

# ATFを基盤とした開発の 進展、成果

照沼 信浩

LC計画推進委員会  
6/11、3号館1階セミナーホール

# 内容

- 概要
- 低エミッタンスビーム開発
- ILCビーム入射取り出しキッカー開発
- 高分解能ビームモニター開発
- ビーム最終収束システム開発
- 高速ビームフィードバック技術開発
- まとめ

# KEK Accelerator Test Facility (1.3 GeV)



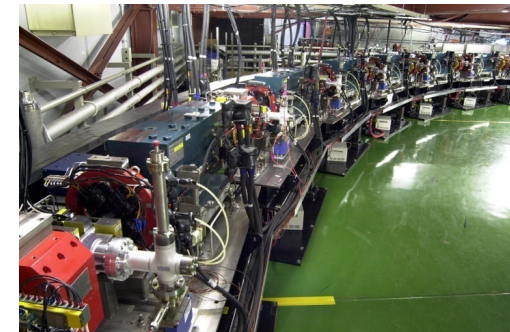
- 国際的な研究開発拠点
- ILC基礎技術開発
  - 低エミッタンスビームを実現・利用する研究開発
  - 最終収束系の実証試験(ATF2)
- 若手研究者の育成

## ATF2 beamline

Nano-meter beam studies; i.e., ILC  
final focus system  
Advanced beam instruments R&D

## Damping Ring

Low emittance beam studies



## S-band Linac

Multi-bunch beam acceleration, 1.3 GeV

# ATFに参加している代表的研究機関

## - ATF International Collaboration -

欧州原子核研究機構(CERN)  
ドイツ(Germany)  
電子シンクロトロン研究所(DESY)

フランス(France)  
IN2P3; LAL, LAPP, LLR

イギリス(UK)  
Univ. of Oxford  
Royal Holloway Univ. of London  
STFC, Daresbury  
Univ. of Manchester  
Univ. of Liverpool  
Univ. College London

イタリア(Italy)  
INFN, Frascati

スペイン(Spain)  
IFIC-CSIC/UV

ロシア(Russia)  
Tomsk Polytechnic Univ.

アメリカ(USA)

SLAC国立加速器研究所  
ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)  
フェルミ国立加速器研究所(FNAL)  
ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)  
ブルックヘブン国立研究所(BNL)  
コーネル大学(Cornell Univ.)  
ノートルダム大学(Notre Dome Univ.)

日本(Japan)

高エネルギー加速器研究機構(KEK)  
東北大学 (Tohoku Univ.)  
東京大学 (Univ. of Tokyo)  
早稲田大学(Waseda Univ.)  
名古屋大学(Nagoya Univ.)  
京都大学 (Kyoto Univ.)  
広島大学 (Hiroshima Univ.)

中国(China)

中国科学院高能物理研究所(IHEP)

韓国(Korea)

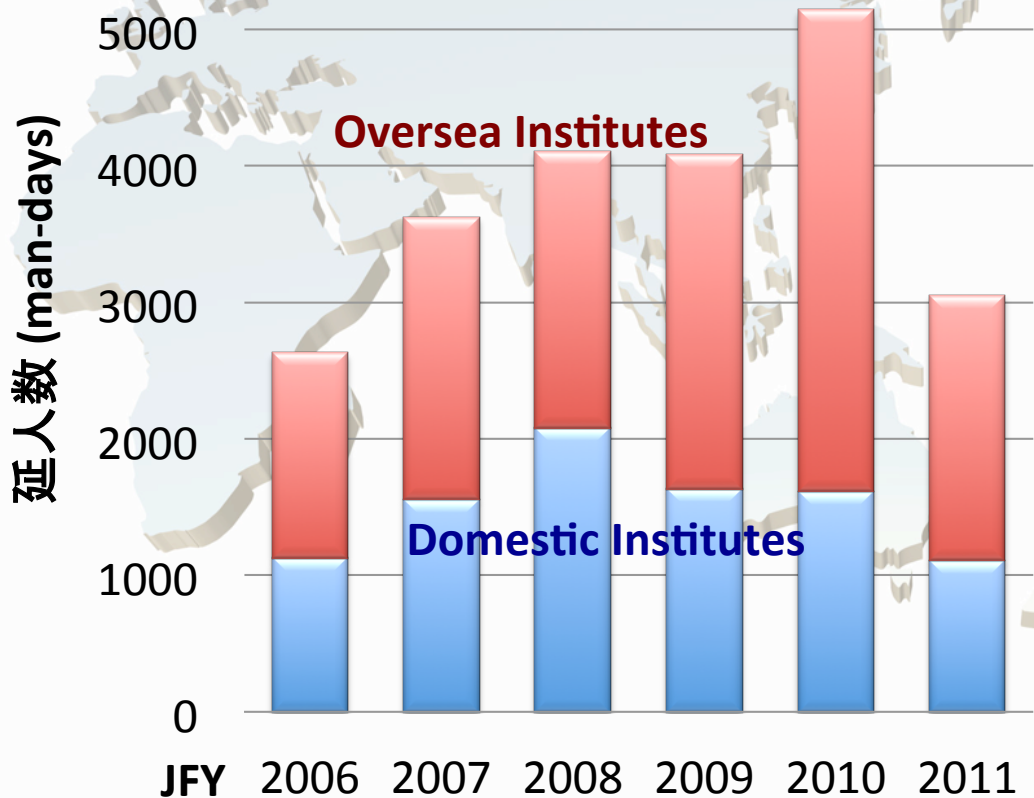
ポハン加速器研究所(PAL)  
キョンプク大学(KNU)

インド(India)

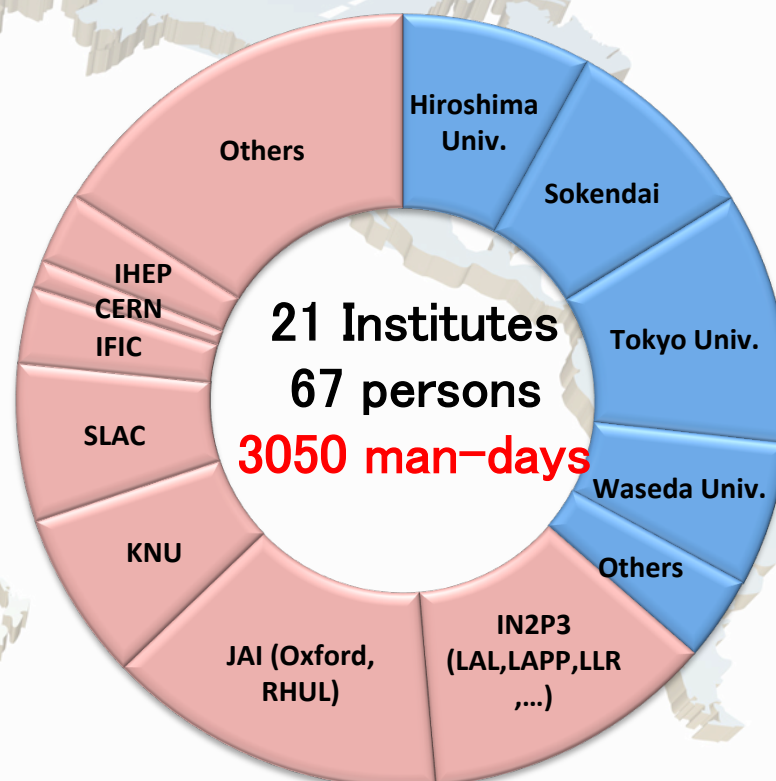
Raja Ramanna Centre for Advanced Technology

# - Activity of the International Collaboration -

ATF共同研究者受入実績  
Number of visited collaborators



2011年度の機関別実績  
JFY2011 visited collaborators

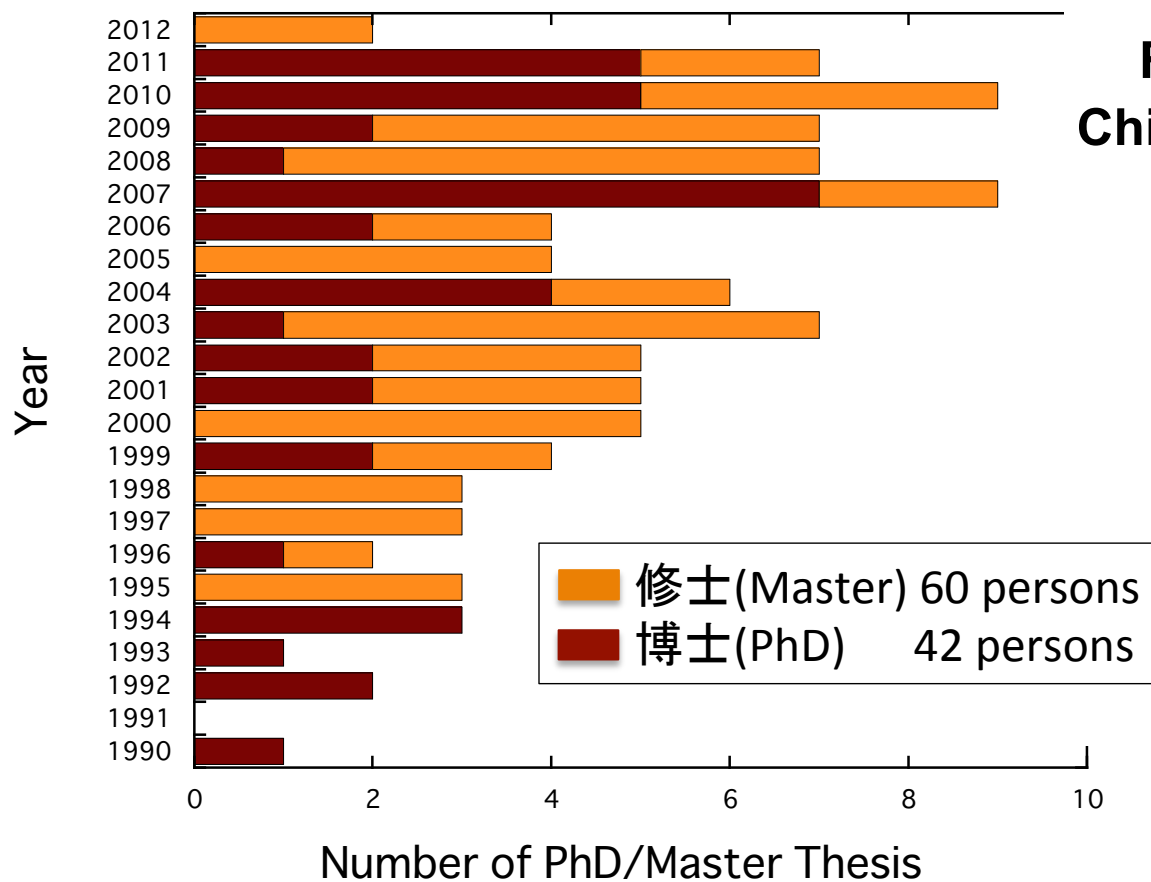


21機関、67名、延3050人

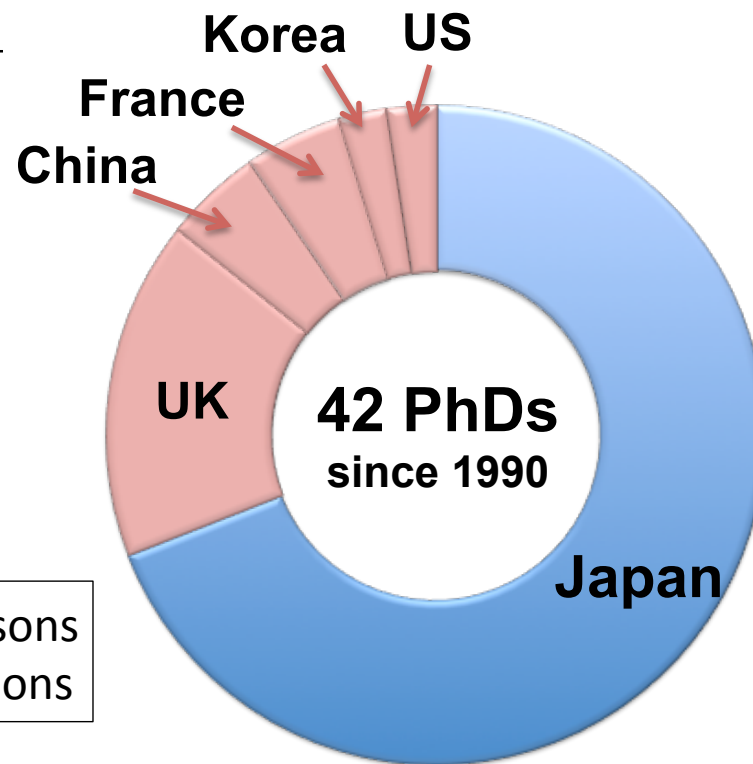
# - Education of the Young Researchers under the International Framework-

ATFでの博士および修士論文実績

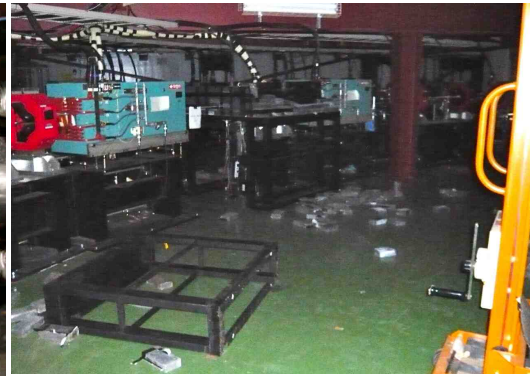
Education of Young Reserchers at ATF



博士論文の国別集計



# 震災からの復旧



	2011												
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
運転状況	3.11 Earth-quake	復旧作業(動力、冷却水、ATF2シールド、真空復帰など)	機器確認 ビーム運転	ビームライン機器の改修・調整					ビーム運転				
ビームラインアライメント		入射ライン+DR		DR			ATF2	アライメント(2巡目)					
低エミッタンスビーム開発	not available							80 pm 復帰	10 pm 復帰。 に再現				

