

# AVF-930サイクロトロン用高調波 ビームバンチャーの開発(III)

北條 悟<sup>#, A)</sup>, 涌井 崇志<sup>A)</sup>, 杉浦 彰則<sup>A)</sup>, 片桐 健<sup>A)</sup>, 中尾 政夫<sup>A)</sup>,  
岡田 高典<sup>B)</sup>, 高橋 勇一<sup>B)</sup>, 青山 功武<sup>B)</sup>, 野田 章<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> National Institute of Radiological Sciences

<sup>B)</sup> Accelerator Engineering Corporation

- はじめに  
NIRS-930
- 強度を上げるために
- バンチャー  
鋸歯状波のバンチャーに向けてこれまで。  
1f、2f、3f合成によるビームテスト。
- 加速ビームの位相幅について
- まとめ



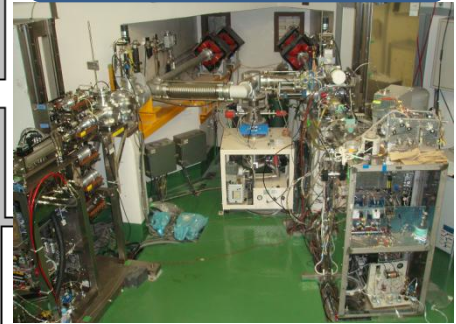
**NIRS-930**



**HM-18**

General experiment

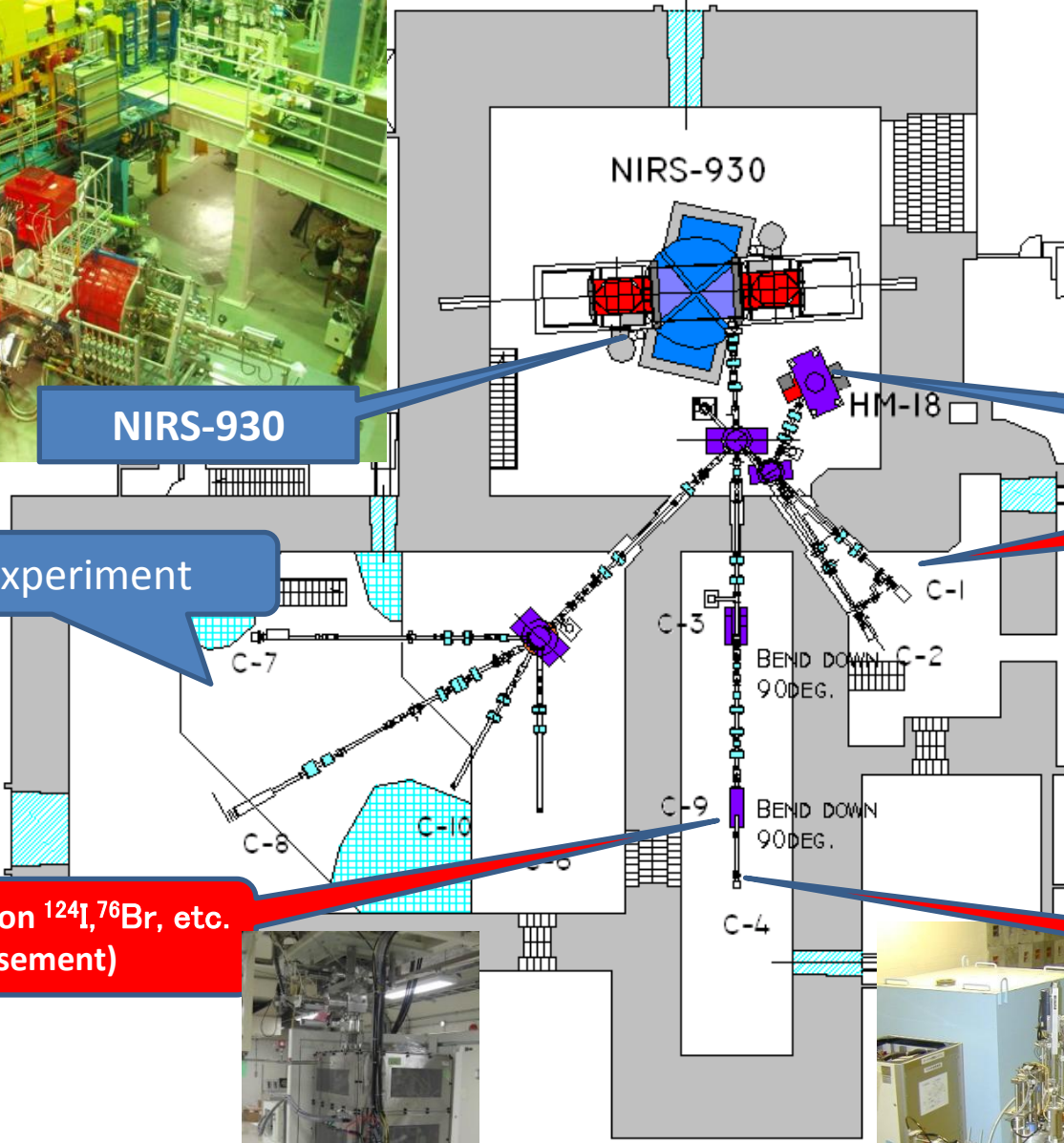
RI production for PET



RI production  $^{124}\text{I}$ ,  $^{76}\text{Br}$ , etc.  
(Basement)



RI production for SPECT



月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後
8月3日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
8月4日 (火)	RI生産		RI生産	
8月5日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg所外) α 75, C4, 10:00~14:00	
8月6日 (木)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) Ne <sup>10+,6+</sup> 120MeV / 500 nA C10	
8月7日 (金)	RI生産		RI生産	
8月8日 (土)				
8月9日 (日)				

8/3(月曜日)

	照射時間	コース	大小	粒子/エネルギー	カレント	製造核種	目的
①	13:00~15:00	直P2	小型	D9	15.00 μA	15O	サル
②	13:15~13:25	C1	大型	P18	15.00 μA	11C	合成
③	15:30~15:33	直P1	小型	P18	2.00 μA	11C	合成
④	16:00~16:10	C1	小型	P18	15.00 μA	test	照射

