

加速器(シンクロトロン)入門

+

放射光源

2025/3/25

加速器セミナー@阪大

KEK PF RFグループ

内藤大地

自己紹介

- 京大 高エネ研出身、 学生時代はKOTO実験に従事。
 - 荷電粒子検出器(CV)の開発、製造、インストール、エンジニアリングラン、1st 物理ラン
 - 博士：2016/5, 京大, “Development of a low-mass high-efficient charged particle detector for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ search”
 - D論執筆中にポストを用意するから加速器をやらないかと誘われ、加速器の道へ。
 - 2016-2018 J-PARC メインリングの電磁石電源グループに所属 (特任/特別助教)
 - 2019-現在 KEK PF RFグループに所属(助教)
 - 現在の所属：
 - 高エネルギー加速器研究機構
 - 加速器研究施設 加速器第六研究系 助教
- 内藤 大地
- Email : daichi.naito@kek.jp
- TEL : 029-864-5200 (PHS4771)

自己紹介

- 2016-2018 J-PARC メインリングの電磁石電源グループに所属 (特任/特別助教)
 - ・ 電磁石の多極磁場成分の高精度測定と多極磁場成分のビームへの影響の見積もり
 - ・ 新型電磁石電源の調整/制御アルゴリズム開発
 - ・ ビームの横方向運動のビーム調整
 - ・ 遅い取り出しでのビーム平坦性向上のためのフィードバックシステム開発
- 2019-現在 KEK PF RFグループに所属(助教)
 - ・ バンチ長測定用偏向空洞の設計、製造、性能評価、インストール
 - ・ 広帯域キッカーの設計、製造、性能評価
 - ・ バンチ位相モニターの開発
 - ・ PF 低電力RF制御システムの更新 (システム設計、インストール、性能評価、ビーム調整)
 - ・ 過渡的電圧変動 補償システムの開発、原理実証試験
 - ・ キッカー電磁石用パルス電源の開発 (途中で篠原くんに引き継ぎ)
 - ・ パルス電源用DC電源の開発

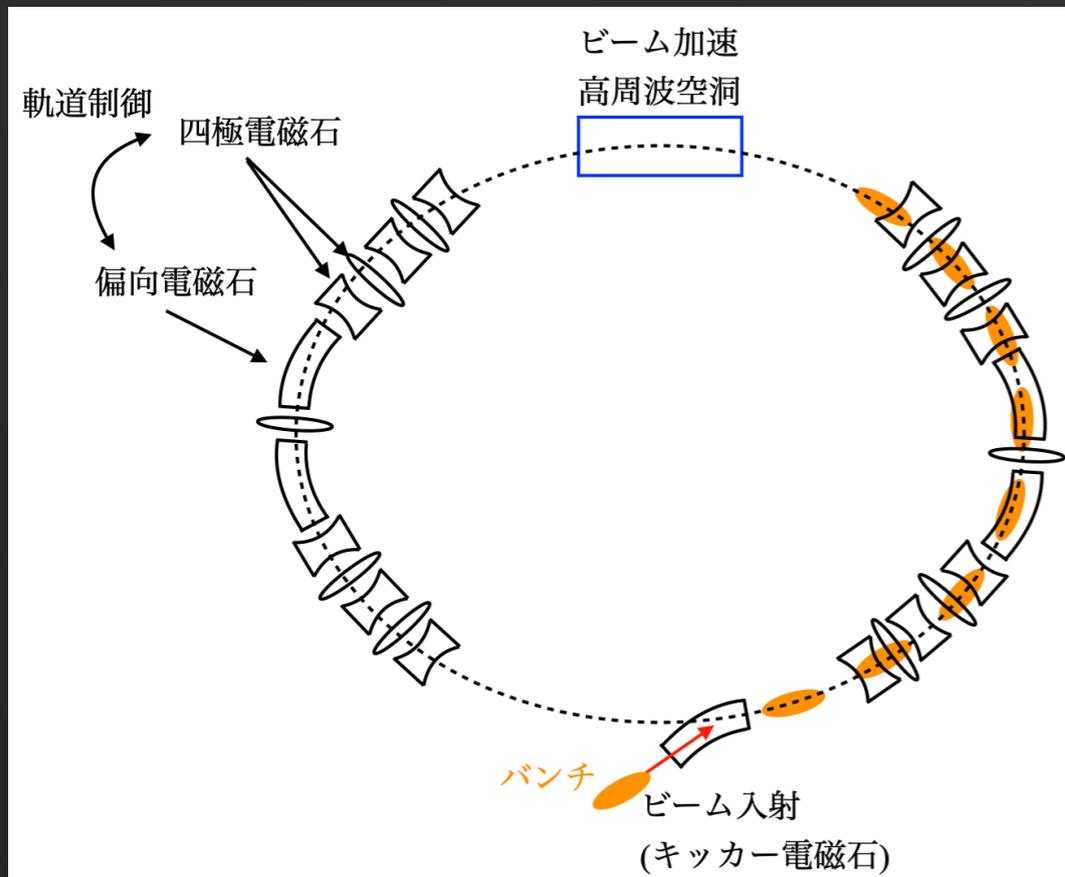
やったことをまとめると

- ・ ハードウェア：デジタル/アナログ/弱電/強電/高周波回路開発、磁場測定、空洞開発
- ・ ソフトウェア：様々な制御/フィードバック構築、回路/電磁場/加速器シミュレーション

- 非常にざっくりとシンクロトロン加速器を解説
 1. シンクロトロンの構成
 2. 電磁石と荷電粒子の運動
 3. 高周波空洞と荷電粒子の運動
- リング型電子加速器固有の事象を解説
 4. シンクロトロン放射 (放射光)
- 放射光源について解説
 5. 放射光源とは
 6. Photon Factory (PF)とは
- 放射光源の将来について紹介
 7. 次世代(第四世代)光源
 8. PFの将来計画
- 加速器への勧誘

1. シンクロトロン構成

<シンクロトロンの基本構成>

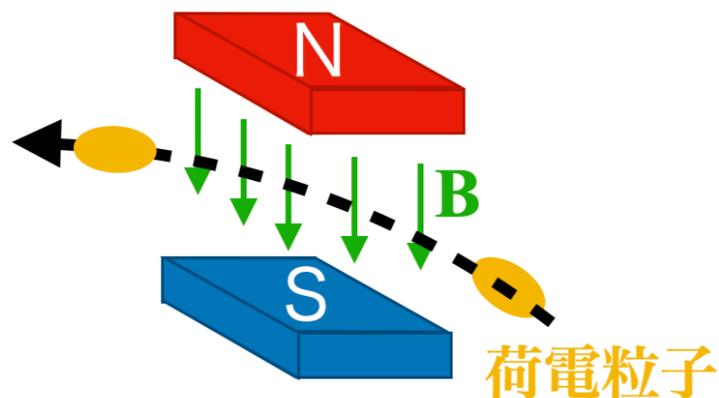


- 用語の定義：
 - バンチ：荷電粒子の塊
 - ビーム：バンチの連なり
- シンクロトロンの基本構成：
 - ビームが周回する真空パイプ(ビームダクト)
 - ビームを入射/出射するための電磁石
 - ビーム軌道を制御するための電磁石(2～8極電磁石)
 - ビームを加速するための高周波空洞

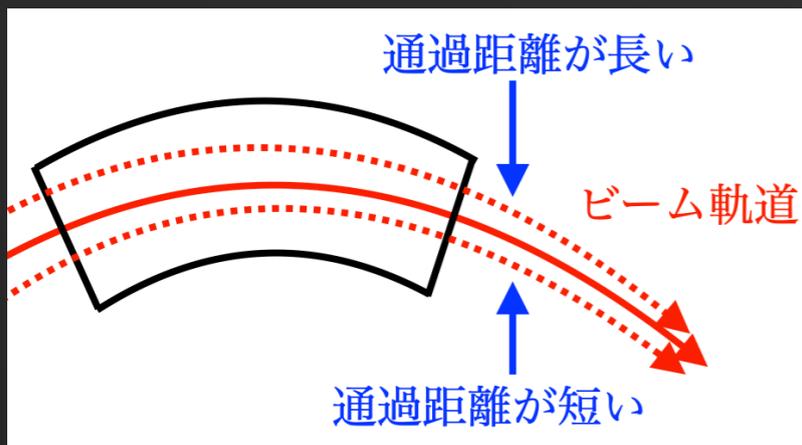
- 電磁石の配置や加速器の形状は異なるが, J-PARC, SuperKEKB, PFで基本構成要素は同じ。

2. 電磁石と荷電粒子の運動 1

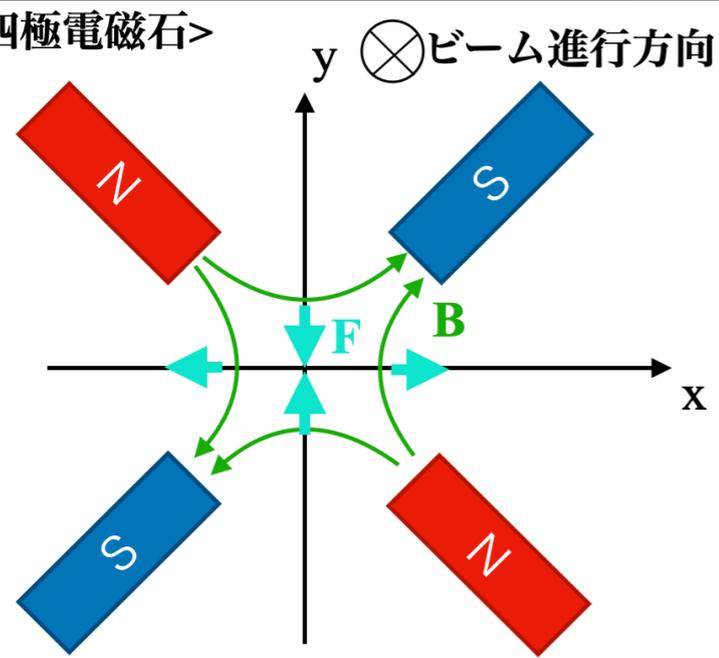
<偏向電磁石>



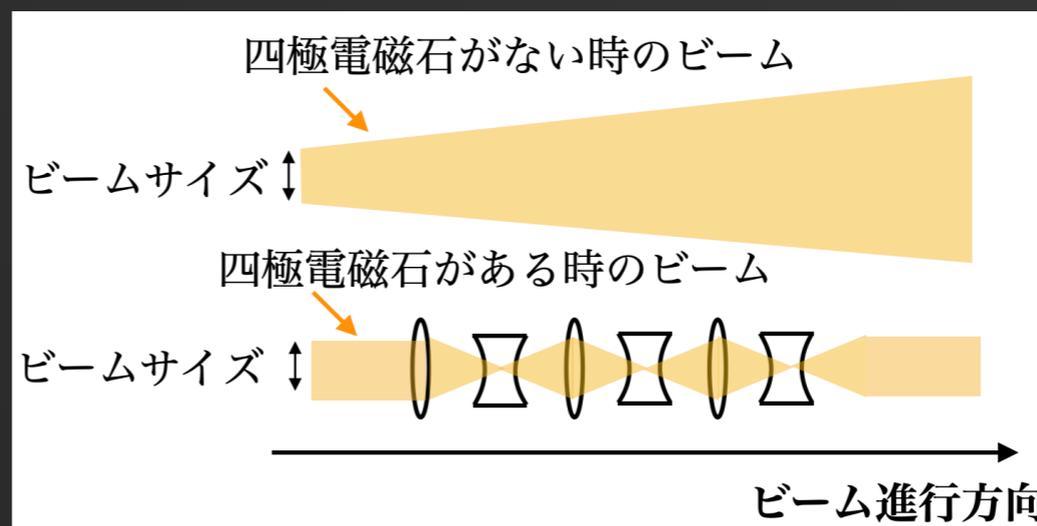
<弱収束原理>



<四極電磁石>



<強収束原理>



- 偏向電磁石 ($\mathbf{B}_0 = (0, B_0)$)の役割：

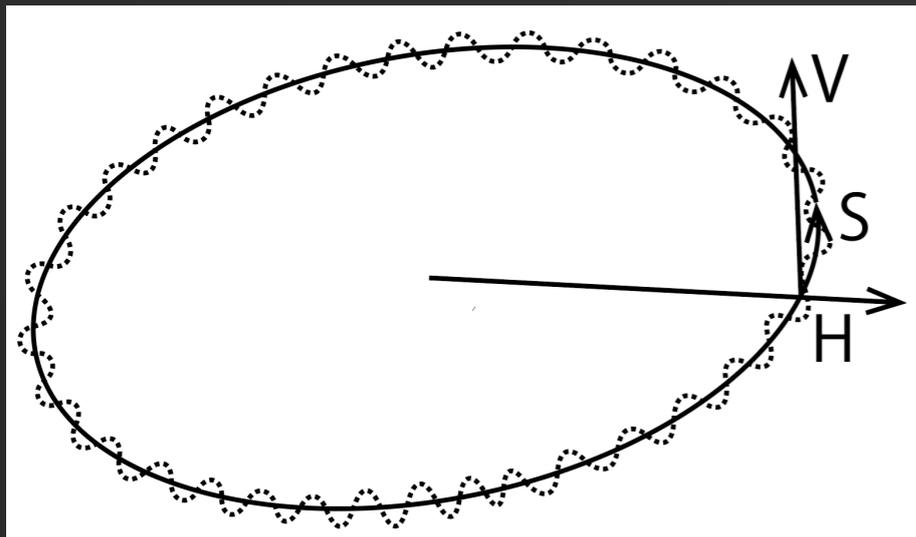
- ・ 荷電粒子を磁場で曲げて円型加速器の中を周回させる。
- ・ ビームの中心軌道： $p = eB_0\rho$ (p : 運動量, ρ : 曲率半径)
- ・ ビームを”弱く”収束する。

- 四極電磁石 ($\mathbf{B}_1 = (\pm k_1x, \mp k_1y)$)の役割：

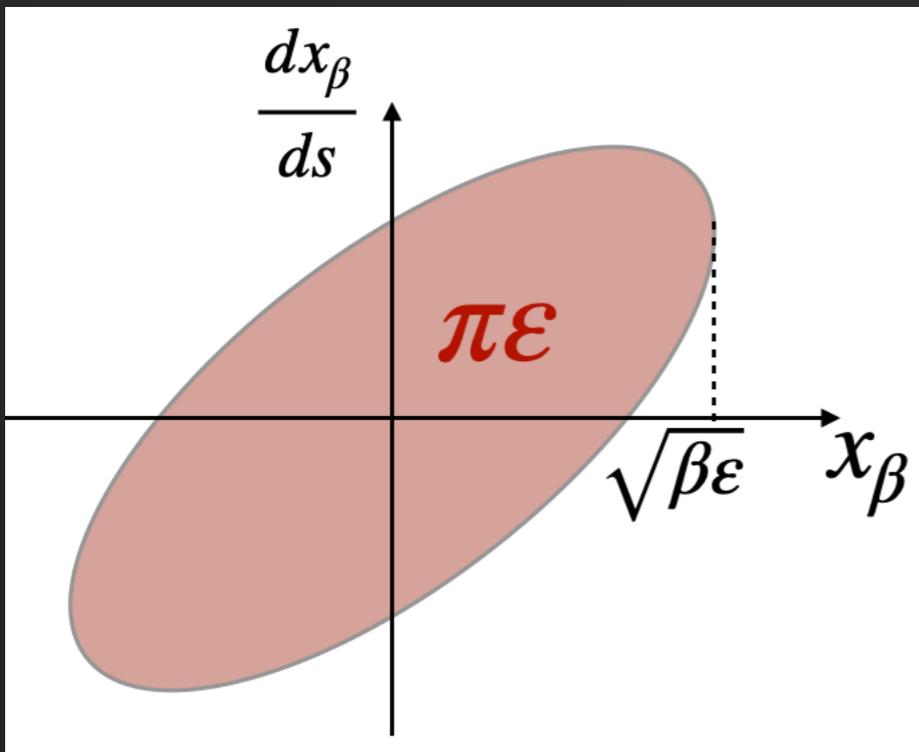
- ・ 磁極の配置によってビームを水平/垂直に収束し、垂直/水平に発散する。
- ・ 磁極の配置が異なる四極磁石を交互に置く。
=>ビームは収束と発散を繰り返しながら伝送される(強収束)。

2. 電磁石と荷電粒子の運動 2

<座標系とベータトロン振動>



<位相空間上のベータトロン振動>



- ビームの運動はHillの方程式に従う。

$$\frac{d^2x}{ds^2} + K(s)x = 0, \quad \frac{d^2y}{ds^2} + K(s)y = 0, \quad K(s+L) = K(s)$$

($K(s)$): 各点での磁場の収束力, L : 加速器の周長

- ビームは調和振動子的に振る舞う。

=> **ベータトロン振動と呼ぶ。**

- 調和振動子の場合の一般解:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \rightarrow x(t) = A \cos \omega t, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- ベータトロン振動の振幅 $x_\beta(s)$:

$$x_\beta(s) = \sqrt{\beta(s)\epsilon} \cos \phi(s), \quad \frac{d\phi(s)}{ds} = \frac{1}{\beta(s)}$$

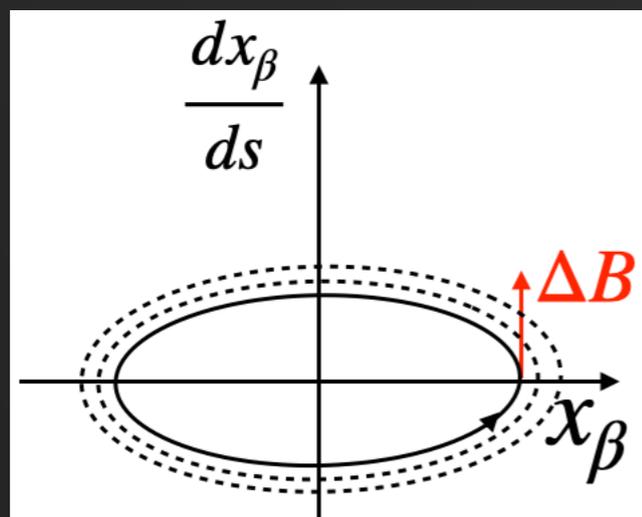
- 各点でのビームの運動は位相空間上で楕円軌道を描く。

- **楕円の面積は保存量で、エミッタンス(ϵ)と呼ばれる。**

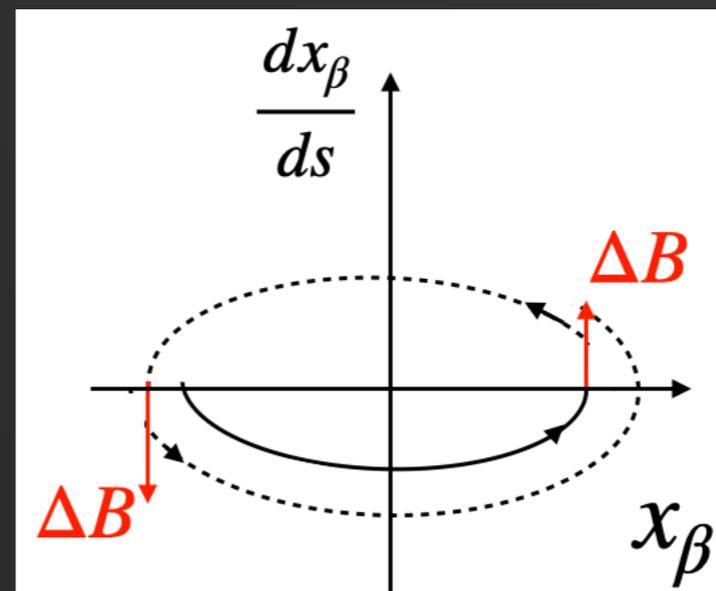
2. 電磁石と荷電粒子の運動 3

- ベータトロン振動の位相進み(チューン)は適切に選ばないと磁場エラーにより発振する。
 - ・ 磁場エラー: 磁石の設置誤差、磁石に流す電流のリップル、軌道/運動量のずれetc...
- 例えば...
 - ・ リング一周した時のベータトロン振動の位相進みが 2π の整数倍だと磁場エラーで発振。
=>整数共鳴と呼ぶ。
 - ・ ベータトロン振動の位相進みが 2π の半整数倍かつ磁場エラーが4極成分だと発振。
=>半整数共鳴と呼ぶ。
- 加速器の調整は共鳴との戦い(今回は省略)。
 - ・ 小さい偏向電磁石(ステアリング電磁石)で磁石の中心を通るように軌道補正。
 - ・ 六極磁石で運動量のずれの影響を補正。
 - ・ エミッタンスが増大しないようにベータトロン振動の位相進みを調整。