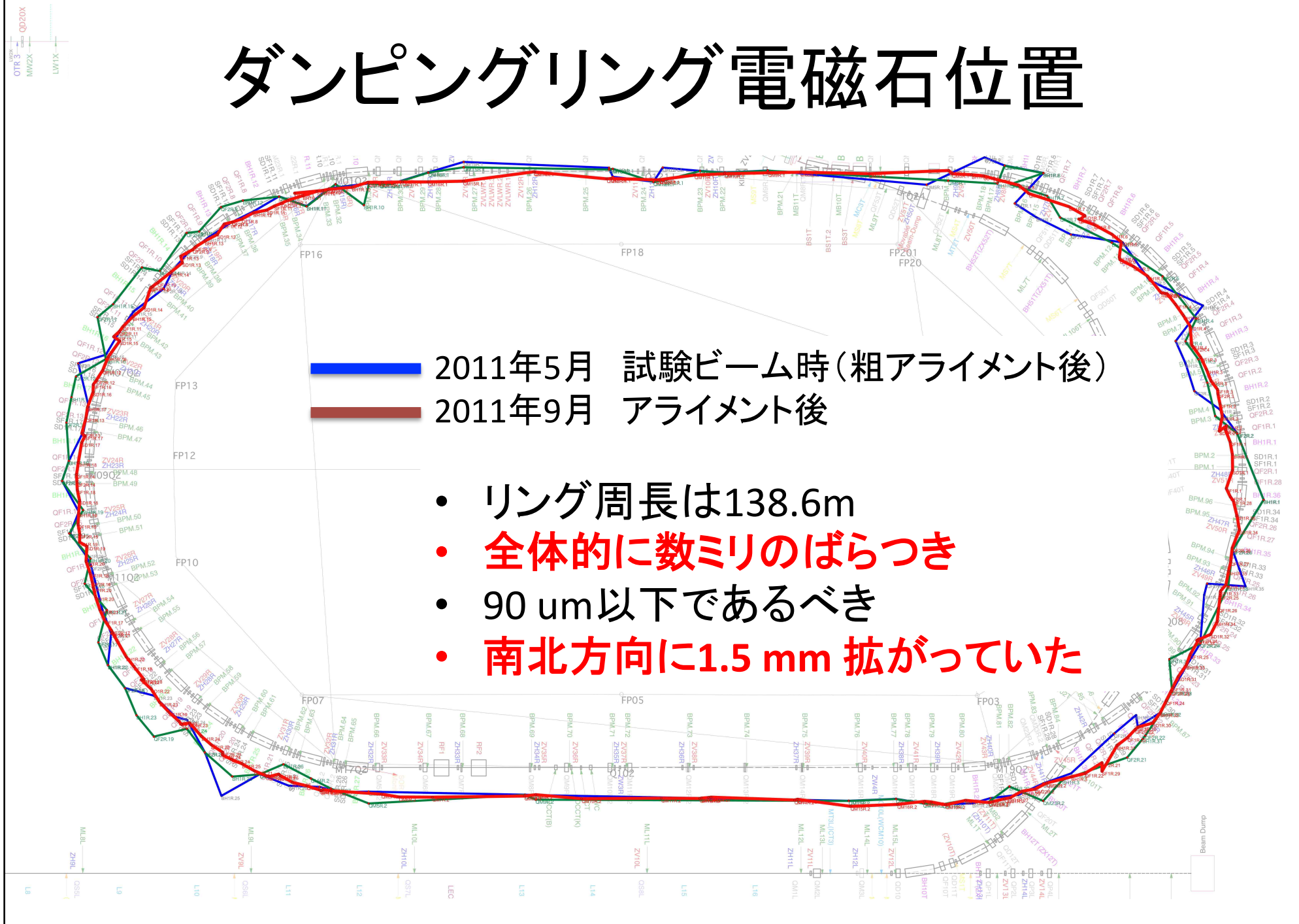
# Alignment of whole ATF beamline

from 2011 April to 2012 March





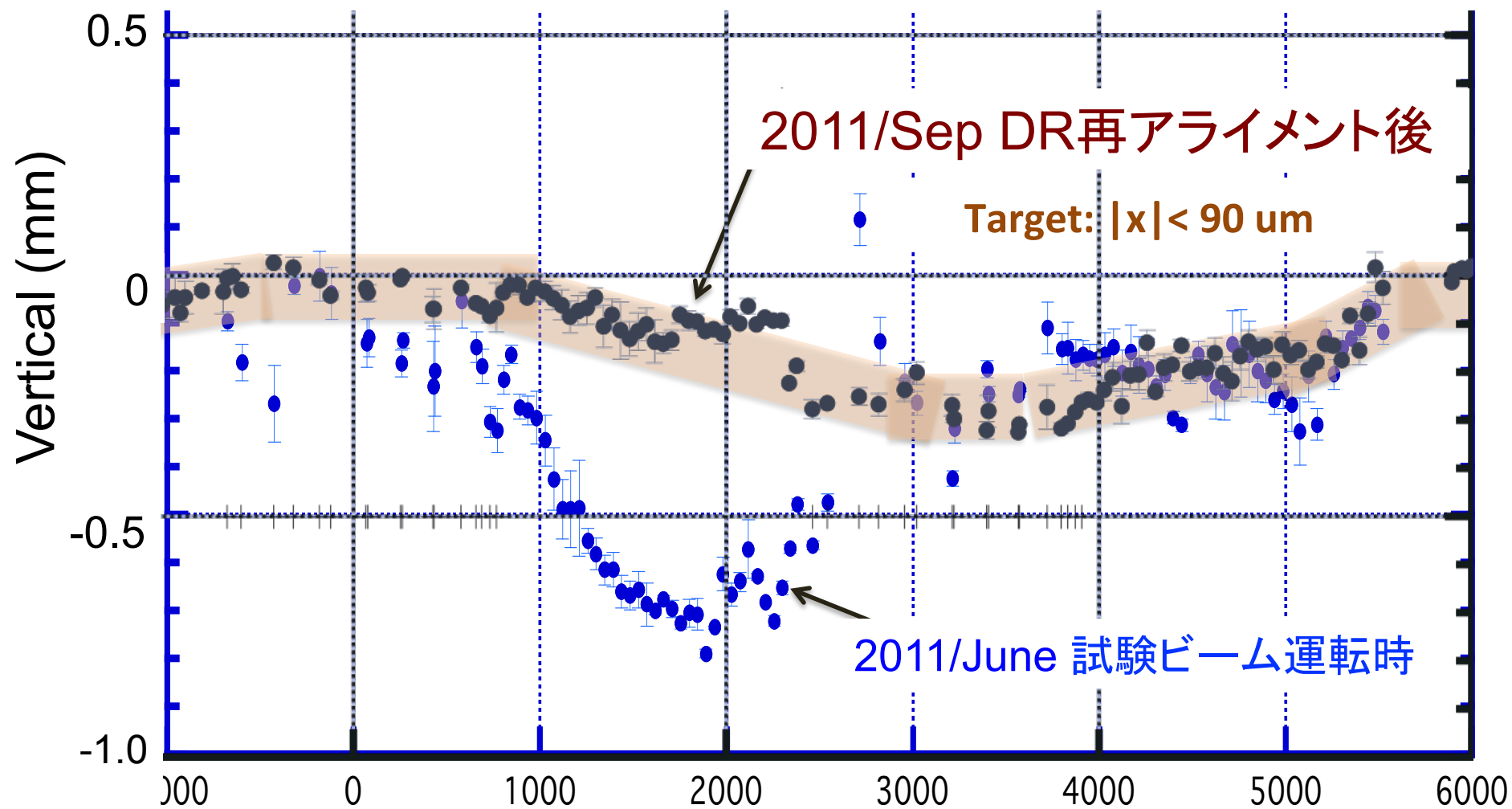
# ダンピングリング電磁石位置



■ 2011年5月 試験ビーム時(粗アライメント後)  
■ 2011年9月 アライメント後

- リング周長は138.6m
- 全体的に数ミリのばらつき
- 90 um以下であるべき
- 南北方向に1.5 mm 広がっていた

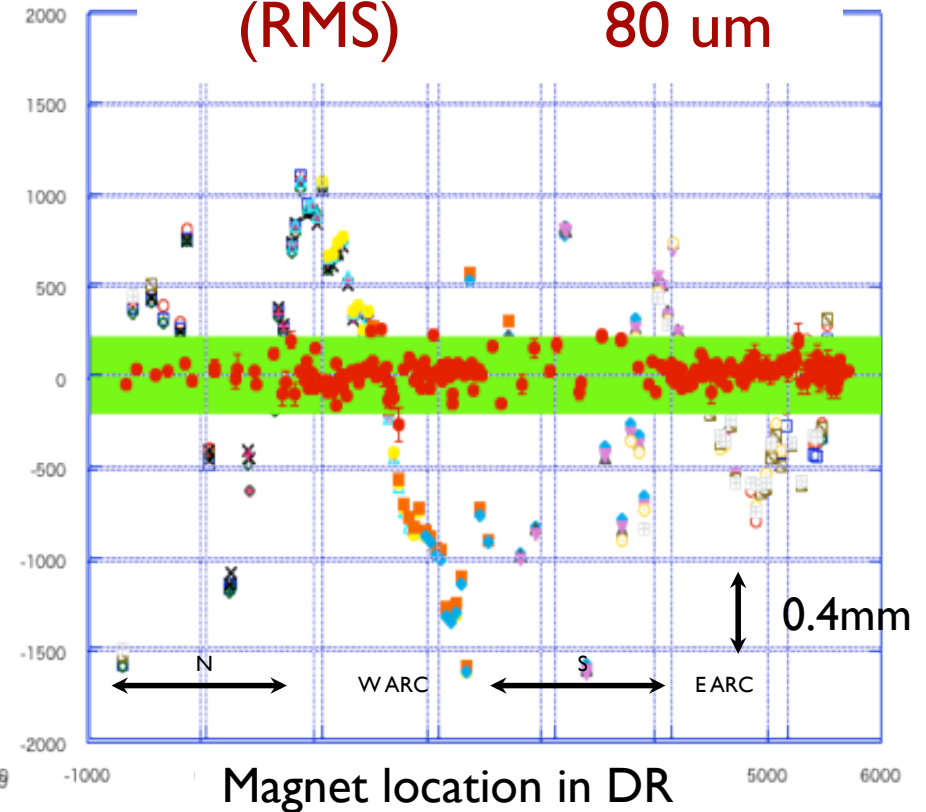
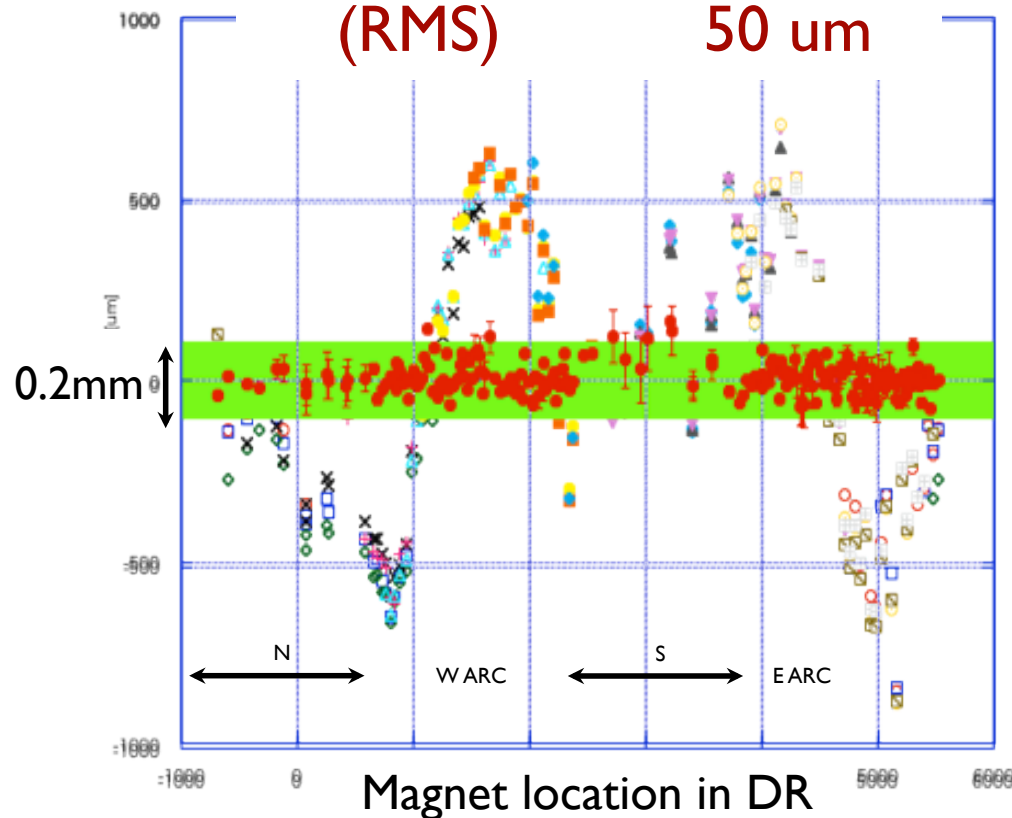
# DR垂直方向再アライメント



# DR Magnet Alignment -2012/Sep

Horizontal displacement:  
(Peak-peak) 150  $\mu\text{m}$   
(RMS) 50  $\mu\text{m}$

Longitudinal displacement:  
(Peak-peak) 270  $\mu\text{m}$   
(RMS) 80  $\mu\text{m}$



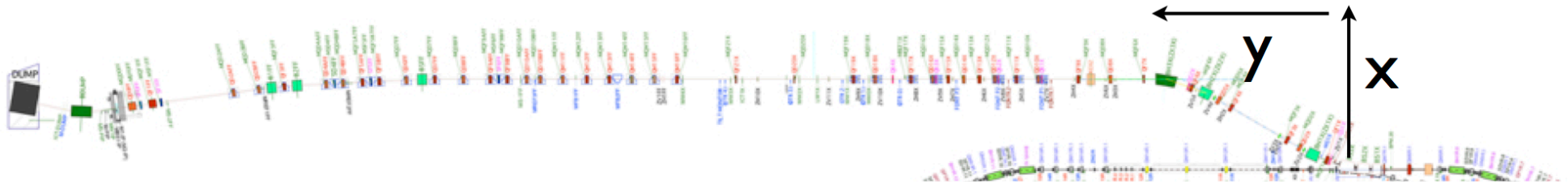
Target:  $|x| < 90 \mu\text{m}$

Others

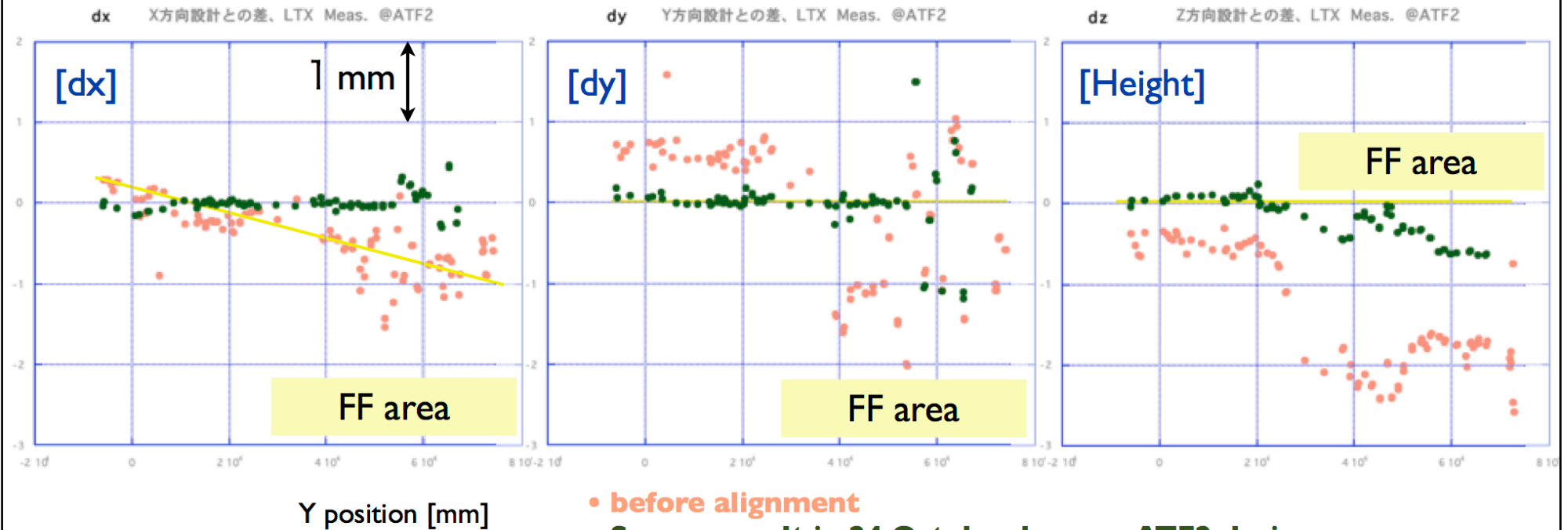
aligned in 2011 summer  
aligned in 2011 May

2012/Jan S.Araki

# ATF2 再アライメント



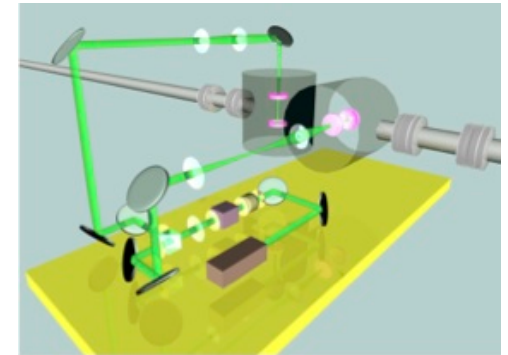
## ● Deviation of Magnets



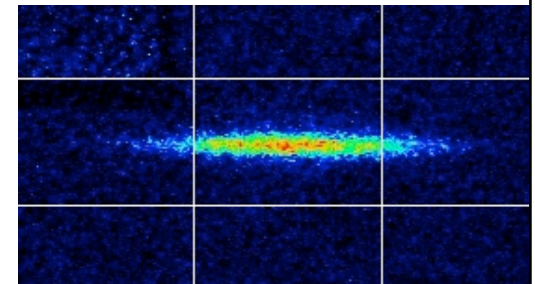
増設されたATF2側の床は一様に1.5 mm沈下した。  
ビームライン再アライメントは電磁石ムーバーの補正範囲までを目標とした。

