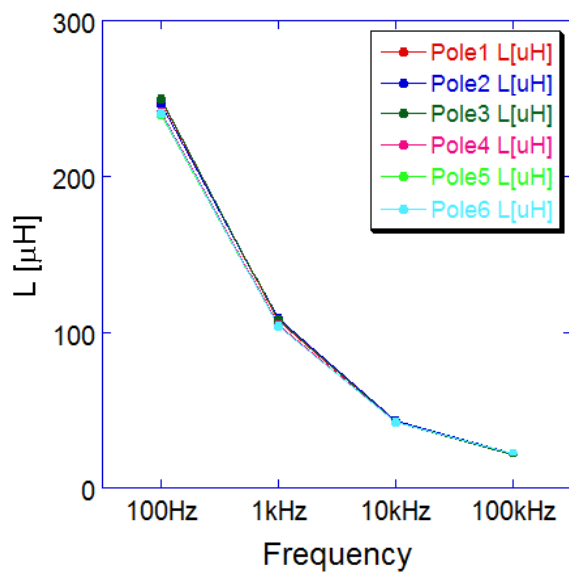
SF5FF Resistance



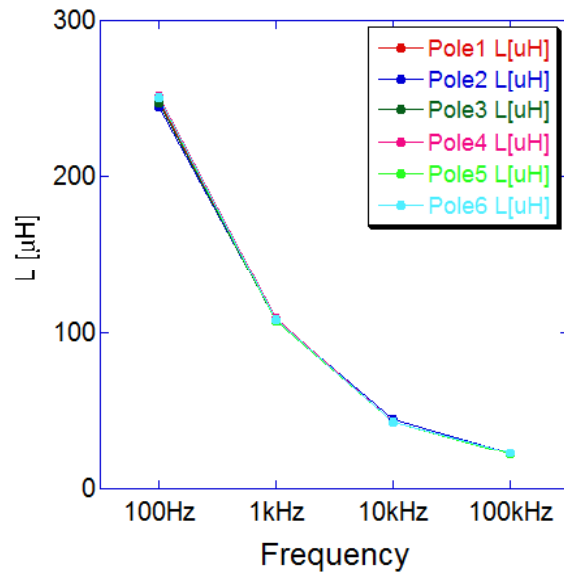
SD4FF Resistance



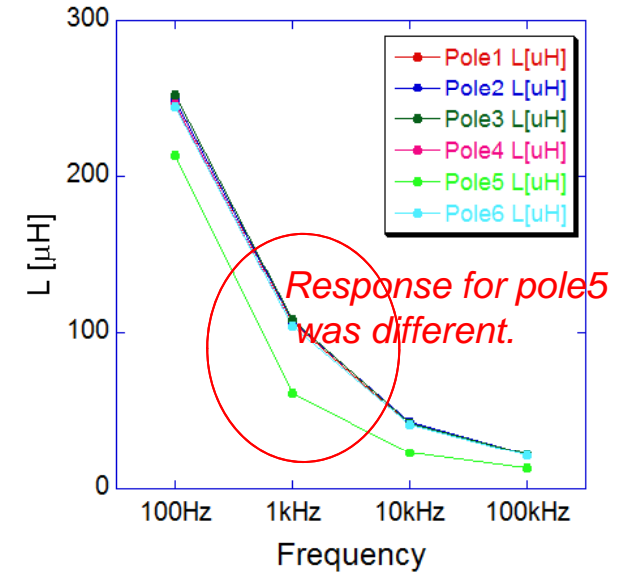
SF6FF Inductance



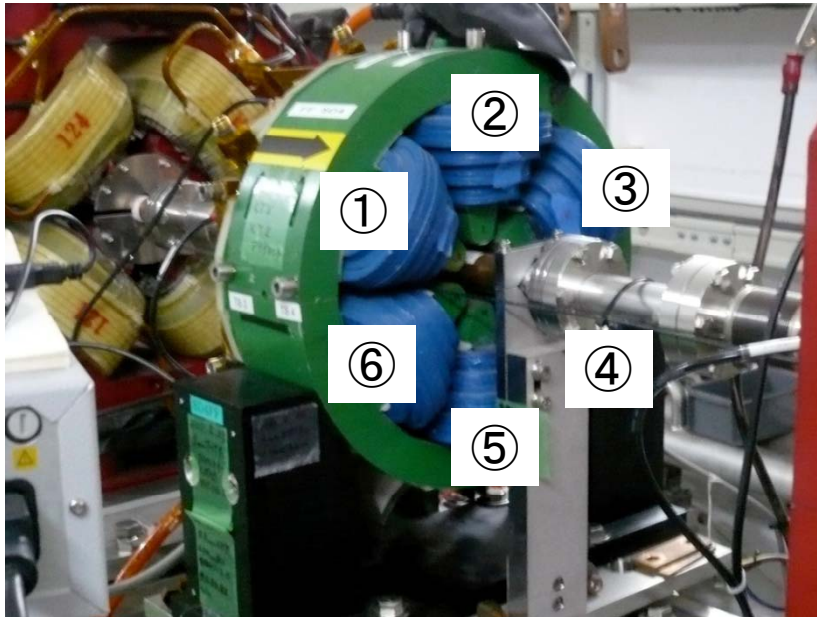
SF5FF Inductance



SD4FF Inductance



# The effect of the small current of pole5 for SD4FF



*When the current of pole5 was smaller than those of others,*

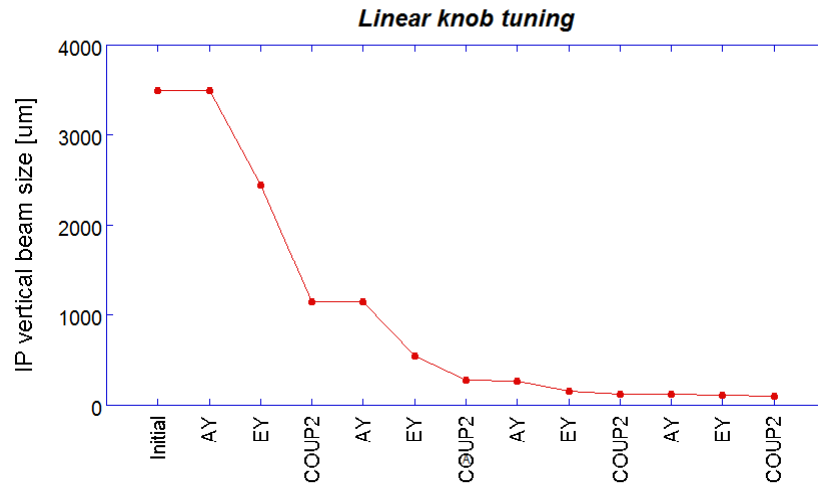
- Generate the horizontal kick
- Generate *the skew quadrupole field*
- Reduce the sextupole field
- Generate the higher multipole fields.

エミッタンスのビーム強度依存性との組み合わせで、  
IPビームサイズのビーム強度依存性に影響？

## *The effect of the skew quadrupole field of SD4FF*

- Generate the vertical dispersion ( can be corrected with Ey knob )
- Generate the  $\langle x'y \rangle$  ( can be corrected with Coup2 knob )