<整数共鳴>

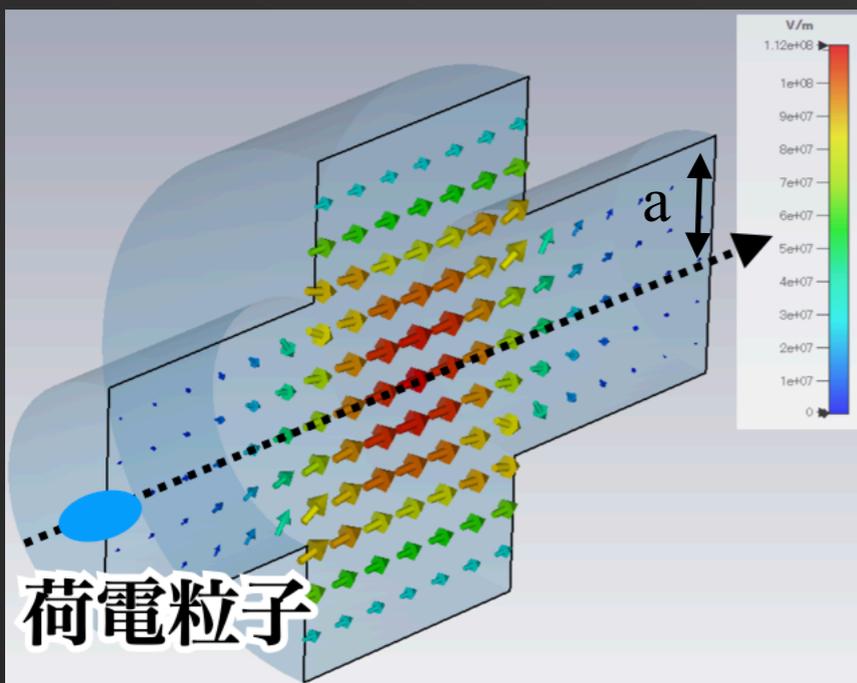


<半整数共鳴>



3. 高周波空洞と荷電粒子の運動 1

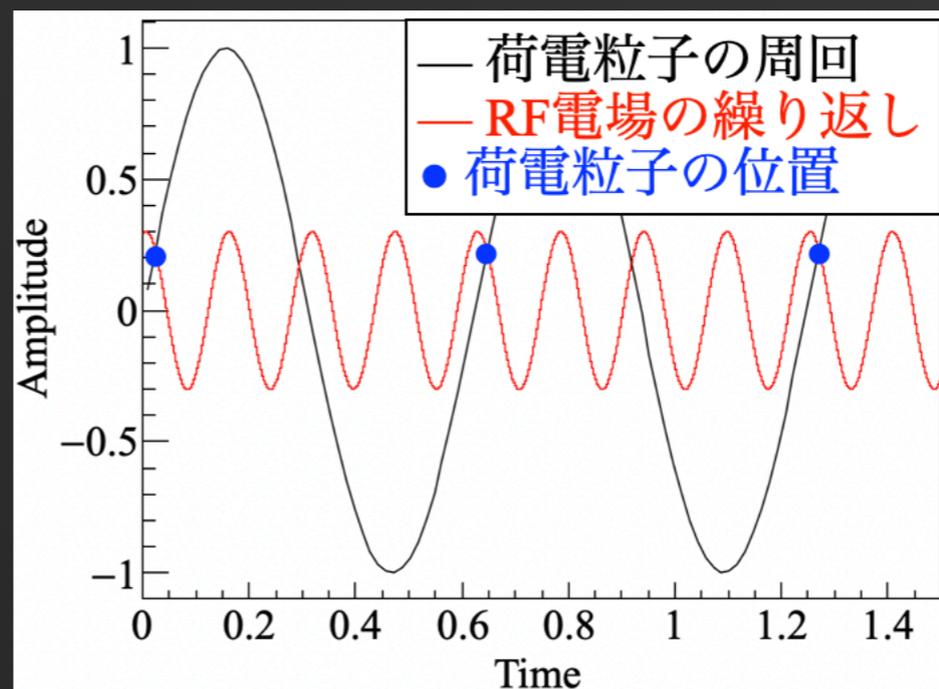
<空洞内の電場>



<高周波空洞の例>



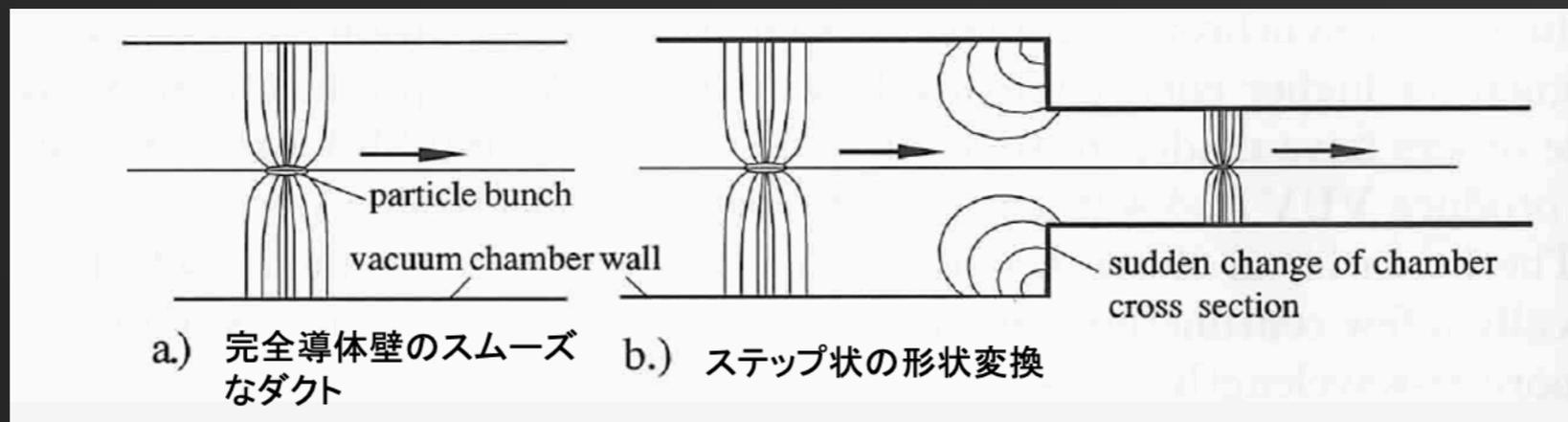
- 何故静電場加速だとダメか?
 - ・ 静電場：電力大、発熱大、1 MV/m程度で放電。
- 高周波空洞：ざっくり言うと側面に穴の空いた円筒。
- いわゆる「共振器」の一種。
 - ・ 周波数が f_c 以下の高周波電力を投入すると共鳴現象が発生。
 - ・ 遮断周波数: $f_c = \frac{c}{2\pi a} \rho$ (ρ は共振モードで異なる定数)
 - ・ (主に)銅でできたもの：常電導空洞 (NC)
 - ・ 超伝導を利用したもの：超伝導空洞 (SC)
- RF電場は荷電粒子の周回周波数と同期。
 - ・ 周波数のシンクロ条件： $f_{RF} = n \times f_{rev}$



3. 高周波空洞と荷電粒子の運動 (横道)

- バンチが高周波空洞を通過するとウェイク場が発生し、空洞内で共振が起こる。
 - ・ 加速電場と同じ共振モード：ビーム負荷, ビームを減速する。
 - ・ ビーム負荷の大きさはバンチ電荷に比例して大きくなる。
=>ビーム負荷を打ち消すためにより大きなRF電圧を投入する必要がある。
 - ・ それ以外の共振電磁場：寄生モード
 - ・ 寄生モードでビームが蹴られるとビームの運動が不安定になる。
=>**バンチ結合不安定性**と呼ぶ(水平/垂直/進行方向全部で起きる)
- ウェイク場はあらゆる形状的、電気的に不連続な場所で発生する。
 - ・ 真空ダクトの継ぎ目、電気抵抗の大きい真空ダクト、コリメーターetc...
- 加速器では如何にウェイク場の発生を抑えられるかが鍵。
 - ・ 空洞に寄生モードを吸収する機構(RF吸収体フェライト or SiC)を取り付けて減衰させる。
 - ・ バンチの振動を検出し、パルス電場(平行板電極等)で蹴り返す。

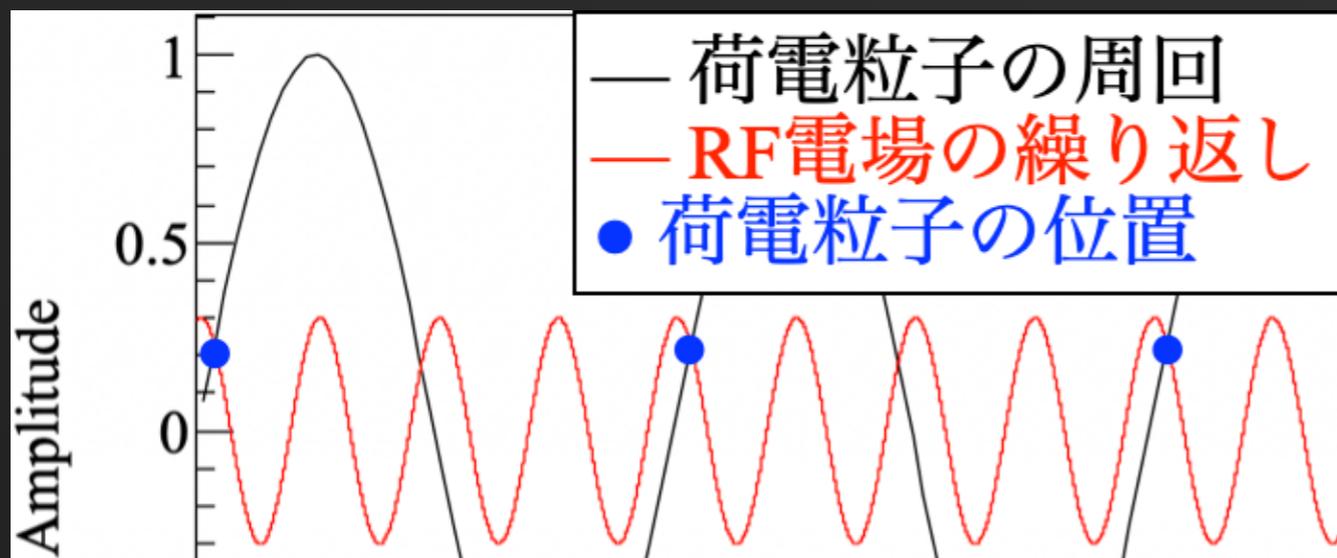
<ウェイク場の発生メカニズム[1]>



[1] H. Wiedemann, *Particle Accelerators*, Springer, 3rd edition

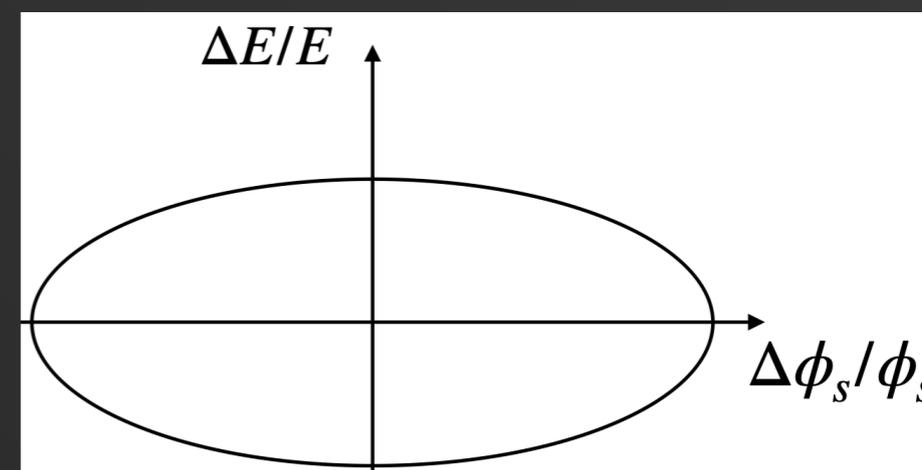
3. 高周波空洞と荷電粒子の運動 2

- 用語の説明：momentum compaction factor (α_c)
 - ・運動量が変化した時のビーム円周軌道の変化を決める量。
 - ・磁場による荷電粒子の曲げ角は運動量に依存する=>曲げ角が変わると周長が変わる。
 - ・ $\frac{\Delta C}{C} = \alpha_c \frac{\Delta p}{p} \rightarrow \frac{\Delta T}{T} = \left(\alpha_c - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{\Delta p}{p}$,
C: ビームの周回周期長, p: ビームの運動量, T: ビームの周回周期, γ : ローレンツ因子
 - ・ $\alpha_c - 1/\gamma^2$ は通常の加速器の場合、正の値。
- ビームをわざと図のようにRF電場の勾配がある所に置くと...
 - ・速い荷電粒子：周回周期が伸びてRF電場が小さくなる=>速度が減少する。
 - ・遅い荷電粒子：周期が短くなってRF電場が大きくなる=>速度が増加する。
- 荷電粒子は位相空間上を回転する。
=>シンクロトロン振動と呼ぶ。



<位相空間上の回転>

(ϕ_s は荷電粒子のRF位相)



ここまでのまとめ

- シンクロトロン中のビームの横方向運動：
 - ・ 電磁石の収束力によりベータトロン振動する。
 - ・ 磁場エラーがあるとベータトロン振動が発振する。
- シンクロトロン中のビームの進行方向運動：
 - ・ Momentum compaction とRF電場の復元力によりシンクロトロン振動する。
- ウェイク場によりバンチ結合不定性が起こる。
- 参考文献：
 - ・ OHO'12 久保 浄 「単粒子ビーム力学」
http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2012/1_kubo_kek_20120820.pdf
 - ・ OHO'19 杉本 寛 「ビームダイナミックスの基礎」
http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2019/02_Sugimoto_Hiroshi.pdf
- KEK 加速器では毎年9月、テーマを変えて加速器セミナーを開催(丸1日、zoom+現地)。
 - ・ 2022までのテキスト <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt5.html>
 - ・ 2022からのテキスト <http://accwww2.kek.jp/oho/textbook/from2022/>
 - ・ 基本的に同じ内容でもより新しい方が過去のテキストを参考に作られていて読みやすい。

電子加速器固有の現象

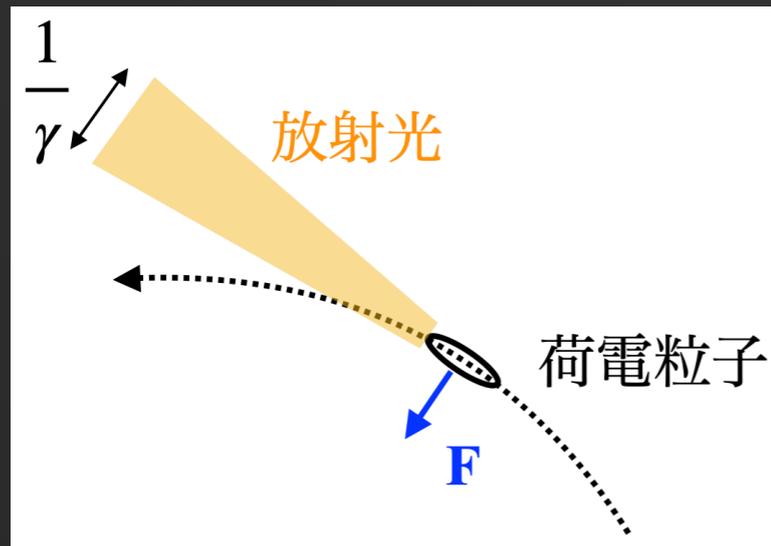
パラメータ	陽子	電子
電荷	+	-
質量	938 MeV	511 KeV
グループ	ハドロン	レプトン

電子加速器固有の現象

パラメータ	陽子	電子
電荷	+	-
質量	938 MeV	511 KeV
グループ	ハドロン	レプトン

4. シンクロトロン放射 (放射光)

<シンクロトロン放射の発生原理>



- 荷電粒子が進行方向と垂直に加速度を受けると、前方に向かって $1/\gamma$ で広がった電磁波が放出される。
 - ダイポール振動で振動方向から垂直に発生した電磁波がローレンツブーストされて前方に集中するイメージ。

- 放射パワー(P_γ) :
$$P_\gamma = \frac{2r_e mc^3}{3} \frac{\gamma^4}{\rho^2} = \frac{2e^2 r_e}{3} \frac{E^2 B^2}{m^3 c^3} \quad (r_e \text{は古典電子半径})$$

- 放射パワーは荷電粒子の質量の3乗に反比例するため、陽子では無視できる。
- 電子加速器ではシンクロトロン放射によって失ったエネルギーを加速空洞で補っている。

※RF電圧の大部分は前述したビーム負荷をキャンセルするのに使われている。

<様々な加速器の設計パラメータ>

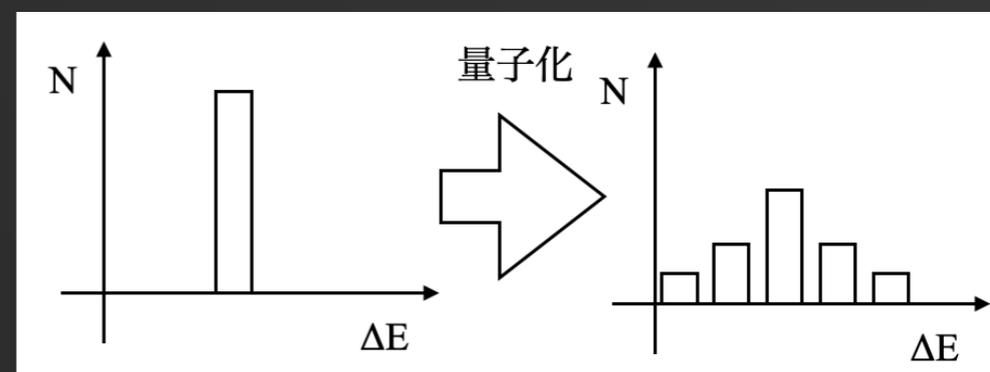
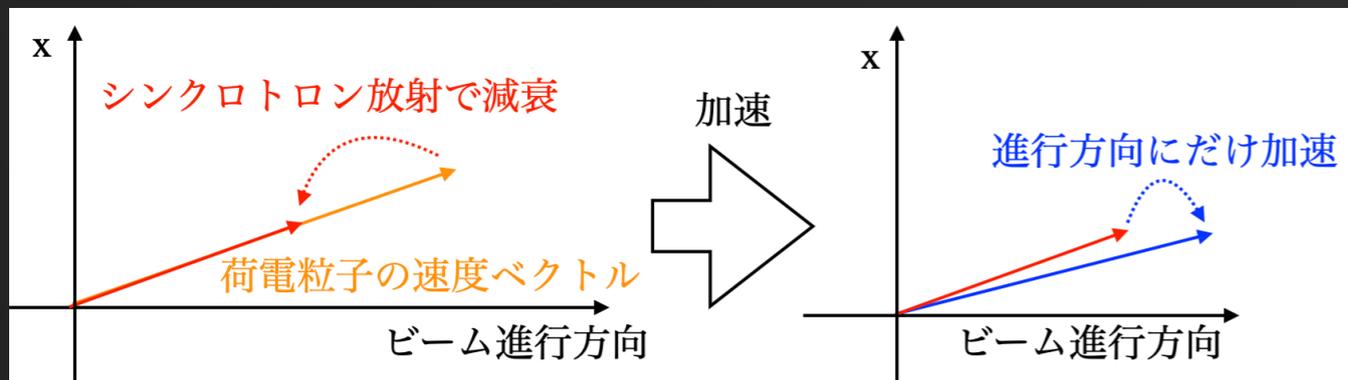
	Beam energy	Beam current	# of cavity	Energy loss/turn	RF voltage
SuperKEKB(陽電子リング)	4 GeV	3.6 A	20	1.76 MeV	9.4 MV
SuperKEKB(電子リング)	7.007 GeV	2.6 A	8(NC)+12(SC)	2.43 MeV	15 MV
PF 2.5 GeV リング	2.5 GeV	0.45 A	4	298 keV	1.7 MV
NanoTerasu	3 GeV	0.4A	4	621 keV	3.6 MV
SPring-8	8 GeV	0.1 A	32	12.43 MeV	13.9 MV