8/4(火曜日)

	照射時間	コース	大小	粒子/エネルギー	カレント	製造核種	目的
①	09:10~09:25	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	動物
②	10:05~10:25	C2	小型	P18	17.00 μA	11C	動物
③	10:30~12:00	C9	大型	4He34	10.00 μA	Sc	照射
④	10:46~10:49	直P1	小型	P18	2.00 μA	11C	合成
⑤	14:00~14:10	C1	小型	P18	20.00 μA	11C	動物
⑥	14:45~15:05	C2	小型	P18	17.00 μA	11C	臨床

8/5(水曜日)

	照射時間	コース	大小	粒子/エネルギー	カレント	製造核種	目的
①	09:10~09:25	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	動物
②	10:00~14:00	C4	大型	4He75	10.00 μA	Mg28	動物
③	10:27~10:30	直P1	小型	P18	2.00 μA	11CO	合成
④	13:15~13:25	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	合成
⑤	14:10~14:25	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	動物

8/6(木曜日)

	照射時間	コース	大小	粒子/エネルギー	カレント	製造核種	目的
①	09:00~09:20	C2	小型	P18	17.00 μA	11C	動物
②	09:30~09:45	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	動物
③	11:00~11:10	C1	小型	P18	20.00 μA	11C	動物
④	13:10~13:25	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	動物
⑤	14:25~14:30	C1	小型	P18	20.00 μA	プレ照射	照射
⑥	14:35~14:40	C1	小型	P18	20.00 μA	プレ照射	照射
⑦	14:45~14:50	C1	小型	P18	20.00 μA	プレ照射	照射
⑧	14:55~15:25	C1	小型	P18	20.00 μA	11C	動物

8/7(金曜日)

	照射時間	コース	大小	粒子/エネルギー	カレント	製造核種	目的
①	09:10~09:25	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	動物
②	10:30~12:00	C9	大型	P18	10.00 μA	As	照射
③	11:10~11:25	C1	小型	P18	15.00 μA	11C	動物
④	13:00~13:30	C2	小型	P18	17.00 μA	11C	動物
⑤	13:45~14:05	C2	小型	P18	17.00 μA	18F	動物
⑥	14:30~15:30	C9	大型	4He34	10.00 μA	At	照射
⑦	14:35~14:50	C1	小型	P18	15.00 μA	18F	合成

# 放射性核種の製造

Radionuclide	Reaction
$^{89}\text{Zr}$	$^{89}\text{Y}(p, n) ^{89}\text{Zr}$
$^{11}\text{C}$	$^{14}\text{N}(p, \alpha) ^{11}\text{C}$
$^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$	$^{\text{nat}}\text{Cu}(p, 2n) ^{62}\text{Zn}$
$^{68}\text{Ge}$	$^{\text{nat}}\text{Ga}(p, x) ^{68}\text{Ge}$
$^{67}\text{Cu}$	$^{68}\text{Zn}(p, 2p) ^{67}\text{Cu}$ $^{64}\text{Ni}(\alpha, p) ^{67}\text{Cu}$
$^{64}\text{Cu}$	$^{64}\text{Ni}(p, n) ^{64}\text{Cu}$
$^{124}\text{I}$	$^{124}\text{Te}(p, n) ^{124}\text{I}$
$^{177}\text{Lu}$	$^{\text{nat}(176)}\text{Yb}(d, n) ^{177}\text{Lu}$
$^{43}\text{Sc}$	$^{\text{Nat}(40)}\text{Ca}(\alpha, x) ^{43}\text{Sc}$
$^{47}\text{Sc}$	$^{44}\text{Ca}(\alpha, p) ^{47}\text{Sc}$
$^{74}\text{As}$	$^{\text{nat}(74)}\text{Ge}(p, n) ^{74}\text{As}$
$^{155}\text{Tb}$	$^{\text{nat}(153)}\text{Eu}(\alpha, 2n) ^{155}\text{Tb}$
$^{186}\text{Re}$	$^{185}\text{W}(d, n) ^{186}\text{Re}$
$^{211}\text{At}$	$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n) ^{211}\text{At}$
$^{28}\text{Mg}$	$^{27}\text{Al}(\alpha, 3p) ^{28}\text{Mg}$

# 高強度でのRI生産

Production	Particle	Energy [MeV]	Beam intensity [ $\mu\text{A}$ ]	Irradiation time [h]
$^{64}\text{Cu}$	Proton	12	10	2.7
$^{89}\text{Zr}$	Proton	15	15	2.5
$^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$	Proton	30	20	9
$^{124}\text{I}$	$\text{H}_2^+$	27	10	4
$^{28}\text{Mg}$	$\text{He}^{2+}$	75	15	4
$^{186}\text{Re}$	Deuteron	20	10	1.5
$^{211}\text{At}$	$\text{He}^{2+}$	34	12	2
$^{67}\text{Cu}$	$\text{He}^{2+}$	34	15	7
	Proton	60	10	7