- Converted T122 from SF6FF to the IP vertical beam size
  - > generate T322
  - > *almost same effect to the roll of SF6FF*

# インピーダンス測定を踏まえたシミュレーション



- emitx=2nm, emity=12pm
- put K1S= -0.015 at SD4FF
- rotate the SK4FF by -44.4 deg.

The IP vertical beam was 3.5um by effect of  $\langle x'y \rangle$  and  $\eta y^*$  for skew quad of SD4FF.

The beam size was smaller by applying the linear knob tuning

3.5um -> 100nm

	rms beam size	core beam size
No errors	55.4nm	51.7nm
With errors, linear knob	111.1nm	101.5nm
Y22=-0.6, Y26= 0.0	96.4nm	91.1nm
Y22=-0.2, Y26=-0.2	71.1nm	67.0nm

**12/19 setting**

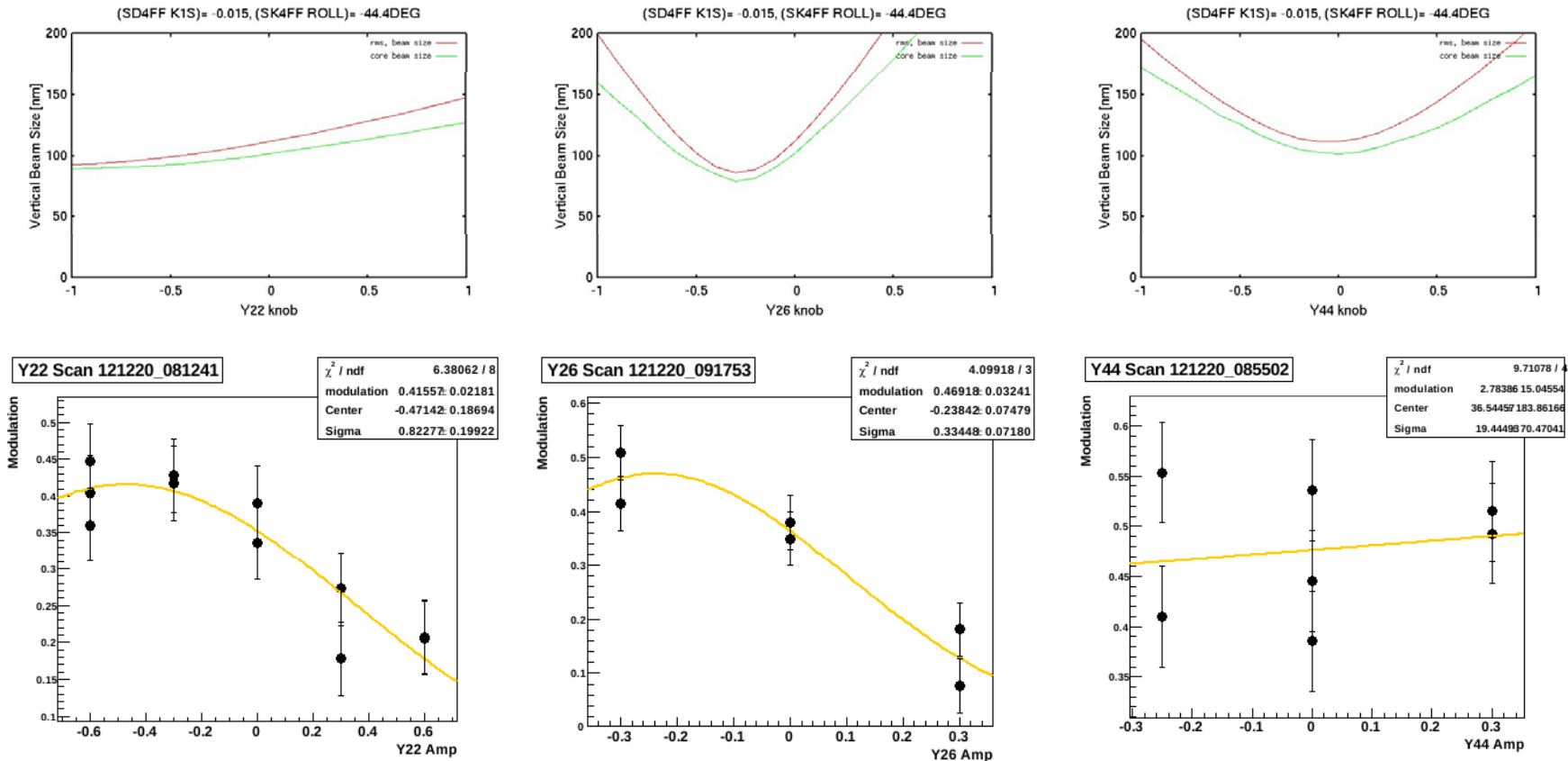
**12/20 setting**

*There is a clear difference between the setting of 12/19 and 12/20.*

*The estimated beam size on 12/20 setting was smaller than that of no correction, but larger than that for no multipole errors.*