# 低エミッタンスビーム開発

- 2003年に垂直方向エミッタンス 4pmを達成
  - 当時のLC要求性能に到達
  - Phys. Rev. Lett. 92, 054802 (2004)
- ILC design → 2pmに
- ATF damping ringにて2pm達成を目指す
  - 現在はATF2 37nmビームの実現を優先
    - ビームタイムの割り当て
    - ATF2の要求10pmは定常的に実現
- 10～12月にATF2に特化した運転。その後、2pm以下を狙う



レーザーワイヤ・ビームサイズモニター

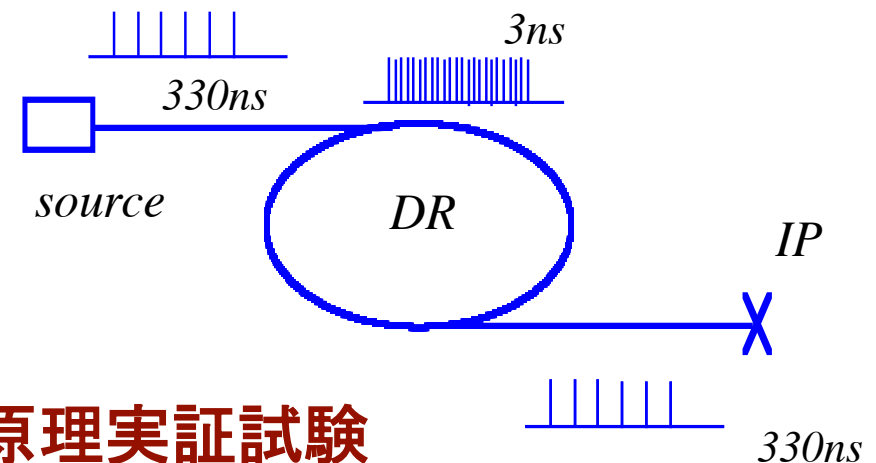


X-ray SR・ビームサイズモニター

# ILCビーム入射取りだし用ナノ秒高速キッカー開発

- ILCダンピングリングでは、マルチバンチビームの入射・取り出しにナノ秒パルスによるビームキッカーを想定。
  - Rise/fall time: 6 ns (3 ns), repetition 3 MHz (6 MHz)
  - Stability:  $< 7 \times 10^{-4}$

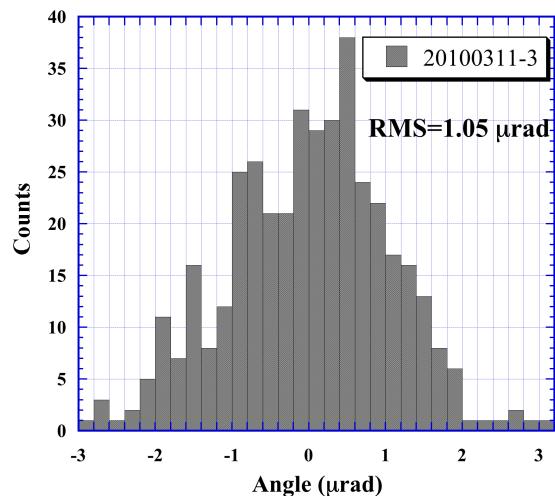
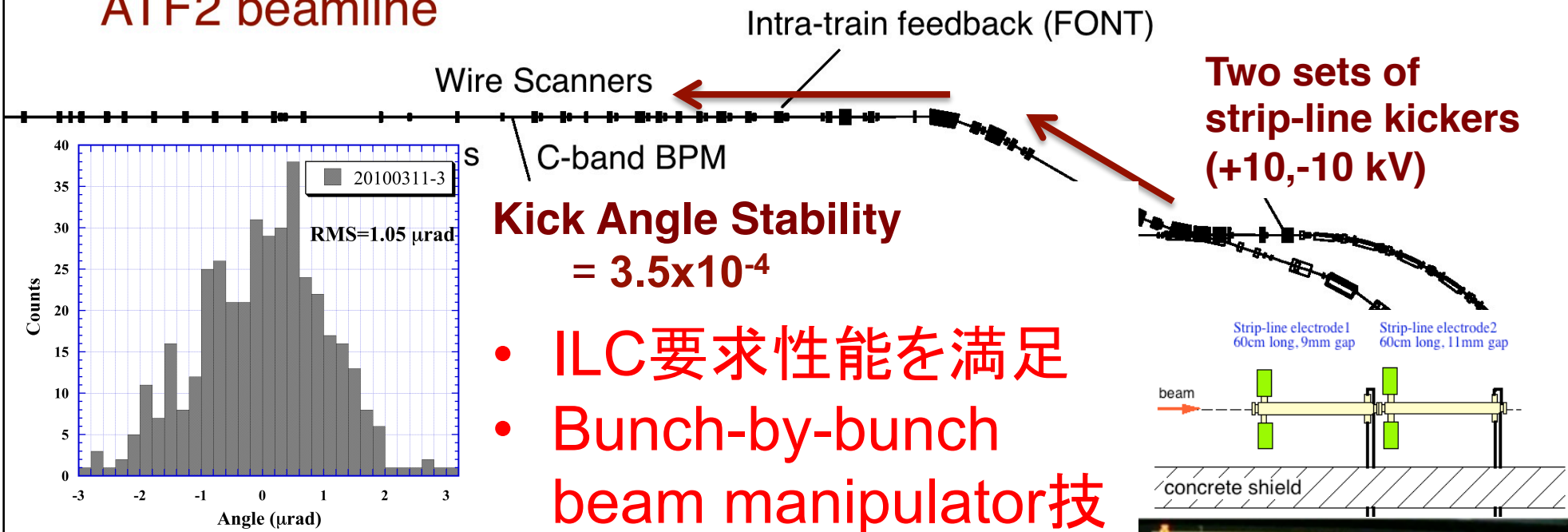
**bunch-by-bunch beam manipulator:** DRでbunch spacingを圧縮



- **ATFにてナノ秒パルスキッカーの原理実証試験**
  - 3ns高速立ち上がりのパルスキッカー開発 (2005～2009)
  - マルチバンチビーム取り出し実証試験 (2009～2010)
- **ILCダンピングリング設計に大きく貢献**
  - DR 17km (20ns) → 6 km (6ns) → 3 km (3ns)

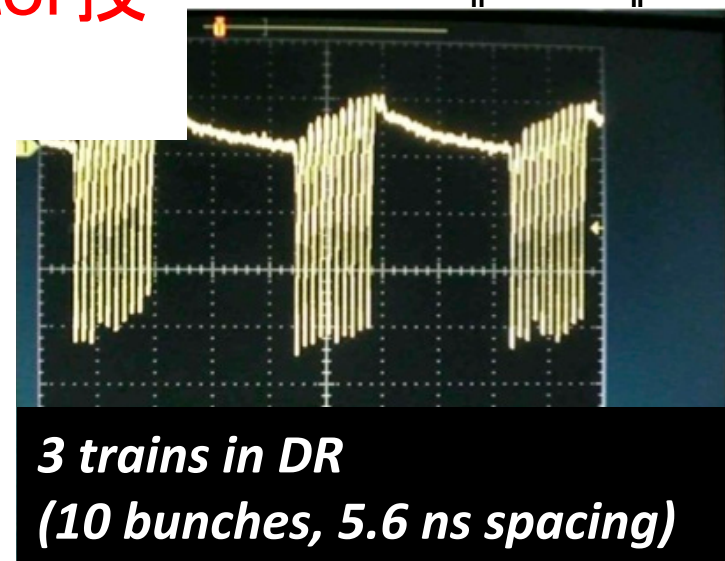
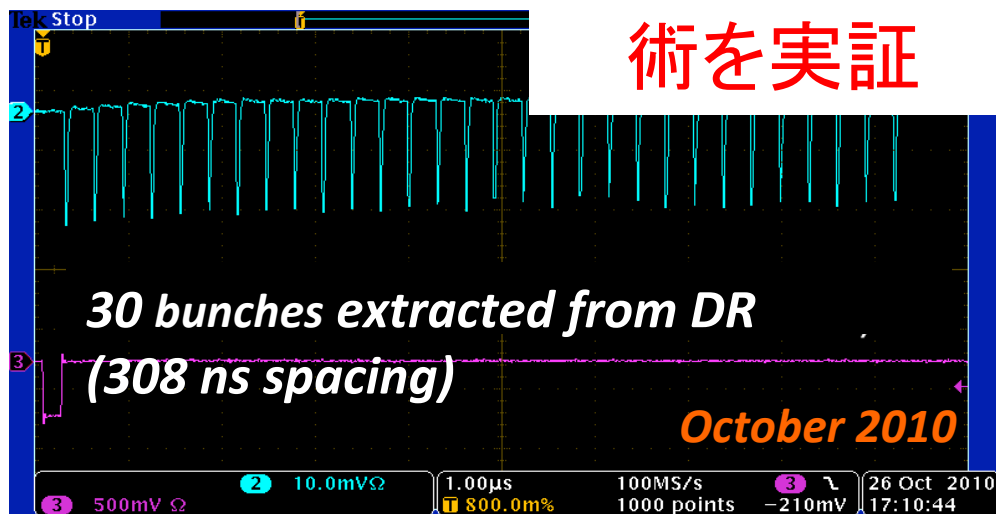
# Demonstration of Multi-bunch Extraction

## ATF2 beamline



**Kick Angle Stability**  
 $= 3.5 \times 10^{-4}$

- ILC要求性能を満足
- Bunch-by-bunch beam manipulator技術を実証



# 非破壊型ビームサイズモニター 1 $\mu\text{m}$ 分解能レーザーワイヤー開発

**ILC design requirement:**

**< 1  $\mu\text{m}$  laser wire scanner**

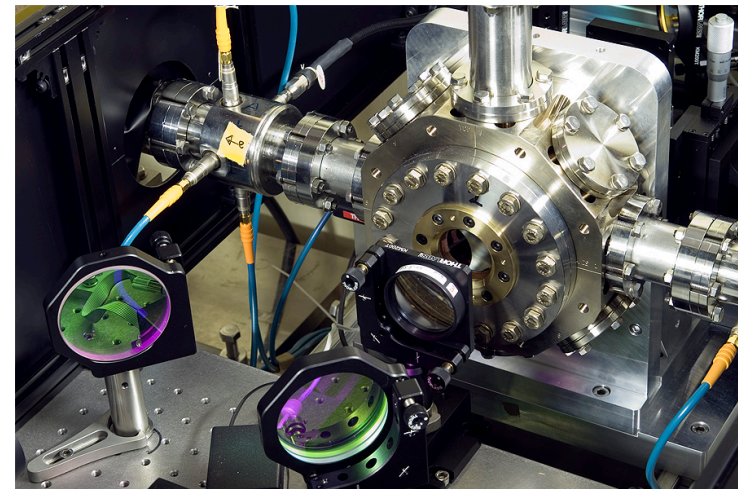
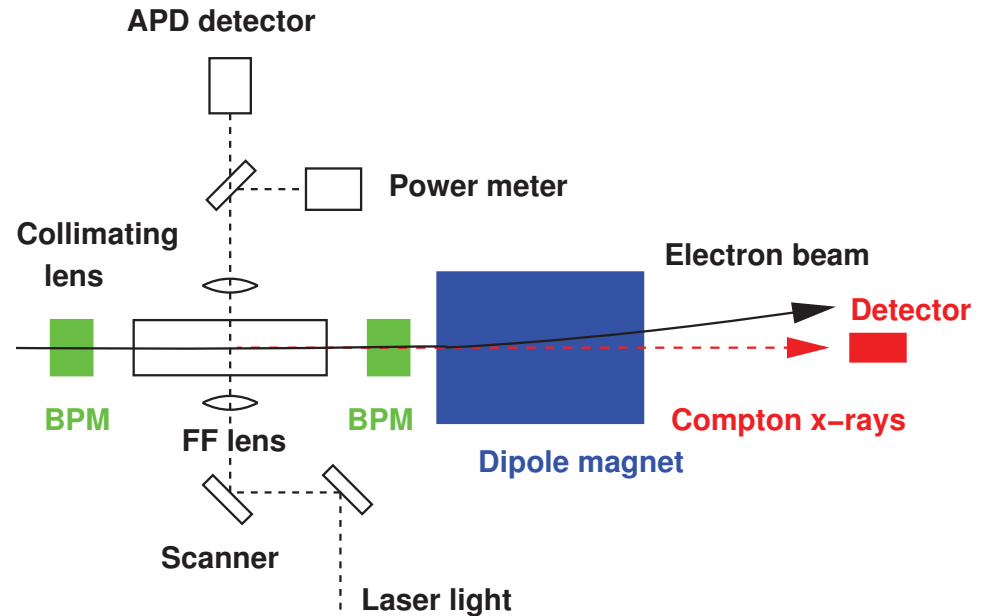
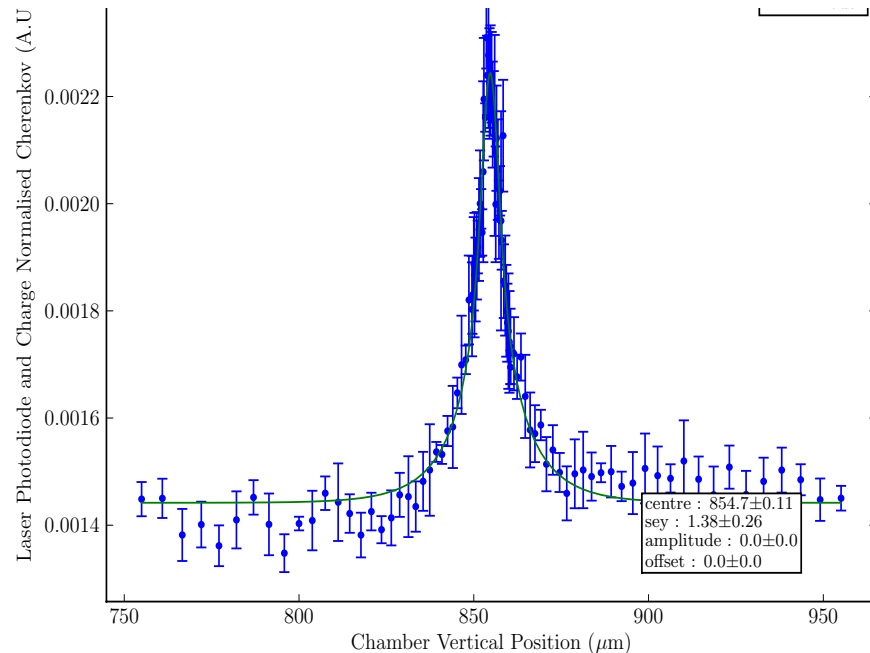
Results at ATF extraction line (2008)

$$\sigma_{lw} = 2.2 \mu\text{m}$$

Results at ATF2 FF line (2012 May)

