

SPring-8における新設計の 傾斜配置型 光位置モニタと 蓄積リングのフィリング・パターンによる影響削減

Newly Designed Inclined X-ray Beam Position Monitors and
Reduction of Influence due to Filling Patterns of the SPring-8 Storage Ring

青柳 秀樹，古川 行人，高橋 直

Hideki Aoyagi, Yukito Furukawa, Sunao Takahashi

(公財) 高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Institute (JASRI)

Outlines

1. はじめに

従来のXBPM（光位置モニタ）の役割、原理、構造

挿入光源ビームライン (ID-BL) 用 XBPM、偏向電磁石ビームライン (BM-BL) 用 XBPM

2. 蓄積リングのフィリング変更が与える影響

フィリングの種類、XBPMが受ける影響の定量化（系統的な評価試験）

3. 影響が生じる原因と対処法

光電子の空間電荷効果、光電子収集電極の印加電圧との関係

4. 傾斜配置型XBPM

構造、評価試験の結果

5. まとめ

略称：

光位置モニタ → X-ray Beam Position Monitor (XBPM)

挿入光源 → Insertion Device (ID)

偏向電磁石 → Bending Magnet (BM)

放射光ビームライン → Beam Line (BL)

1. XBPM(光位置モニタ)の役割・原理・構造

略称：
 光位置モニタ → X-ray Beam Position Monitor (XBPM)
 挿入光源 → Insertion Device (ID)
 偏向電磁石 → Bending Magnet (BM)
 放射光ビームライン → Beam Line (BL)

役割：

- SPring-8では、ID-BL と BM-BL にXBPMを設置している。(光源からの距離 約20m)
- 性能を十分に評価されたXBPMで光軸を観測することは、ユーザーに対するビームの安定供給をより確実にする。
- 蓄積リングの rf-BPM は電子ビーム閉軌道のグローバルな診断に優れているのに対し、XBPM は個別の放射光ビームラインのビーム(光)軸を正確に診断することに適している。

原理：

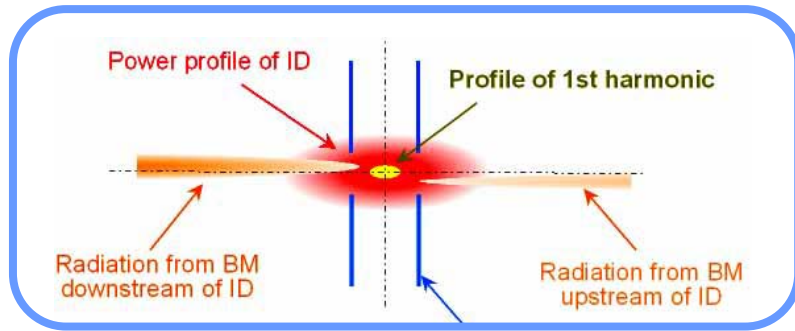
ブレード型検出素子(平行配置)からの光電子放出による電気信号の配分比から位置を算出

【平行配置の理由】

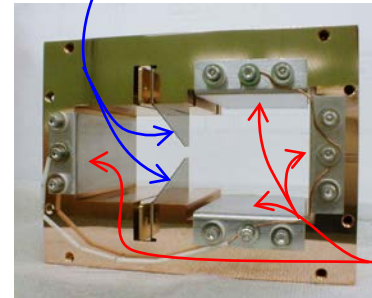
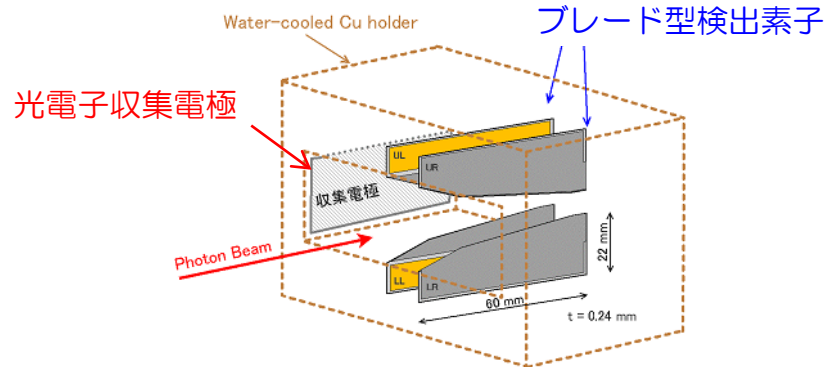
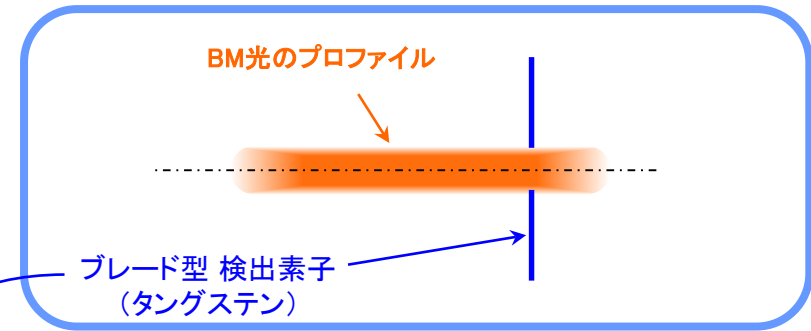
- 光を遮る断面積 小 → 熱負荷 小
- 締め付け面積 大 → 冷却効率 大

構造：

ID-BL用XBPM 4枚の検出素子(水平・鉛直方向)

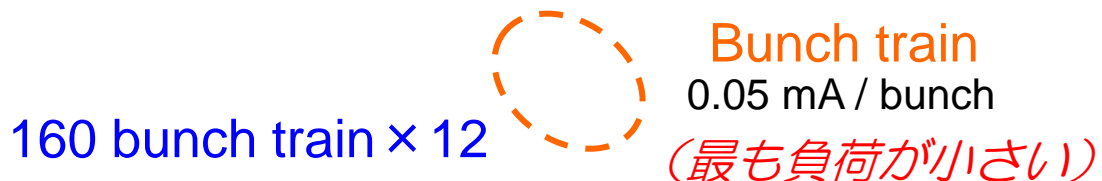


BM-BL用XBPM 2枚の検出素子(鉛直方向のみ計測)



通常(従来) HV = +100 V 印加
光電子収集電極
 正電圧を印加して、検出素子から放出される光電子を収集する。→ 出力信号が安定

マルチバンチ (CW的利用に適する、長い寿命)