# インピーダンス測定を踏まえたシミュレーション2

## Nonlinear knob の反応



## Simulation

- put K1S = -0.015 at SD4FF
- rotate the SK4FF by -44.4 deg.
- optimize the linear knobs (Ay, Ey, Coup2)
- evaluate the nonlinear knob response

## 6極電磁石の入れ替え

現在の設定では、SF5FFの磁場は弱いため(SF5FFは1A, SD4FFは27A)、  
2013年1月の運転前に、SD4FFとSF5FFを入れ替えた。

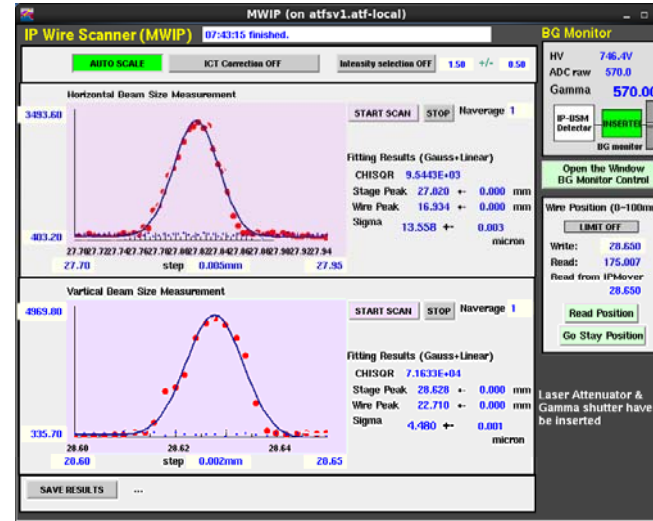
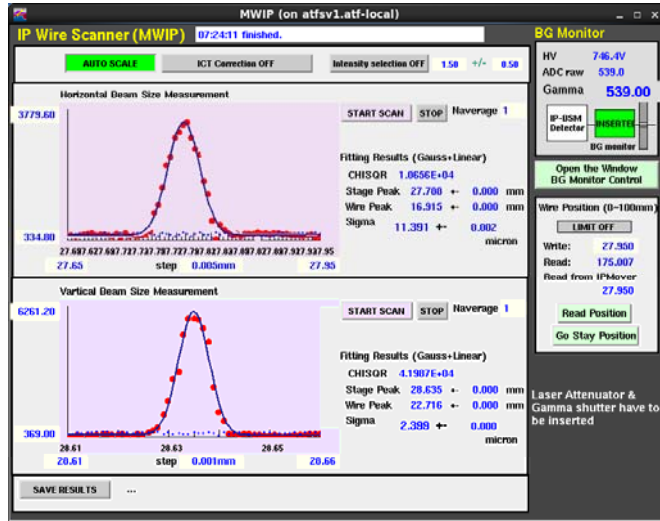


# 入れ替え前後のBBA結果

2012/11/08 (入れ替え前)

FF sextupoles turned off

FF sextupoles turned on with BBA offset



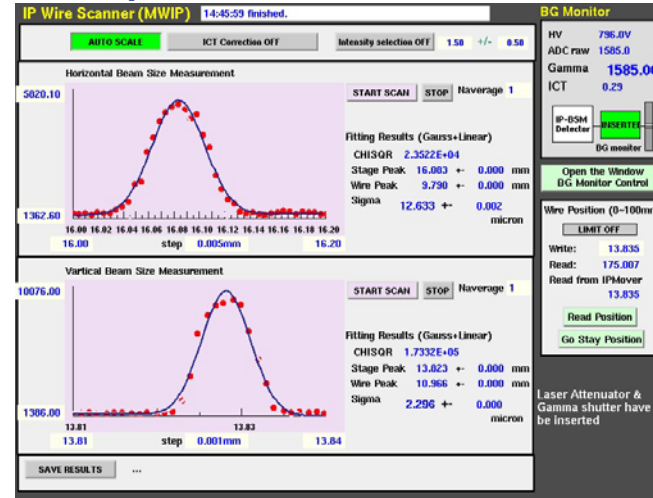
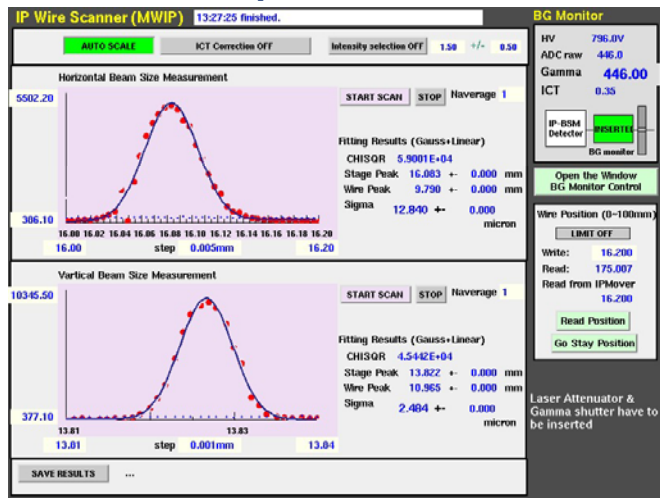
Vertical beam size

Sexts OFF 2.4um  
Sexts ON 4.5um

2013/02/06 (入れ替え後)