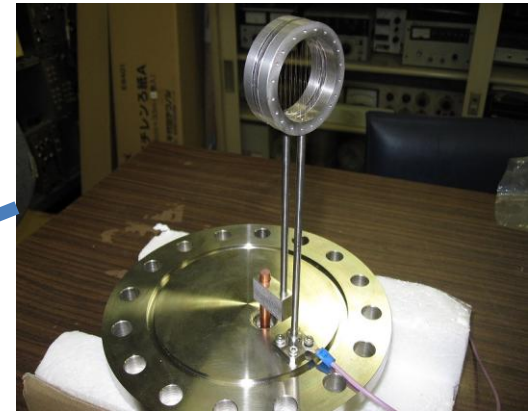
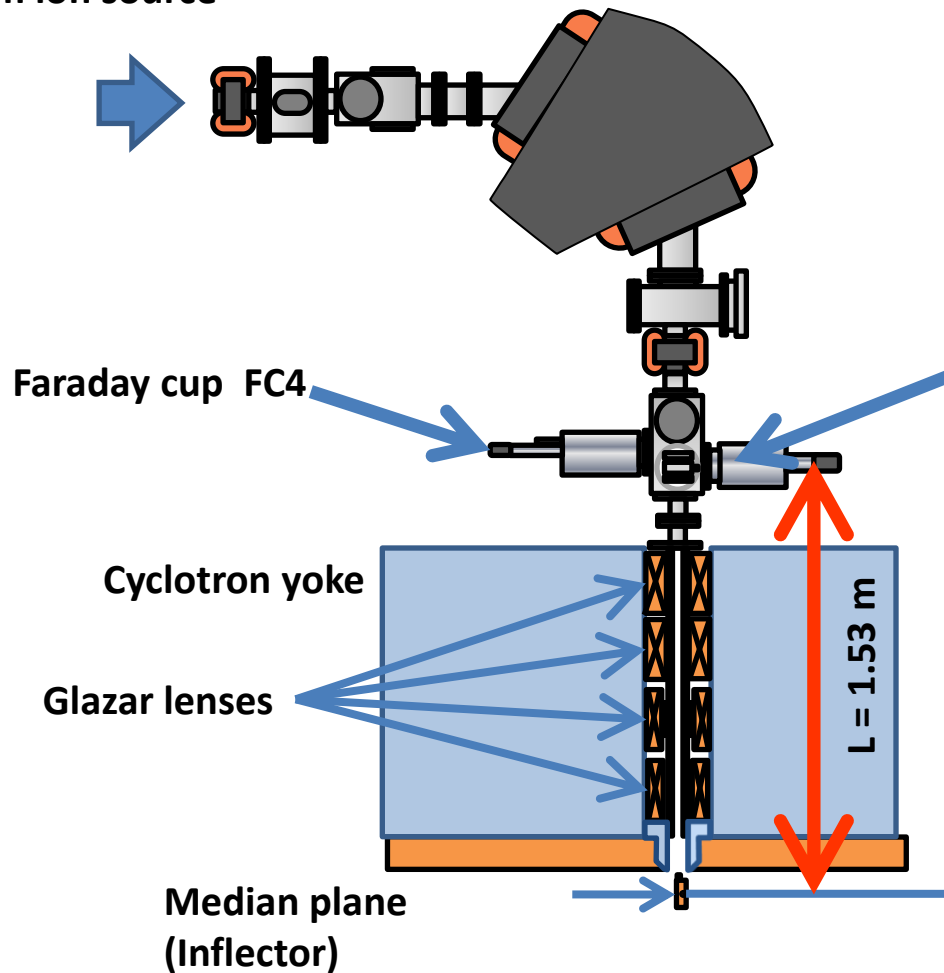
# ビーム強度の増強のために