$$\sigma_{lw} = 1.2 \sim 1.4 \mu\text{m}$$

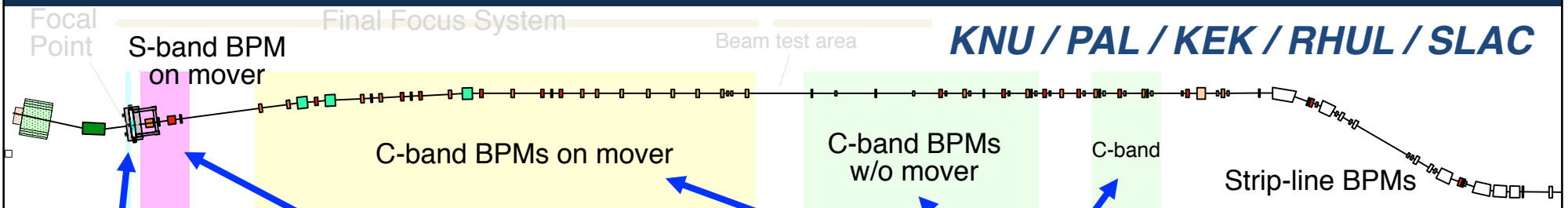
**ほぼ目標を達成**



JAI(RHUL, Oxford) / KEK



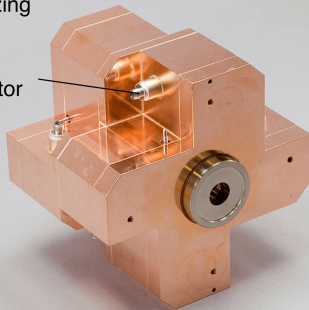
# ナノメートル分解能ビーム位置モニター開発



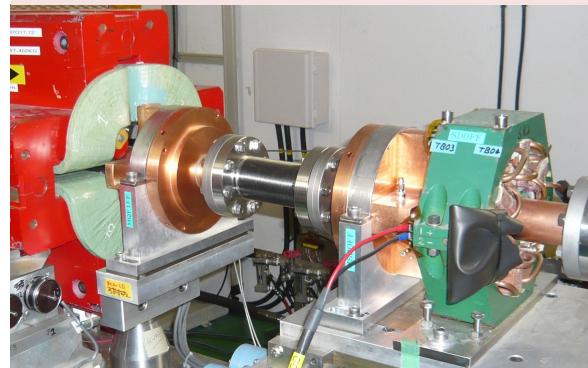
**IP BPM system**  
 (BPM + Ref) Cavity  
 1 unit  
 Target : 2 nm  
**Aperture: 6 mm(V)**

after blazing

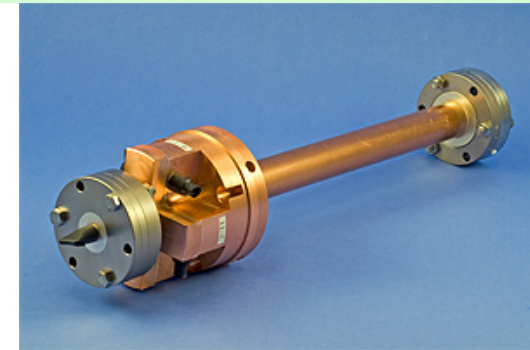
SMA connector



**S-band BPM system**  
 BPM cavity: 4 units  
 Ref. cavity: 1 unit  
 Target : 100 nm  
**Aperture: φ40 mm**



**C-band BPM system**  
 BPM cavity: 34 units  
 Reference cavity: 4 units  
 Target resolution: 100 nm  
**Aperture: φ20 mm**



**Achieved resolution at ATF**  
**8.72 ±0.28(stat) ±0.35(sys) nm**

@  $0.7 \times 10^{10}$  electrons/bunch,  
 @ 5 μm dynamic range

[Y. Inoue et al., Phys. Rev. ST-AB 11, 62801 (2008)]

**Proto-type**  
**Achieved resolution**

**15.6 nm**

@dynamic range ±20μm

# ATF2 Cavity BPMsの運用状況

## C-band BPM

R&D状態から完全なビーム運転での運用状態にある。

ATF2ビームラインでは数ミリオーダーの軌道を測定する必要がある

→ BPM信号を20 dB attenuationしてダイナミックレンジを確保

### Resolutions:

with 20dB att. ~ 200 nm

w/o 20dB att. ~ 50 nm

(well centered beam w/o saturation → 27 nm)

ILCで想定されている分解能100 nmを十分に達成。

## S-band BPM

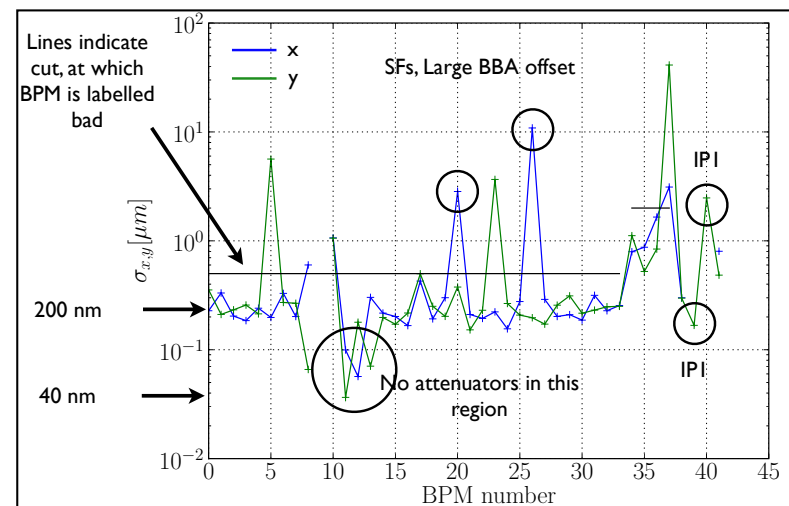
Resolution ~ 1  $\mu\text{m}$

ATFで必要とされている大口径のBPM

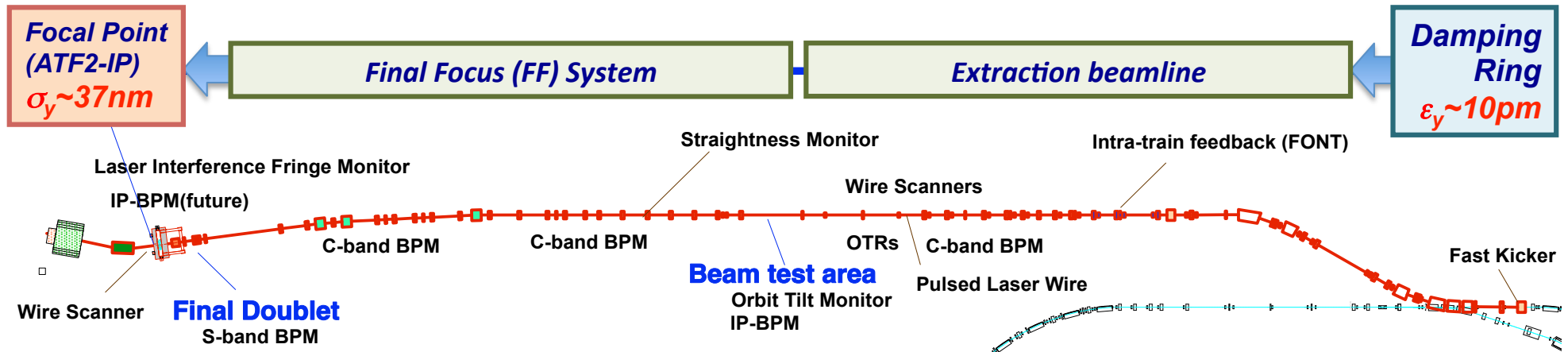
ILCは不要

## IP-BPMs

これから



# ILCビーム最終収束システム実証試験(ATF2)



## Challenging goals for ATF2

1. 垂直方向ビームサイズ37nm の実現
2. IPにおけるナノメートルレベルでのビーム位置安定化

- ATF2-FF opticsはILC final focus systemの設計を踏襲
- Demonstration of compact final focus optics for ILC
- ATF DRから取り出す低エミッタンスビームを利用することで研究を実現

# Parameters at ATF2

3.11 Earthquake

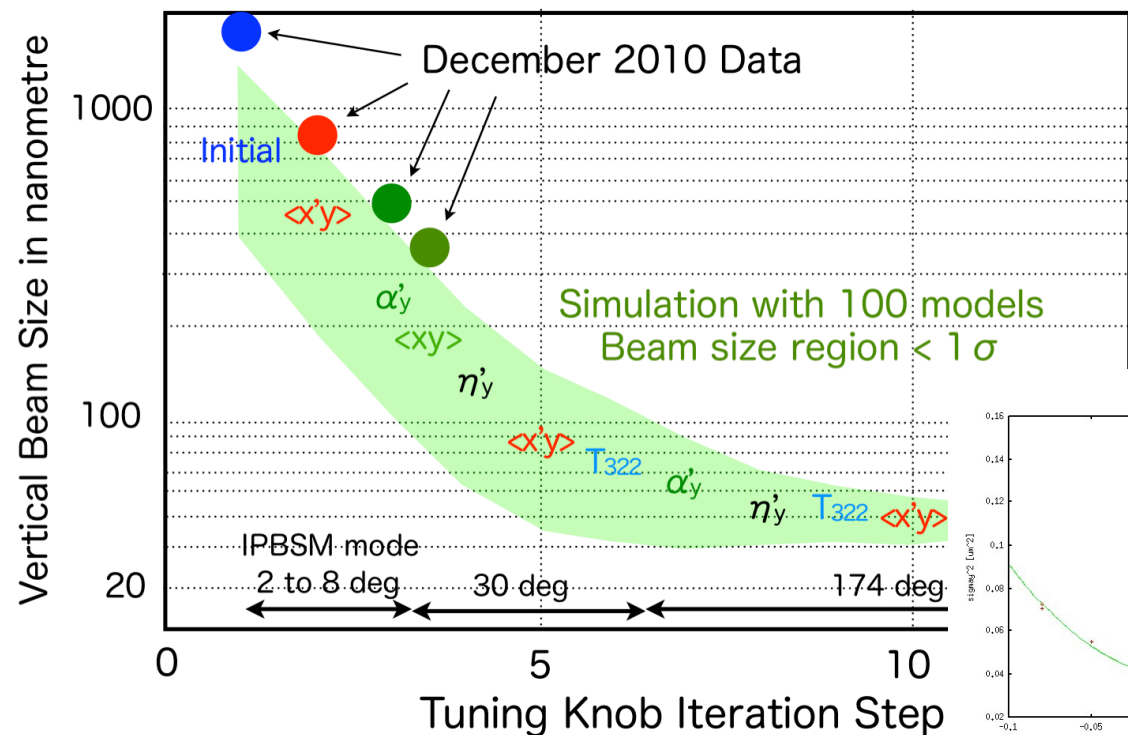


IP Parameter	nominal	May 2010	Feb 2011	Dec 2011	Feb 2012	Jun 2012
Beam energy	1.3GeV	1.3GeV	1.3GeV	1.3GeV	1.3GeV	1.3GeV
Emittance in x	2 nm	1.7nm	1.8-1.7nm	2nm	1.8nm	4 nm
Emittance in y	12 pm	<10pm	27-28pm	~50 pm <small>wakefield@mOTR</small>	15.6 pm	12.5 pm
Beta function in x	4 mm	4cm	10mm	1cm	4cm	4 cm
Beta function in y	0.1mm	1mm	0.1mm	0.5mm	0.3mm	0.1 mm
beam size in x	2.8 $\mu\text{m}$	~10 $\mu\text{m}$	-	9.2 $\mu\text{m}/2$	11.2 $\mu\text{m}$	-
beam size in y	35 nm	300 nm 8deg.mode	1.8um@PIP C-wire	850nm 5deg.mode	165nm 30deg.mode	-

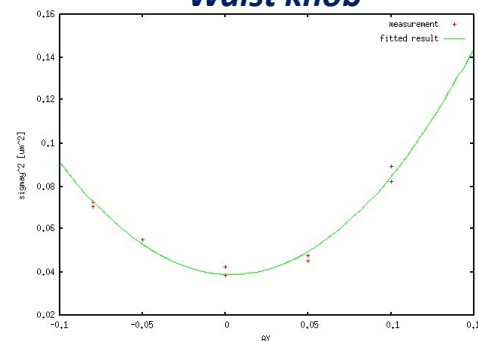
012年

ビーム調整を進めながら段階的にDesign Opticsに移行中

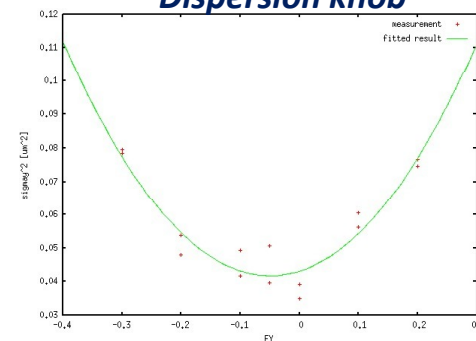
# Beam tuning for the 37 nm vertical beam



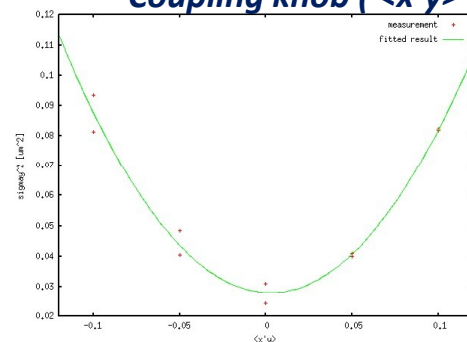
Waist knob



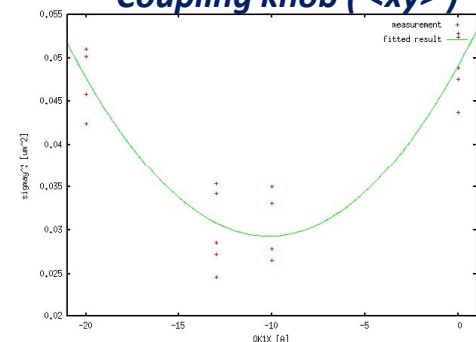
Dispersion knob



Coupling knob ( $\langle x'y \rangle$ )

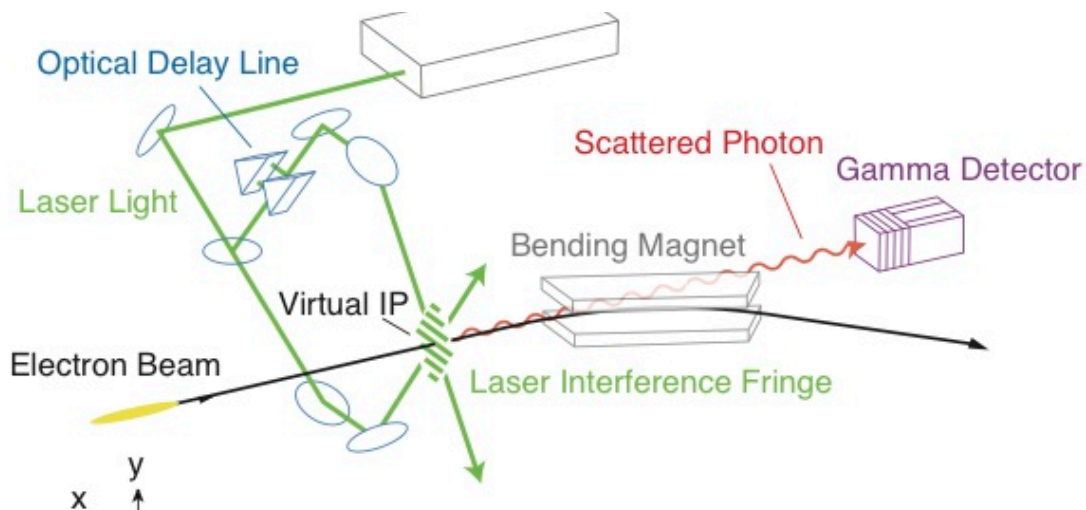


Coupling knob ( $\langle xy \rangle$ )

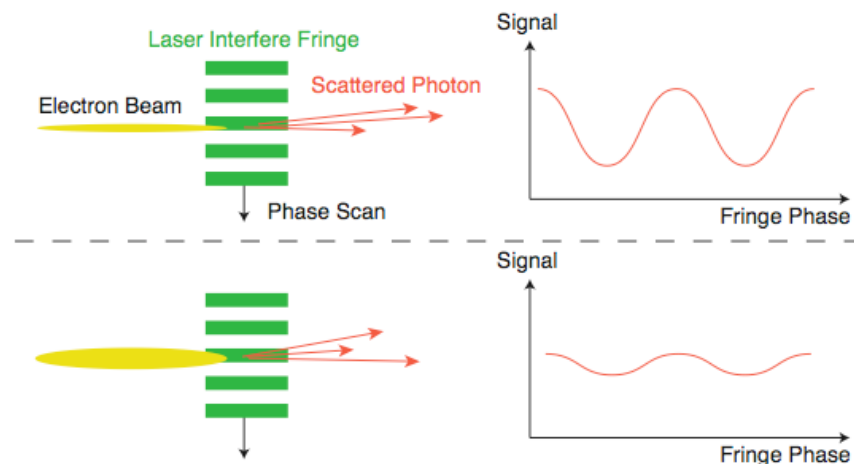


# ATF2ビーム調整; ナノメートル極小ビームサイズ測定

レーザー干渉縞を利用するビームサイズモニター  
(Shintake Monitor、IP-BSM)で測定しながら  
ビーム調整 → 37 nmまで追い込む  
つまり、この測定の安定度が研究遂行のカギ