FF sextupoles turned off

FF sextupoles turned on with BBA offset

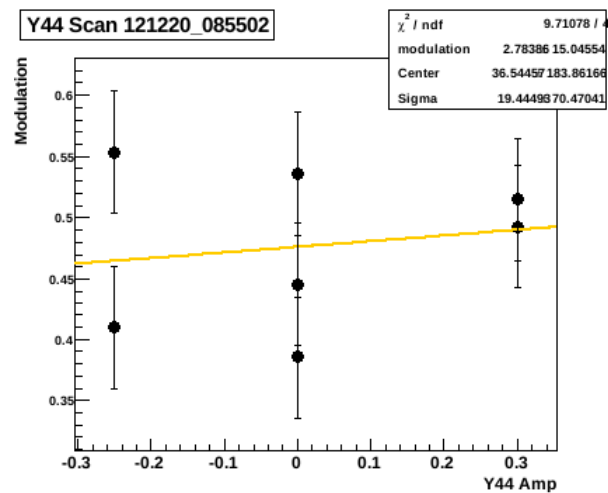
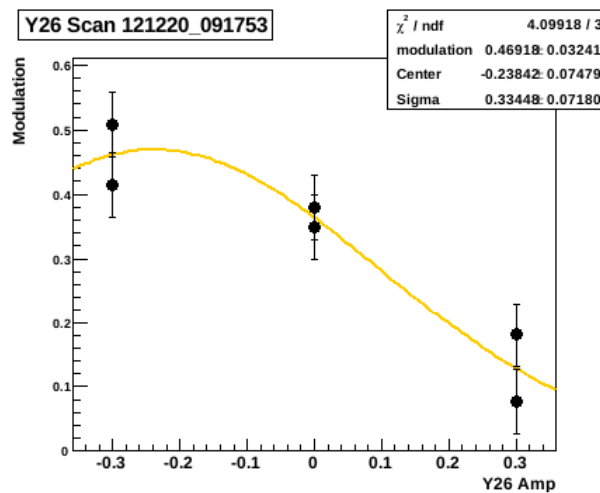
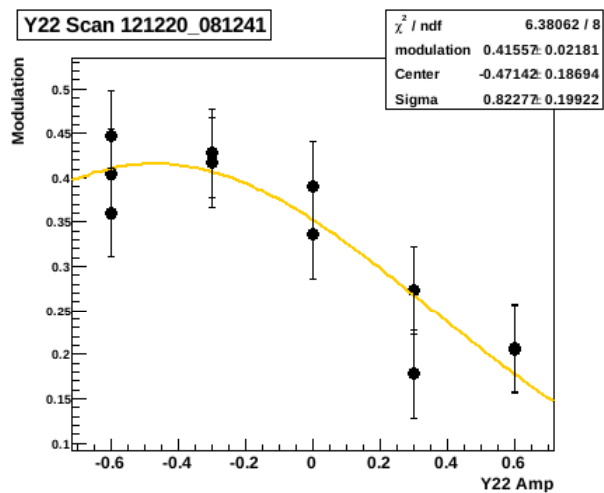


Vertical beam size

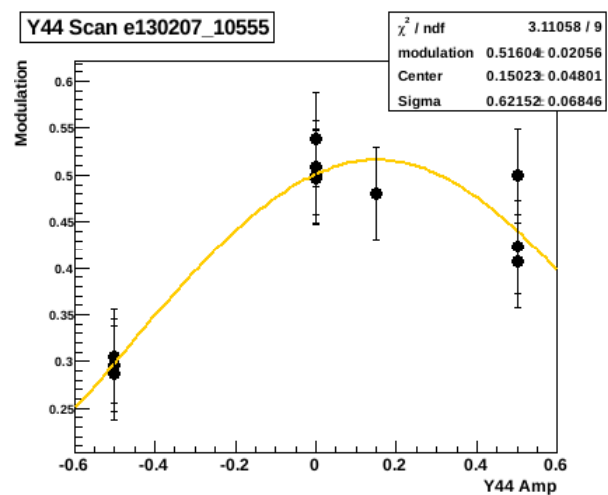
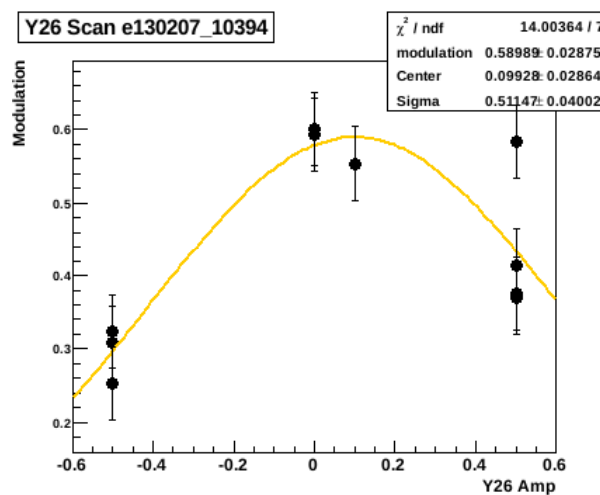
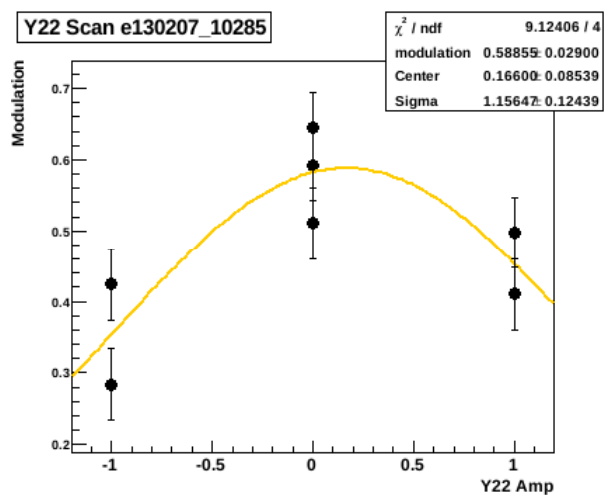
Sexts OFF 2.5um  
Sexts On 2.3um

# 入れ替え前後のNonlinear knobの応答

2012/12/20 (入れ替え前)