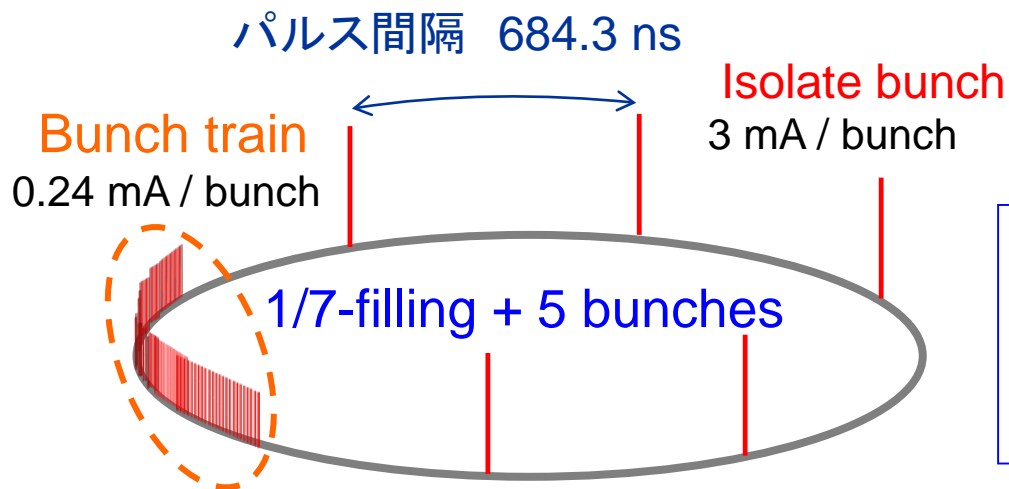
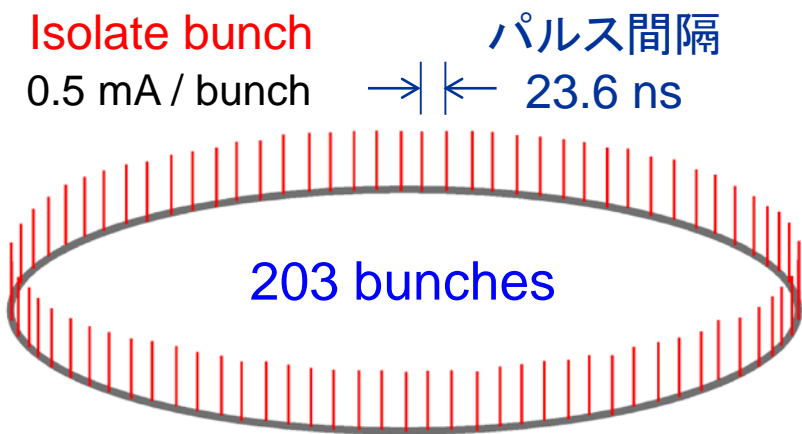


→|← トレイン間隔 86.5 ns

周長:	1,436 m
RF周波数:	508 MHz
ハーモニックナンバー:	2,436
最短のパルス間隔:	2.0 ns
蓄積電流値:	100 mA

(cf. 1 mA / bunch = $3 \times 10^{10} e^-$)

セベラルバンチ (時間分割実験、ユーザー運転で供用)

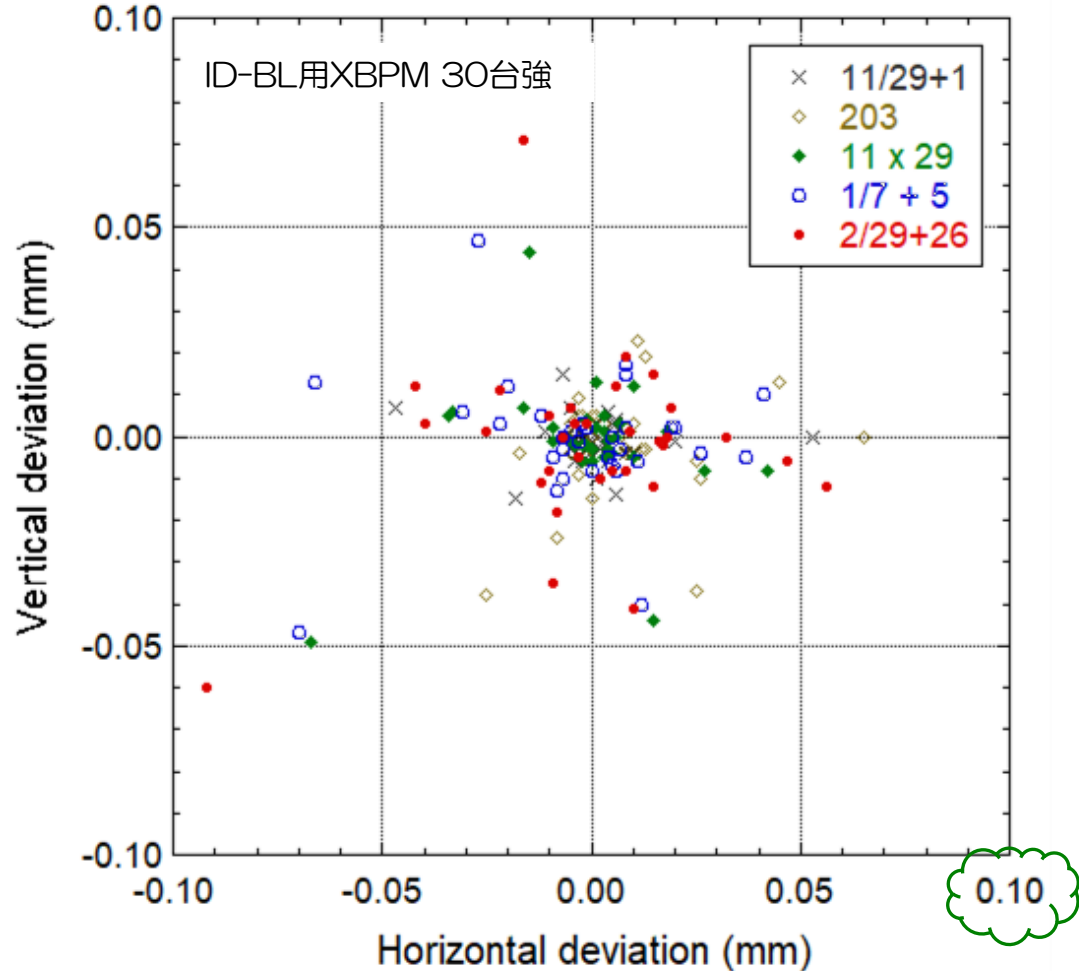


その他のフィリング

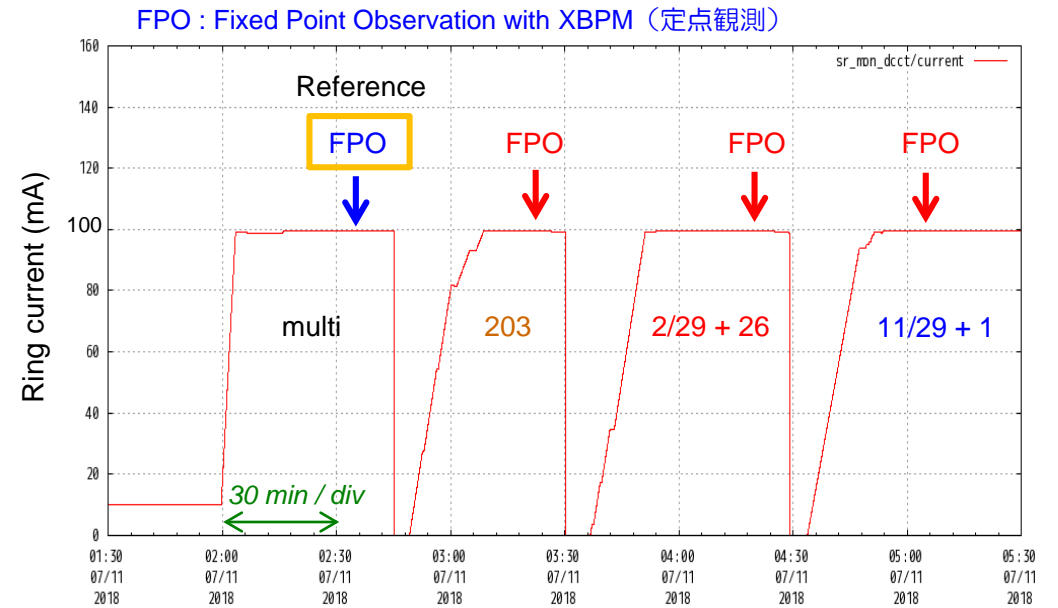
- 11 bunch train × 29
- 11 / 29 - filling + 1 bunch
- 2 / 29 - filling + 26 bunches