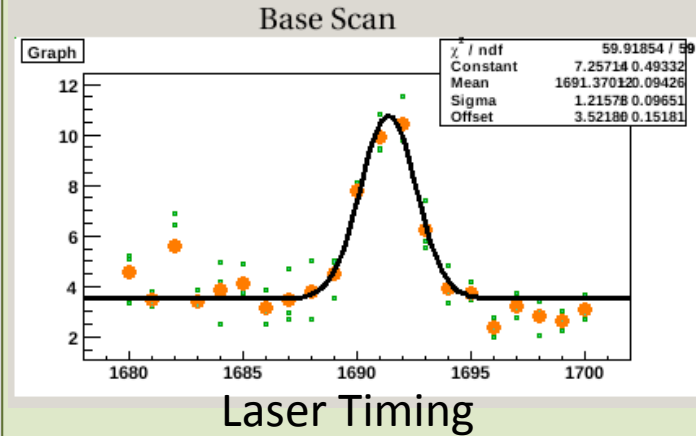
	174°	30°	8° ↔	2°
Fringe pitch	266 nm	1.03 μm	3.81 μm	15.2 μm
Minimum	25 nm	100 nm	360 nm	-
Maximum	100 nm	360 nm	-	6 μm



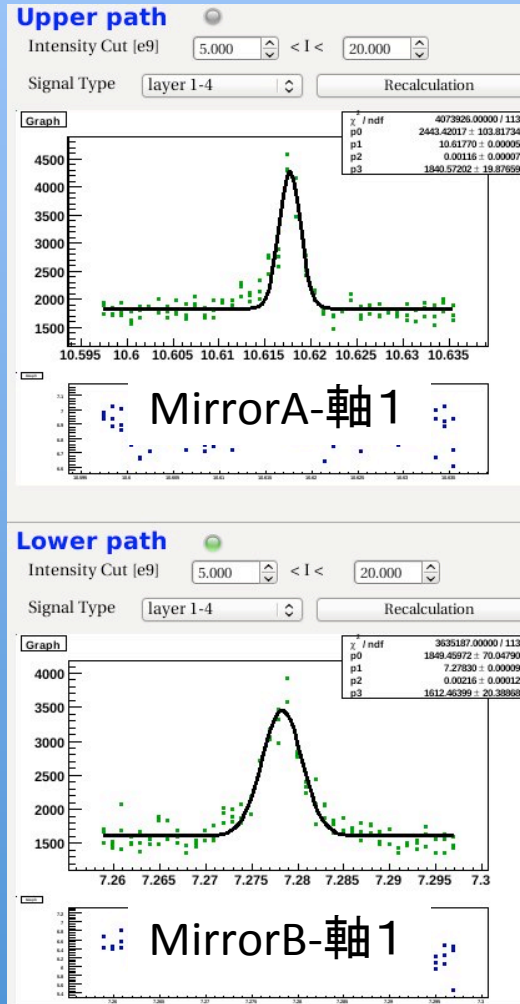
# IP-BSM Setting

レーザー  $\sigma_{IP} \sim 10 \text{ um}$ , FWHM  $\sim 8 \text{ ns}$

## Laser-Beam Timing Scan

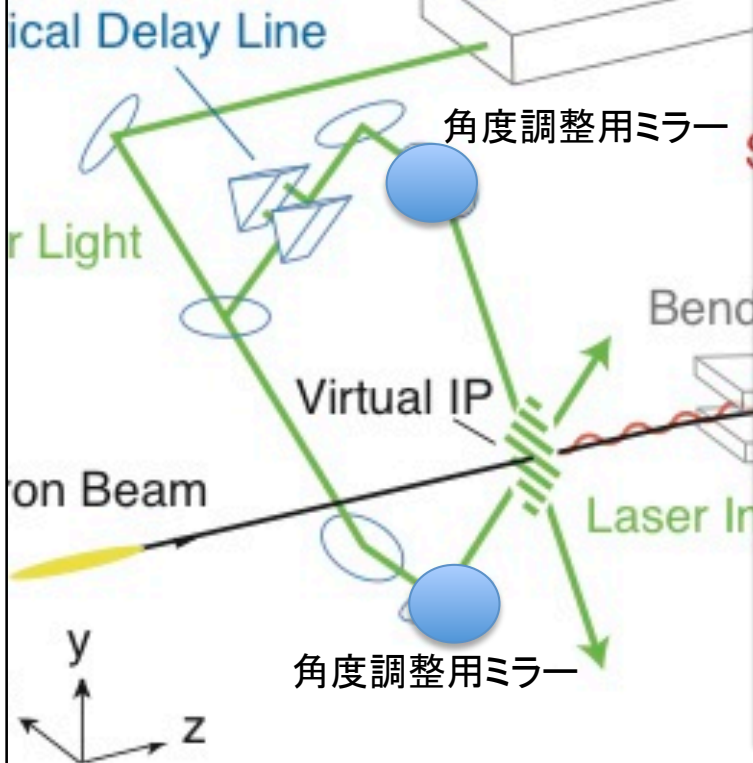
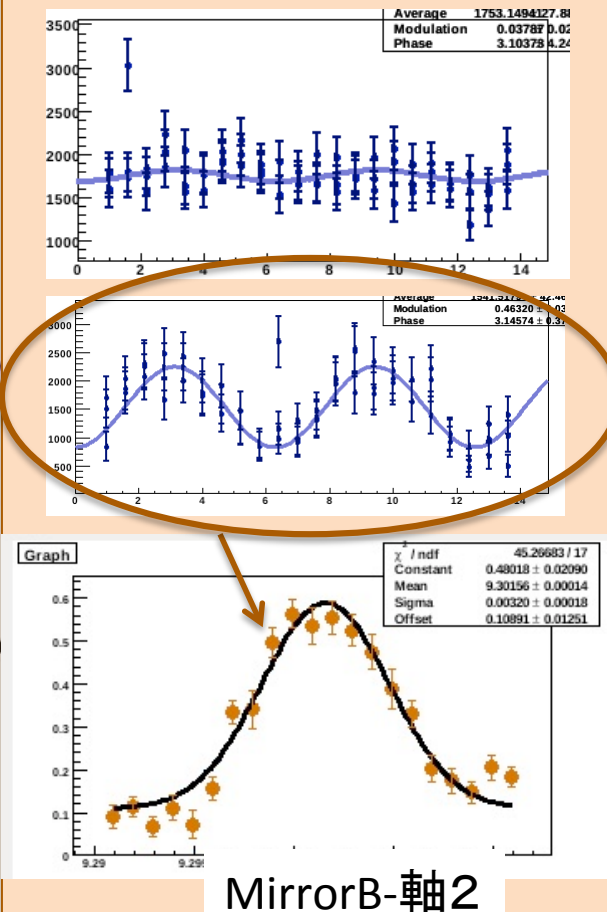


レーザーと電子ビームを交差させる  
(Transverse調整)  
Compton信号を最大に

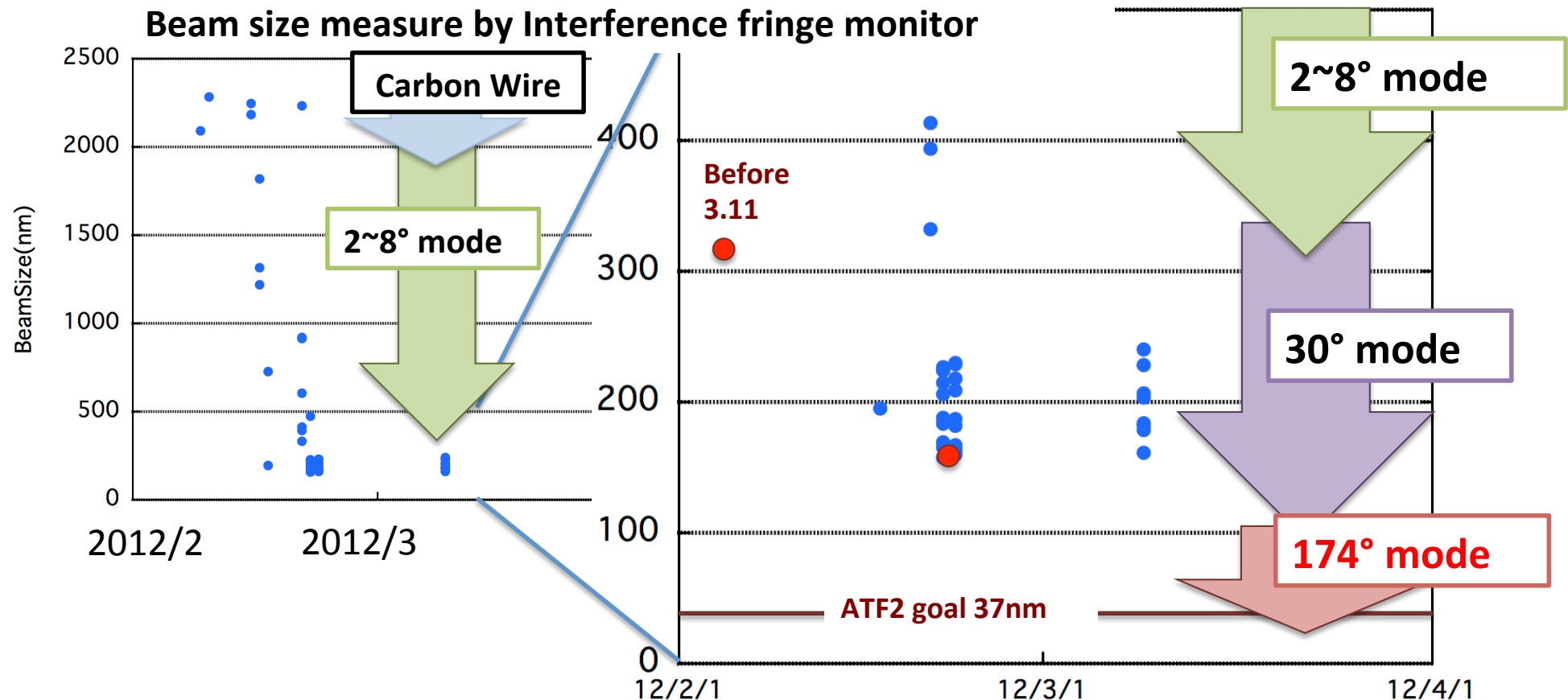


干渉縞を作る  
(2本のレーザーを重ねる、  
Longitudinal調整)

干渉縞のコントラストを最大に



# Recent results on the vertical beam size

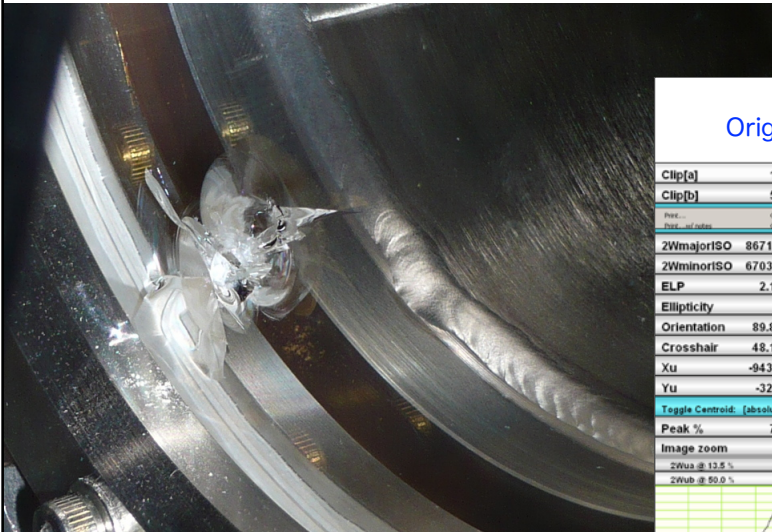


- 震災後、サブミクロンレベルのビーム開発は2012年2月から再開
- IP-BSM交差角30°モードでの信号を初めて確認。
- 垂直方向ビームサイズは **165 nm まで到達**
- 現在、100 nm以下の測定に向けたシステムの安定化を進めている



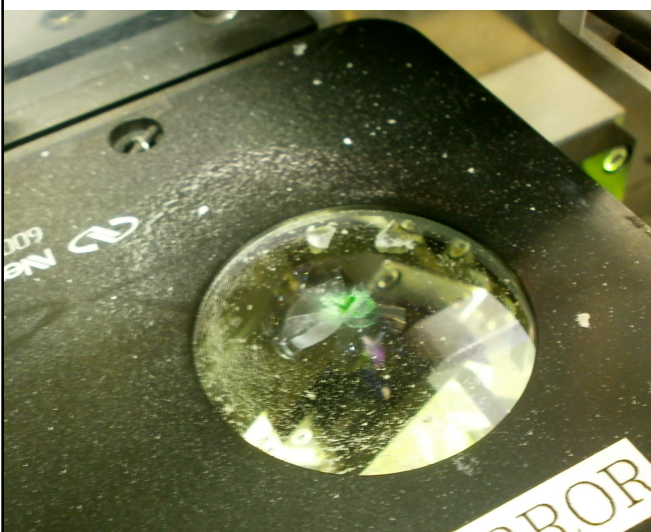
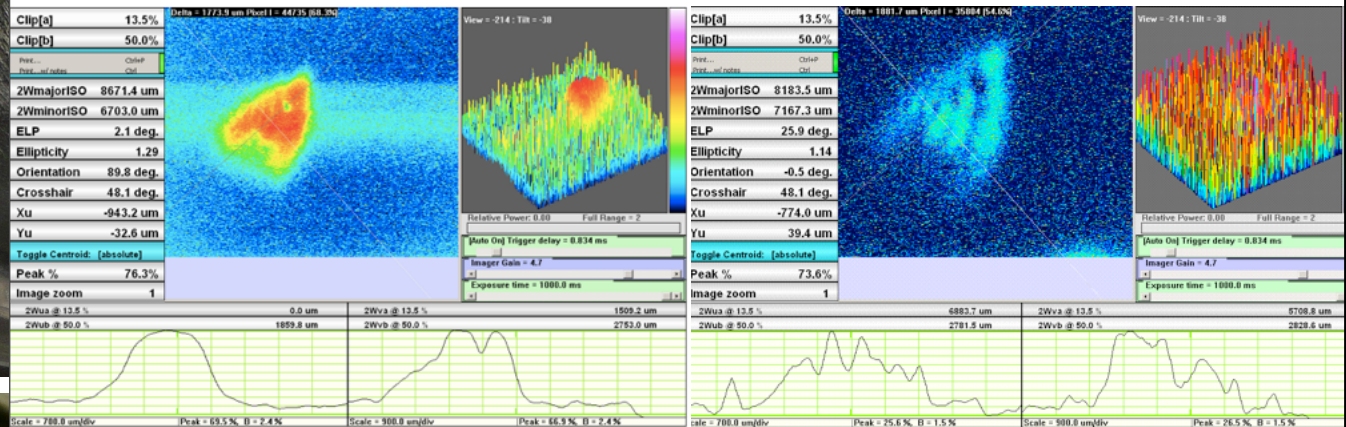
# IP-BSM安定化:レーザープロファイルの改善