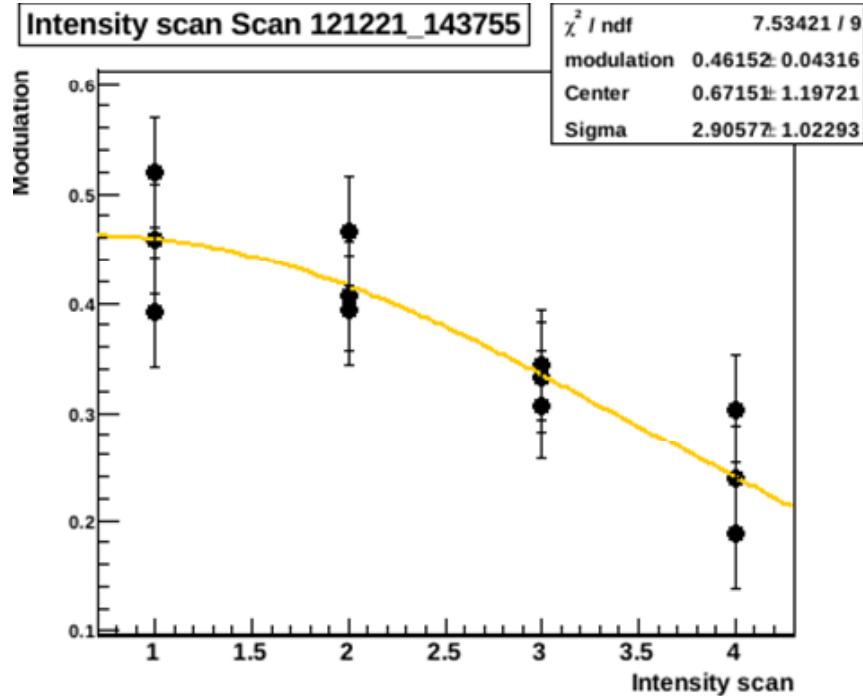
2013/02/07 (入れ替え後)