4. シンクロトロン放射の影響

- 放射減衰
 - ・ 電子の失うエネルギーが E^2 に比例。
 - ・ エネルギーの高い粒子はより遅くなりやすい。
=>シンクロトロン振動が減衰。
 - ・ 加速空洞で加速される時に荷電粒子の傾きが減少。
=>ベータトロン振動が減衰。
- 放射励起
 - ・ シンクロトロン放射によるエネルギーの低下は光子の放出に伴う量子過程。
 - ・ シンクロトロン振動(運動量変動)の振幅が増大。
=>電磁石での曲げ角の変動が増加。
=>ベータトロン振動の振幅が増大。
- 減衰と励起が釣り合った所が実際のビームサイズになる。
=>平衡エミッタンスと呼ぶ。

<ベータトロン振動の放射減衰>

<電子の失うエネルギーの量子化>

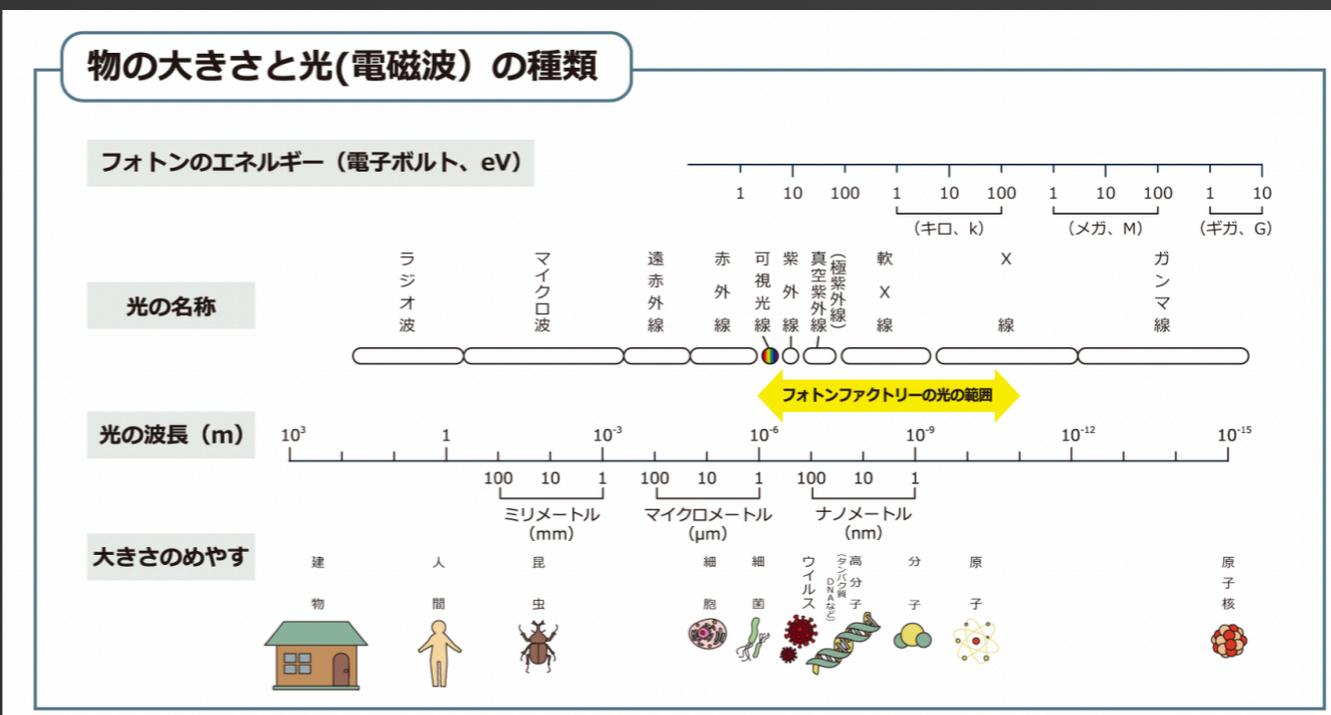
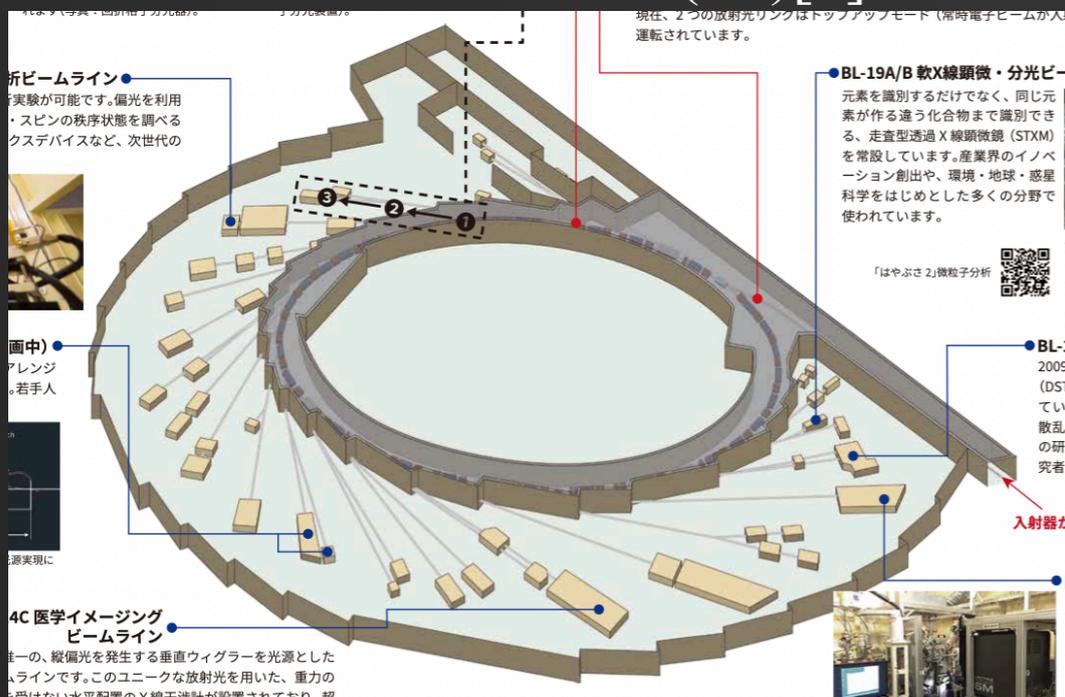


5. 放射光源とは？

- シンクロトロン放射光を利用して実験を行う施設。
- 2000年代からはより細く、より高い強度、より高いエネルギーの放射光を得るため、アンジュレーターやウィグラーを使って放射光を発生させるのが主流。

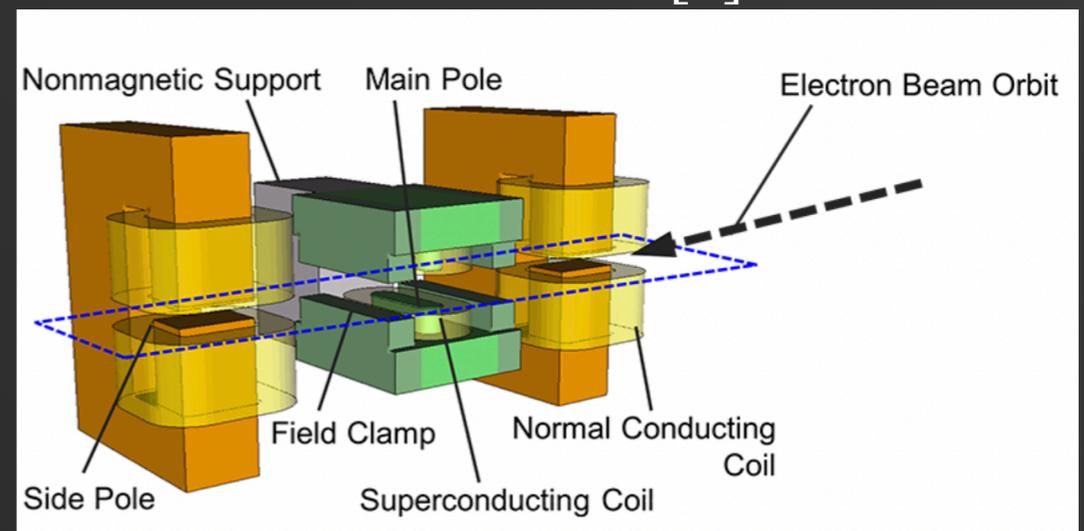
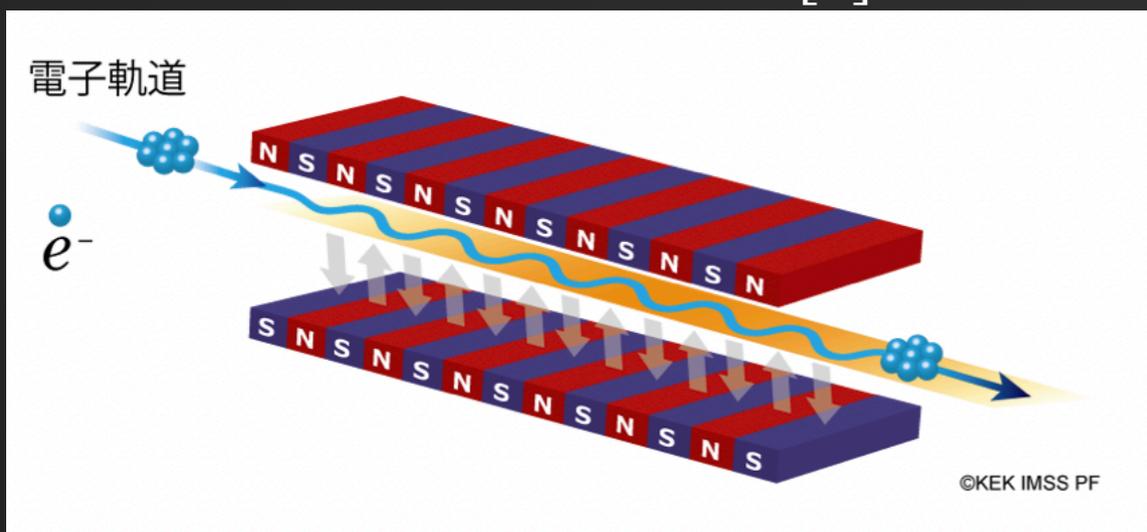
<放射光源の例(PF)[2]>

<光の種類 [2]>



<アンジュレーター[2]>

<ウィグラー[3]>



[2] <https://www2.kek.jp/imss/pf/about/sr/pf1.html>

[3] https://www.hitachi.co.jp/products/energy/nuclear/accelerator/research_accelerator/index.html

5. 放射光源とは？

<放射光実験の種類 [2]>

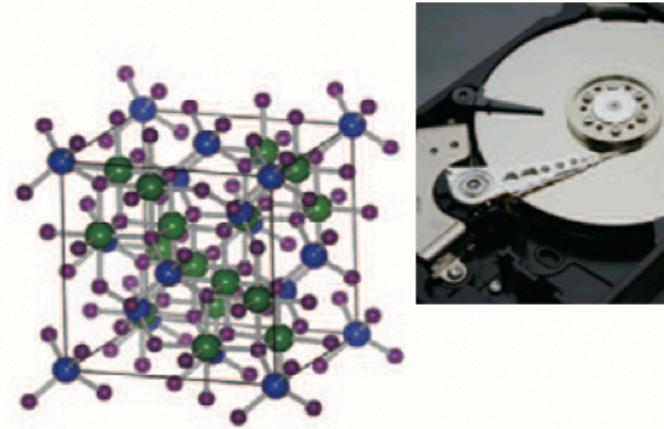
回折・散乱：原子・分子によって光は散乱，または回折されて像が形成される。像を解析すれば原子・分子の配列がわかる。

分光：原子・分子によって吸収されたり，放出されたりする光の波長を調べることによって，物質の電子状態や化学結合の情報がわかる。

光照射効果：光によって化学反応が引き起こされることを利用して，反応を制御して新しい物質を作ったり，化学反応機構の情報がわかる。

物質を見る

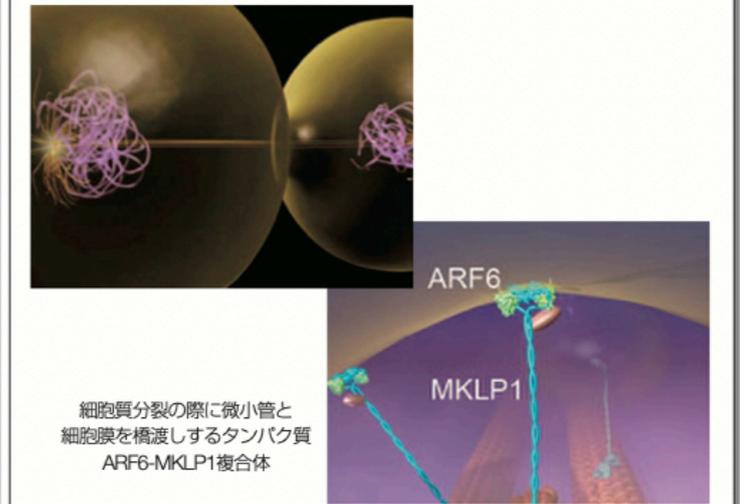
ハードディスクの小型化・大容量化の基礎となった巨大磁気抵抗効果や高温超伝導など、物質があらわす特異な性質は、物質中で原子がどのように並んでいるか、電子がどのように運動しているかに深く関係しています。物質の性質の起源を知ることは、新しい機能性物質を設計するためにも重要な情報です。



白金フリーの次世代磁気記録材料として期待されているコバルトフェライトの原子配置（青：鉄，緑：鉄またはコバルト，紫：酸素）

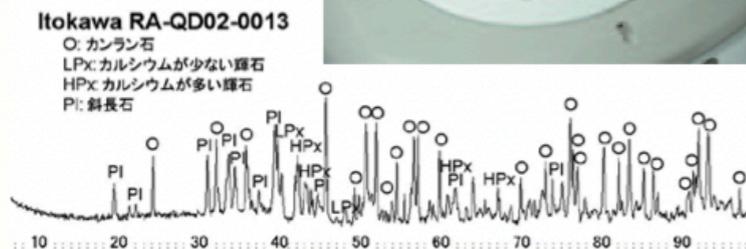
生命を見る

生命活動は、タンパク質と呼ばれる複雑で多種多様な分子によって行われています。この精密な分子機械、タンパク質がどのように働いているか、放射光によって次々と解明されています。またタンパク質の立体構造の情報は、精密な薬剤設計や品種改良などにも役立っています。



地球・宇宙・環境を見る

地球の中心部と同じ高温高压条件を地上の極微小領域で再現して物質の構造を調べる研究や、環境試料のような低濃度の試料、隕石や探査機で採取された試料などの微量で貴重な試料の分析には、高輝度光で非破壊測定が可能な放射光が威力を発揮します。

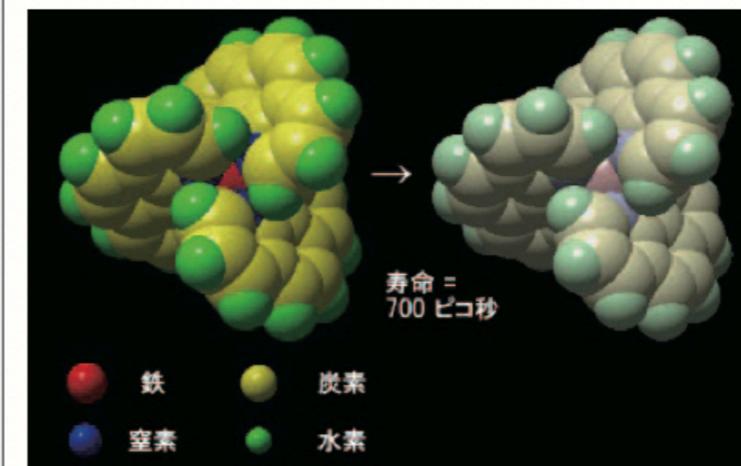


(写真) フォトンファクトリーで分析されたはやぶさ回収試料。イトカワの形成史を知る手がかりとなった。
(データ) X線回折実験により得られた構成鉱物の種類

提供：東北大学

速い反応を見る

放射光はパルス状の光なので、物質が刻々と変化する様子をストロボ写真のように捉えることができます。フォトンファクトリーでは、大強度のパルスX線源であるアドバンスリング (PF-AR) を用いて、速い反応 (~100ピコ秒=100億分の1秒) を追跡できます。



レーザー励起によって700ピコ秒の間だけ磁性が出現する分子磁石、鉄フェナントロリン錯体

[2] <https://www2.kek.jp/imss/pf/about/sr/pf1.html>

6. PFとは1

- PF : Photon Factoryの略。
 - ・ PF 2.5 GeV ring (PF), PF Advanced ring (PF-AR)の2台の放射光源から構成。
- 共通のLinacから電子ビームを入射して蓄積。
 - ・ LINACではPF, PF AR, SuperKEKB 電子/陽電子リングの4ヶ所にビームを供給。
 - ・ 加速器の磁場/電場を変更して最大12.5 Hzでビームを振り分けることが可能。
 - ・ ビームは一気に入射されるのではなく、少しずつ継ぎ足して規定電流値まで貯める。
 - ・ 大電流のバンチを作る、輸送するのが大変なため。

<KEKの航空写真 [4]>

<Linacの概略図 [5]>



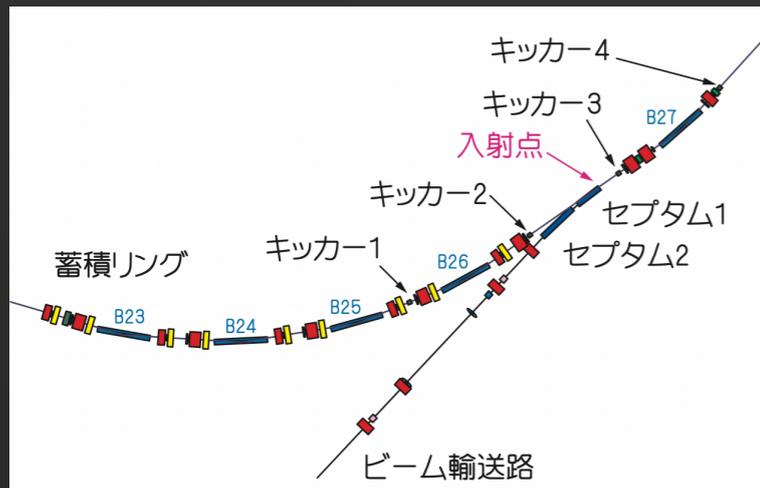
	Beam energy
SuperKEKB(陽電子リング)	4 GeV
SuperKEKB(電子リング)	7.007 GeV
PF 2.5 GeV リング	2.5 GeV
PF AR	6.5 GeV