マルチバンチ (multi) における XBPMの読み値を基準として
セベラルバンチ での読み値の偏差で評価した。

対処前 (2018年 6~7月)



評価試験の時間の流れ (例)



光源からの距離 約20m なので
XBPM の読み値 0.1mm は、
角度にして $100 \mu\text{m} / 20\text{m} = 5 \mu\text{rad}$ に相当

フィリング・パターン毎のバンチ電流値 と XBPMへの影響の程度 (RMS値)

Filling pattern	Bunch train (mA/bunch)	Isolated bunch (mA/bunch)	ID-BL ($\mu\text{m RMS}$) before		ID-BL ($\mu\text{m RMS}$) after		BM-BL ($\mu\text{m RMS}$)
			Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Vertical
Multi	0.05	—	3.6	2.0			1.3
11/29 + 1	0.10	5.0	13.9	5.8			3.0
203	—	0.5	17.6	12.6			6.0
11 x 29	0.31	—	27.7	14.6	2.7	2.0	4.3
1/7 + 5	0.24	3.0	33.5	15.2	2.4	2.1	5.4
2/29 + 26	0.38	1.4	40.3	20.5	4.3	5.6	8.0



2018年 6~7月 測定

孤立バンチ のバンチ電流値よりも
トレイン部 のバンチ電流値に影響されていることが分かる。

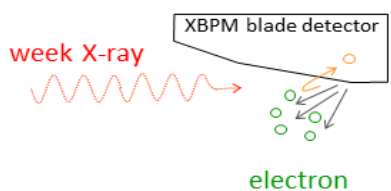


蓄積リングのCODの
乱れも疑われる!?

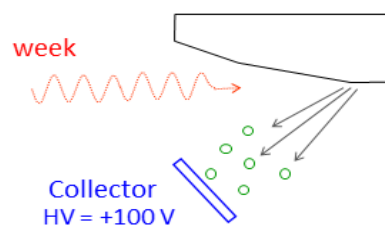
影響がみられた主な原因として、検出素子受光部での光電子放出の際の空間電荷効果の影響が強く疑われた。

原因の直感的解釈

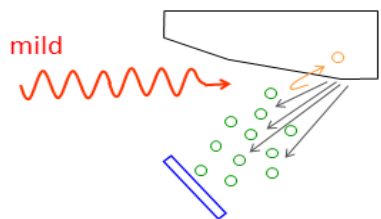
Case 1: Weak X-ray



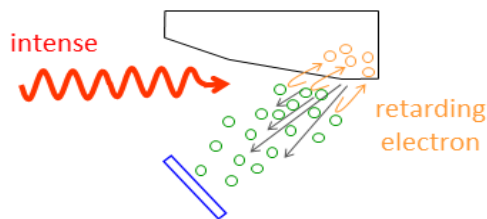
Case 2: Weak X-ray and collector



Case 3: Mild X-ray and collector



Case 4: Intense X-ray and collector



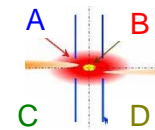
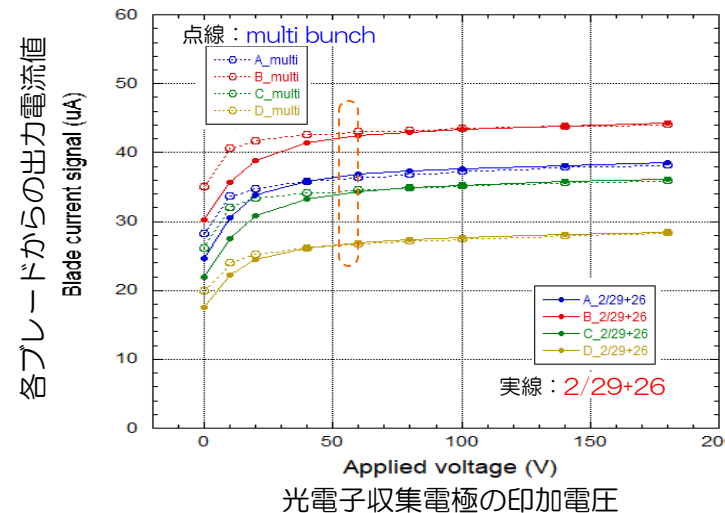
そこで、

光電子収集電極の印加電圧 (通常 HV = +100 V) を変化させて

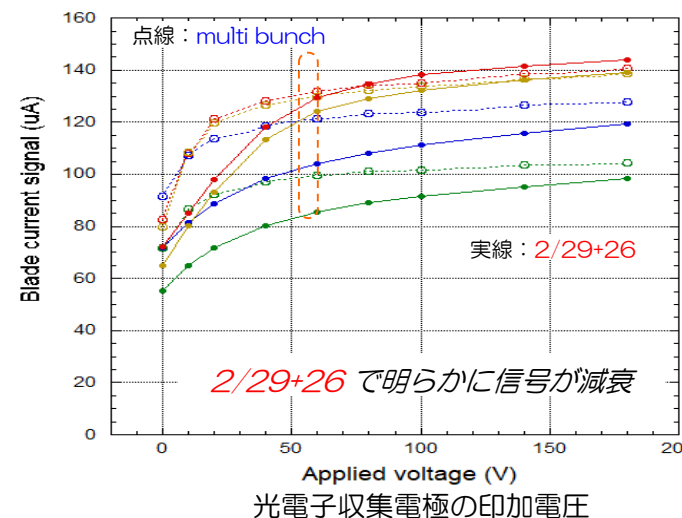
その影響の原因を検証した。(右図参照)