- 入射するビーム量を増やす  
イオン源からの強度を増やす。
- 効率を上げる。

入射の効率 →バンチャーの改良  
加速の効率  
取出し効率

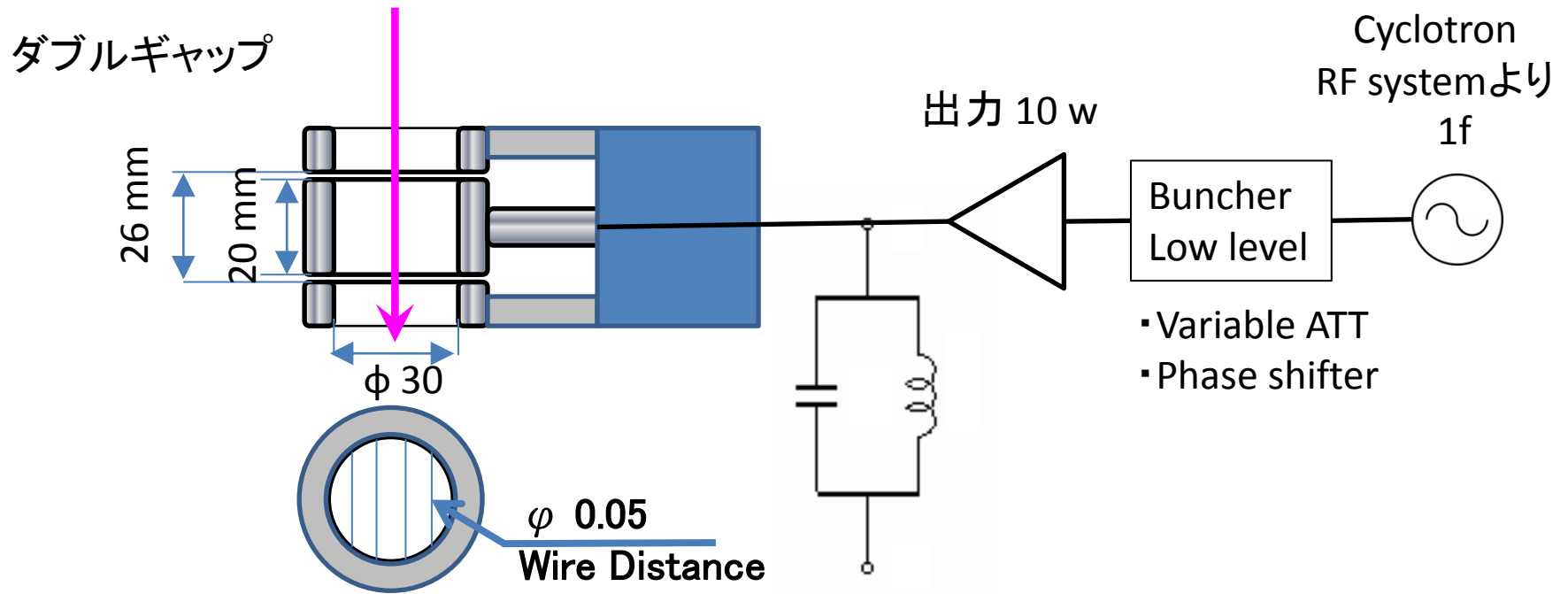
# バンチャー設置位置

From ion source





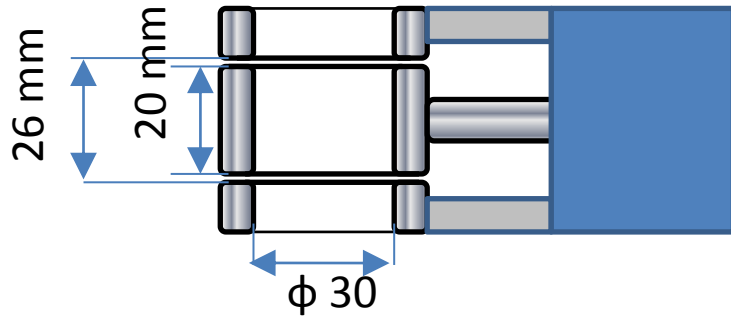
# 1fのみを用いた当初のバンチャー



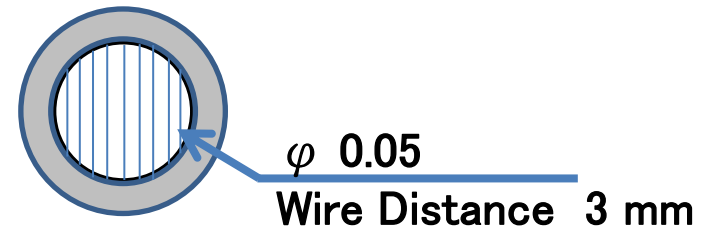
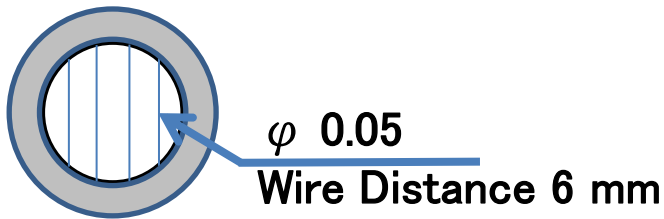
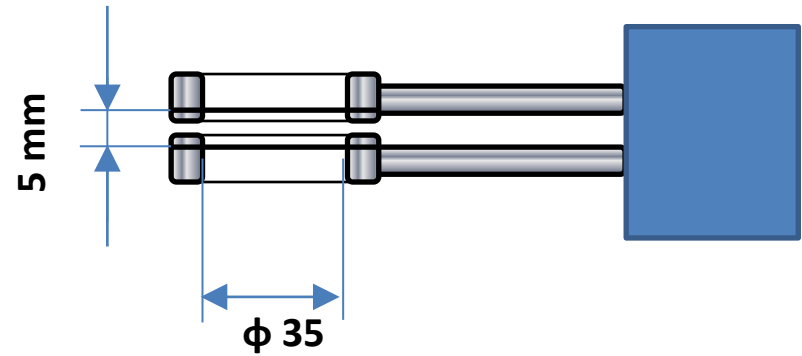
共振電圧を用いるため、  
アンプの出力は小さい。