2012年12月と違い、強いskew6極磁場をかけないでも、30度モードでモジュレーションが大きくなった。

# 入れ替え前後のビーム強度依存性の変化

2012/12/21



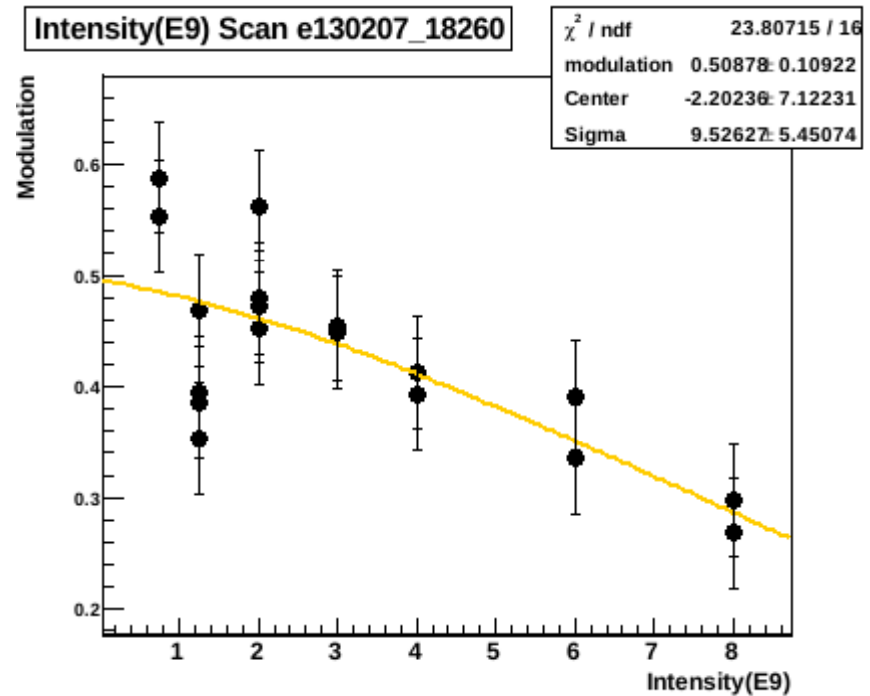
Typical modulation

50% at N=1e9

30% at N=3e9

20% at N=4e9

2013/02/07



Typical modulation

50% at N=1e9

30% at N=8e9

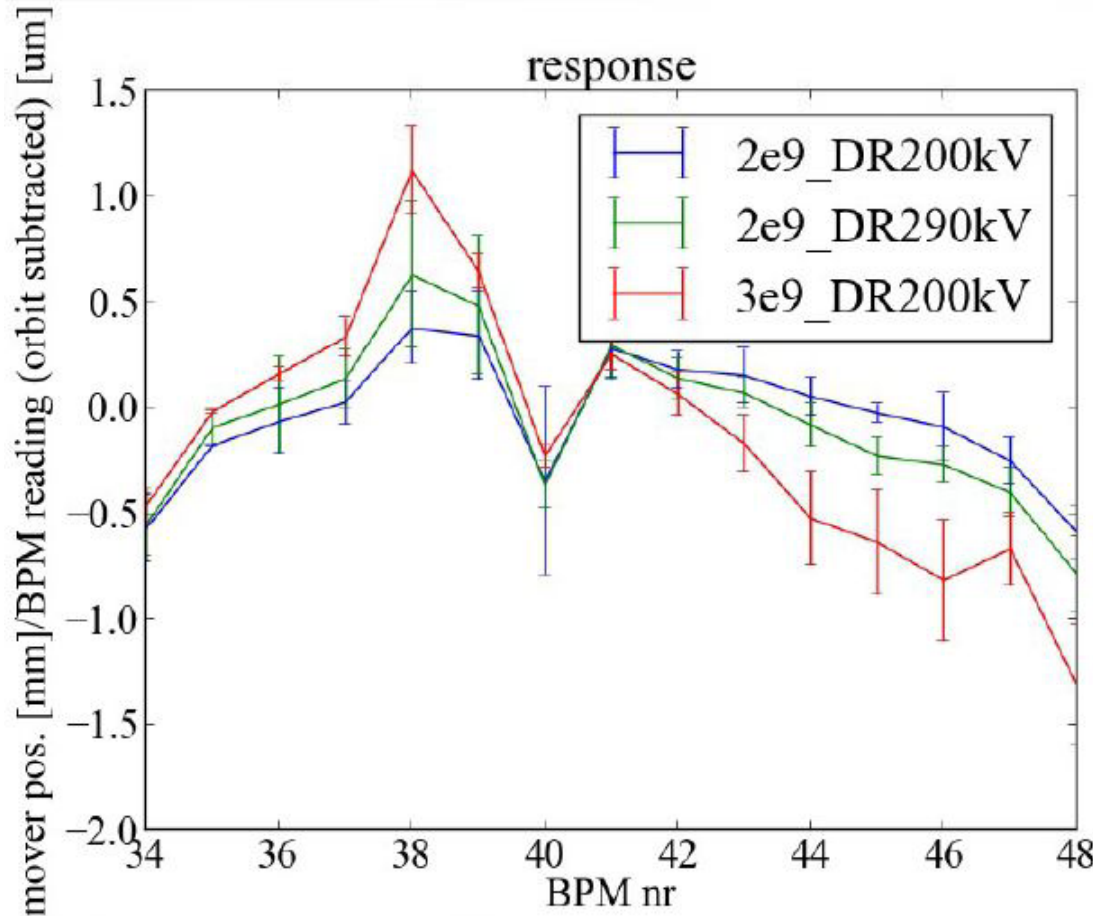
ATF2 IP での強度依存性は2012年12月より減少しているが、まだ存在する。

強度依存性が減少した原因はSD4FFの高次磁場の影響か??

# Wake の影響 (前回推進会議からの進捗)

2012年12月のReference Cavity のWakeの軌道解析

(前回推進会議では1つのBPMでの軌道変化を報告)



Corresponding wakefield of cavity mover system:  
0.3-0.4 V/pC/mm

Larger value for higher charge?!

Recall simulation (including bellows):