[4] <https://www.kek.jp/ja/about/pr/image/31344>

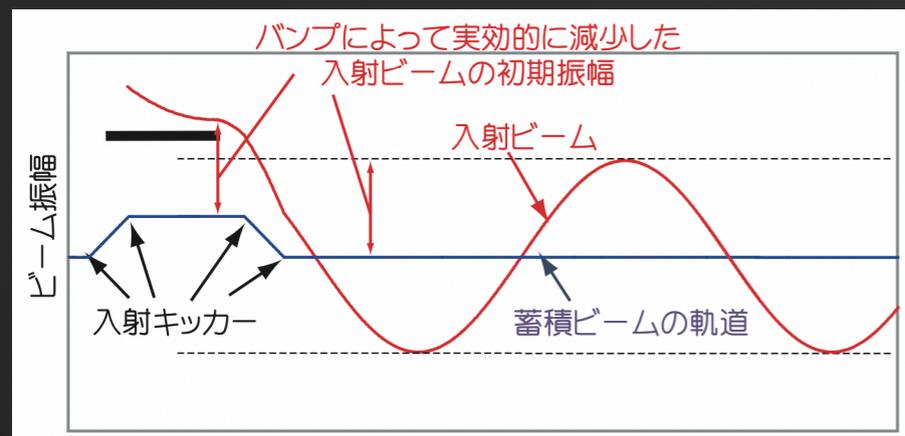
[5] <https://www2.kek.jp/openhouse/contents/denshi.html>

横道：ビームの入射と蓄積

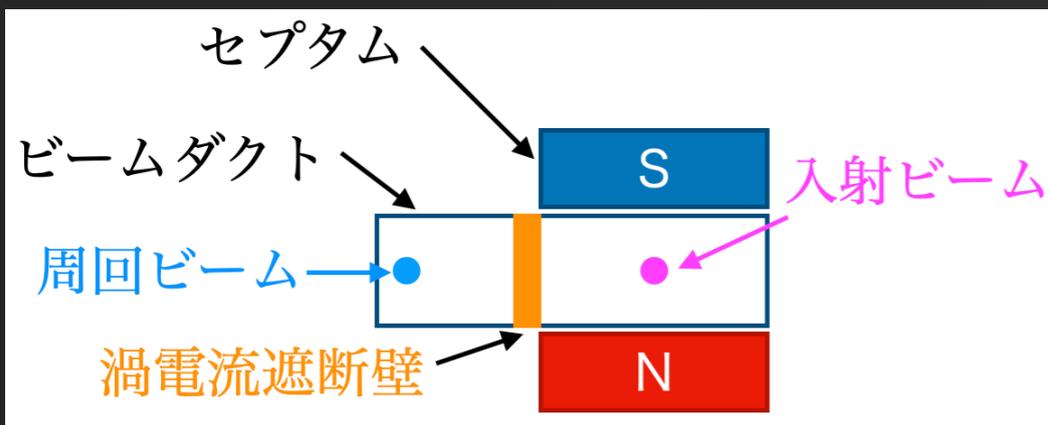
<ビーム入射部の配置 [6]>



<入射スキーム [6]>



<セプタム電磁石の概略図>



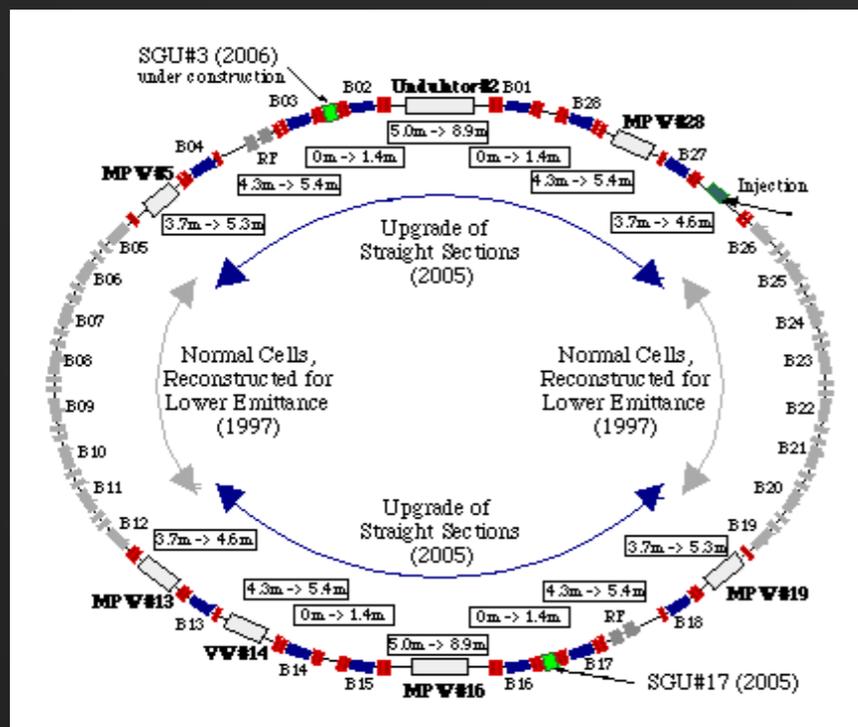
- セプタム, キッカー：
 - ・ パルスの的に磁場を発生させる偏向電磁石。
 - 1-a：セプタムでビームを入射。
 - 1-b：キッカーで周回ビームを入射ビームに寄せる。
 - 2. 放射減衰によって入射ビームの振動が減衰する。
-
- 蓄積ビームは時間とともに減少するので、常に一定のビーム電流になるようにビームを継ぎ足している。
 - ・ シンクロトロン放射でエネルギーを確率的に大損失
 - ・ 残留ガスと散乱
 - ・ バンチ内で電子同士が散乱
 - キッカー自体が加速器の性能を決めることがある。
 - ・ パルス磁場の発生=>渦電流により磁場エラーが発生
 - ・ ダクトを電気抵抗が高い材質にして渦電流抑制
 - ・ ウェイク場の増大
 - ・ ダクトの発熱が増大

[6] <http://accwww2.kek.jp/oho/OHO text archives 2005-2011/OHO08 web final/03 harada.080819b.pdf>

6. PFとは2

- PF 2.5 GeV ring (PF) :
 - マルチバンチ運転, 軟X線光源。
 - 1982年利用運転開始、現存する世界最古の放射光源。
 - 光源用ハードウェアの多くはPFで開発され、その後世界中に広がっていった。
 - 放射光科学の発展に貢献してきた、2009年にはノーベル化学賞も受賞(Ada Yonath氏)。
 - 2005年に最後の大改造を行い、現在は2.5 世代光源と呼ばれている。
 - 第一世代：素粒子実験加速器に間借り
 - 第二世代：光源専用マシン
 - 第三世代：アンジュレーターがメイン放射光源の光源マシン
 - 第四世代：回折限界光源 (後で解説)

<PFの概略図>



<ビームパラメーター>

パラメータ	PF	PF AR
エネルギー	2.5 GeV	6.5 GeV
周長	187 m	377 m
RF周波数	500.1 MHz	508.6 MHz
バンチ数	250	1
ビーム電流	0.45 A	0.05 A
ビームライン数	39	8
自然エミッタンス	34.6 nm · rad	237 nm · rad

6. PFとは3

- PF Advanced ring (PF-AR) :
 - シングルバンチ運転, 硬X線光源。
 - 光の照射されるタイミングが一意に決まる。
 - 試料が光を照射してからの時間発展が測定可能。
- トリスタンの前段加速器を改造して使用、PFよりも5年ぐらい若い。
- 場所の制約からビームラインは少ない。
- 2002年に最後の大改造。
- マルチバンチ光源でもタイミング実験をしたいという要望はある。
- PFでは~1 MHzで電磁石を使ってバンチを蹴り、一つのバンチからの光だけを見る手法を開発中 => (たぶん)篠原くんのトークにある?

<PF ARの概略図[7]>



<ビームパラメーター>

パラメータ	PF	PF AR
エネルギー	2.5 GeV	6.5 GeV
周長	187 m	377 m
RF周波数	500.1 MHz	508.6 MHz
バンチ数	250	1
ビーム電流	0.45 A	0.05 A
ビームライン数	39	8
自然エミッタンス	34.6 nm · rad	237 nm · rad

[7] <https://www2.kek.jp/ja/tour/electron-31.html>

7. 次世代(第4世代)光源～世界の潮流～

- ユーザーのニーズ：輝度が高い(点光源に近く、強度が高い)光源が欲しい！
- 放射光の輝度：放射光のエミッタンス(位相空間体積)に反比例。
- 放射光固有の位相空間面積： $\varepsilon_{ph} = \frac{\lambda}{4\pi}$ (λ ：光の波長)
 - ・ 例え電子ビームのエミッタンスがゼロでも発生する放射光のエミッタンスは制限される。
- ビームのエミッタンスを放射光の固有エミッタンスまで下げたマシン：
 - ・ **回折限界光源、第四世代光源と呼ぶ。**

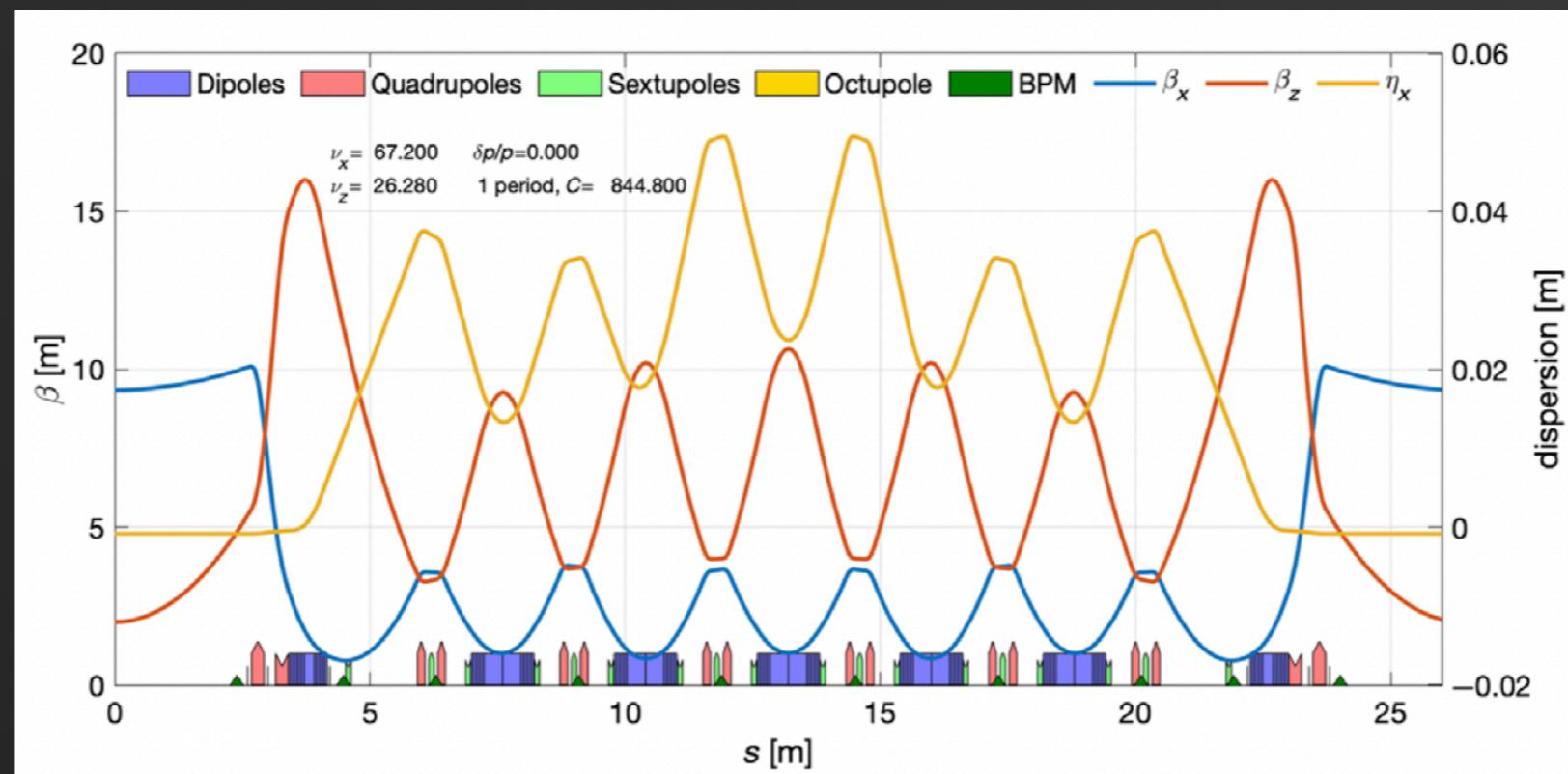
<第四世代光源一覧>

施設名	国	自然エミッタンス	周長	エネルギー	ビーム電流	ステータス
ESRF-EBS	フランス	0.135 nm · rad	844 m	6 GeV	200 mA	運転中
MAX-IV	スウェーデン	～0.25 nm · rad	528 m	3 GeV	500 mA	運転中
APS-U	アメリカ	0.032 nm · rad	～1100 m	6 GeV	200 (?) mA	ビーム調整中
SIRIUS	ブラジル	0.25 nm · rad	518.4 m	3 GeV	350 (200) mA	ビーム調整中
HEPS	中国	～0.06 nm · rad	1360 m	6 GeV	200 mA	建設中?
4GSR	韓国	0.062 nm · rad	799.3 m	4 GeV	400 mA	建設中
SLS-II	スイス	～0.15 nm · rad	288 m	2.7 GeV	400 mA	建設中
Elettra2.0	イタリア	～0.25 nm · rad	259 m	2 GeV	400 mA	建設中
SPring-8-II	日本	0.05 nm · rad	1435 m	6 GeV	100 mA	検討中
PETRA-IV	ドイツ	～0.015 nm · rad	2304 m	6 GeV	100 mA	検討中
DIAMOND-II	イギリス	0.16 nm · rad	560.6 m	3.5 GeV	300 mA	検討中
ALBA-II	スペイン	0.2 nm · rad	268.8 m	3 GeV	300 mA	検討中
SOLEIL-II	フランス	0.084 nm · rad	354 m	2.75 GeV	500 mA	検討中

7. 次世代光源～どうやってエミッタンスを下げるか～

- エミッタンスの平衡条件：放射減衰率=放射励起率
- エミッタンスを下げるには？
 - ・ 放射励起によるベータトロン振動の励起を抑える。
 - ・ 偏向電磁石内での運動量の違いによる曲げ角の変動をできるだけ抑える。
 - ・ 機能複合型電磁石を用いる (quadrupole, gradient dipole)。
 - ・ できるだけ偏向電磁石の長さを小さくして最適条件を達成しやすくする。

<第4世代光源の磁石配置の例[8]>



[8] P. Raimondi and S. M. Lizzuo, PRAB 26, 021601 (2023)

7. 次世代光源～何がチャレンジングか～

- 偏向電磁石内で運動量の違いによる曲げ角の変動をできるだけ抑える。
 - ・ 四極電磁石, 六極電磁石でより強い磁場を発生させる必要がある。
 - ・ 細いダクト内径(直径～20 mm)が必要 (cf pfは～100 mm)。
 - ・ **ビームの物理的な安定領域が非常に狭い。**
 - ・ momentum compaction factorが非常に小さくなる($\alpha \sim 10^{-3} \rightarrow \sim 10^{-4}$)。
 - ・ 放射減衰の効果が弱くなる。
 - ・ **バンチ結合不安定性が起きやすい。**
- とてもエミッタンス(=粒子密度が高い)が小さい。
 - ・ **バンチ内での電子同士の散乱でエミッタンス増大が起きてしまう。**
 - ・ 残留ガスとビームの散乱も問題。

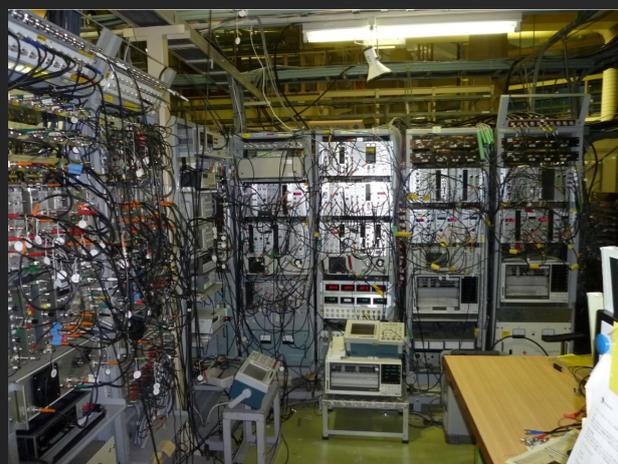
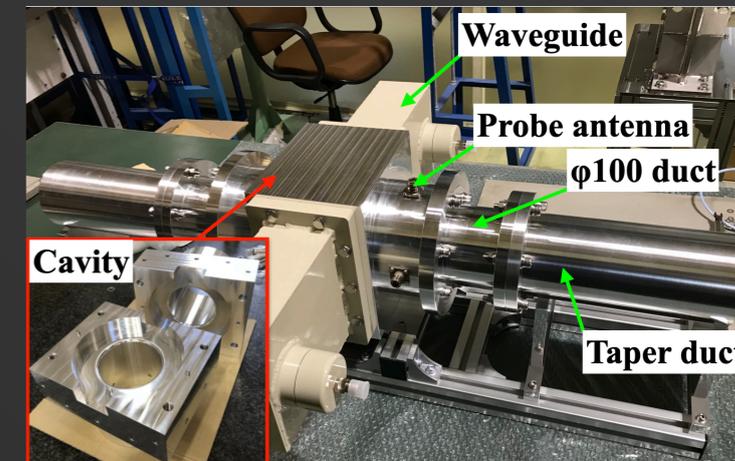
7. 次世代光源～PFでの取り組み～

- PF, PF-ARの面倒を見つつ、機器更新も兼ねて次世代光源のための要素開発を行なっている。
 - ・ 渦電流とウェイク場の発生を抑えたビームダクト一体型キッカーの開発[9]。
 - ・ 高信頼、低ジッターのキッカー用パルス電源の開発(篠原くんの発表)
 - ・ ウェイク場の発生を抑えたアウトガス自己吸着型ビームダクトの開発[10]。
 - ・ AIを使った入射調整最適化手法の開発 (最近始動)。
 - ・ 超伝導ウィグラーの開発 (最近始動)。
 - ・ RFシステムの応答を組み込んだ他粒子のトラッキングコード(MBTRACK2)の開発中 [11]。
 - ・ バンチ位置モニター&フィードバックシステムの開発 [12]。
 - ・ 次世代光源用RFシステムの開発。

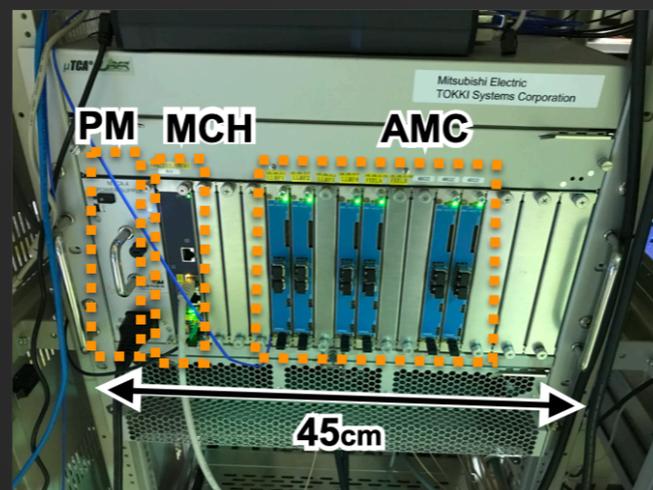
- ・ RF空洞の開発 [13]
- ・ バンチ位相補正用キッカーの開発[14]
- ・ デジタルRF制御システム(FPGA)の開発 [15]