# バンチャー電極の変更

ダブルギャップ

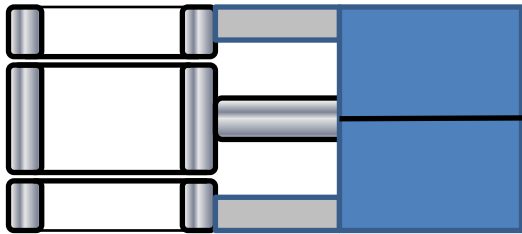


シングルギャップ

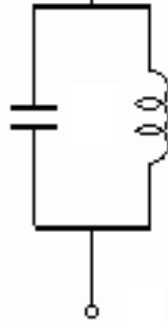


# RF回路の変更

ダブルギャップ



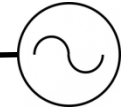
出力 10 w



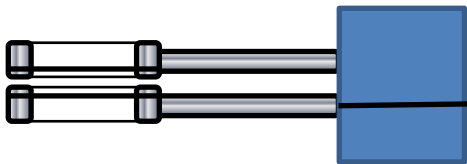
Buncher  
Low level

- Variable ATT
- Phase shifter

Cyclotron  
RF systemより  
1f



シングルギャップ



200  $\Omega$



50  $\Omega$

出力 500 W  
周波数帯域  
10-100MHz

Buncher  
Low level

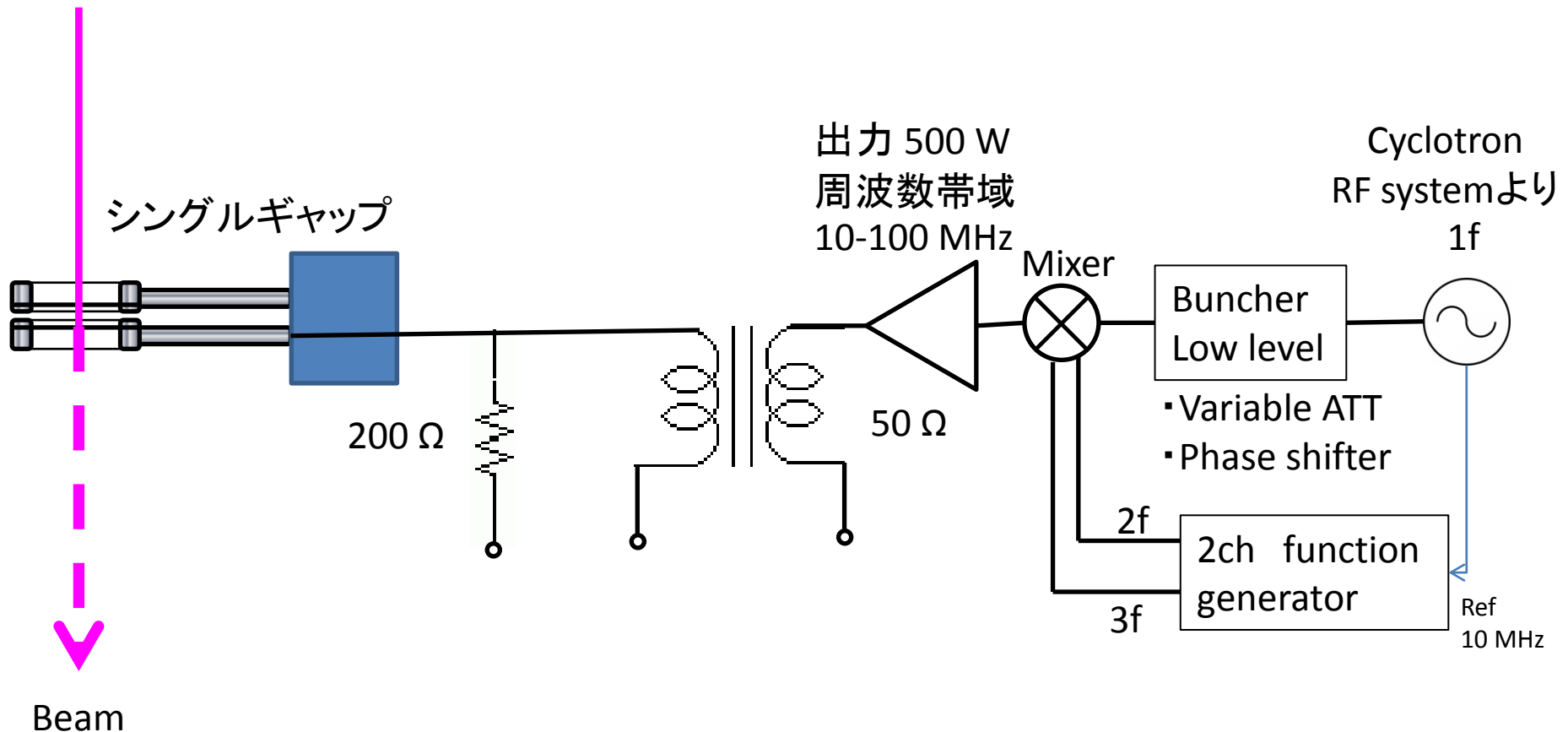
- Variable ATT
- Phase shifter

Cyclotron  
RF systemより  
1f



将来的には  
任意波形発生器1台のみにしたい。

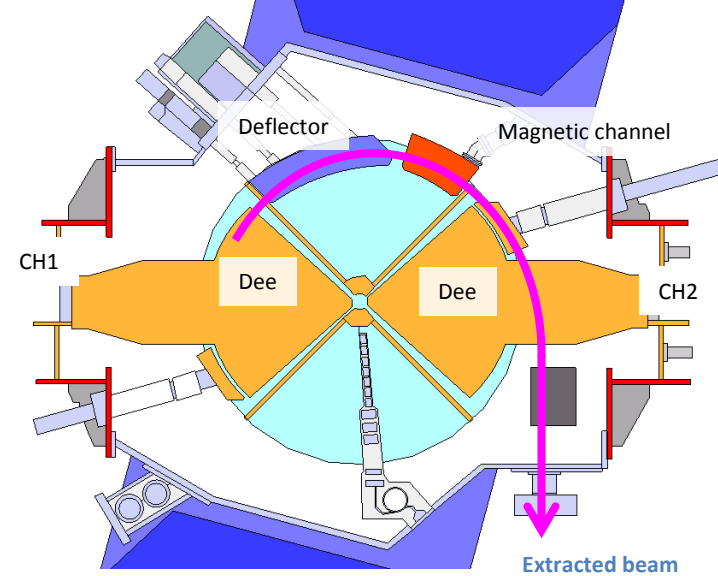
# 高調波バンチャーテスト回路



# The beam current and extraction efficiency.

(injection beam at inflector = 46.1 eμA )

Beam He<sup>2+</sup> 34 MeV

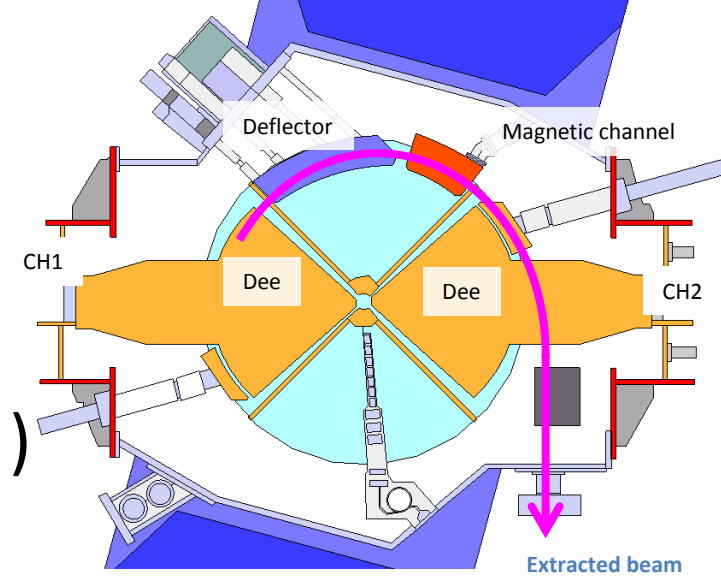


Buncher	Beam Current at Radius = 920 mm [eμA]	Extracted Beam Current [eμA]	Extraction efficiency
Off	9.6	8.6	90%
1 <sup>st</sup> harmonic	21.5	20.0	93%
1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> harmonic	23.4	21.5	92%
1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> , 3 <sup>rd</sup> harmonic	24.5	22.6	92%

The through pass efficiency from injection beam at inflector.