multi bunch と 2/29+26 で比較

BL20XU
影響 無



BL16XU
影響 有

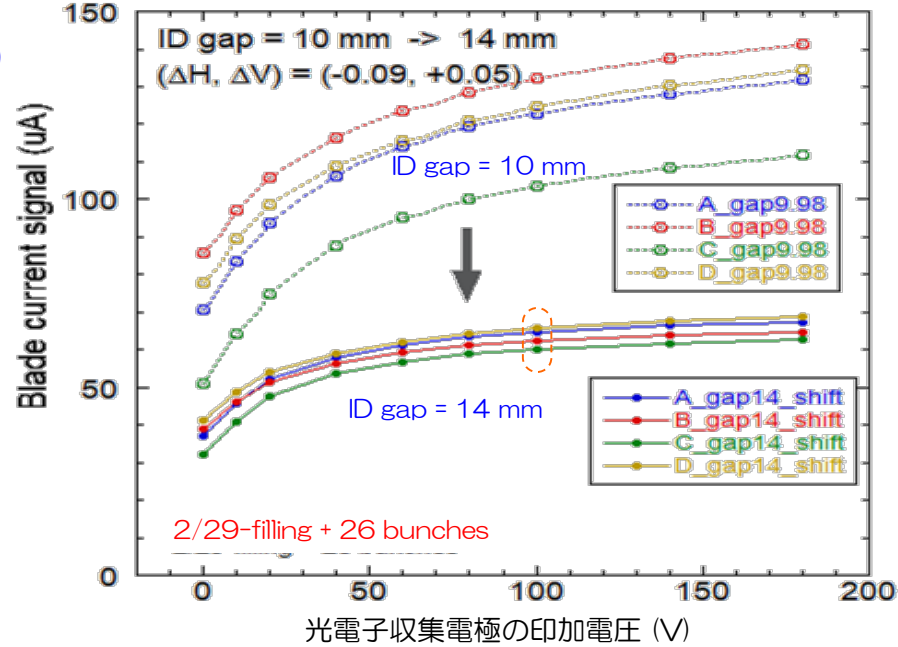


2/29+26 で明らかに信号が減衰

3. 影響が生じる原因と対処法 検証データ (光電子収集電極の印加電圧に対する応答)

検証実験： 挿入光源のギャップ (ID gap) を広げて測定

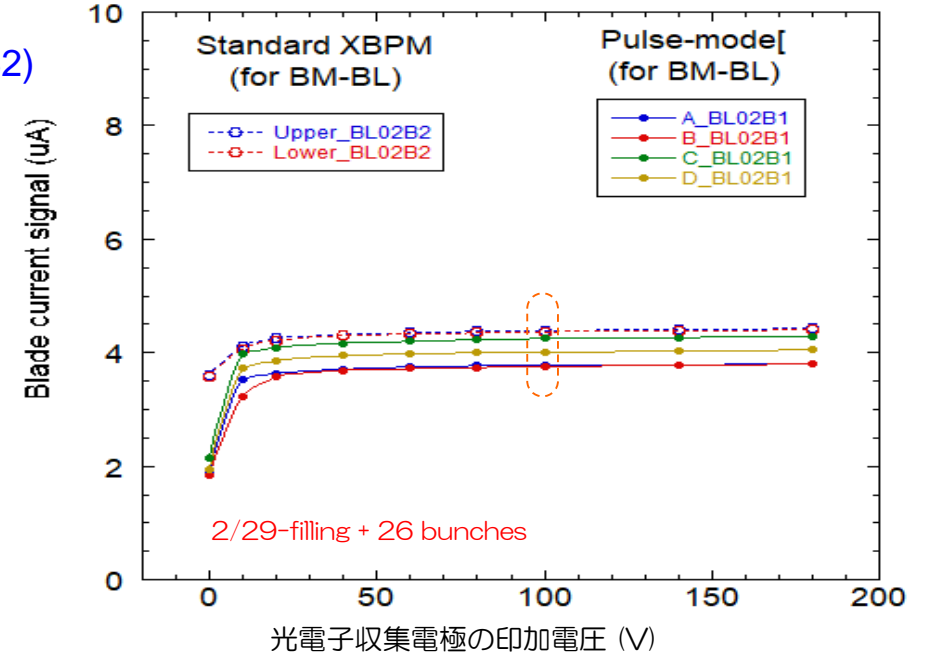
ID-BL (BL22XU)



ID gapを開いている時は、
空間電荷効果の影響が抑えられている。

参考データ： BM-BL用XBPM

BM-BL (BL02B1, 02B2)

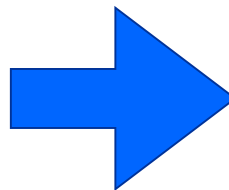
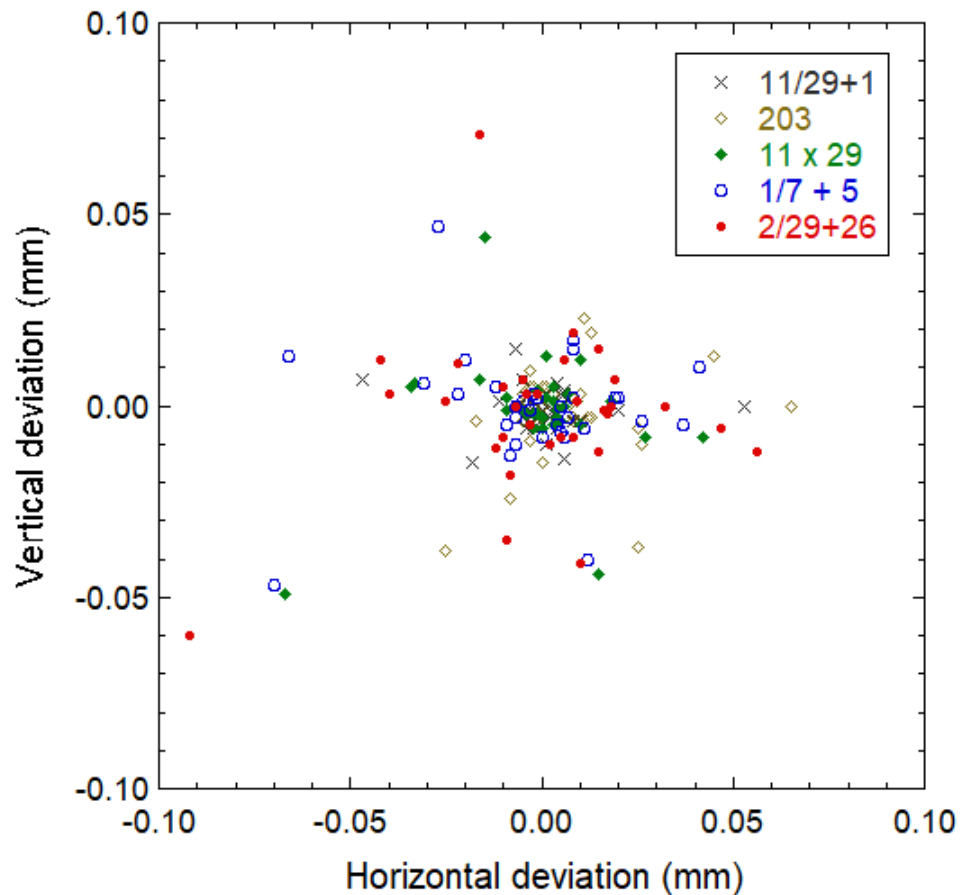