<RF制御システムの写真 [15]>

<キッカーの写真[14]>



更新



- [9] C. Mitsuda *et al*, proc PASJ 2021, WEP013
- [10] X. Jin *et al*, slide of PASJ 2024, THPA01
- [11] N. Yamamoto *et al*, proc PASJ 2021, MOP023
- [12] R. Takai *et al*, proc PASJ 2022, FRP011
- [13] T. Yamaguchi *et al*, NIM, Vol 1053, 2023, 168362
- [14] D. Naito *et al*, proc IPAC 23, WEPA119
- [15] D. Naito *et al*, proc IPAC 24, THPG71

8. PFの将来計画について

- 世界：次世代光源実現に邁進。
- 日本：SPring-8-II計画が進行中。
 - ・ KEKは次世代光源以外の道を進むしかない(政治的な話)。
 - ・ 今回は次期計画のConceptual design report (CDR) Ver 1.2 [16]の内容を紹介(2025/1/20公開)
- KEKの次期計画: PF Hybrid Light Source (PF-HLS)
<PF HLSのコンセプト [16]>

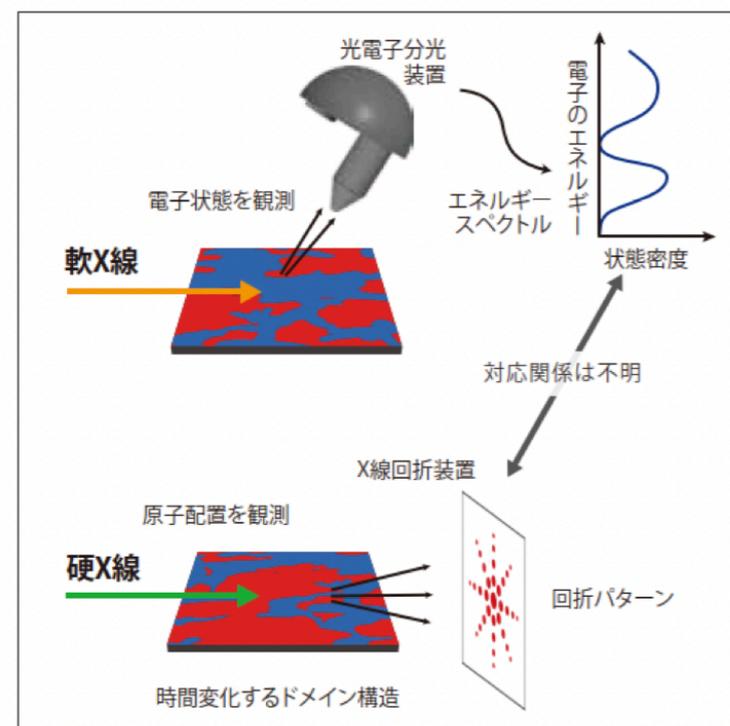
放射光マルチビームで観る物質・生命

超伝導や強磁性などの物理現象、触媒や電池などにおける化学反応、多様で複雑な生命現象など…

これらは全て、時空間的に不均一な現象です。放射光マルチビーム実験施設では、これらの機能の根源を解明するために、新しい手法を開拓します。

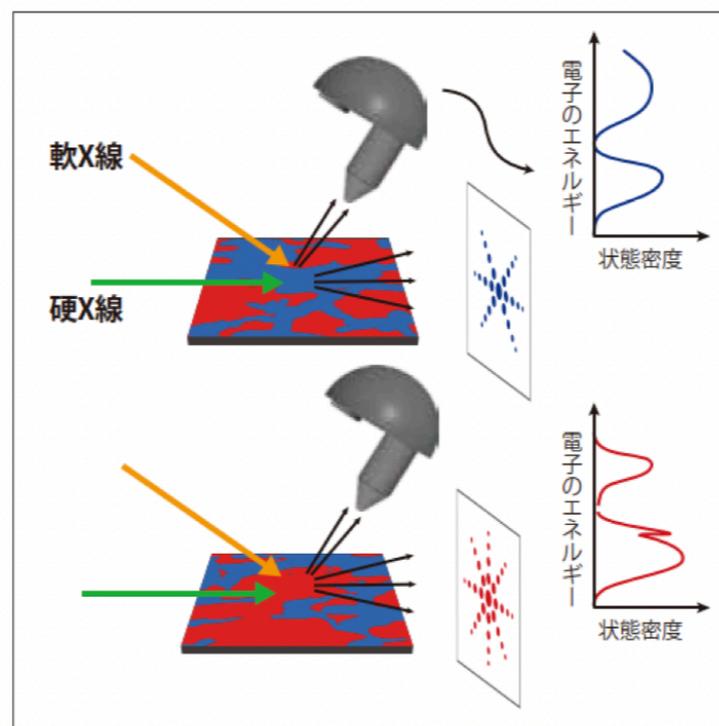
① SRシングルビーム実験

1本のビームラインで広い波長領域が利用できます。これにより、測定対象と測定手法が拡大し、広範な分野・手法の深化が促進されます。



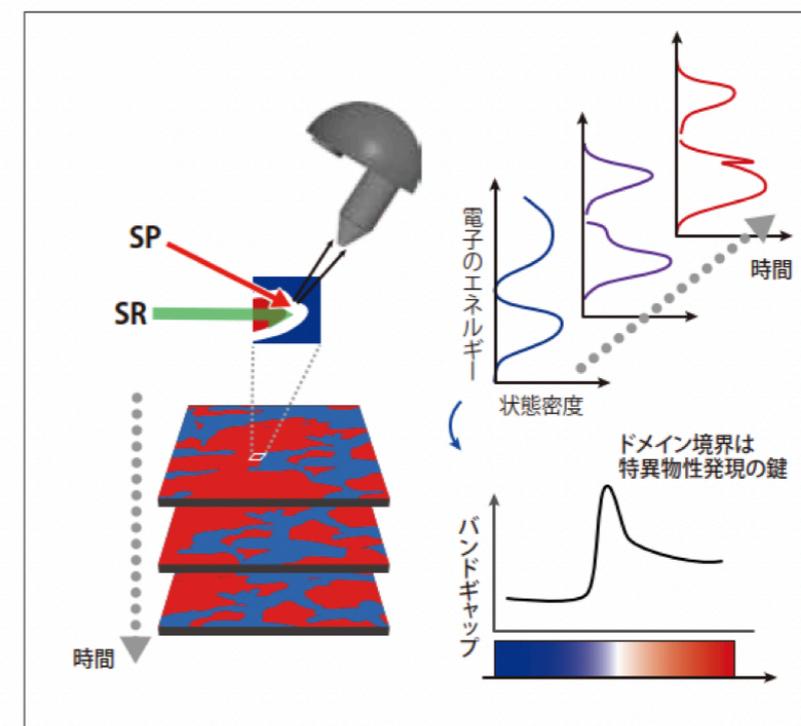
② SR+SRマルチビーム実験

電子状態と原子配置の情報を同時に取得することができ、機能と構造の相関がわかります。協働により分野・手法の融合が促進されます。



③ SR+SPマルチビーム実験

SPビームの高い時空間分解能を利用したドメイン境界の観測、ポンプ&プローブ測定など、既存の手法とは質的に異なる手法により、新たな知が創成されます。

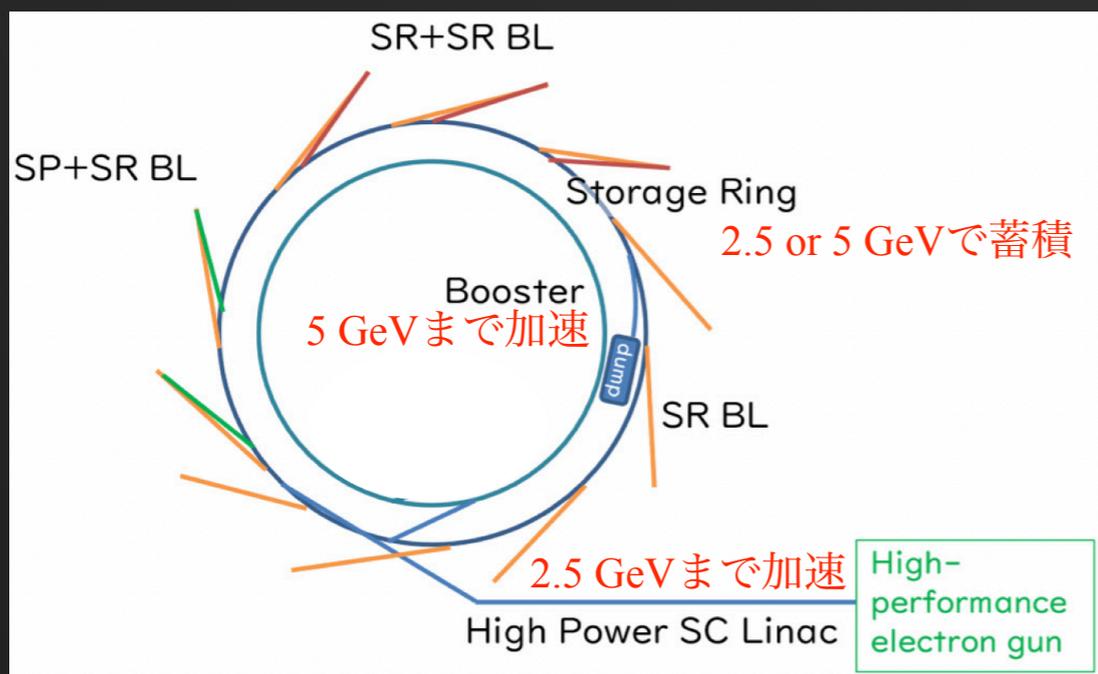


[16] https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/pfhls_cdr_ver1.2.pdf

8. PF HLSの加速器

- 2.5 GeV 超伝導ライナック+5 GeVブースターリング+シンクロトロンで構成。
- PF HLSの特徴
 - 日本ではKEKにしかない超伝導技術を用いた加速空洞(ILC用)を使う。
 - **同じ場所で同じ試料に軟X線、硬X線の両方を照射できる。**
 - シンクロトロンのエネルギーを2.5 GeVと5 GeVで切り替え可能(~1日で機器の設定変更)
 - 時間分解能が必要な実験のためにパルス幅の短いSingle pass (SP) beamをリングに入射。
 - SPビームはリングを半周して廃棄される。
 - 通常の放射光ユーザー用のマルチバンチビーム(SR)は常にリング内を周回。
 - **異なるパルス幅と電流で、異なる軌道を通る2種類のビーム同時に存在する。**
 - **エミッタンスが多少悪くても、何でもできる施設を目指している。**

<PF HLSの加速器 [16]>



<SPとSRビームの比較 [16]>

パラメータ	SR ビーム	SPビーム
ビームエネルギー	2.5 or 5 GeV	2.5 GeV
バンチ長	4.7 or 7.2 ps	50~400 fs

8. 何故超伝導空洞を使うのか?

- 空洞に発生する電場 (V_c) : $V_c = \sqrt{P_c/R_{sh}}$
 - ・ P_c : 投入電力
 - ・ R_{sh} : ショントインピーダンス、形状と表面抵抗で決まる。
- 超伝導は表面抵抗が小さく、ショントインピーダンスが大きい。
 - ・ 常電導空洞に比べて少ないパワーで高い電圧を出せる。
 - ・ 空洞表面での発熱がほぼない(常電導空洞は投入パワーの約半分を壁でロス)。
 - ・ **常電導空洞に比べて電流の高い(=ビーム負荷が大きい)ビームを加速できる。**
 - ・ **大電流のSPビーム(最大 1 nC×6000バンチ× 10 Hz)を供給するには必須。**
 - ・ ILC用に開発された超伝導空洞を流用。

<超伝導ライナックのパラメーター[16]>

パラメータ	値
ビームエネルギー	2.5 GeV
RF周波数	1.3 GHz
バンチ電荷	1 nC
加速勾配	30 MV/m
9セル空洞数	80
マクロパルス数	10000
マクロパルス繰り返し	10 Hz
LINAC全長	300 m

<ILC用超伝導空洞[17]>



[17] https://aaa-sentan.org/ILC/about_collider/scrif.html

8. シンクロトロン設計

- 現在加速器の設計を鋭意進めている。
 - ・ 加速器内を全く軌道の違う2種類のビームを周回させないといけない。
 - ・ SPビームのバンチ長を短いままリングを周回させるためには物凄く小さい α_c が必要。
 - ・ 2.5 GeVと5 GeV両方でビームを周回できるように磁石や空洞を配置しないといけない。
 - ・ 予算の問題で400 mぐらいまで周長を減らして上記を満たさないといけなくなった。
- **加速器としてはとてつもなく設計が難しい。**

<CDRでの主要パラメータ一覧[16]>

パラメータ	Value	
エネルギー [GeV]	2.5	5.0
周長 [m]	749.5	
ラティス	Double DDBA/8BA (modified)	
ノーマルセル数	4	
アイソクロナスセル数	11	
RF電圧 [MV]	1.6	6.5
RFバケット高さ [%]	8.93	7.76
一周当たりの放射損失 [MeV/turn]	0.222	3.557
モーメントムコンパクション因子	3.24×10^{-5}	
ベータトロンチューン, v_x/v_y	47.865/16.655	
減衰時間, x/y/z [ms]	25.9/56.2/67.5	3.24/7.03/8.44
蓄積電流 [mA]	500	200
自然エミッタンス[nmrad]	0.208	0.832
エネルギー拡がり	7.417×10^{-4}	1.48×10^{-3}
自然バンチ長	4.72 ps (1.4 mm)	7.21 ps (2.2 mm)
タウシェック寿命[h]	1.25 *	21 *

8. 将来計画のスケジュール感

- 現在マスタープラン2026(学術大型予算計画への提言)への採用を目指して検討中。
- 学術予算的に全部を一度に建造することは不可能だと解っている。
- 2025年7月までに以下の2案のうち、どちらかを選択して詳細を詰めていく予定。
 - ・ リングだけ先に建造し、その後に超伝導ライナック建造予算獲得を目指す。
 - ・ 超伝導ライナックを用いた自由電子レーザーを建造し、その後にリング建造予算獲得を目指す。
- 加速器の設計は未だ固まっていない。
 - ・ SPビームをリング内を通すのか、エネルギー切り替えを行うのか?
 - ・ 外部評価委員会の評価を受けて変わっていく可能性がある。
 - ・ 加速器の設計が固まればハードウェアの要求が決まり、具体的なR&Dも始まるだろう。
- 現在は「将来計画のために」というお題目でR&D費を獲得して研究を進めている。
 - ・ 数百億の予算を獲得するのは非常に困難だが、数千万なら獲得することが可能。
 - ・ R&D費を獲得するための旗振り役という側面もある。

9. 加速器への勧誘 (加速器の何が面白い? ※個人の感想です)

- 大強度(J-PARC)、高ルミノシティー(SuperKEKB)、極低エミッタンス(放射光)、全てに共通するのは空間電荷効果が高いこと。
 - ・ これにより様々な非線形な現象や集団効果が発生する。
 - ・ シミュレーションでの予測が難しく、理論が確立されていないものもある。
 - ・ 例えば空間電荷効果の影響により起こるベータトロン振動の共鳴。
 - ・ 次世代の素粒子実験用加速の設計には理論の確立が必須。
 - ・ AIを使った予測や、応答モデルの開発が非常に効果的な可能性がある。
- **加速器には未解決の問題が多数。**
 - ・ **一つ一つ現象のメカニズムを明らかにし、問題を克服するハードウェアの開発が必要。**
- 次世代光源の実現のためには更なるハードウェアの開発が必要。
 - ・ 機能複合型電磁石の開発
 - ・ 電磁石/電源の開発
 - ・ バンチ結合不安定性を抑えるためのフィードバックシステムの開発
- **次世代光源ではハードウェアに対する要求性能が高く、かなり開発のしがいがある。**
(具体例は篠原くんの発表で)

9. PFへの勧誘

- PFの良いところでもあり悪いところ：**プロジェクトタスクがない**
 - ・通常の加速器はプロジェクト志向が強く、研究テーマは天から降ってくるもの。
 - ・PFは「将来光源のために」というお題目のもと、比較的自由にテーマを選べる。
 - ・例えば加速器の設計に勤しんでもよし、電磁石や電源の開発をしてもよし。
 - ・加速器性能の向上のためにビーム調整をする必要がない。
 - ・加速器を使って自由な研究ができる。
 - ・加速器性能向上のスタディ、ビーム物理の理論的検証、新技術の検証、機械学習を使った自動ビーム調整スタディ etc...

加速器の研究を始めるには良いところ。

9. 加速器の研究者になるには？

- 毎年前半(今年の研究職の締め切りは4/24, 技術職は4/12)と後半(10~12月)に応募あり。
 - ・ 博士研究員：任期2年
 - ・ 特別助教：任期4年(3年目の終わりに面接して任期なしの助教へ移行)
 - ・ 技術職員：任期なし
 - ・ 公募ページ：<https://www.kek.jp/ja/career>
- KEK 加速器の公募は特殊で、採用されてからどの加速器に配属されるか決まる。
- KEK加速器の技術職員は非常に特殊で、研究者と同じ仕事ができる。
 - ・ 過去には論文博士になって准教授になった人も。
 - ・ 研究を続けたいけど、博士に進むのは...という人の受け皿にもなっている。
- 博士研究員の公募は(枠が余っている限り)いつでも出せる。
 - ・ **職に困ったら是非私までご相談を (daichi.naito@kek.jp)。**
- 若手(45歳以下)だとJ-PARCで14人中8人、PFでは6人中2人が他分野から加速器に来ている。
 - ・ **ハードウェア開発が多いので、加速器を全く知らなくてもいきなり仕事ができる。**
 - ・ 青木研の卒業生で昨年10月からJ-PARCに採用された長尾くんも既に新しいベータトロン振動の位相進み測定システムを完成させてソフトウェアのデバッグ中。