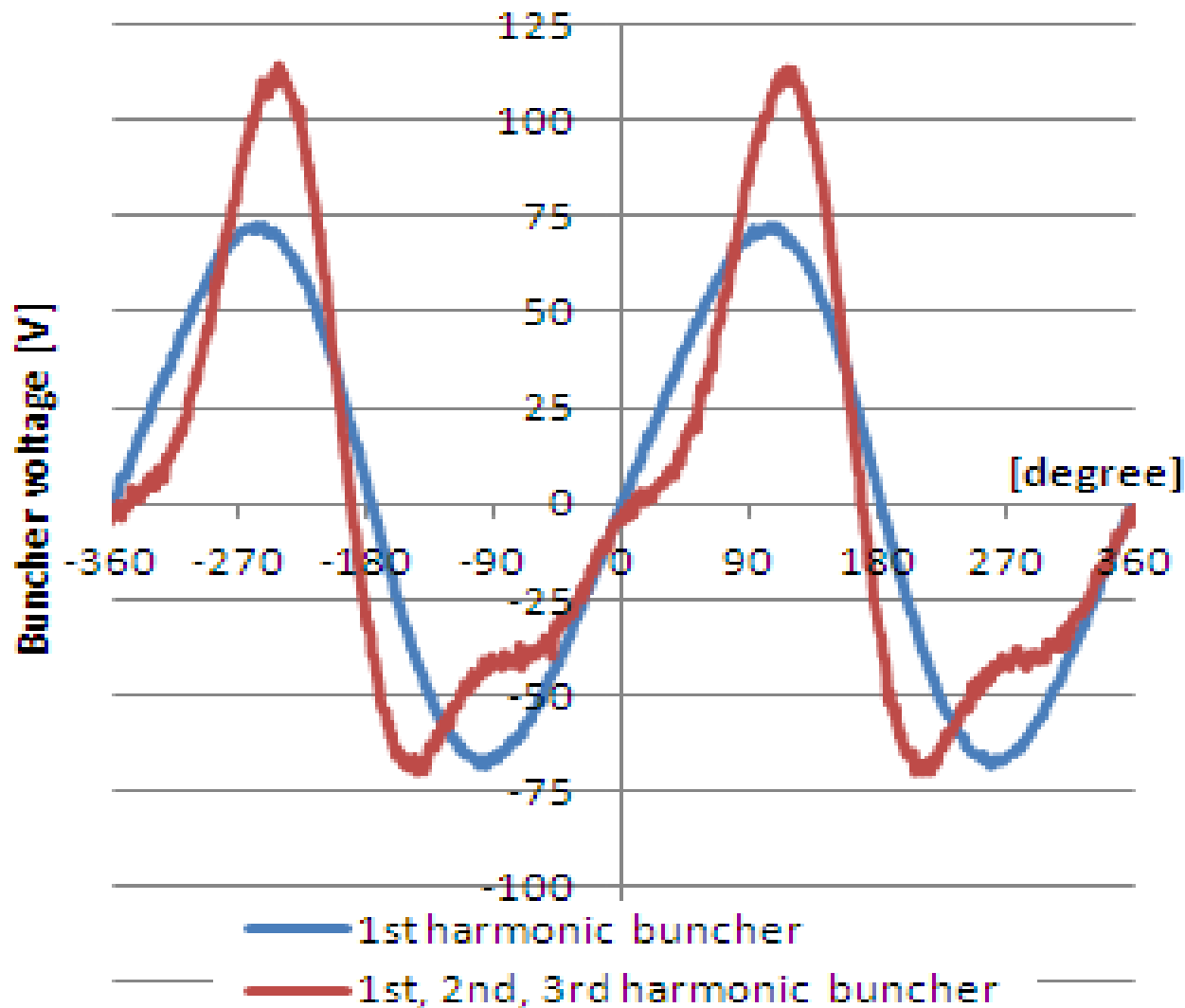
(injection beam at inflector =  $46.1 \text{ e}\mu\text{A}$  )

Beam  $\text{He}^{2+}$  34 MeV



Buncher	Radius = 920 mm	Extracted
Off	21%	19%
1 <sup>st</sup> harmonic	47%	43%
1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> harmonic	51%	47%
1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> , 3 <sup>rd</sup> harmonic	53%	49%

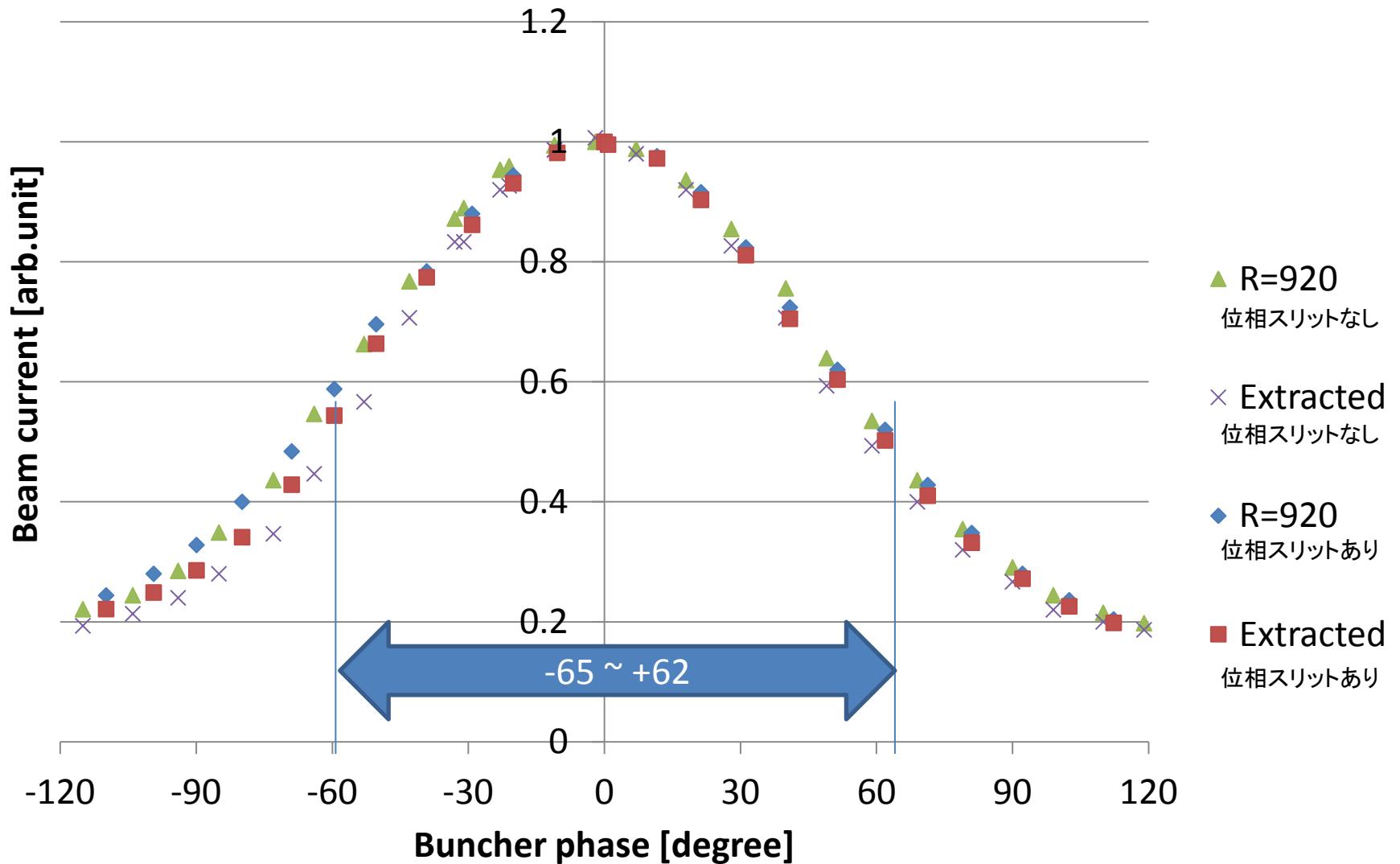
# The wave forms of buncher voltage.