## IP BSM光学素子損傷への対応

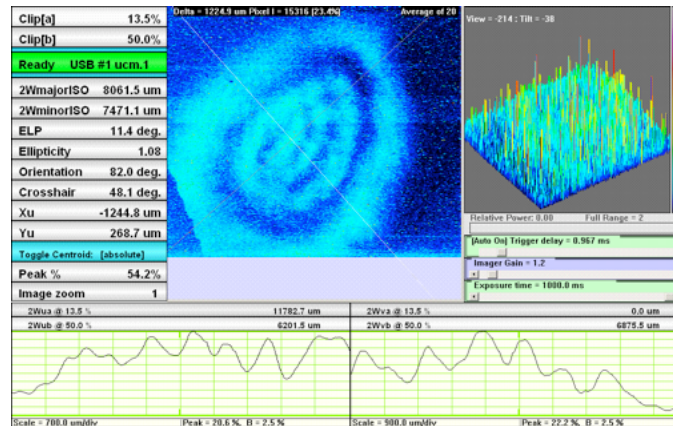


Original reducer 2nd lens (f=-175mm), 3/9

Changed the reducer 2nd lens (f=-250mm), 3/15



Rear mirror was exchanged, 3/26, at present, i.e. the curvature radius from 5m to 6m



After the exchange: rounder-like profile, much less "spots"

# IPBSM 安定化: レーザードリフトの改善

Build up time: レーザー開始～7時間 (April 4)

- Build Up Timeが大きく変動
- 時間と共に変動周期が変わる。
- 安定なときもある
- **値が大きくなるとレーザーのTiming Jitter ~ 10 ns**

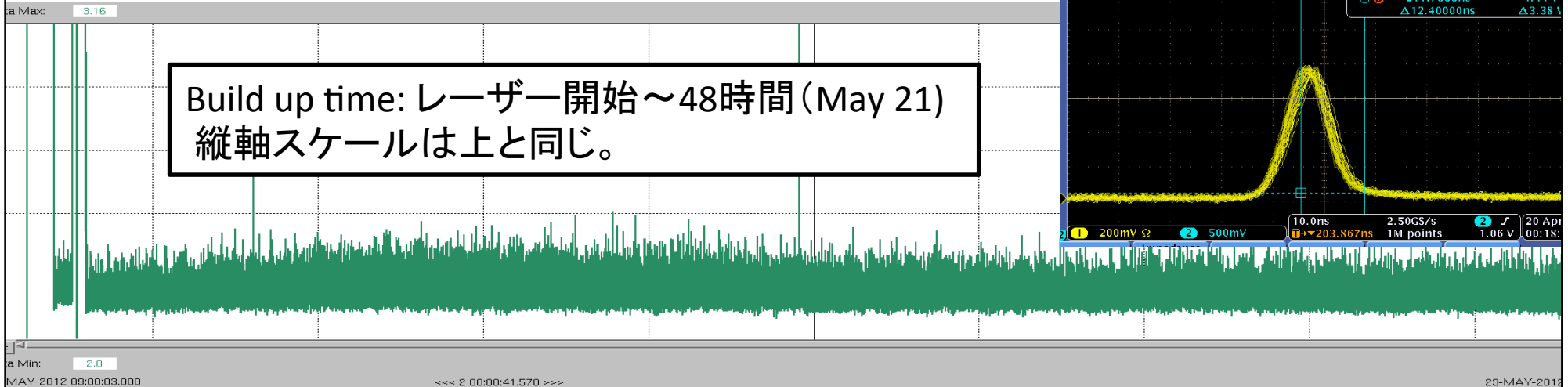
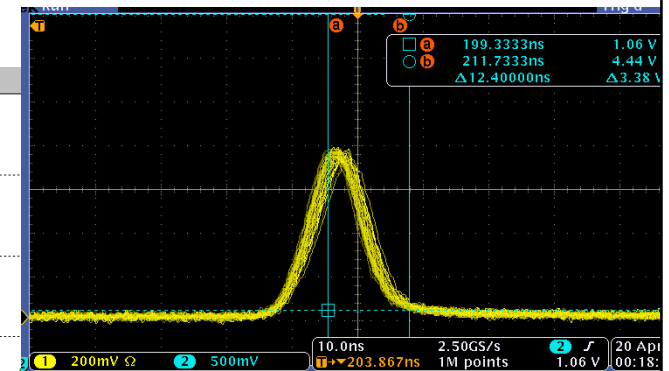
Laser FWHM ~ 8 ns

電子ビームとの衝突を維持出来ない

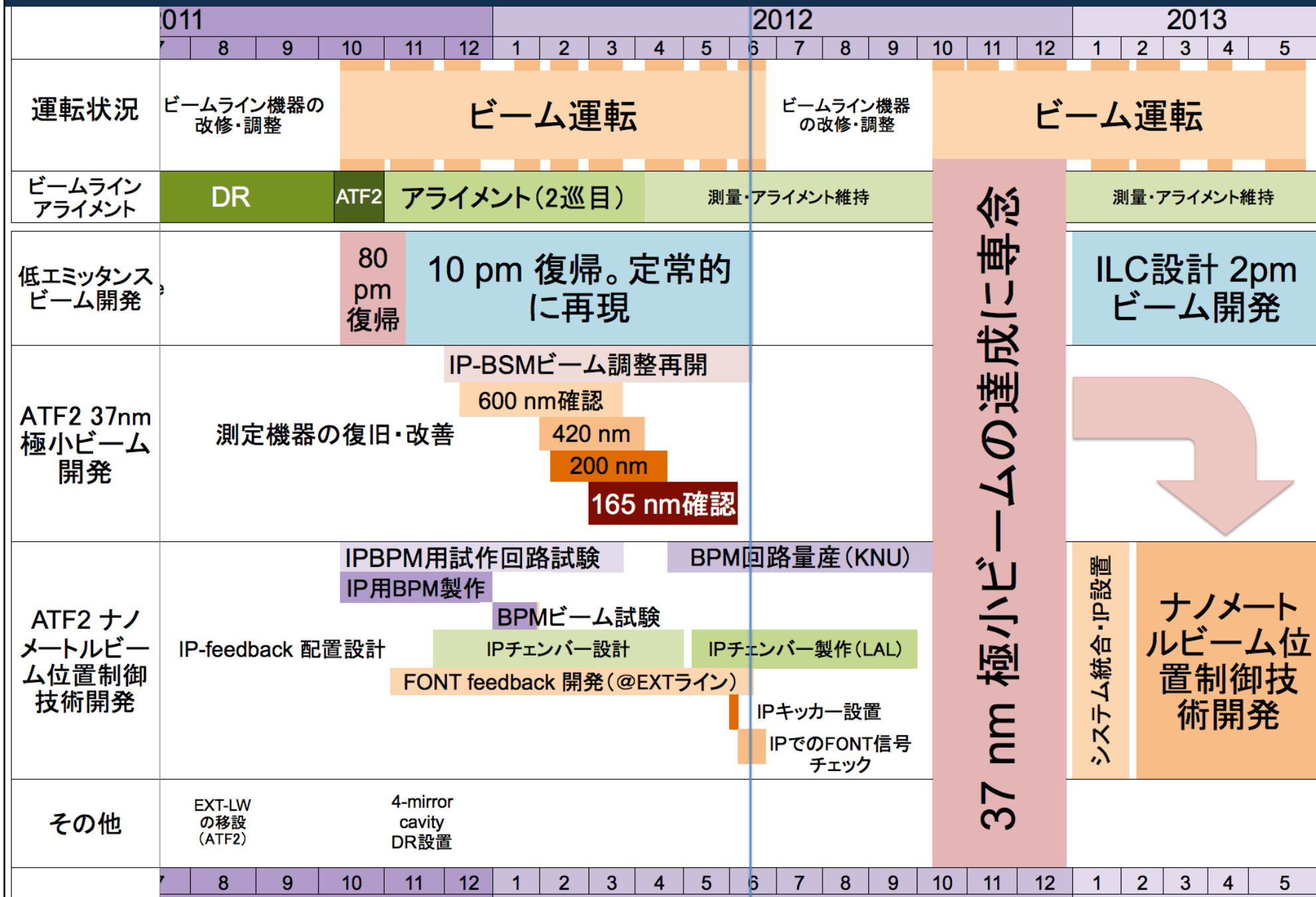
## レーザーFeedback改修後

- Build Up Timeは安定
- **レーザーのTiming Jitter ~ 2 ns以下**
- 改善後2週間を経過しても悪化の兆候は無い

Build up time: レーザー開始～48時間 (May 21)  
縦軸スケールは上と同じ。



# ATF2ビーム開発



# バンチトレイン内高速フィードバック開発・実証試験

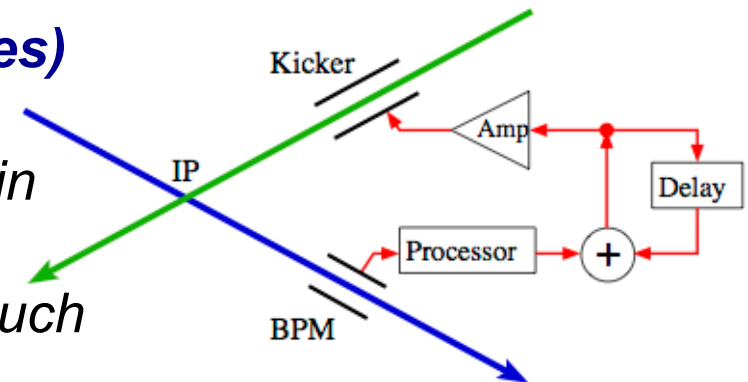
Oxford / KNU / RHUL / KEK

## Challenging goals for ATF2

1. achieving of the 37 nm vertical beam size
2. **Stabilize a beam in a few nanometer level at the IP.**

## FONT (Feedback On Nano-Second Timescales) has been developed

- as a prototype of a beam-based intra-train feedback system for IP of LCs.
- Correct the impact of fast jitter sources such as the vibration of magnets.



## FONT1~FONT3

**Analogue feedback system** for very short bunch-train LCs.

Latency FONT3(ATF) 23 ns.



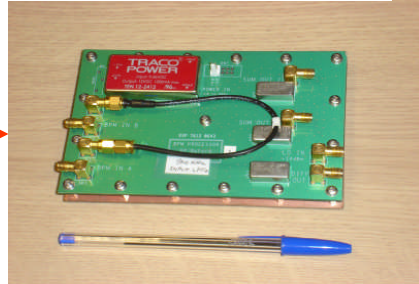
## FONT4 & FONT5 (ATF2)

**Digital feedback system** for long bunch-train ILC.

allow the implementation of more sophisticated algorithms

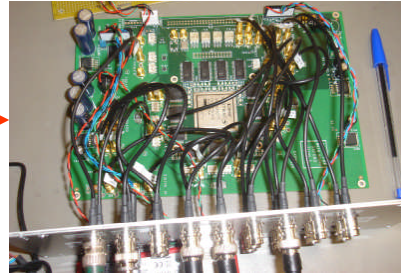
# FONT5 Hardware

バンチ信号検出



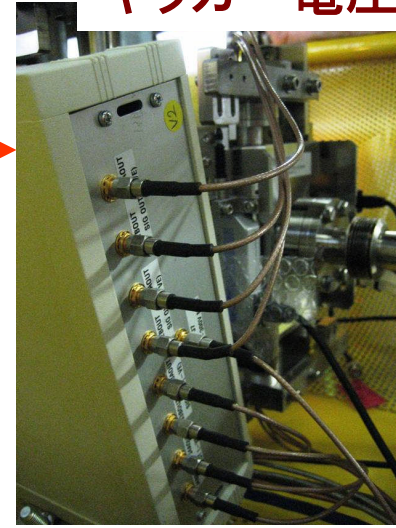
Analogue Front-end  
BPM processor

位置補正の算出



FPGA-based digital  
processor

キッカー電圧生成



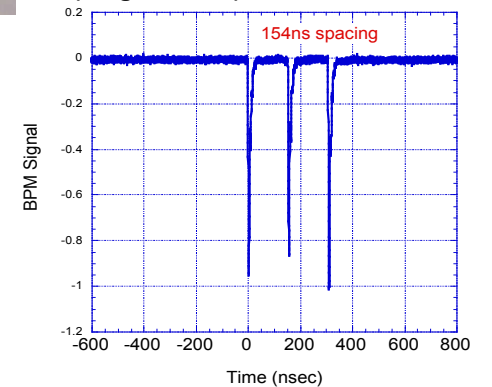
後続バンチのキック



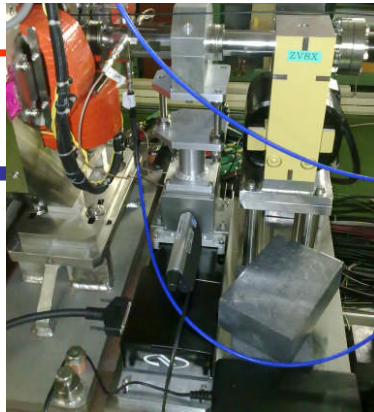
Strip-line kicker

マルチバンチビーム

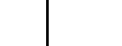
(Single bunch) x 3 Train Extraction



ビーム位置モニター

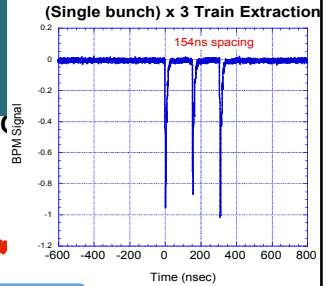
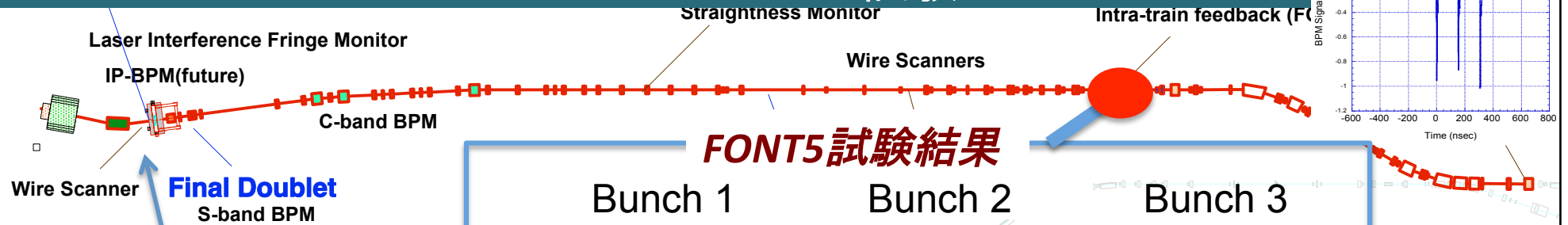


Strip-line BPM with  
mover system

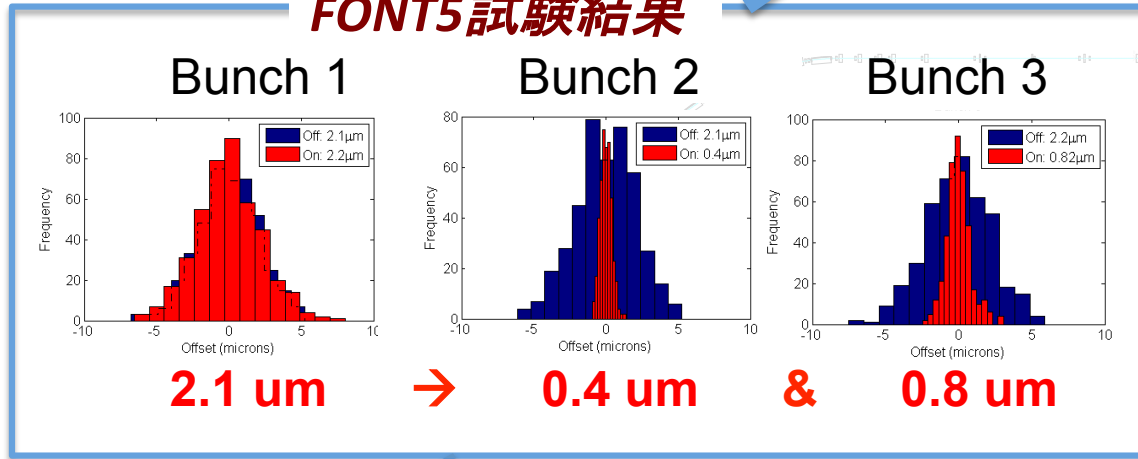
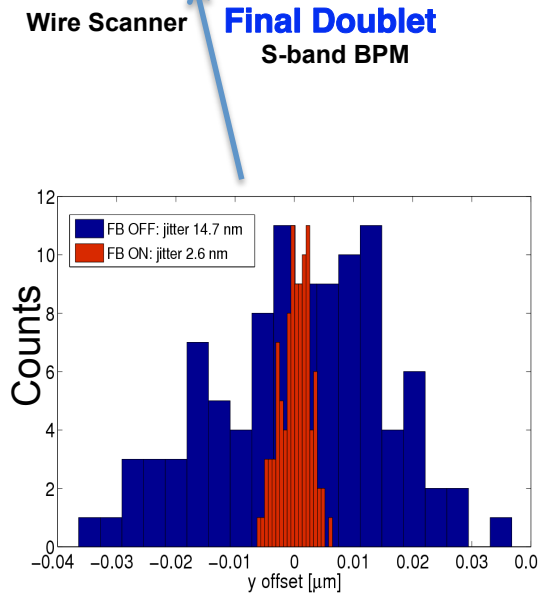