電流信号の絶対値が小さければ、
空間電荷効果の影響が無視できる。

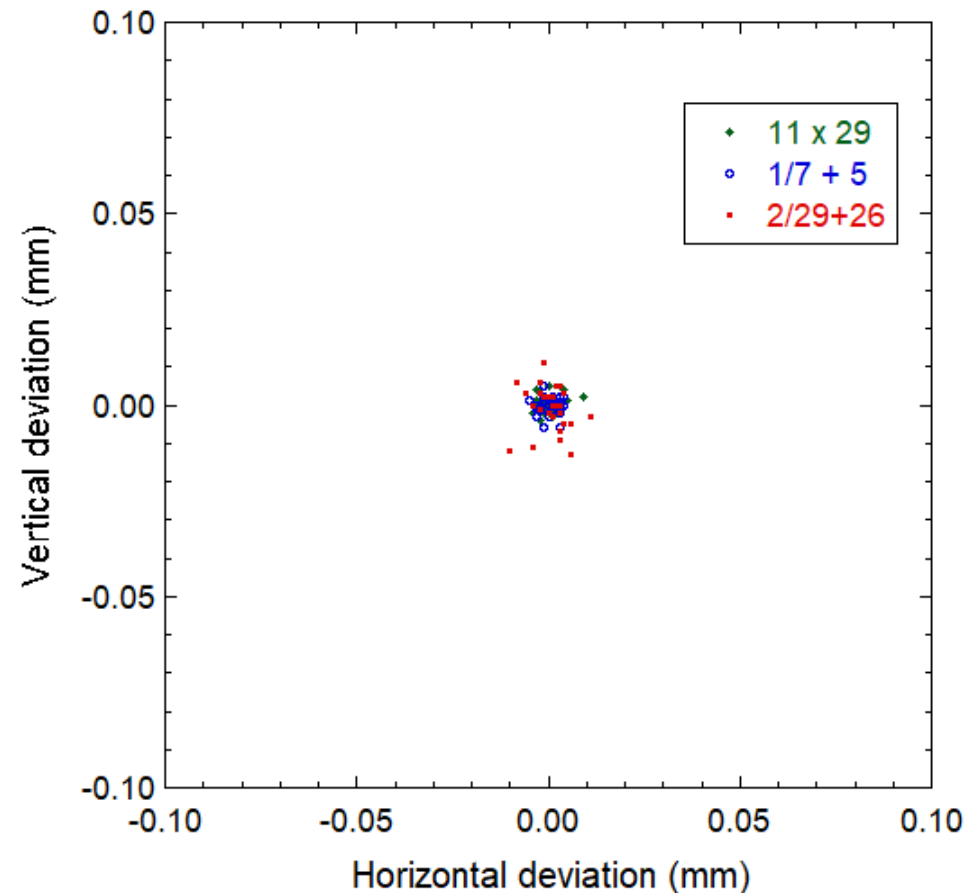
以上のことから、従来の XBPM に対して 対症療法として、

- 印加電圧を $HV = +500V$ (すべての XBPM)
- 定点観測 ID gapを広めに設定 (影響が大きかった BL のみ)

Before (2018年 6~7月)



After (2019年7月~2020年 5月)



主な対処：

1. 印加電圧 HV = +100V → +500V
2. ID gap を広げる

フィリング・パターン毎のバンチ電流値 と XBPMへの影響の程度 (RMS値)

Filling pattern	Bunch train (mA/bunch)	Isolated bunch (mA/bunch)	ID-BL ($\mu\text{m RMS}$) before		ID-BL ($\mu\text{m RMS}$) after		BM-BL ($\mu\text{m RMS}$)
			Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
Multi	0.05	—	3.6	2.0			1.3
11/29 + 1	0.10	5.0	13.9	5.8			3.0
203	—	0.5	17.6	12.6			6.0
11 x 29	0.31	—	27.7	14.6	2.7	2.0	4.3 → 2.2
1/7 + 5	0.24	3.0	33.5	15.2	2.4	2.1	5.4 → 2.7
2/29 + 26	0.38	1.4	40.3	20.5	4.3	5.6	8.0 → 6.0

2018年 6~7月
2019年~2020年

2020年3月

2020年5月

2019年7月

↑
時が経つと
改善されている!?

従来型のXBPMで 1/10 程度に抑えた。

前述の対症療法的な対策（光電子収集電極の印加電圧を高くするだけでなく、ID gap も広げることが必要）では、XBPMの適用範囲が狭められることになる。

そこで、

新しく XBPM検出部を設計・製作することで、検出素子の光電面における **空間電荷効果** の問題を解決することを試みた。

4. 傾斜配置型XBPM ブレード型検出素子の構造

新設計のポイント：空間電荷効果を軽減するために、ブレード検出素子と光電子収集電極との間に高い電界を生じさせる。

従来の設計

並行配置によって

- 光を遮る断面積 小 → 熱負荷 小
- 締め付け面積 大 → 冷却効率 大

セラミック溶射
(0.1t)

タングステン板
(60×21×0.2t)