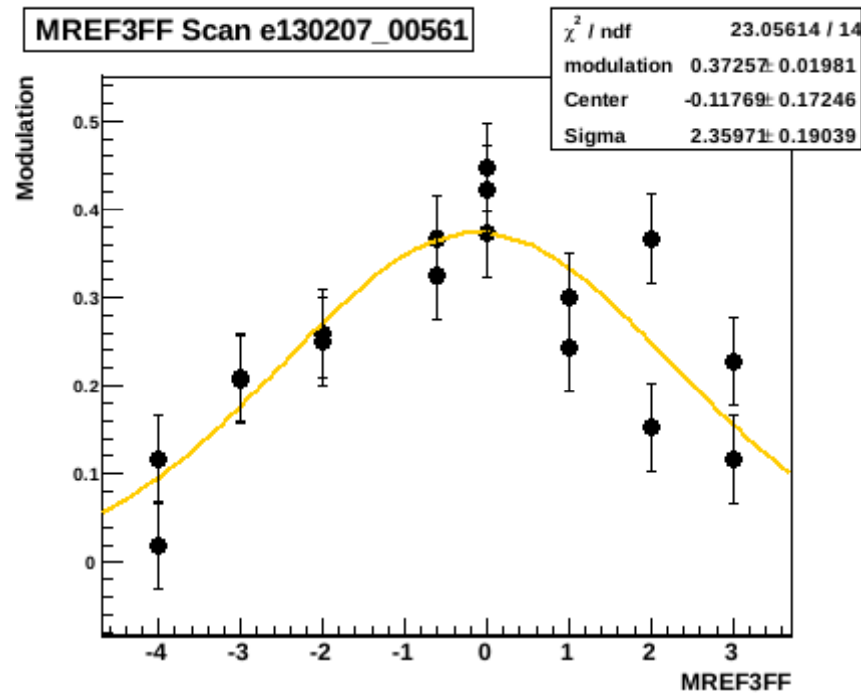
0.21 V/pC/mm

高次モードも加えて解析

バンチ長の不定性あり

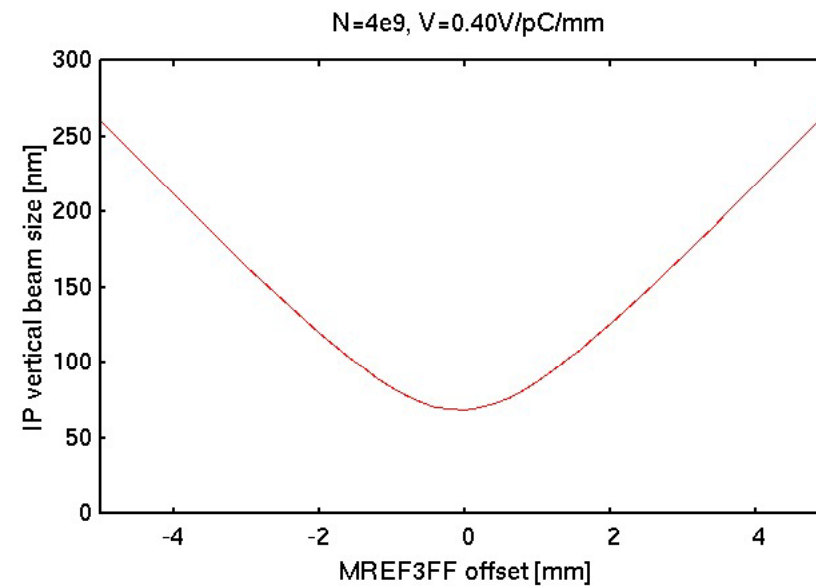
# Reference Cavity の位置とIPのビームサイズ

2013/02/07の測定結果から



N=4e9  
 $\Delta\sigma_y = 70\text{nm} / \text{mm}$

Tracking Simulation



N=4e9  
V=0.40V/pC/mm  
 $\Delta\sigma_y = 53\text{nm} / \text{mm}$

軌道解析の結果  
V=0.3~0.4V/pC/mmから

オーダーはsimulationと測定は一致しているが、  
測定値の方がSimulationよりも若干ビームサイズ依存性が強い。

# Summary

当面は $10 \times 1$ 光学系で、 $N=0.1e10$  の低電流運転で出来るだけ小さいビームに絞る。

6極電磁石のコイルのインピーダンス測定の結果、SD4FFの1つのコイルのインピーダンスが低いことがわかった。

SD4FF を磁場が弱いSF5FFと交換したところ、

- 6極電磁石を磁場中心に合わせてONした時もIPのビームサイズが変わらなくなった。
- Nonlinear knobを使わないでも、ビームサイズを絞れるようになった。
- ビーム強度依存性が弱くなった(要確認)。

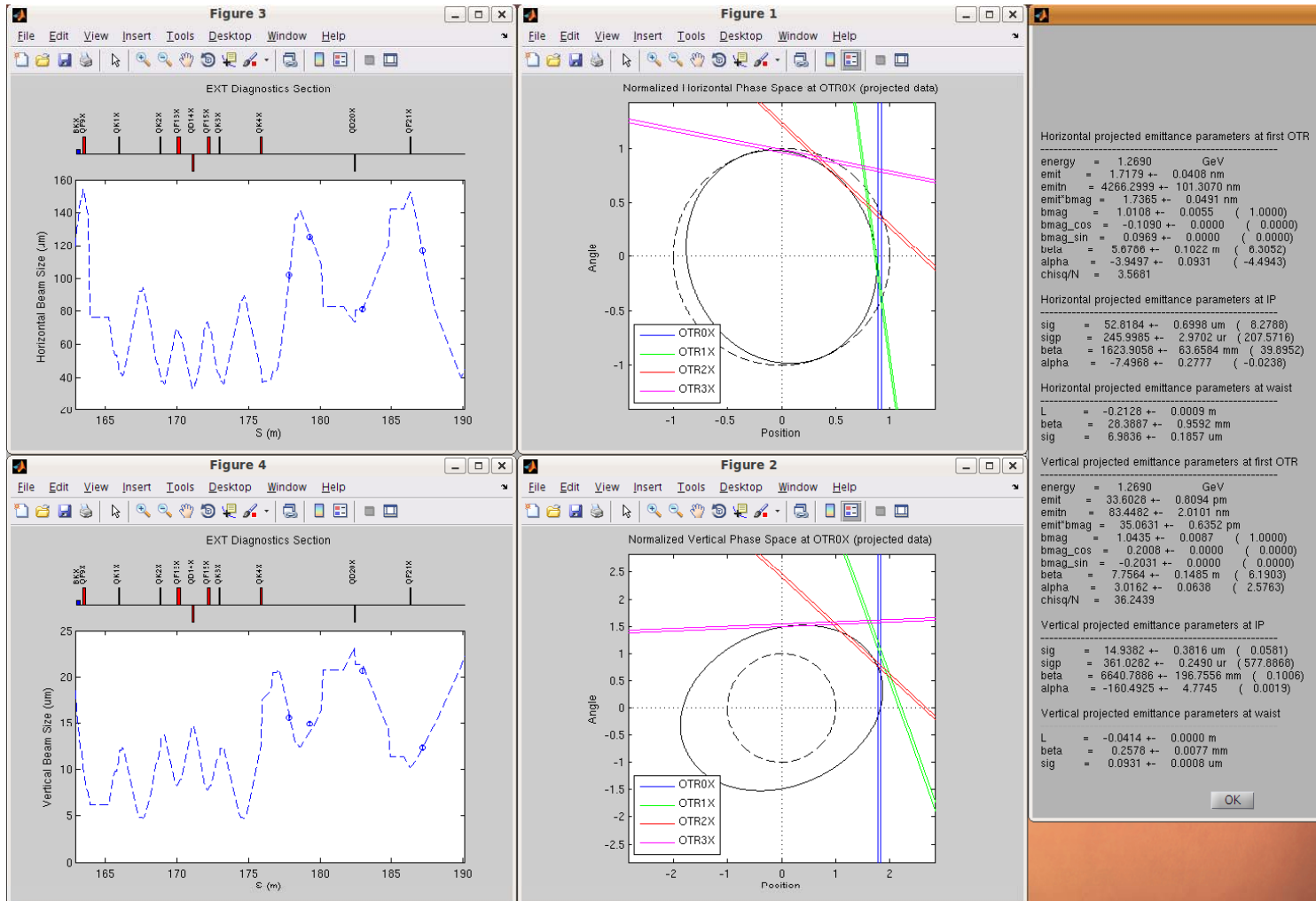
Reference CavityのWakeの強さの解析、測定を進めた(現在進行中)。

- Wakeの強さをSimulationで解析すると $0.21\text{V/pC/mm}$ (バンチ長の不定性あり)。
- ビームの軌道測定では $0.3\text{-}0.4\text{V/pC/mm}$
- IPのビームサイズの変化は測定では $70\text{nm/mm}$ だった。
- Wakeの強さを $0.4\text{V/pC/mm}$ としたトラッキングでは $53\text{nm/mm}$ だった。