# 2nm Stability R&D

—Fast Feedback試験—



## FONT5試験結果



途中で何も外乱が無く  
ビームラインも理想的な場合

### IPでの予想

FB OFF: jitter 14.7 nm  
FB ON: jitter 2.6 nm

## FONT + IP-BPM

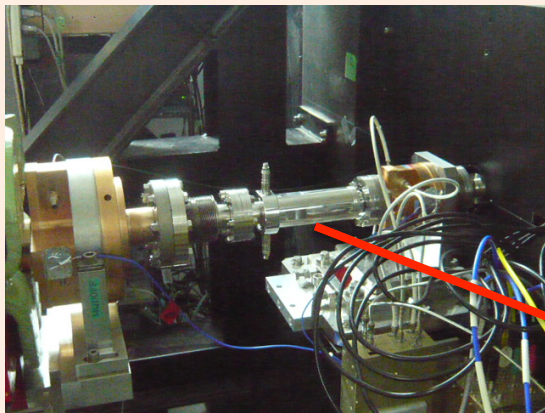
ATF2ビームラインへの入射は安定化できる  
ビームライン内の影響をIPでのfeedbackで抑えよ  
IP-BPM + FONTの組み合わせでIP安定化の研究

# 準備状況: IPナノメートルビーム位置安定化

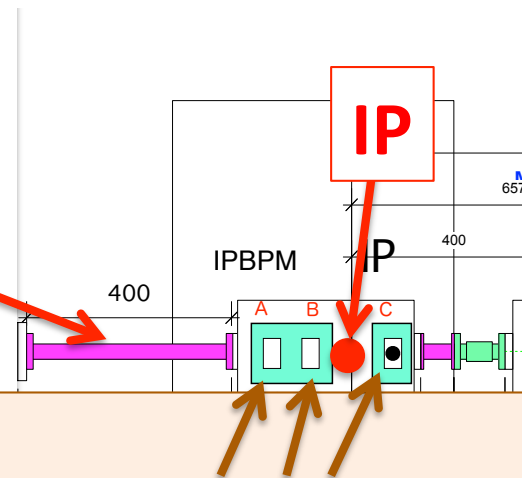
## IPBPM+FONT

### FONT-kicker

ATF2-IP上流に設置済  
今週からプロトタイプIPBPM  
を使用して予備試験を開始

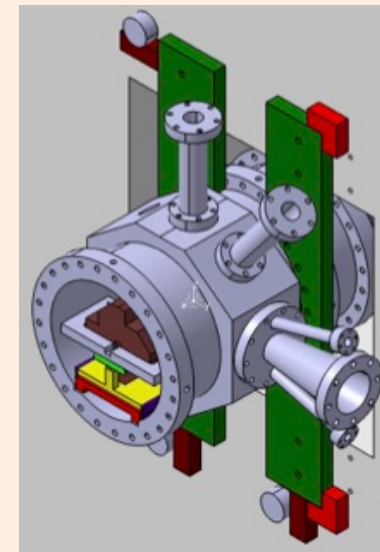


2013年早春の統合  
試験・インストール  
を準備中



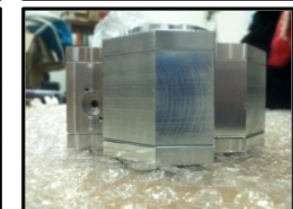
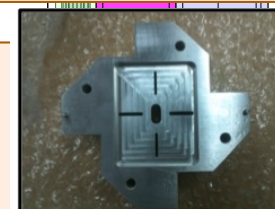
### 真空チェンバー

IPBPM3台を組み込むため  
新規製作中(LAL担当)



### IPBPM

KNU製Low-Qタイプを3台設置する。2台は位置微調。  
BPMは製造完了し、ATF LINACでビーム試験済み。  
読み出し回路もビーム試験を終え量産待ち。



# まとめ

- 震災からの復旧:ビーム性能はアライメントの進捗と共に改善。
- 国際的な共同研究・開発体制のもとでILCビーム技術開発を進めている。特にダンピングリングで得られる低エミッタンスビームを利用する研究開発はATFの特徴である。
- 今までに、高性能ビームモニターやビーム取り出しキッカーの開発、実証試験を行ってきた。
- 現在、37 nm極小ビーム(ATF2 Goal 1)の達成をめざしてビーム調整研究を進めている。
- 同時にナノメートルビーム安定化(ATF2 Goal 2)の準備が順調に進行中。



backup

# Results of Cavity BPM prototypes

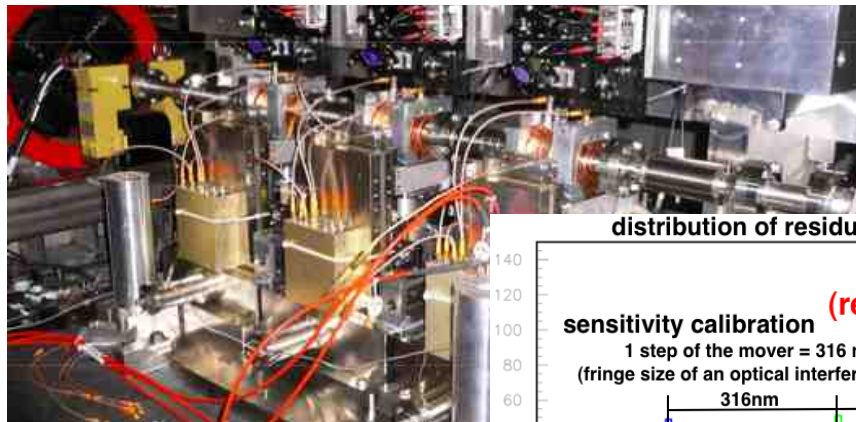
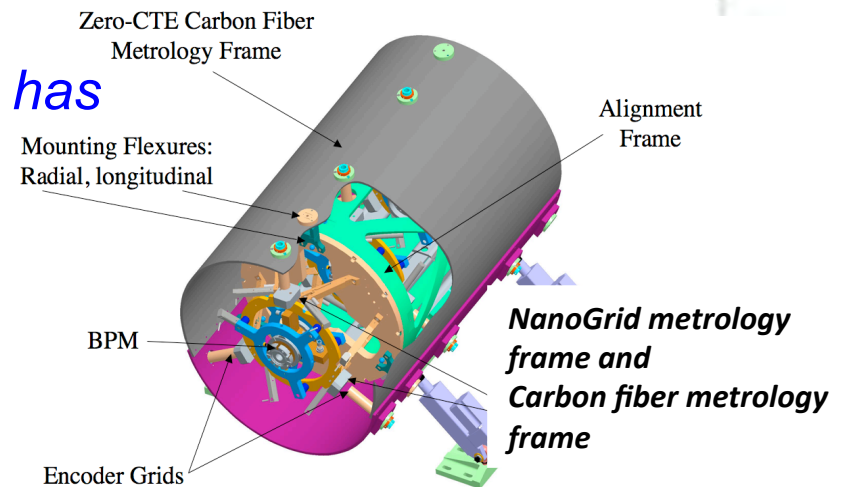
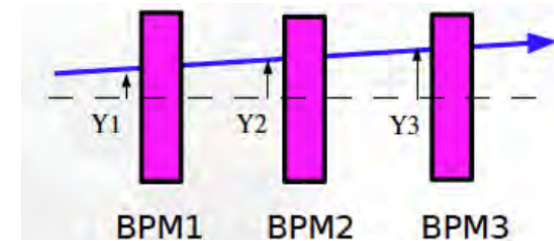
## Cavity BPM:

- **strong signal, possible to reach "nm" resolution**
- better mechanical rigidity and reliability of the electric center

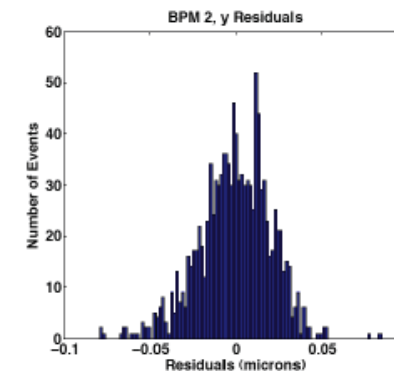
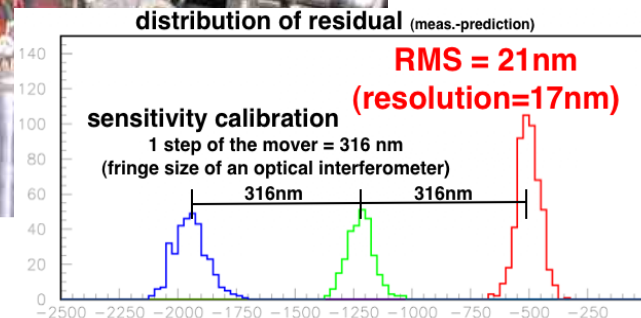
Two R&Ds with the prototype cavity BPMs has been done until 2008 for ATF2.

**They have proved position resolutions smaller than 20 nm.**

KEK / SLAC / LLNL

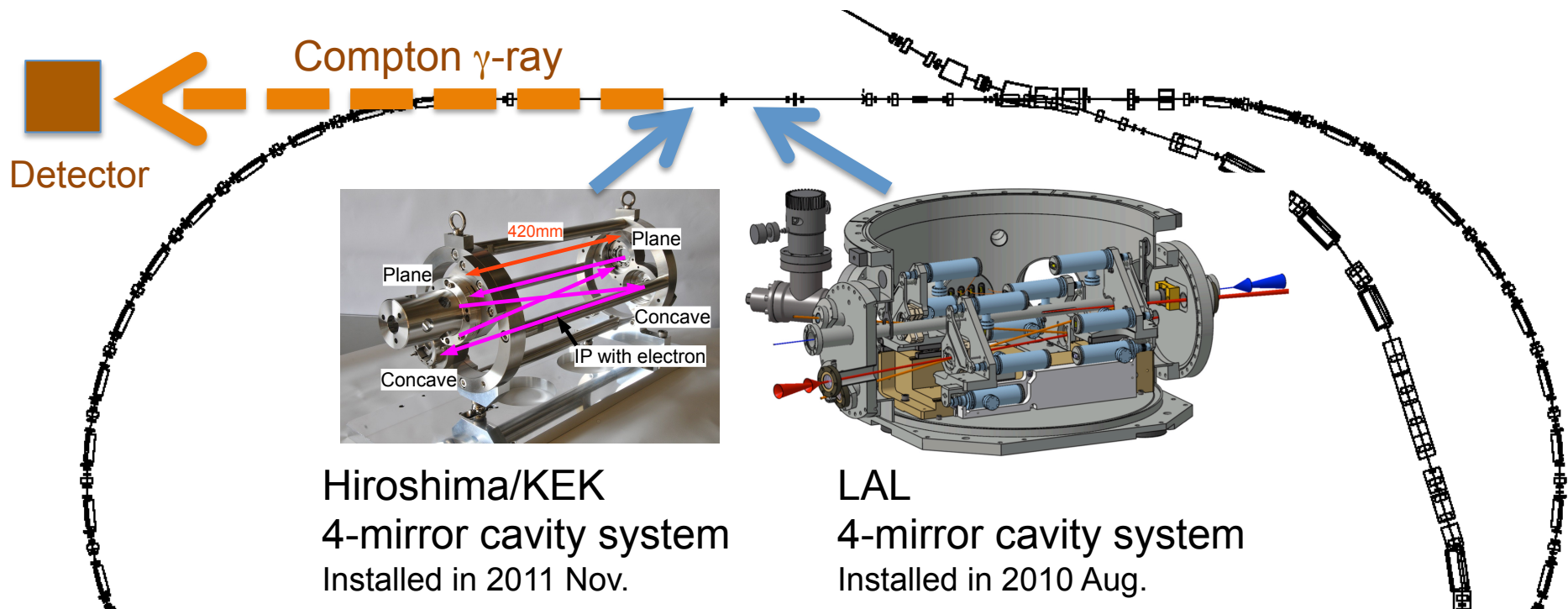


Active stabilization with optical interferometers



**Achieved resolution 15.6 nm @dynamic range  $\pm 20 \mu\text{m}$**

# 偏極陽電子源開発研究



光共振器によるレーザー蓄積

2010年までは2-mirror systemで研究開発

→ 4-mirror system (Higher tolerance)

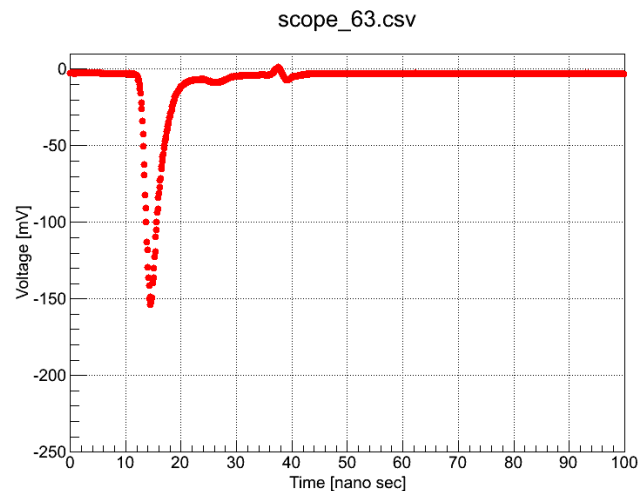
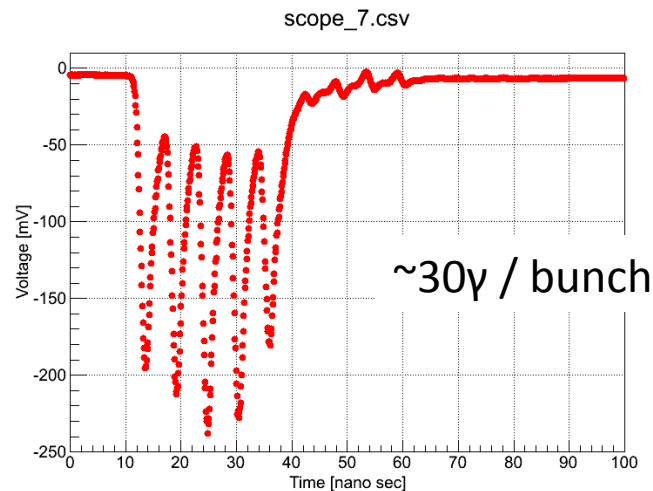
→ 高いレーザー蓄積に向かう