X線は端面に照射

Parallel configuration

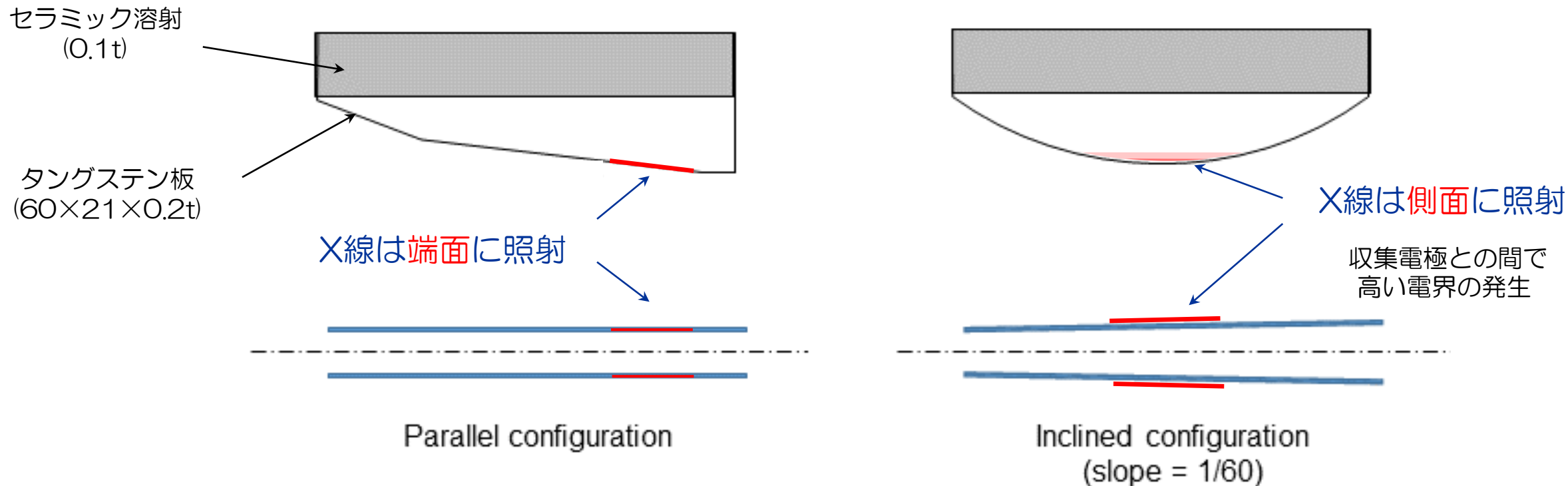
新しい設計

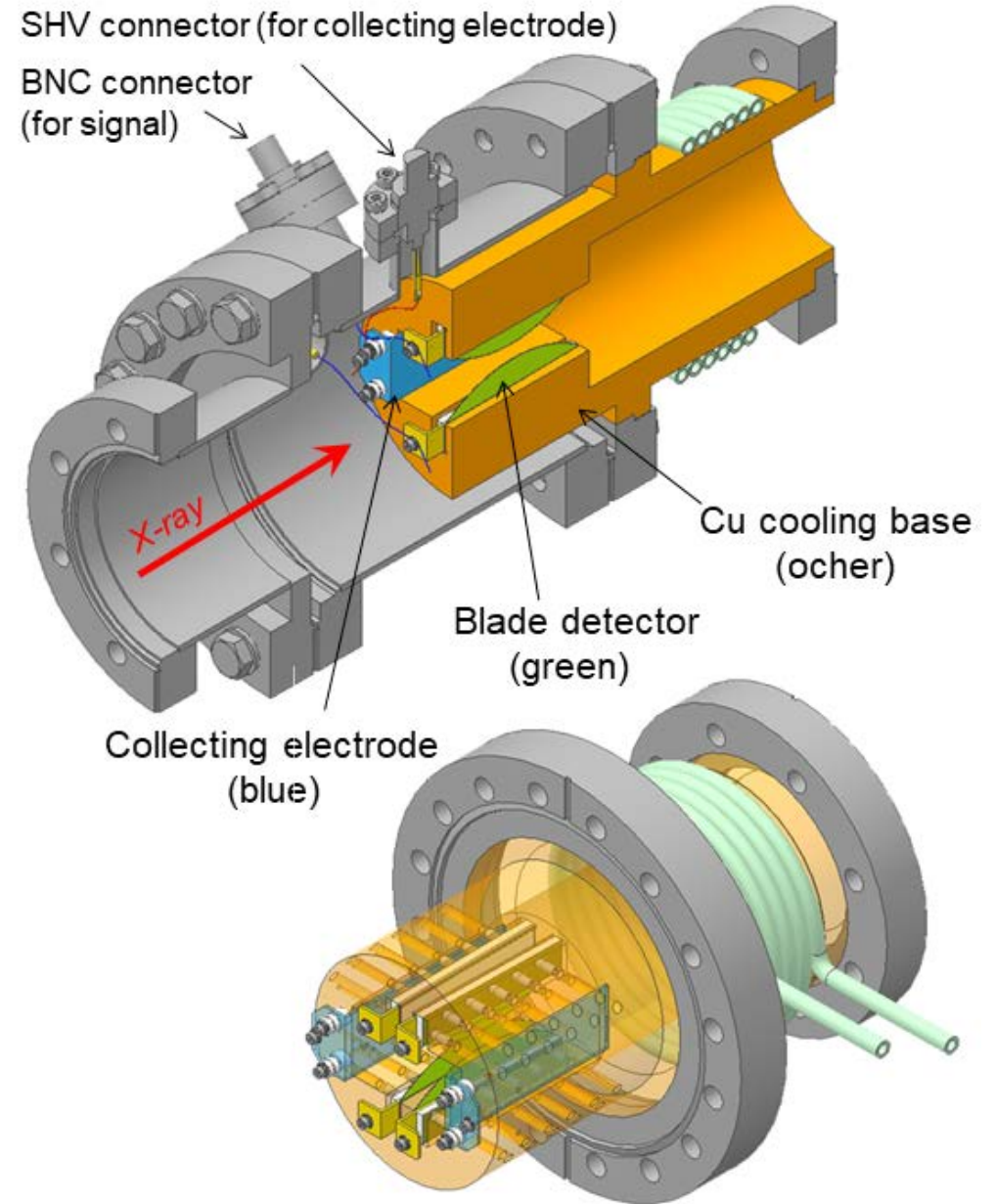
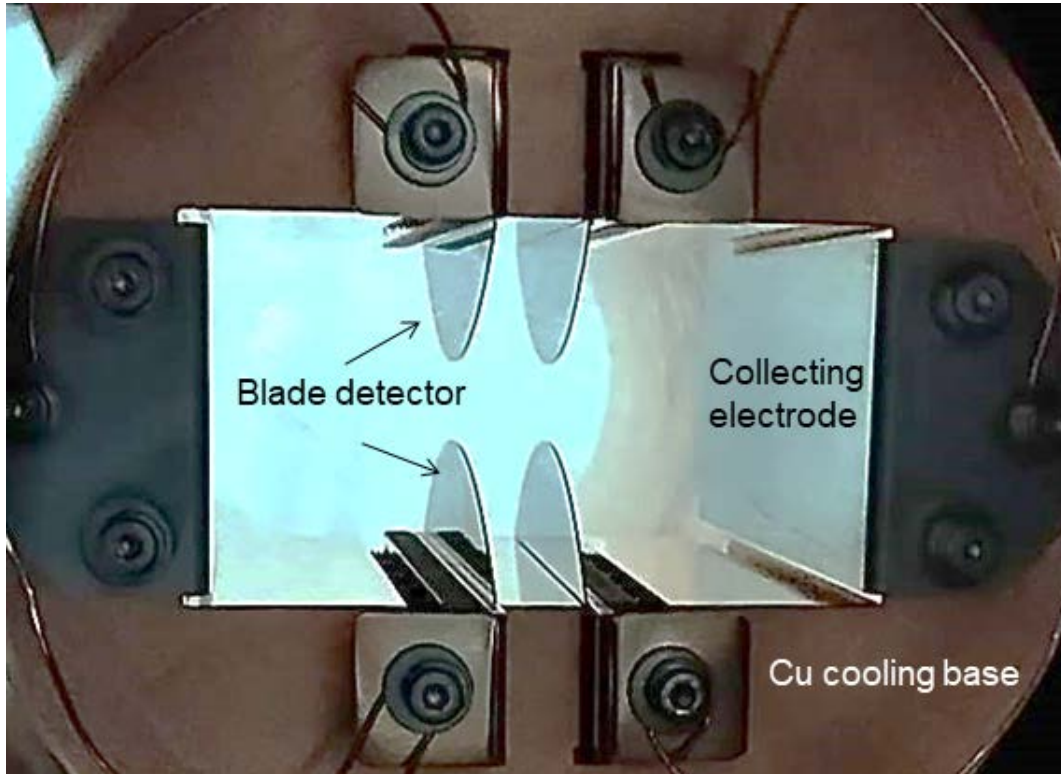
- “ハ”の字型に配置 (傾斜配置)
- ラウンド形状 (熱負荷の軽減)