9. その他加速器関連の情報

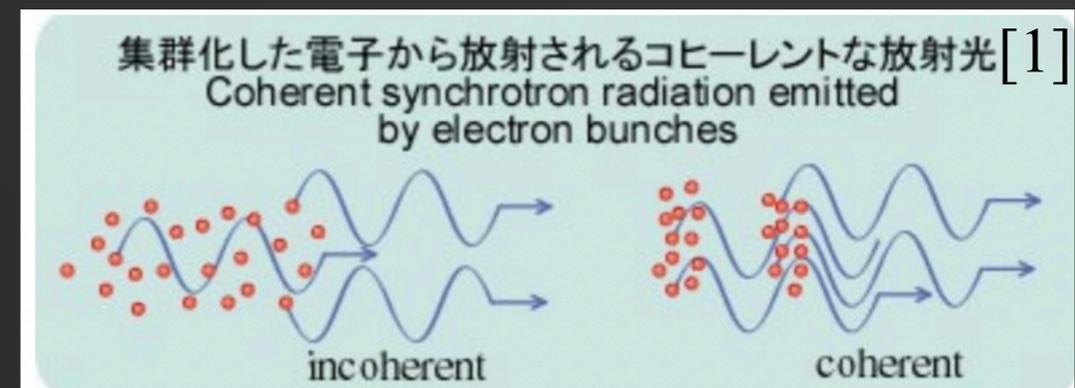
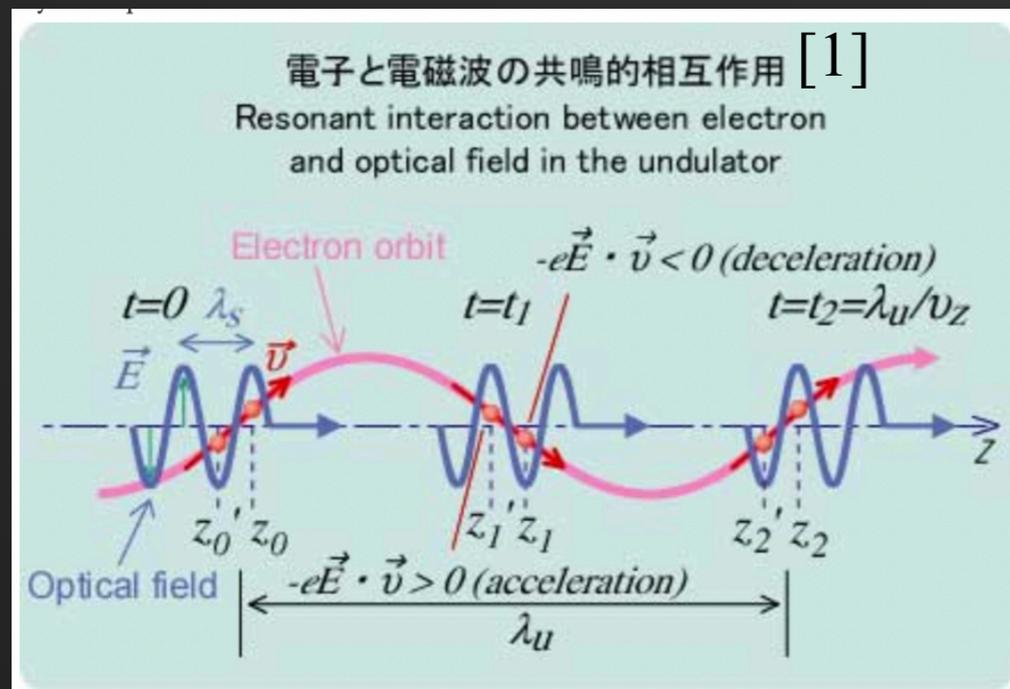
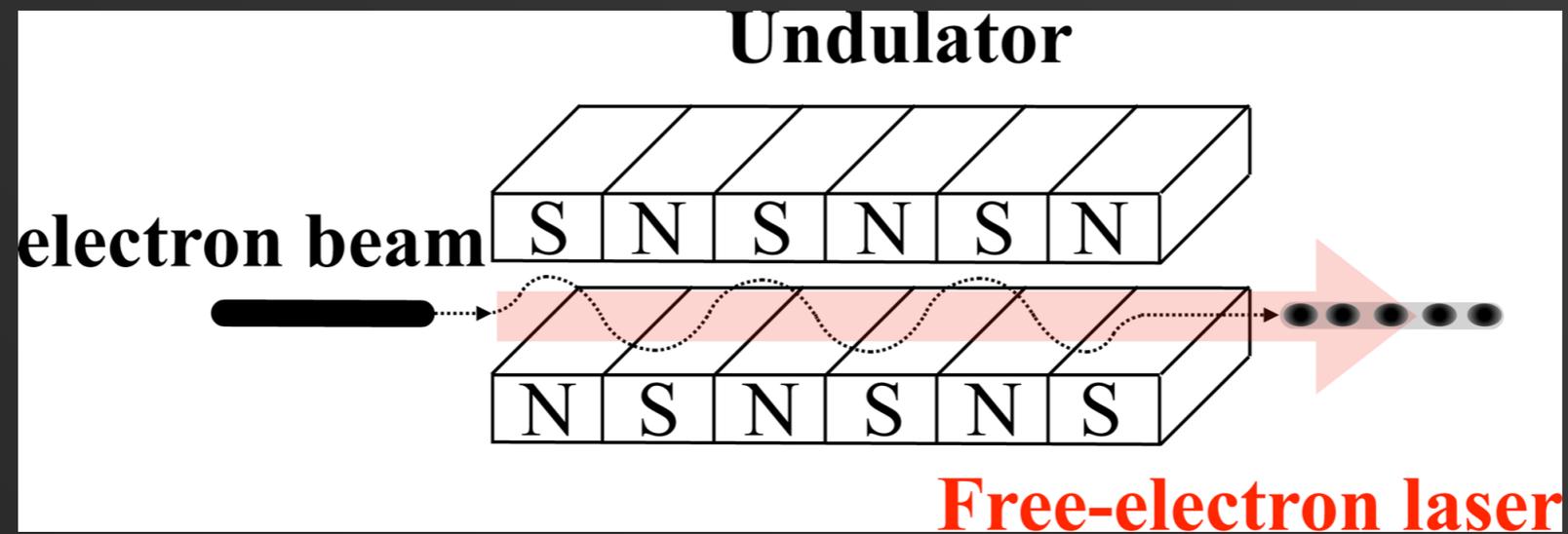
- 加速器関連の公募はビーム物理研究会若手の会のHPに掲載。
url :<https://beam-physics.kek.jp/bpc/wakate/wakate/index.php?%27%27公募・採用の案内%27%27>
- ビーム物理研究会若手の会：加速器分野の若手支援団体
 - ・ HP: <https://beam-physics.kek.jp/bpc/wakate/wakate/index.php>
 - ・ 毎年3月初旬に研究会を開催。
 - ・ 不定期に研究会を開催。
 - ・ 今年の9月の物理学会の前後に広島で初心者向け加速器/レーザースクールを開催予定。
(5月末に応募開始予定。)
 - ・ 会員になれば(入会金無料)、加速器関連の研究会や公募情報がメール配信される。

予備スライド

自由電子レーザー

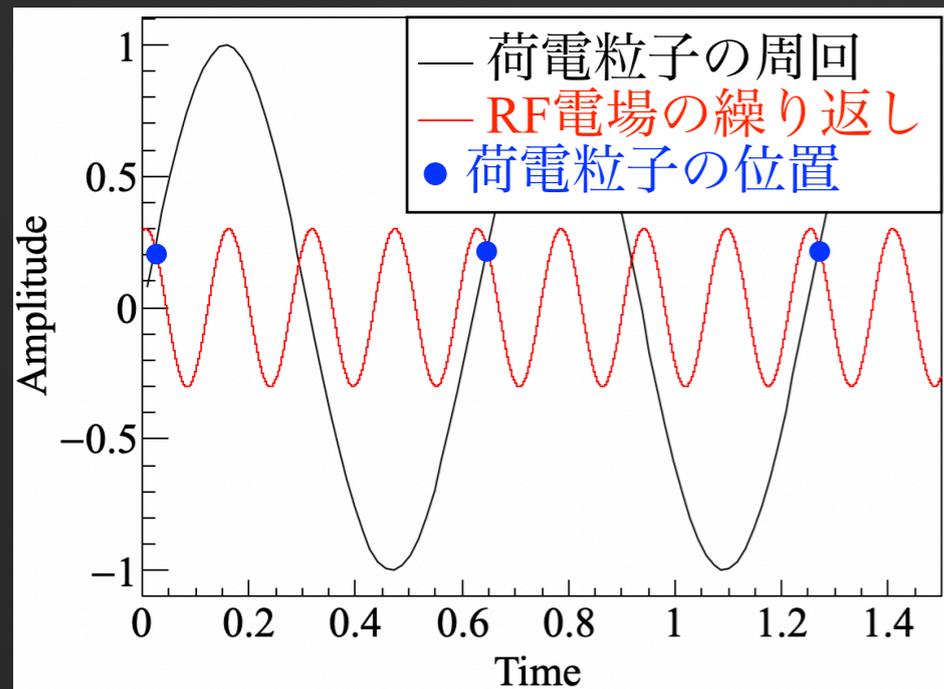
- 電子バンチを自身が出したシンクロトロン放射と干渉させる。
 - 次第にバンチ内の電子で位相が揃った塊に分裂する(マイクロバンチング)
 - 電子の個数 N^2 に比例した非常に強度の高い光が得られる。

<自由電子レーザーの概略図>



[1] <http://www.fel.eng.osaka-u.ac.jp/FEL.html>

1. シンクロトロンとは？



●シンクロトロンの定義：

- ・荷電粒子が一定軌道を回っている円型加速器。
 - ・磁場で荷電粒子の軌道を曲げてリングを周回させる。
 - ・RF電場で荷電粒子の速度を維持又は増加させる。

周波数のシンクロ条件： $f_{\text{RF}} = n \times f_{\text{rev}}$

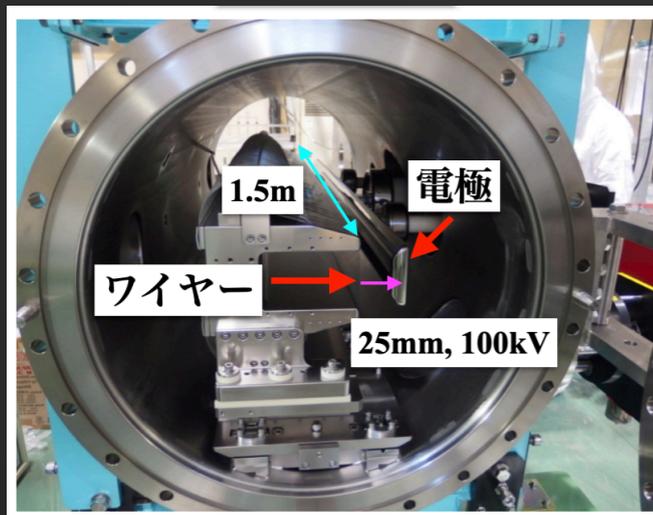
- ・磁場や電場の強さ、RF電場の周波数を荷電粒子の運動量と「シンクロ」して変化させることで、荷電粒子の軌道半径を一定に保つ。

2. 電磁石と荷電粒子の運動 J-PARCの遅い取り出し

● J-PARCの遅い取り出し：

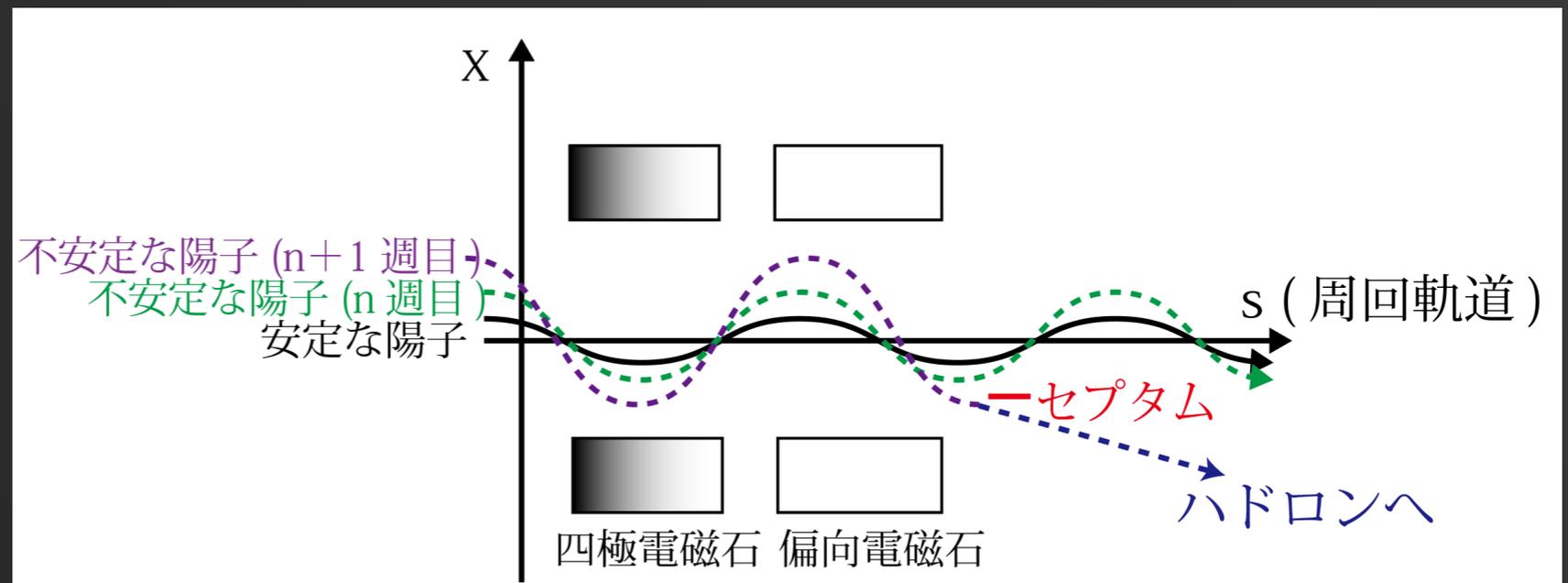
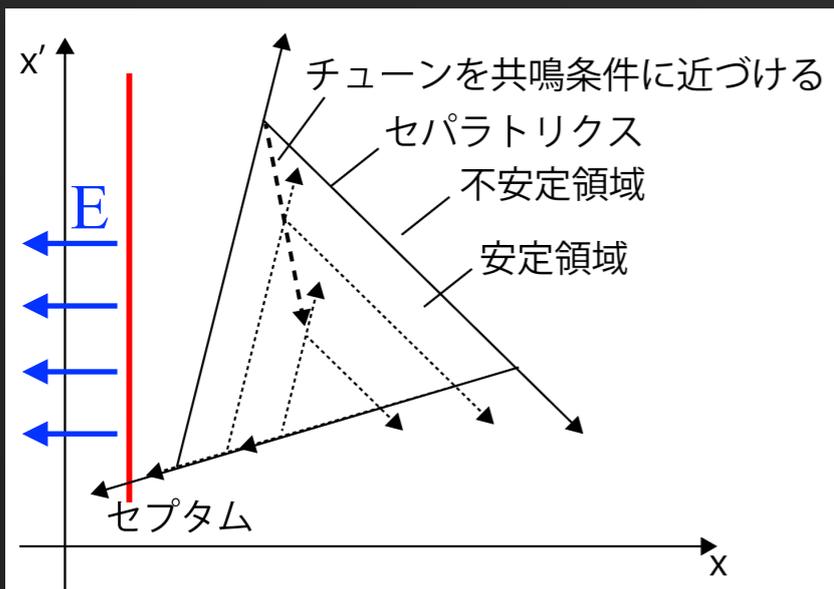
- ・ 六極磁石でわざと磁場エラーを作り、チューンを(3次)共鳴が起こる条件に近づける。
- ・ 位相空間の外側の粒子から共鳴を起こしてエミッタンスが大きくなる。
- ・ エミッタンスが大きくなった粒子をタングステンリボンと静電場で切り出す。

<静電セプタム>



<ベータatron振動とビーム取り出し>

<遅い取り出しの位相空間>



2. 電磁石と荷電粒子の運動補足

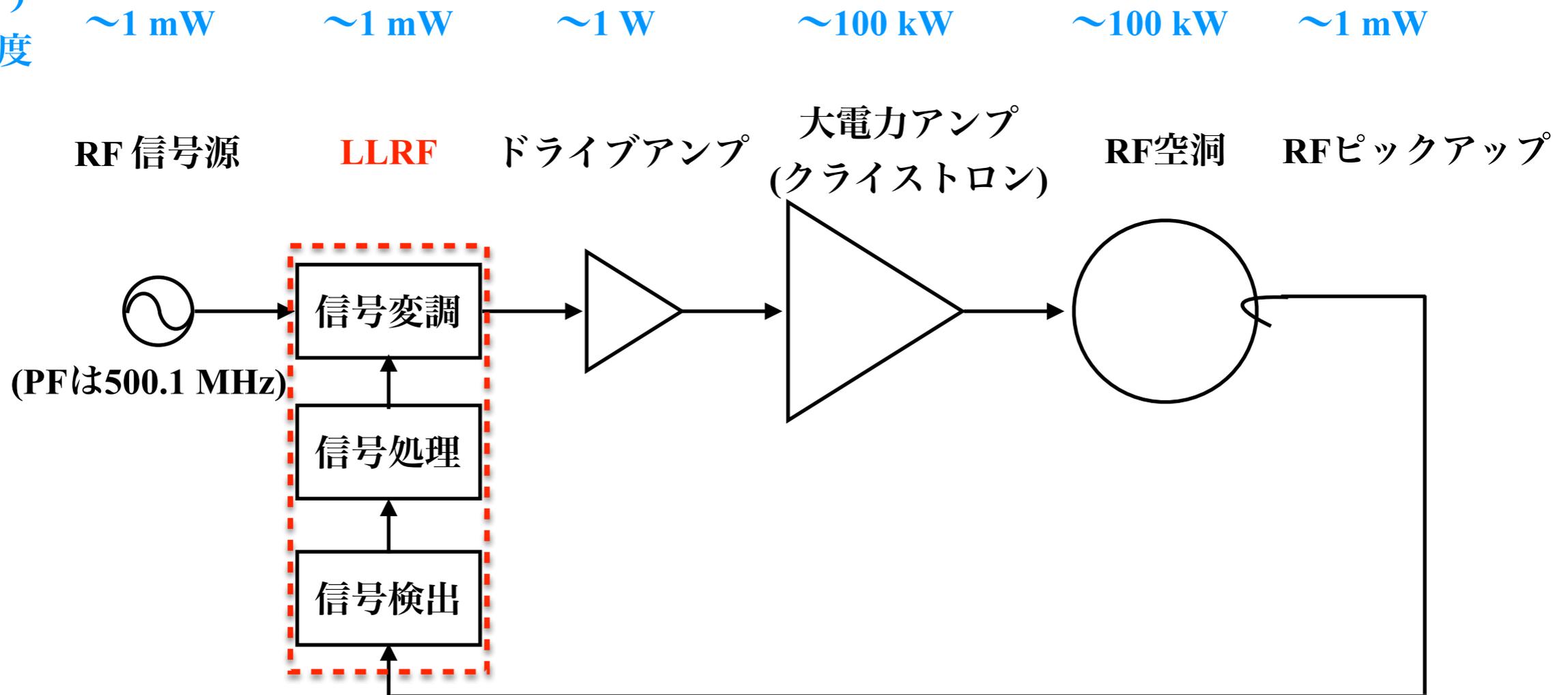
- 実際の荷電粒子は空間電荷効果により互いに反発しあうのでとても難しい。
 - ・ 空間電荷効果によりビームは位相空間上で広がりを持つ。
 - ・ 空間電荷効果による反発で粒子毎に感じる実効的な磁場が変わる。
 - ・ 粒子毎にベータトロン共鳴が起きる条件が異なる。
 - ・ 広がりが大きいと磁場エラーがなくてもベータトロン共鳴を起こす。
- 当然、荷電粒子の数が増えると空間電荷効果も増大。
 - ・ **空間電荷効果を取り入れた軌道不安定性理論は未だ確立されていない。**
 - ・ 多粒子シミュレーションが必要だが、スパコンを用いても正確な計算は不可能。
cf. J-PARC MRの粒子数 $\sim 10^{21}$ 個
 - ・ 人間：
 - ・ 頑張って理論の確立を目指す。
 - ・ 機械：
 - ・ 測定結果をインプットにして機械学習を行い、応答モデルの確立を目指す。

LLRFとは何か？

- ・ LLRF：Low Level RFの略。
- ・ RF 空洞内に励起されたRF電圧の振幅と位相を安定化させるシステム。
- ・ RF空洞：放射光を出してエネルギーを失った電子を再加速させる。