IPビームサイズのビーム強度依存性の研究は今後も続けていく予定。

Backup

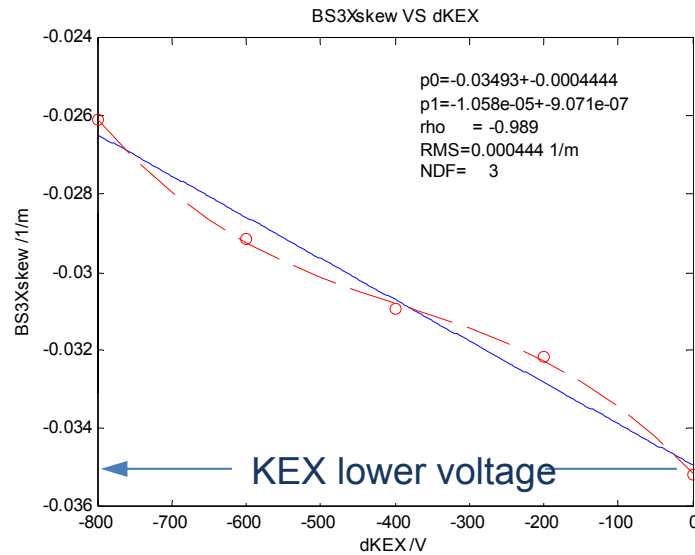
# Emittance measurement after rematching



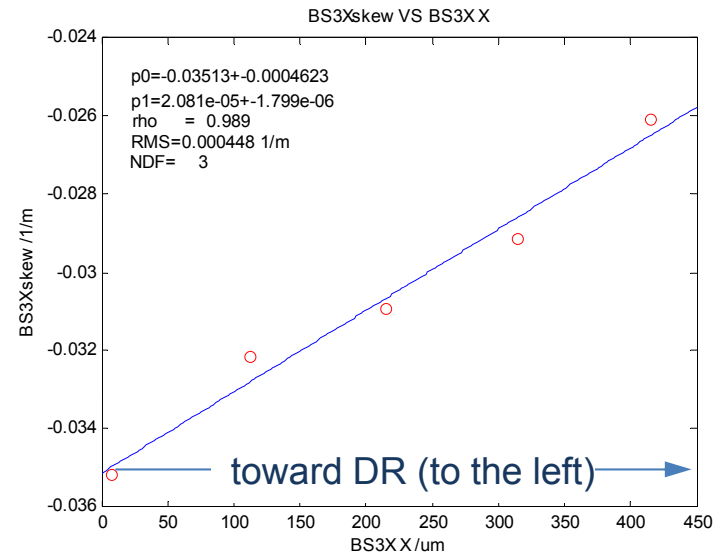


# 取り出しセプタムの非線形磁場

BS3Xskew = 0 @ KEX = 46.7 kV



BS3Xskew = 0 @ BS3X X = +1.7 mm



M. Woodley, 15<sup>th</sup> ATF2 Project Meeting

ATF2ビームラインのDispersionは、取り出しセプタムにskew4極磁場があると説明できる。  
推定されるSkew4極電磁石の強さは、取り出しキッカーの強さで変化する。  
これらから、取り出しセプタムにはskew6極磁場があるのではないかと考えられる。

# 垂直方向への軌道の漏れ

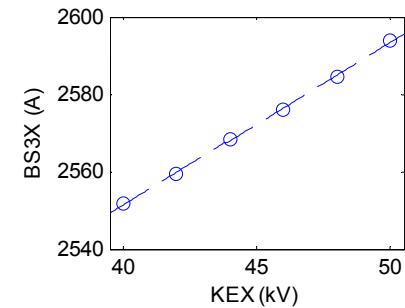
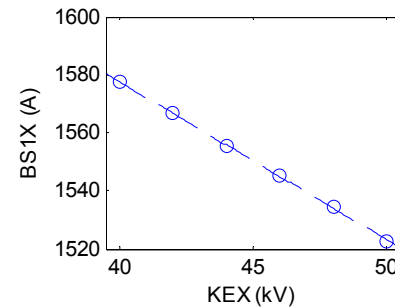
取り出しラインの水平方向の軌道が変わらないようにキッカー、セプタムの強さを調整すると、垂直方向に軌道が変わる。

この軌道は、取り出しキッカーが大きく回転していると考えると理解できる。

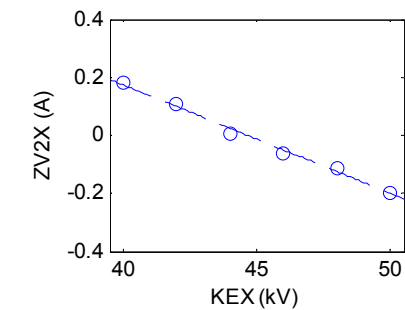
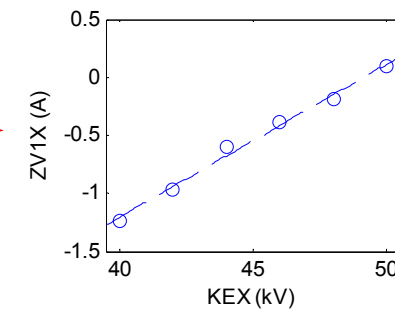
## Kicker & Septum Orbit Data

In order to make same EXT orbit, we must set to the following Septum and vertical steering settings

KEX	BS1X	BS3X	ZV1X	ZV2X
46000	1545.49A	2576.02A	-0.391A	-0.062A
48000	1534.29A	2584.62A	-0.181A	-0.112A
50000	1522.69A	2593.62A	+0.099A	-0.197A
44000	1555.29A	2568.42A	-0.601A	+0.003A
42000	1566.69A	2559.42A	-0.961A	+0.108A
40000	1577.49A	2551.52A	-1.241A	+0.183A



**KEX1 steers vertically?  
inferred roll is ~100 mrad (!)  
... or something else?**



# 取り出しキッカー、セプタムのアライメント

取り出しキッカー、セプタムをアライメントの基準通りに並べると、垂直方向に大きく軌道がでる。

補正するために、2010年4月にセプタムBS3Xを4mrad回転させた。

その後、BS3Xをもとに戻し、2012年1月に取り出しキッカーを60mrad回転させた。現在は、この状態である。

# 入れ替え前後のReference Cavityの位置依存性