X線は側面に照射

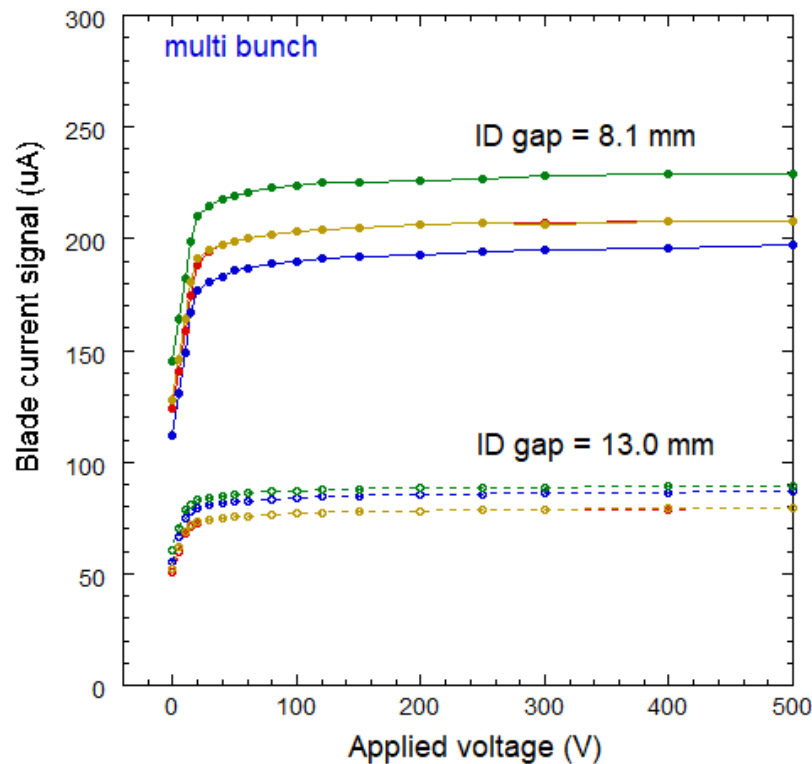
収集電極との間で
高い電界の発生

Inclined configuration
(slope = 1/60)

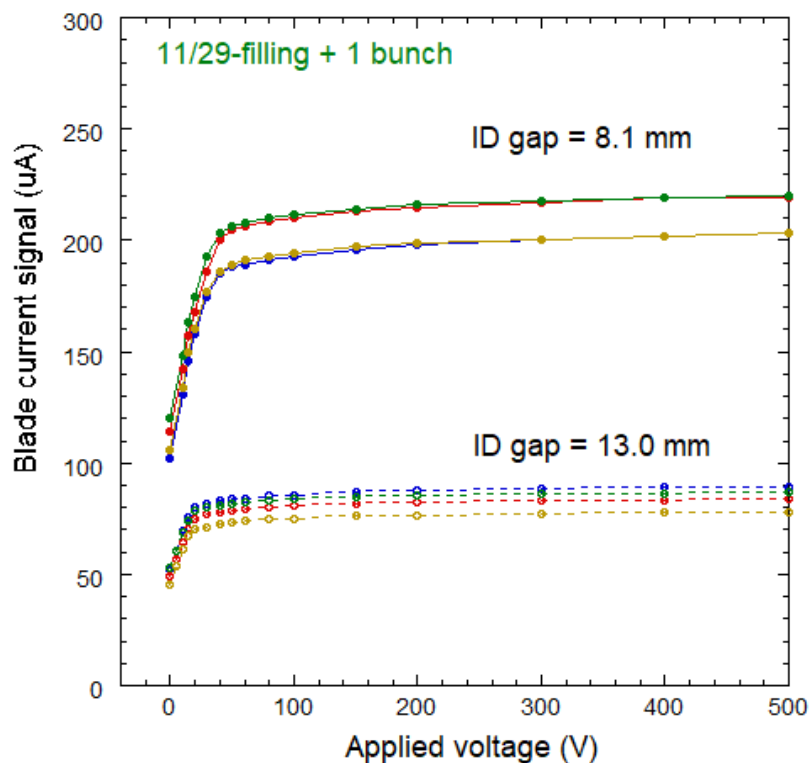




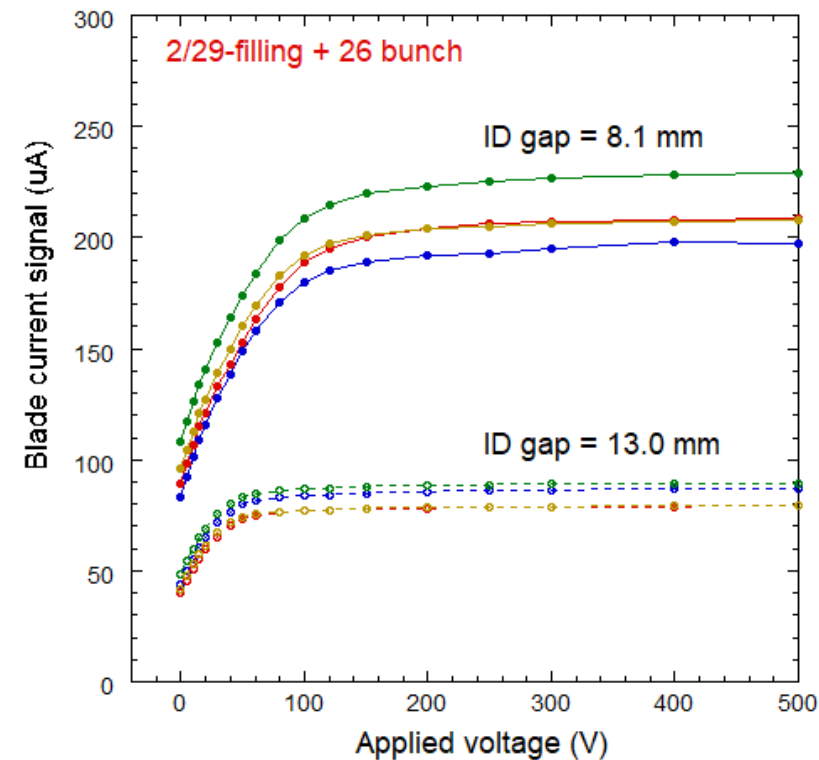
マルチバンチ
(160 × 12)



セベラルバンチ
(11/29 + 1)