＋のピーク電圧と  
－のピーク電圧  
が違う。  
高調波の位相が、  
基本波に対してゼロ  
ではない？  
ビーム強度はこの波  
形が最大であった。

位相分布幅と分布を  
確認してみる。

# 加速位相幅 (バンチャー入射位相)



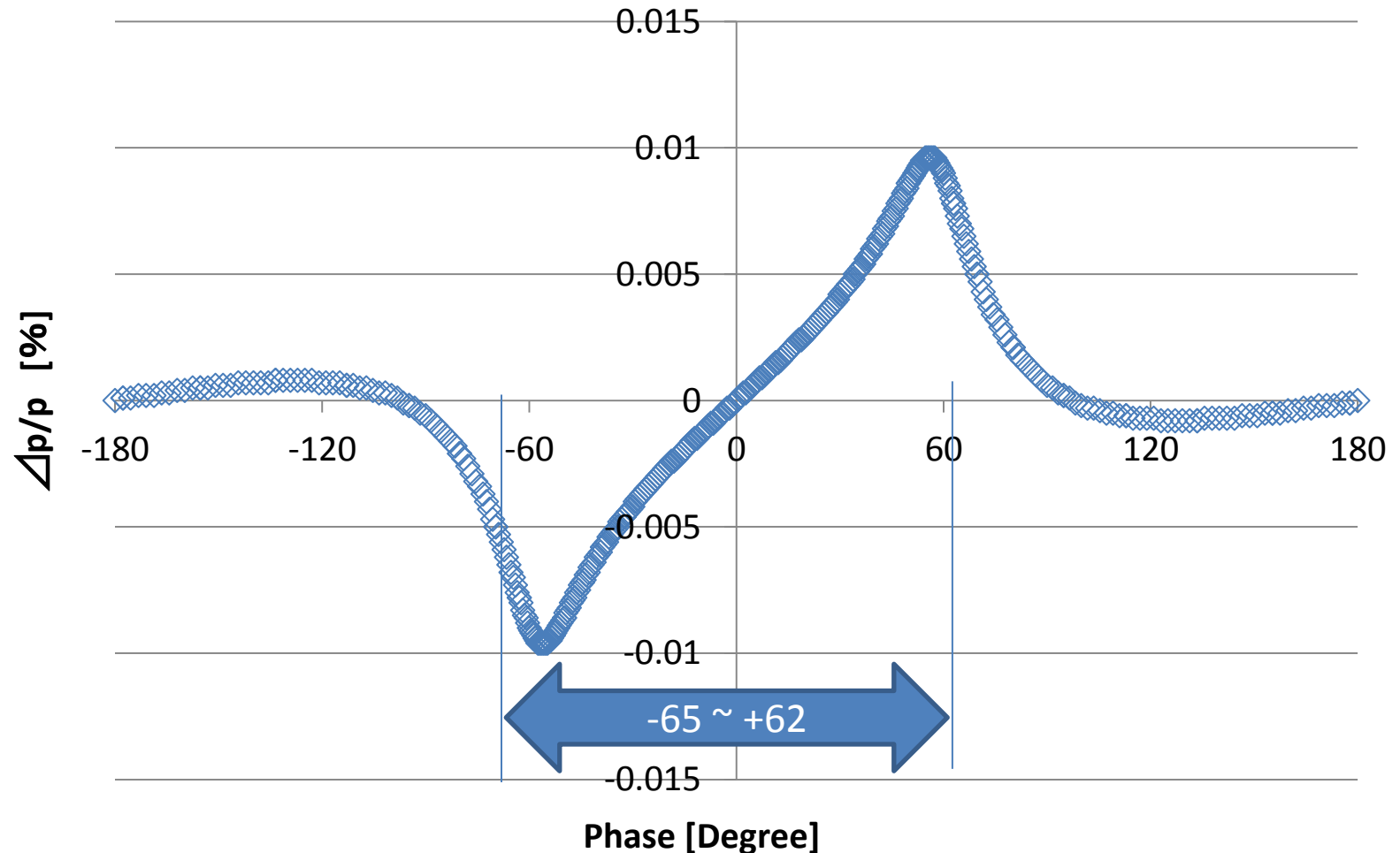


# ビームバンチシミュレーション\*

He<sup>2+</sup> 5.4 keV (34 MeV 加速入射エネルギー)