<典型的な高周波加速システム>

取り扱う
信号強度

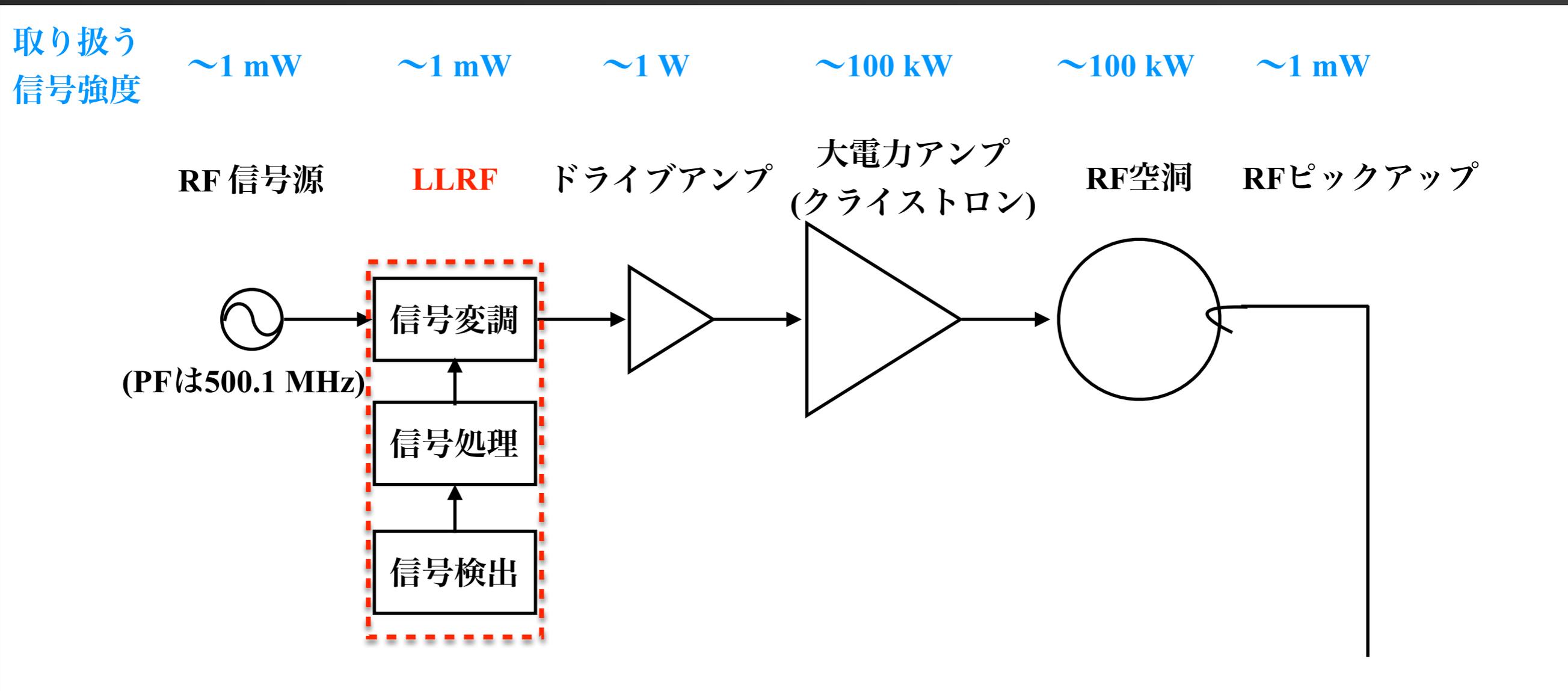


何故LLRFが必要か？

- ・一般的に高周波加速システムは振幅/位相変動を引き起こしてしまう。
 - ・ \sim kHzの変動：クライストロン等の電源からくるノイズ、リップル。
 - ・ \sim Hzの変動：ビーム電流の変化が空洞に与える影響。
 - ・(結合バンチ不安定性等の空洞が作るビーム不安定性)

LLRFによるフィードバック制御によって安定化させる必要がある。

<典型的な高周波加速システム>



世界の主な放射光源加速器のLLRF

- 世界のリング型放射光源のLLRFのうち、主な施設と分かる範囲での安定性を表記。

Facility	Method of IQ detection	Voltage stability	Phase stability
ALBA	IF sampling	0.11 %	0.35°
DIAMOND	IF sampling	0.1 %	0.1°
SIRIUS	IF sampling	—	—
SOLEIL	IF sampling	0.03 %	0.024°
NSLS-II	Non-IQ sampling	—	—
PLS-II	Non-IQ sampling	0.1%	0.1°
SSRF	Non-IQ sampling	1%	1°
TPS	Non-IQ sampling	0.06%	0.07°
MAX-IV	Direct sampling	0.02 %	0.01°
SPring-8	Direct sampling	0.037%	0.059°
PF (old)	Analog LLRF	0.52%	0.12°
PF (new)	Direct sampling	0.05%	0.05°

- 表のうち、以前のPFのLLRFは**アナログ回路**で構成、それ以外はデジタル回路で構成。
 - 電圧安定性の要求：運動量変動による放射光のサイズ変動の抑制。
 - 位相安定性の要求：電子バンチ位置変動による放射光のタイミングジッターの抑制。
 - 次世代光源では大体～0.1%, 0.1°の安定性が求められている。
- ESRF, ALS, SLS, BESSY-II, PETRAIIIといったリング型光源でもデジタル回路を開発中。

デジタル回路で構成されたLLRFが既に世界の主流。

アナログ vs デジタル

	アナログ	デジタル	優劣
制御の速さ	△→◎	○	アナログ > デジタル
ノイズ抑制	△→◎	○	アナログ > デジタル
システム診断	外部機器	自己診断	アナログ > デジタル
持続可能性	○	△	アナログ > デジタル
放射線耐性	○	△	アナログ > デジタル
システムの柔軟性/拡張性	△	◎	アナログ < デジタル
省スペース性	△	◎	アナログ < デジタル
温度/湿度ドリフト	△	○	アナログ < デジタル
メンテナンス性	△	○	アナログ < デジタル

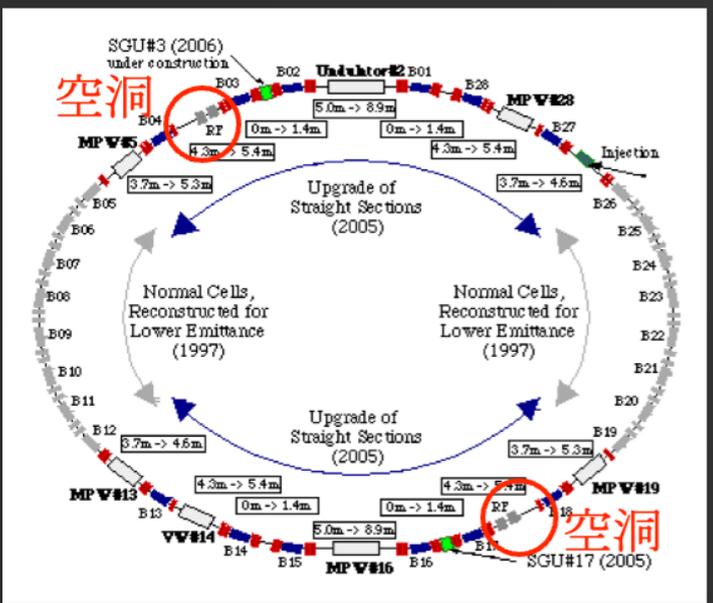
- ・ 究極的な性能を目指すならばアナログ回路で構成するのが良い。
- ・ 使い勝手の面ではデジタルの方が省スペースでメンテナンス性、拡張性の面で優れている。
 - ・ 「今のところ」リング型放射光源では「そこそこ」の性能が良い。

⇒デジタルLLRFがリング型放射光源にとって最適解。

PFはとても古いアナログLLRFなので性能面でも使い勝手の面でも、
デジタルLLRFにすることで飛躍的な改善が見込めた。

旧LLRFシステム (アナログ, 2023年秋以前)

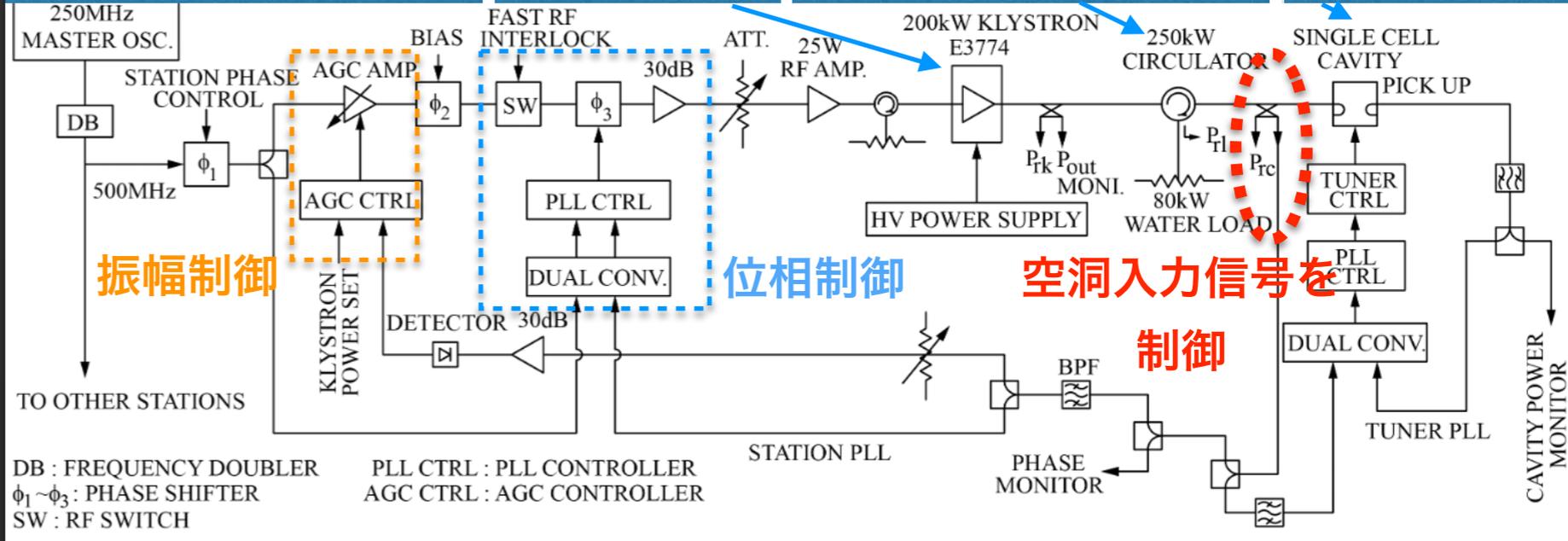
<RFシステムの全体図(1ステーション分)>



LLRF (analog, lack×8) Klystron Circulator & dummy load Cavity

<代表的なRFパラメータ>

Parameter	Value
# of cavity	4
# of klystron	4
RF	500.1 MHz
Total cavity	1.7 MV
..	
Total klystron	287 kW

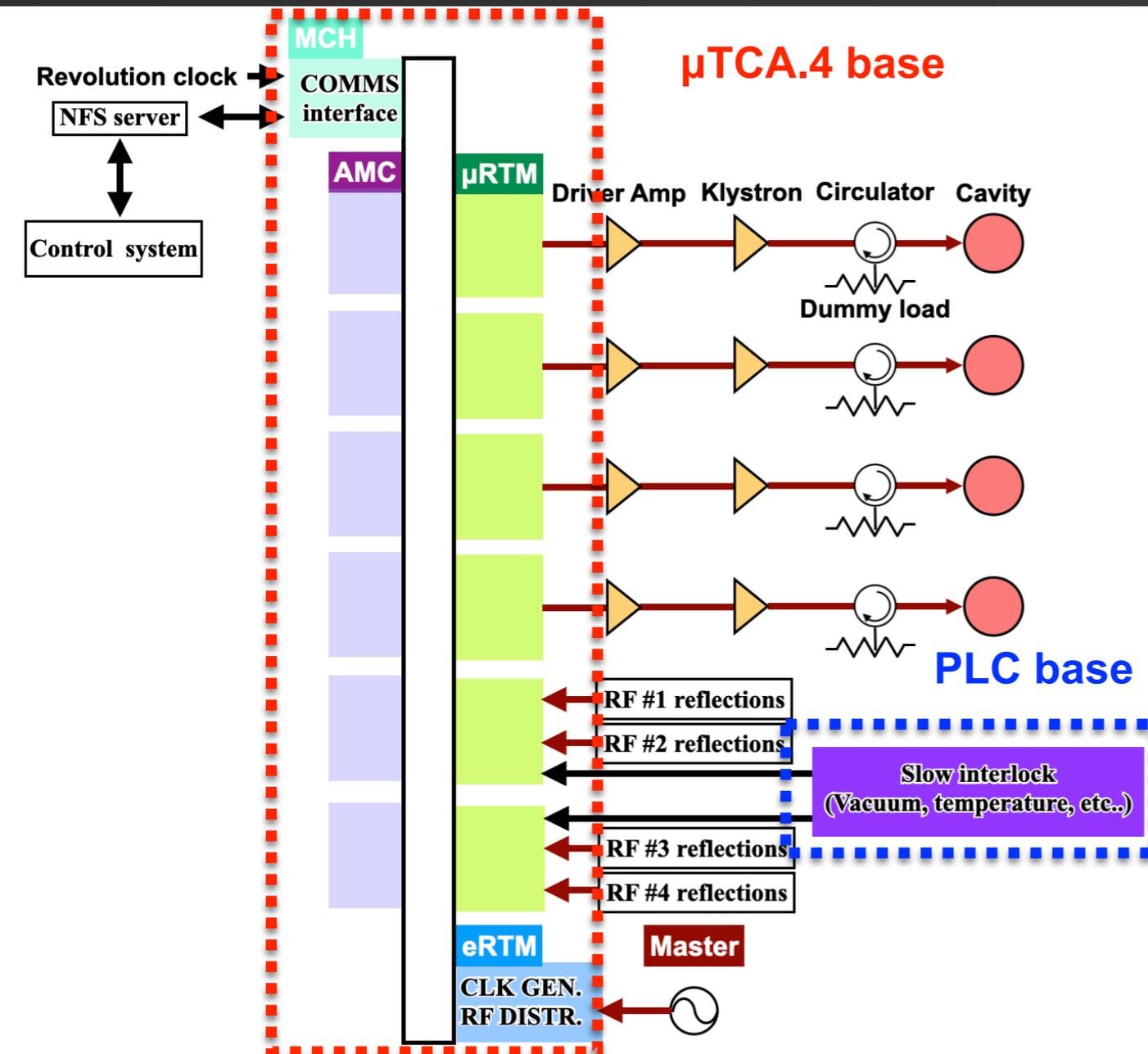


- 40年前に設計されたシステムで、一部モジュールは入手性に難あり。
- デジタルLLRFに置き換えることで
 - メンテナンス性を向上。
 - 次世代光源に必要な制御技術を開発。

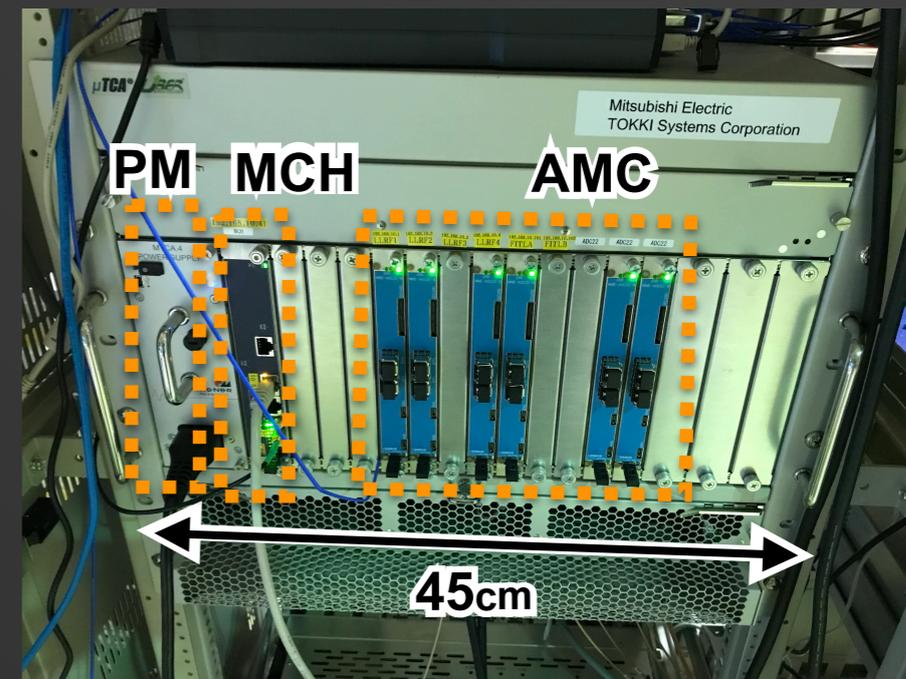
デジタルLLRFの目標:

- 空洞電圧振幅の変動 $< \pm 0.1 \%$
- 空洞電圧位相の変動 $< \pm 0.1^\circ$

新規LLRFシステム



<μTCA.4 シェルフ写真>

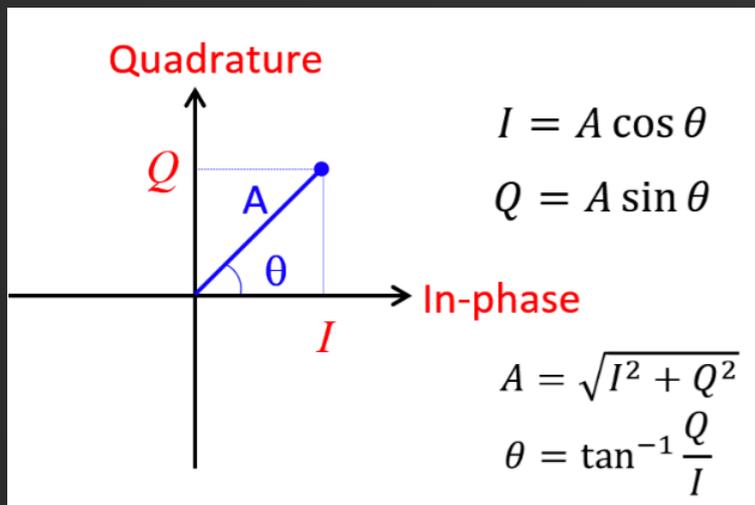


モジュール	役割	設計変更もと
シェルフ	バックプレーン, 空冷	市販品 (Uber)
PM(電源)	電力供給	市販品 (Wiener)
MCH	ネットワークハブ	市販品 (NAT)
eRTM	クロック生成/RF分配	SPring-8
μRTM	デジアナ入力, RF出力	J-PARC LINAC
AMC	信号検出/制御 (FPGA)	J-PARC RCS/MR