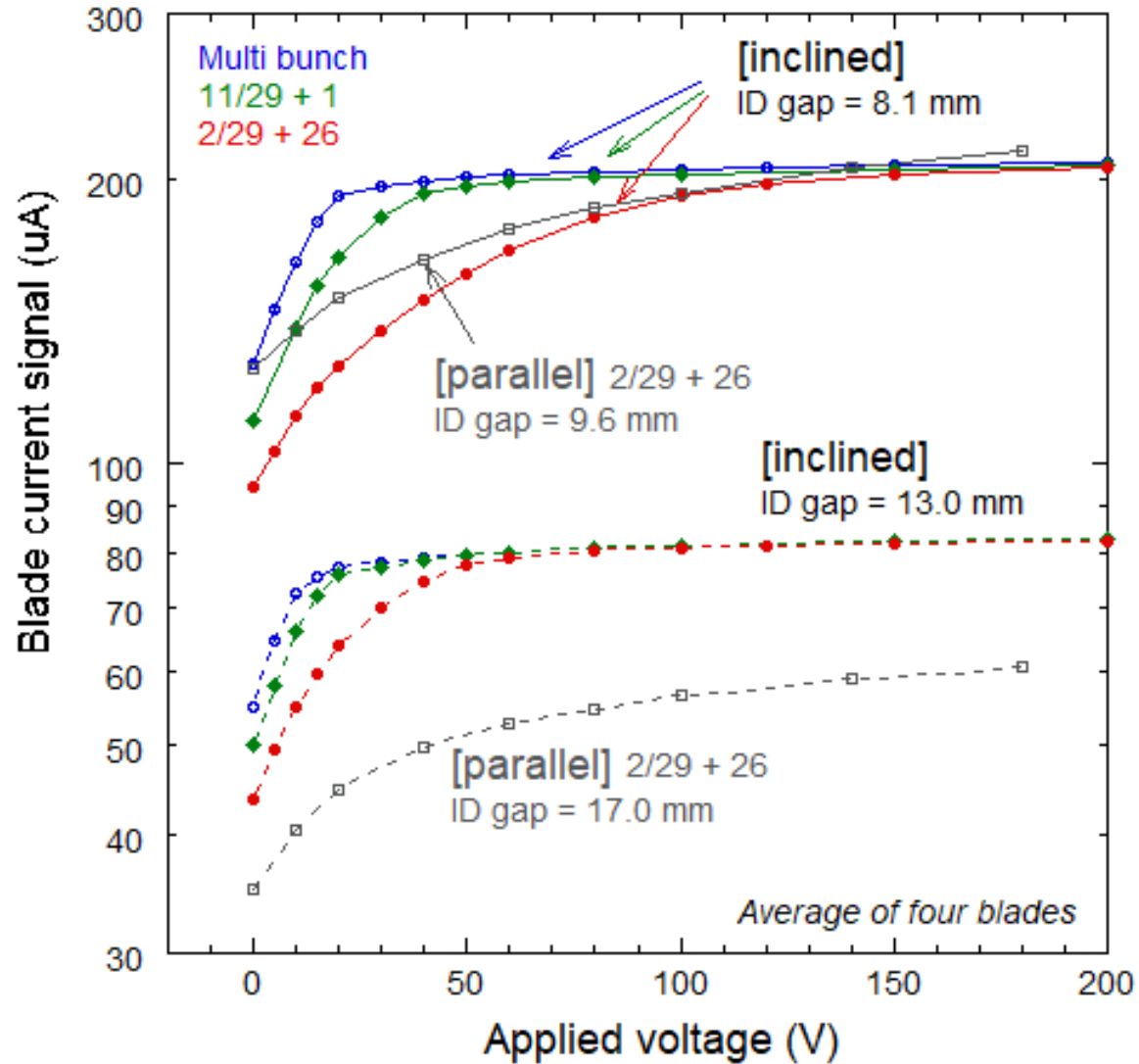


セベラルバンチ
(2/29 + 26)



マルチバンチであれば、IDの最小gap (8.1 mm)でも空間電荷効果の影響が抑えられている。

セベラルバンチでは、印加電圧を +500V とすれば、空間電荷効果の影響が抑えられている。



- 4枚のブレード信号の平均値をプロット
- 傾斜配置：“Multi” “11/29+1” “2/29+26”
平行配置：“2/29+26” parallel（従来型）
- 縦軸を対数軸
- 低電圧部 ($HV \leq 200V$) の立ち上がり

プラトー領域の下限值電圧

1. 影響が大きいフィリングほど高くなる。
2. ID gap を閉めて電流信号が大きくなるほど高くなる。
3. 平行配置では、明確なプラトー領域がない。

結論として：

傾斜配置型XBPMは、

従来型の平行配置型XBPM と比べると明らかに

フィリングの影響軽減に大きな効果があることを示唆する。

“2/29 + 26” (最も影響が出やすい) での XBPMの読み値 をマルチバンチ (基準) と比較した

Condition		マルチバンチ (基準) と比較 Deference of readouts	
ID gap (mm)	XBPM HV (V)	Dx (μm)	Dy (μm)
13.0 (定点観測 gap)	100	4.5	1.0
	500	-1.5	1.0
8.1 (最小 ID gap)	100	-5.0	-1.5
	500	0.0	1.0

(3.4 μm RMS) (1.1 μm RMS)

結論：フィリング・パターンを変更した時の影響が十分小さくなっている。

傾斜配置型XBPM を使用することで、最も影響が出やすい “2/29 + 26” で、最小 ID gap (8.1 mm) でも光電子収集電極 の印加電圧 を +500V とすれば、空間電荷効果 の影響が抑えられる。

フィリング・パターン毎のバンチ電流値 と XBPMへの影響の程度 (RMS値)

新しい設計

Filling pattern	Bunch train (mA/bunch)	Isolated bunch (mA/bunch)	ID-BL (μm RMS) before		ID-BL (μm RMS) after		BM-BL (μm RMS)	Inclined XBPM (μm)	
			Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical		Vertical	Horizontal
Multi	0.05	—	3.6	2.0			1.3		
11/29 + 1	0.10	5.0	13.9	5.8			3.0		
203	—	0.5	17.6	12.6			6.0		
11 x 29	0.31	—	27.7	14.6	2.7	2.0	4.3 → 2.2		
1/7 + 5	0.24	3.0	33.5	15.2	2.4	2.1	5.4 → 2.7		
2/29 + 26	0.38	1.4	40.3	20.5	4.3	5.6	8.0 → 6.0	0.0	1.0

3.0
2020年1月

0.0 3.4 RMS
1.0 1.1 RMS

BM-BL用XBPM で改善されてるのは蓄積リング自体の性能が上がったから？

はじめに

- 従来のXBPM (ID-BL用、BM-BL用) の役割、原理、構造
- ブレード型検出素子、光電子放出型、光電子収集電極 (従来は $HV = +100\text{ V}$)

フィリング変更が与える影響・原因・対処法

- 影響を受ける度合いを定量化 (最大 水平 $40\mu\text{m}$ 、鉛直 $20\mu\text{m}$ 程度)
- 原因の特定 (空間電荷効果)
- 光電子収集電極の印加電圧に対する出力電流信号の応答から判定
- 対症療法として、印加電圧を $HV = +500\text{V}$ 、定点観測 ID gapを広めに設定
- 影響の度合いは 1/10 程度に軽減

傾斜配置型 XBPM の設計・実証試験

- 検出素子を“ハ”の字型に配置 (高い電界の発生 → 空間電荷効果の抑制を期待)
- 端部を円弧状に成形 (熱負荷の軽減)
- 印加電圧に対する出力電流信号の応答試験 → 結果良好
- 影響の度合い (XBPMの読み値の偏差) は 水平 $0.0\mu\text{m}$ 、鉛直 $1.0\mu\text{m}$ を実証

<今後の方針>

- 今後の新規製作は、傾斜配置型XBPM を基本に検討する
- 現在使用中のXBPM (平行配置型) は 光電子収集電極の印加電圧 や 定点観測 ID gap を適切に設定した上で運用を続ける