→ 高輝度のCompton  $\gamma$ -ray生成

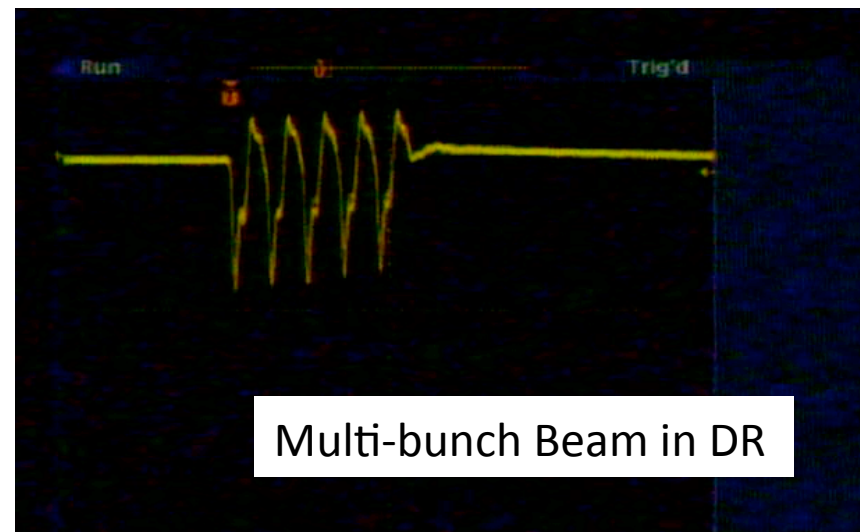
→ 偏極陽電子源

→  $\gamma$ - $\gamma$  collider 技術開発

# 4-mirror Cavity (Hiroshima, KEK)

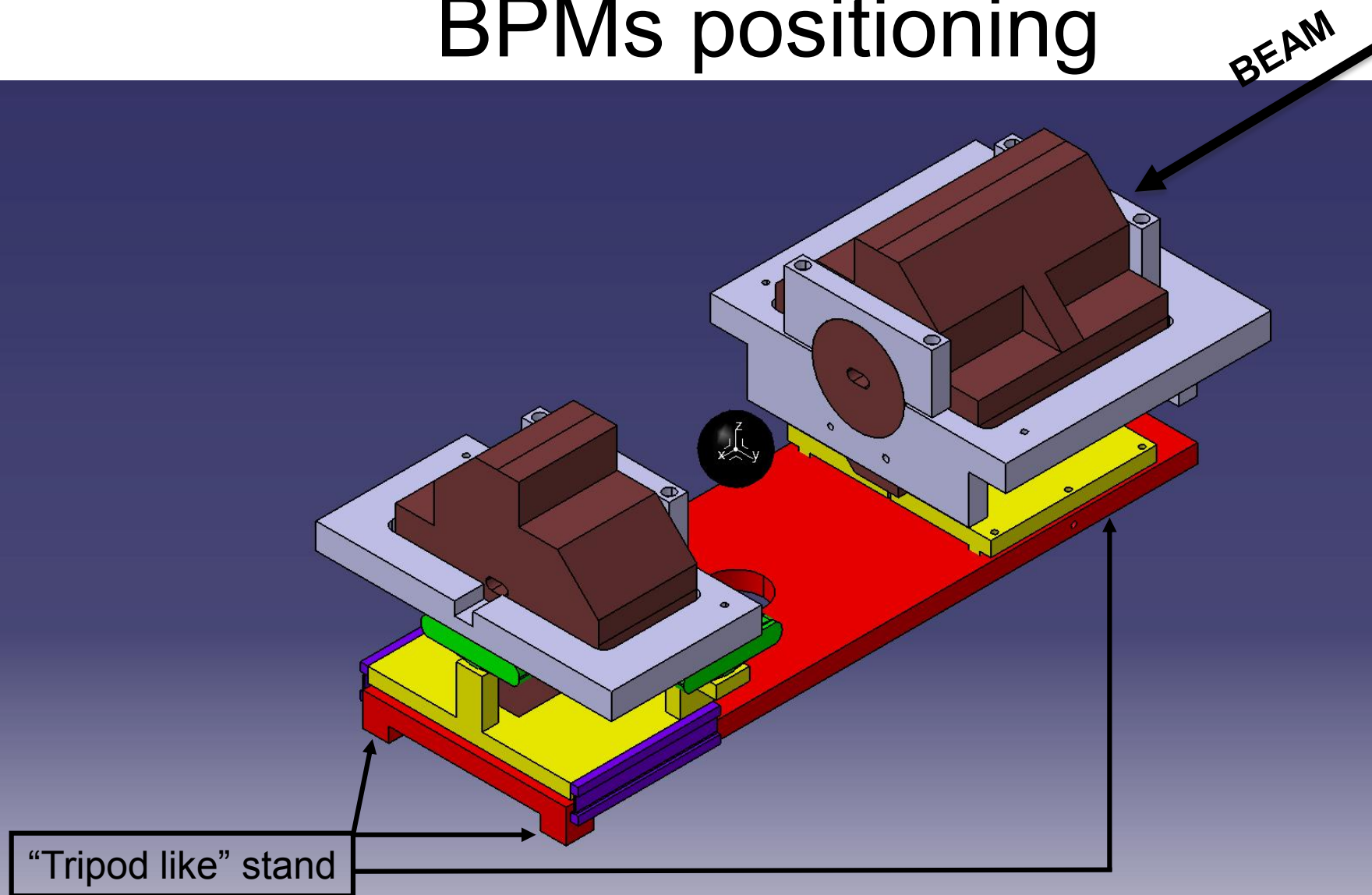


DR  $\sim 15\text{mA}$  (5 bunches)  
 $\sim 4\text{mA}$  (1 bunch)  
Stored power  
 $\sim 1.6\text{kW}$  (linear pol.)



2-mirrorでの実績と比べて現在2倍の蓄積率を得ている。  
今後、高反射率ミラーに替えてレーザー蓄積の増強、システム高度化へ

# BPMs positioning



BPMs assy to be mounted in IP Chamber vessel

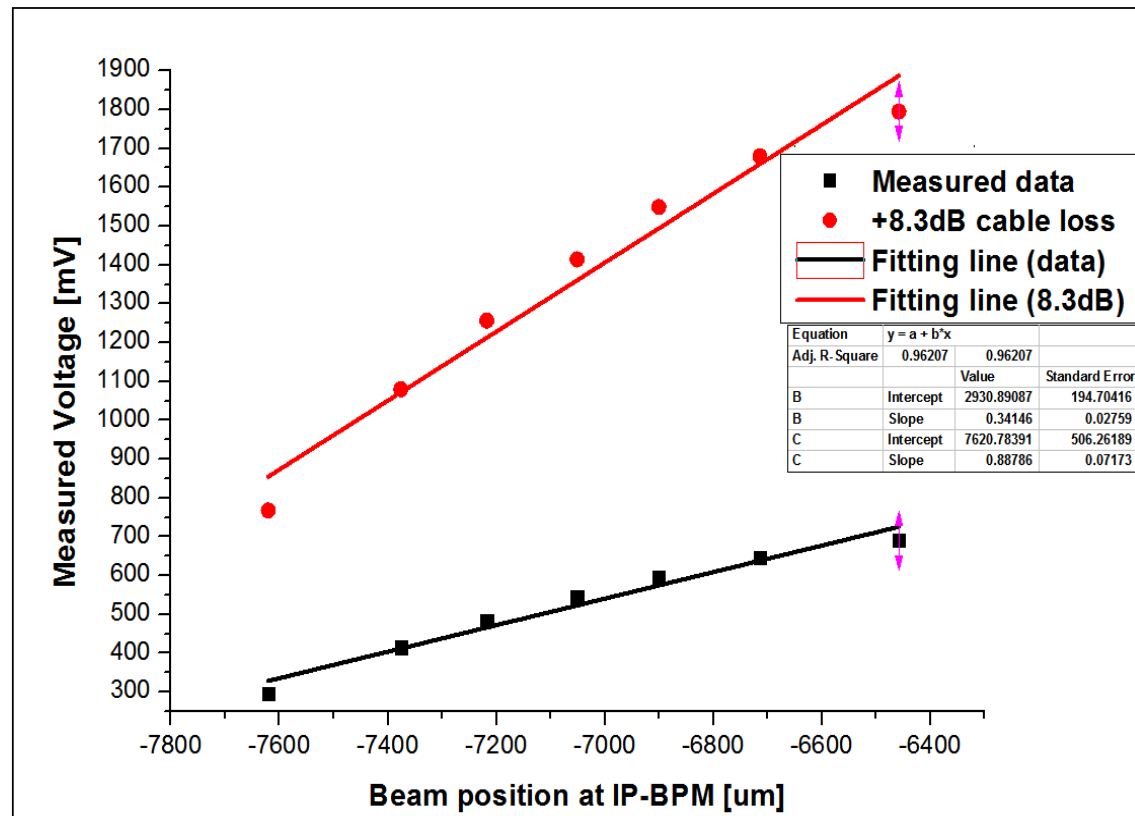
# Beam test at ATF LINAC

## Results of IP-BPM x-port sensitivity for one-port measurements

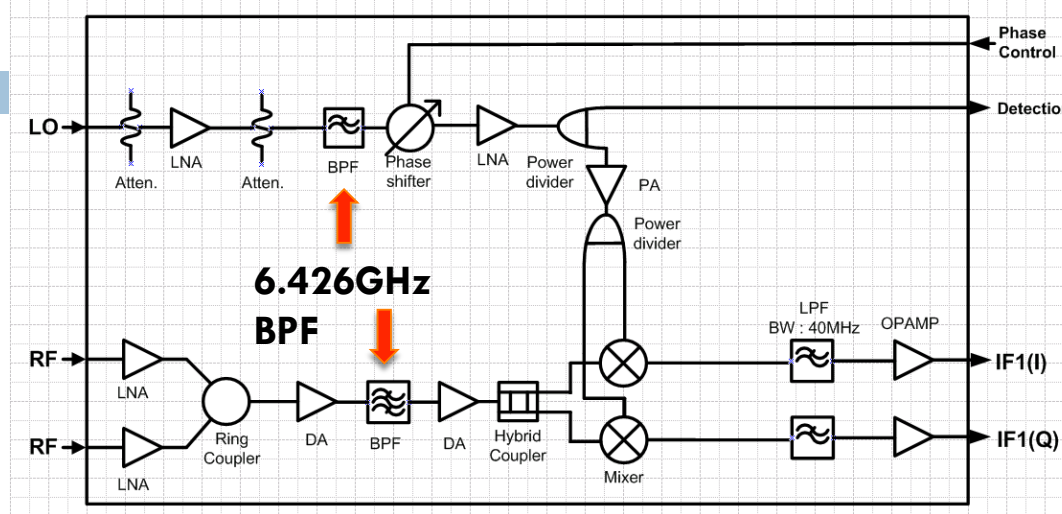
- **IP-BPM sensitivity**  
(For x-port)  
**= 0.34146**[mV/ $\mu$ m]  
(one-port measurements)  
**= 0.88786**[mV/ $\mu$ m]  
(one-port measurements & Consider the 8.3dB cable loss)

\*if we used two x-port of BPM, we would have the results 1.77572[mV/ $\mu$ m].

- **Designed sensitivity**  
**= 3.865**[mV/ $\mu$ m] for two-port

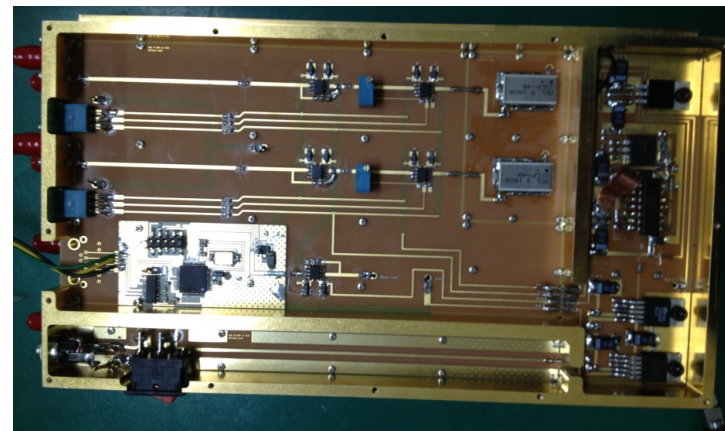
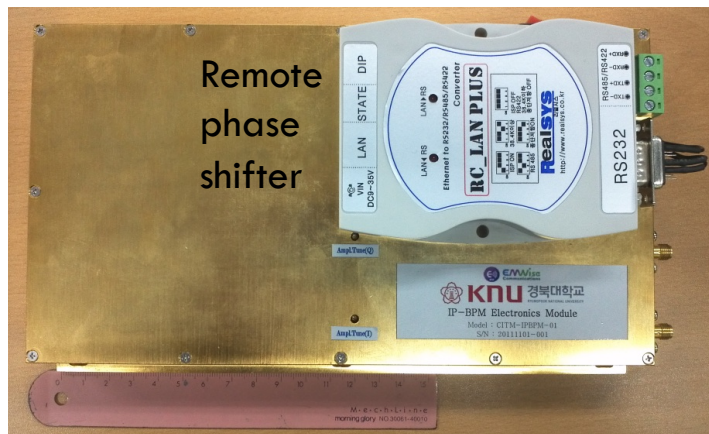


# Simplified schematic of new electronics



**Total conversion  
Gain: 54dB**

Simplified schematic of the IP-BPM signal processing electronics. (For the original y-port)

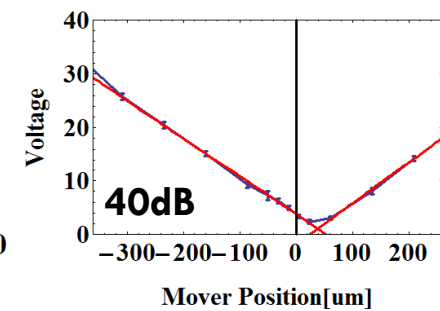
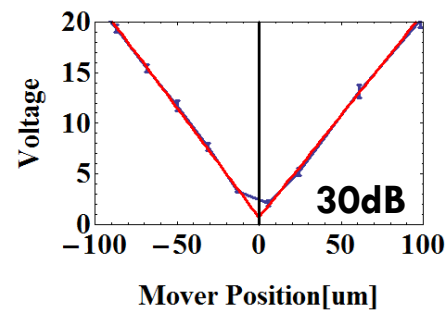
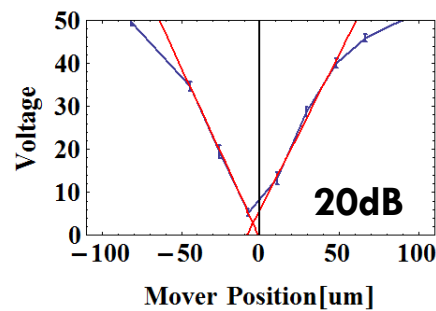


By Siwon Jang (KNU) at LAL, 2012 March

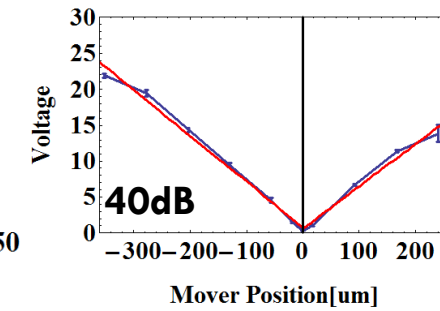
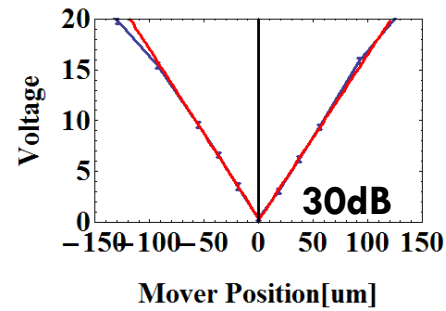
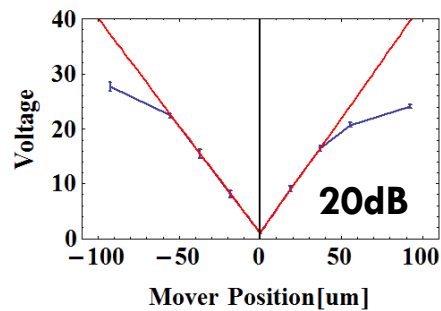
# Results of Jan. beam test

- Calibration Run was made under 40 dB, 30 dB, 20 dB attenuation cases. This is to enlarge dynamic range of the electronics, in order not to saturate while sweeping the beam.

Y-port



Flexible Y-port



By Siwon Jang (KNU) at LAL, 2012 March