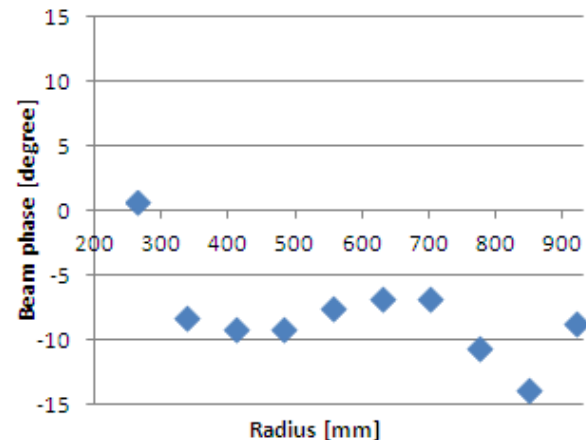
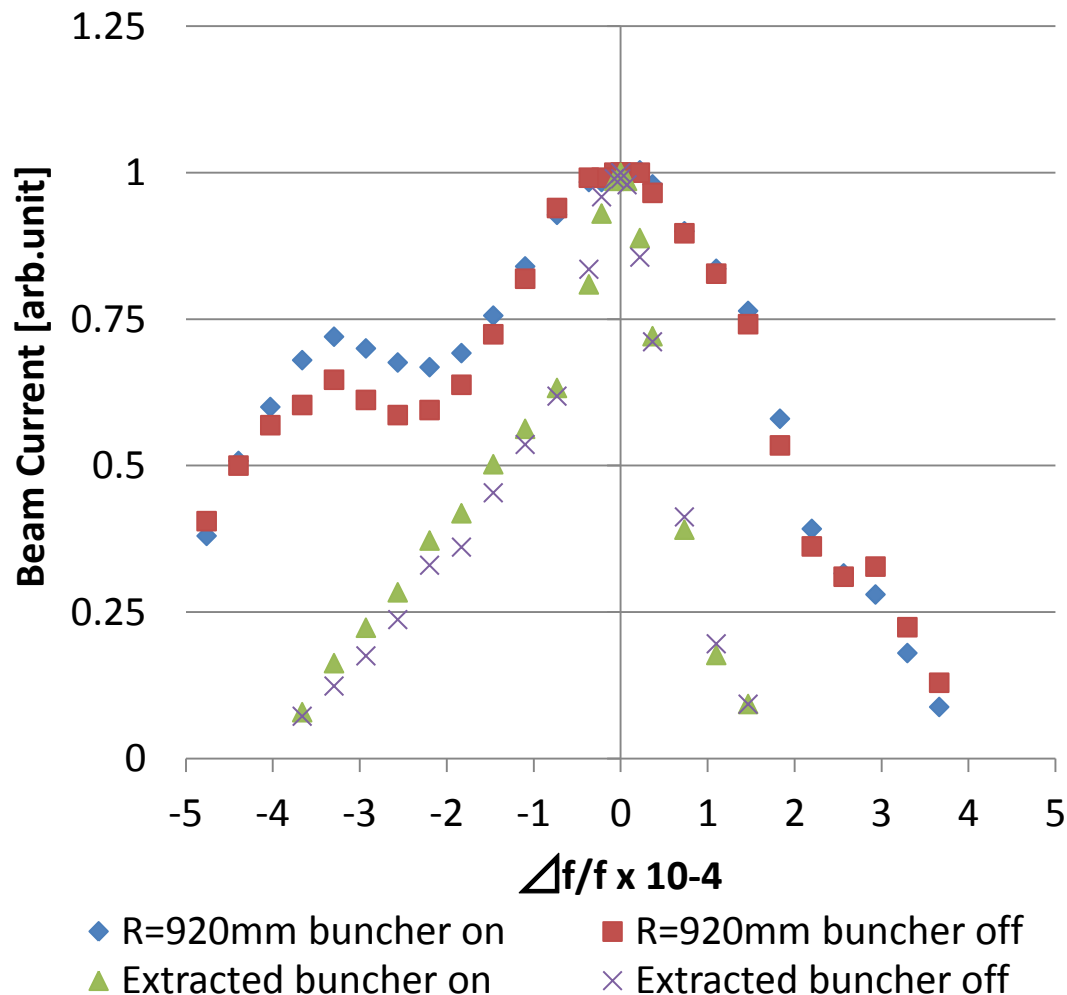
バンチャーMP間距離 L = 1.53 m

ビーム電流 50 eμA      ビーム径 φ5



\*R. Baartman, "SPUNCH - A space charge bunching computer code",  
Proc. 11th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, (1986) 238.

# 加速周波数スキャン



R=300以上では±5度の位相差

バンチをガウシアン分布として仮定  
 加速周波数13.65 MHz  
 ターン数は255ターン  
 25%減となる周波数は13.654 MHz  
 75%減となる周波数は13.652 MHz

これらの値より位相幅を算出すると、  
 50 degree  
 -Δf側では・・・データが足りなかった。

# 位相幅結果比較

測定方法	位相幅	
バンチャー位相シフト	127 [degree]	-65[degree]~62[degree] バンチャー電圧シミュレーションと合う
周波数スキャン	50 [degree]	バンチがガウシアンでない ので再測定予定。 再度、要検討。
バンチャーなしのビーム電流より算出 360x(加速Beam電流/入射Beam電流)	75 [degree]	46.1 e $\mu$ A=360 [degree] 9.6 e $\mu$ A= 75 [degree]

# まとめ

- 基本波の信号に2次、3次の高調波を合成入力し、バンチャーシステムによるビームテストを行った。
- サイクロトロンからの取出し効率を低下させることなく、増強できた。

基本波バンチャー	: 21.5 e $\mu$ A	入射効率: 47%
	↓	
高調波バンチャー	: 24.5 e $\mu$ A	入射効率: 53%

- 出力のピックアップ波形にはひずみ？が生じており、今後の検討課題となっている。
- 位相幅の測定を行った。  
結果、周波数スキャンでは、 $+\Delta f$ 側からの算出で50 [degree]であった。  
今後、 $-\Delta f$ 側で再測定を実施し確認する予定である。