SPring-8, J-PARC, SuperKEKBで開発されたLLRF技術を転用。

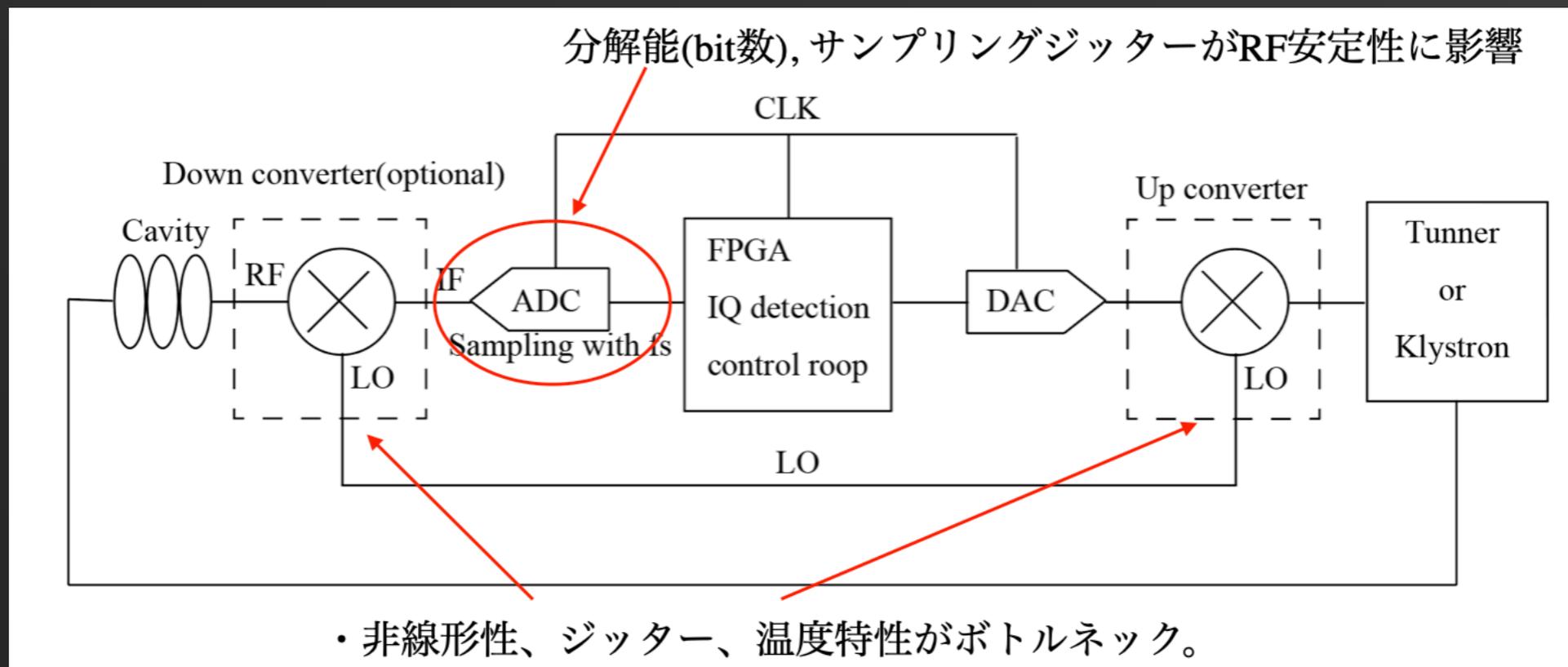
=>開発コスト, 期間, リスクの低減を図った。

PF LLRFの特徴 1 (Non-IQ direct sampling)



- 一般的なデジタルLLRF：
 - RF信号をADCで取り込み、実部と虚部に分けて計算する。
=>RFの振幅(A)と位相(theta)を再構成。

<一般的なデジタルLLRFブロック>



・非線形性、ジッター、温度特性がボトルネック。

- 近年では高速/低ジッターなADCの開発が進んでおり、RF信号をダウンコンバートせず、直接読む方法(Non-IQ direct sampling)が実現可能になりつつある。

RF周波数が~500 MHzの放射光源のLLRFではSPring-8のみで採用されている

Non-IQ direct samplingをPFでも世界に先駆けて導入することにした。

Non-IQ direct sampling

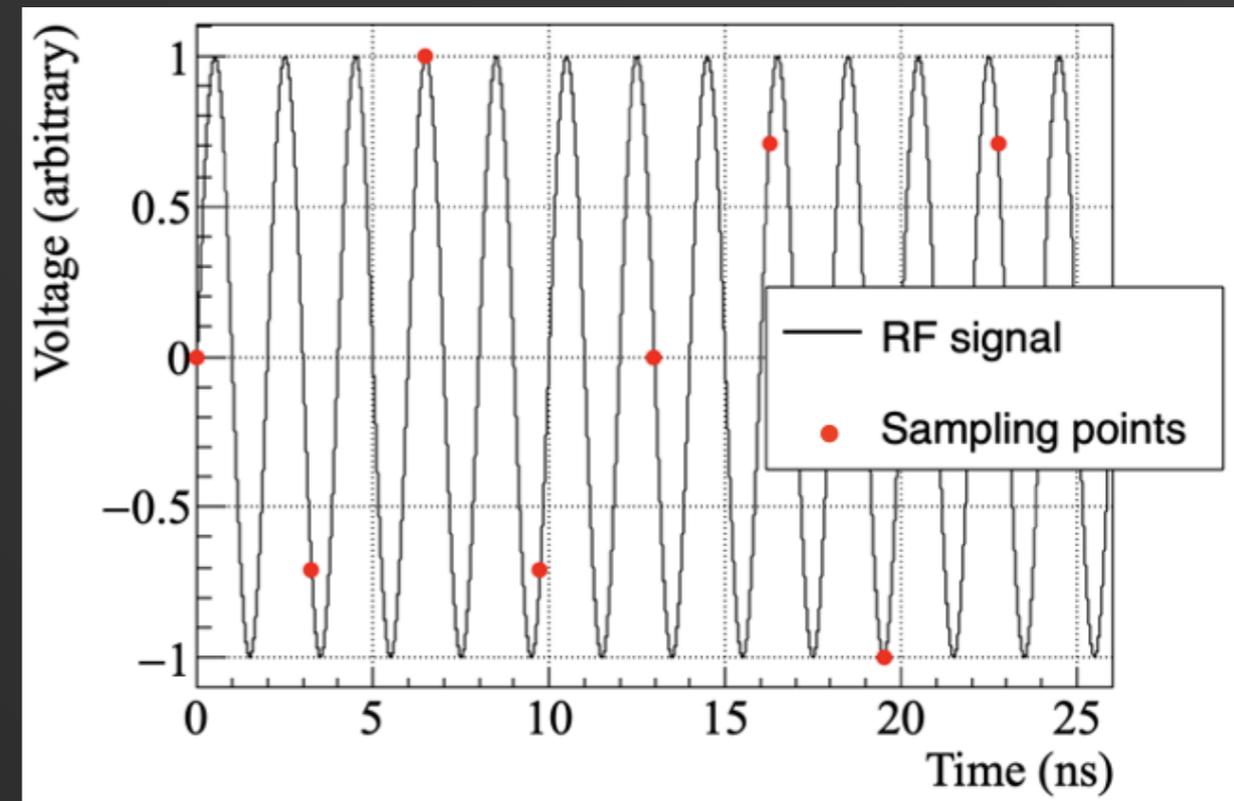
- RF信号の周波数を f_a と置くと

$$f_s = \frac{n}{n+m} f_a \quad (n, m \text{ は任意の整数, PFでは } n=8, m=5 \text{ を採用})$$

を満たす周波数でサンプリングしてIQ値を計算する手法。

$$I = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_i \cos \left(2\pi i \cdot \frac{m}{n} \right)$$
$$Q = -\frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_i \sin \left(2\pi i \cdot \frac{m}{n} \right)$$

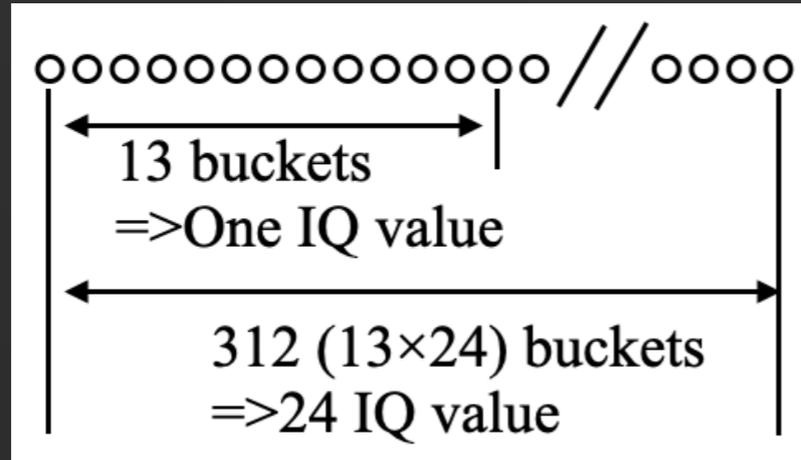
<PFでの信号検出の様子>



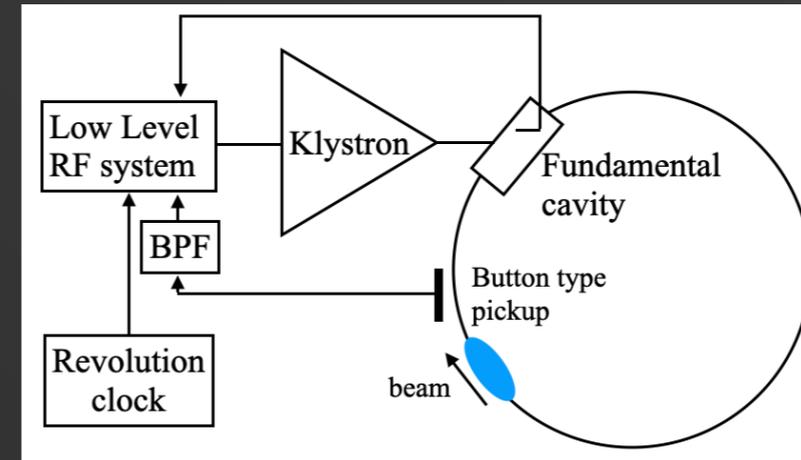
PF LLRFの特徴 2 (バンチ位相検出&位相補償機能)

- ADCの信号検出クロックを307.75 MHz に設定 ($f_{RF} \times 8 \div 13$)。

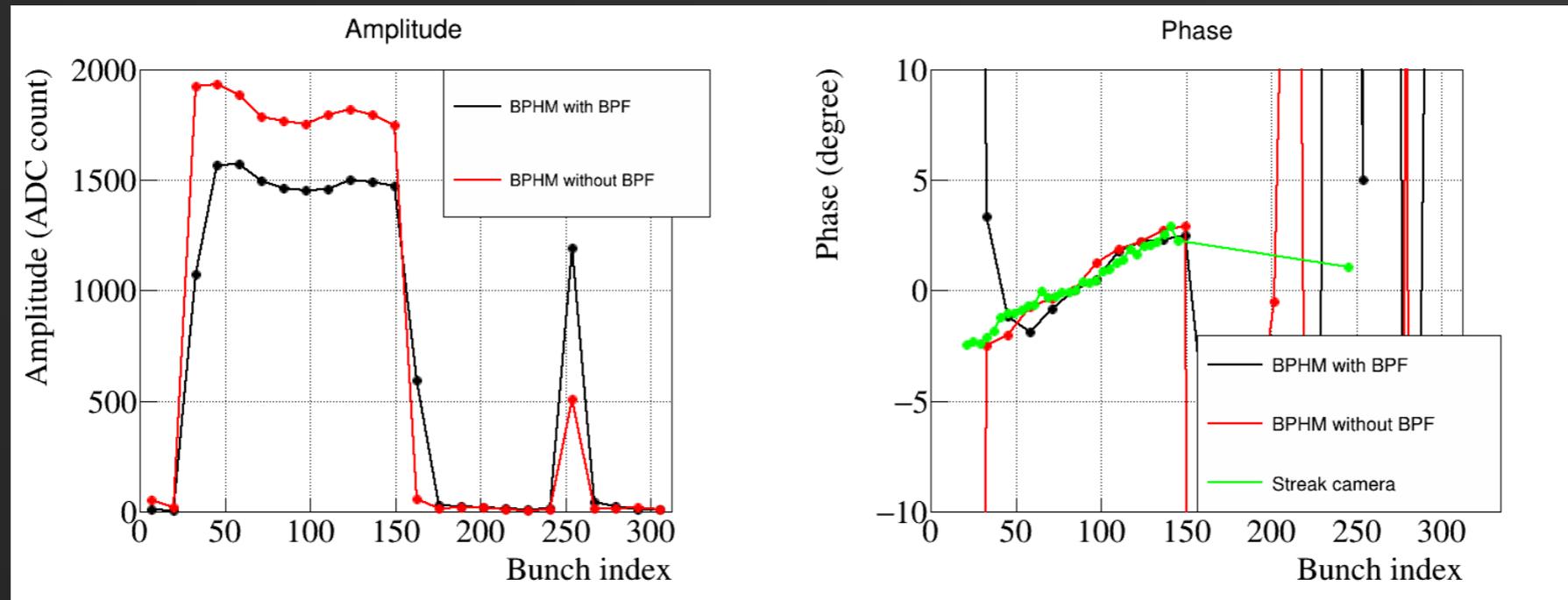
<1周期分のIQ検出>



<バンチ位相検出 @ PF>



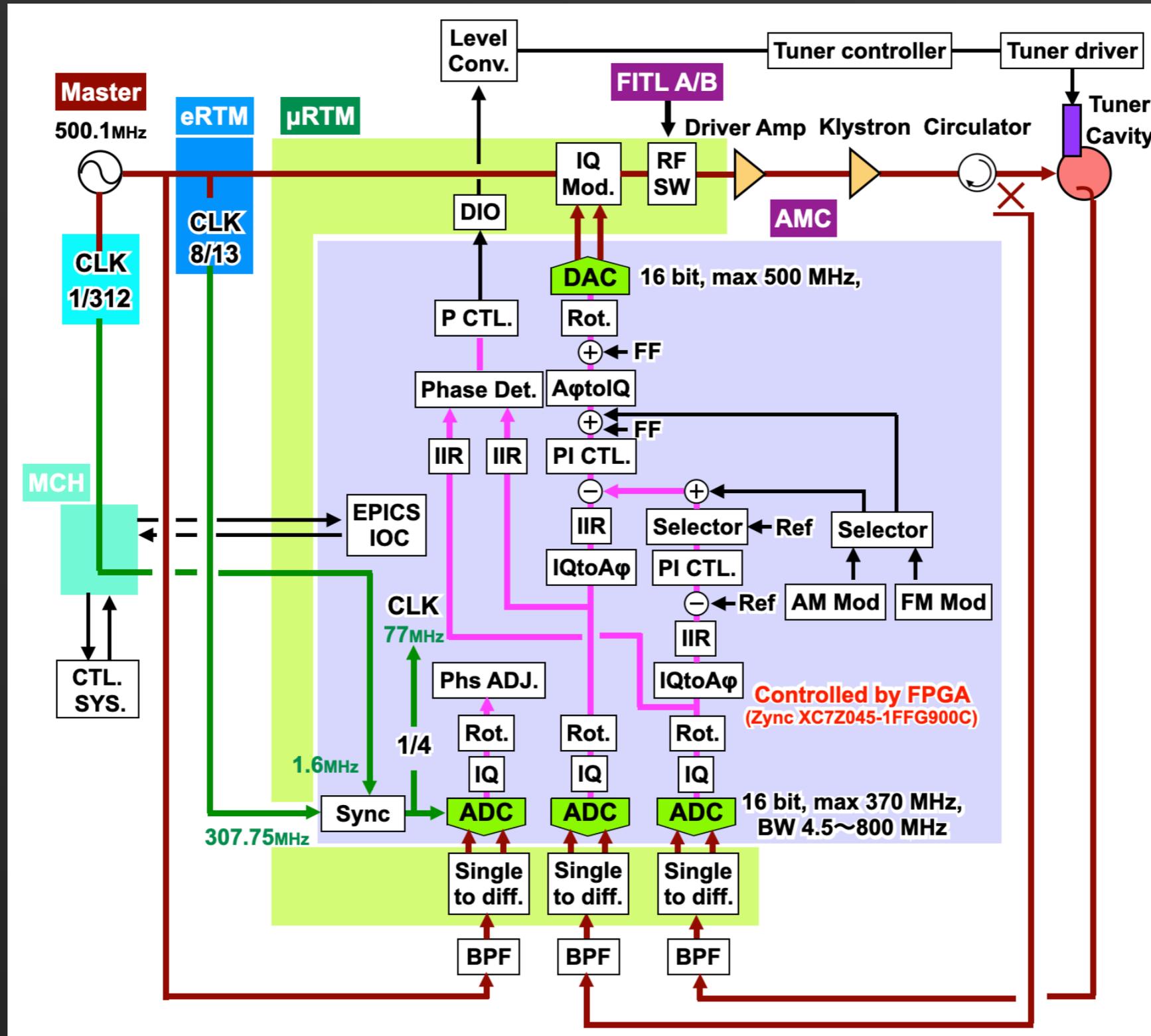
<バンチ位相検出用ファームウェアを用いたPFでの位相測定>



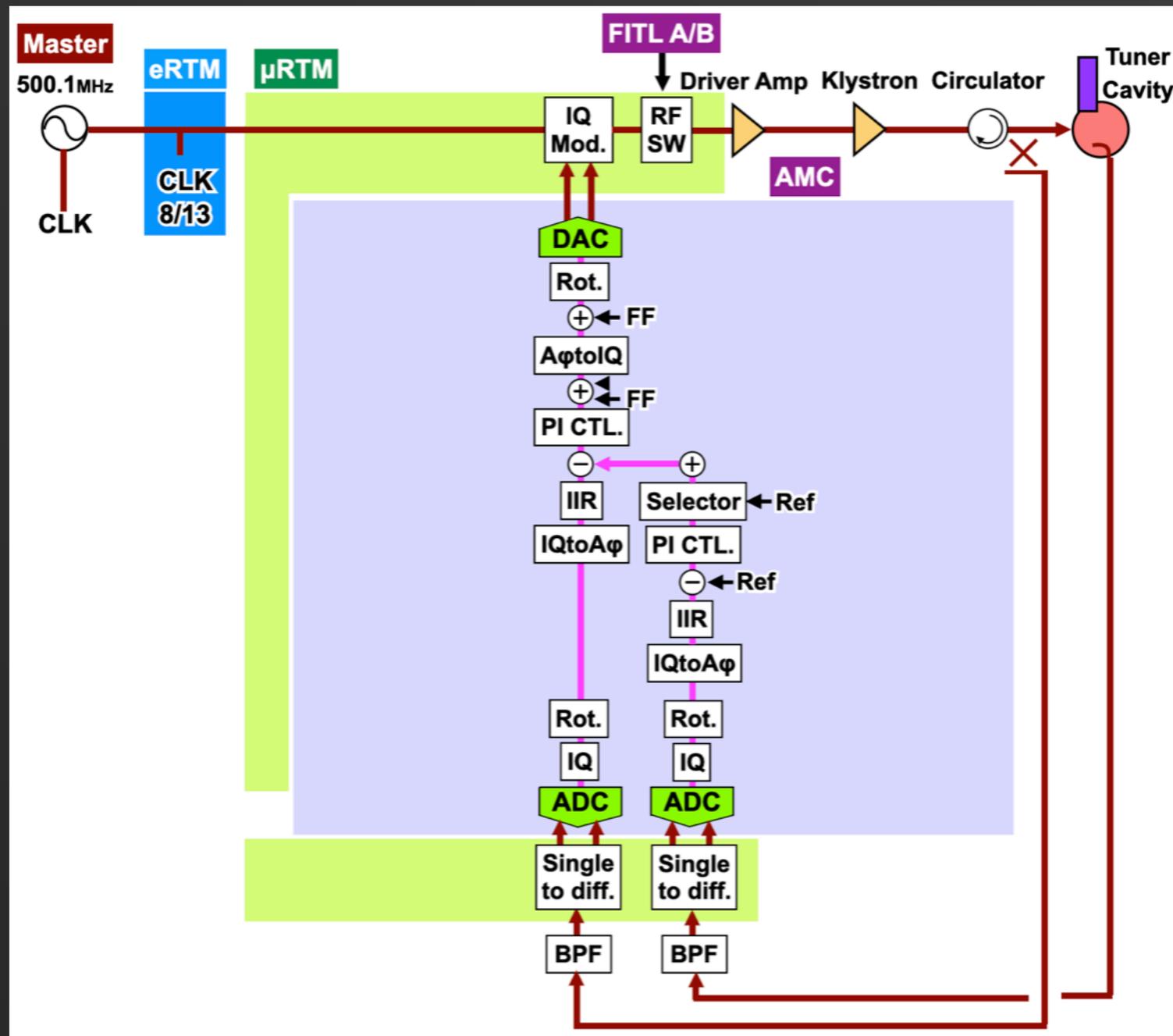
- ビームの周回に同期したRF信号とその位相の検出を実現。
- ビームの周回に同期した任意の変調信号をRF出力に重畳する機能も実装。

PF LLRFの特徴 3 (振幅/位相ダブルループ制御)

<RF制御部の構成>



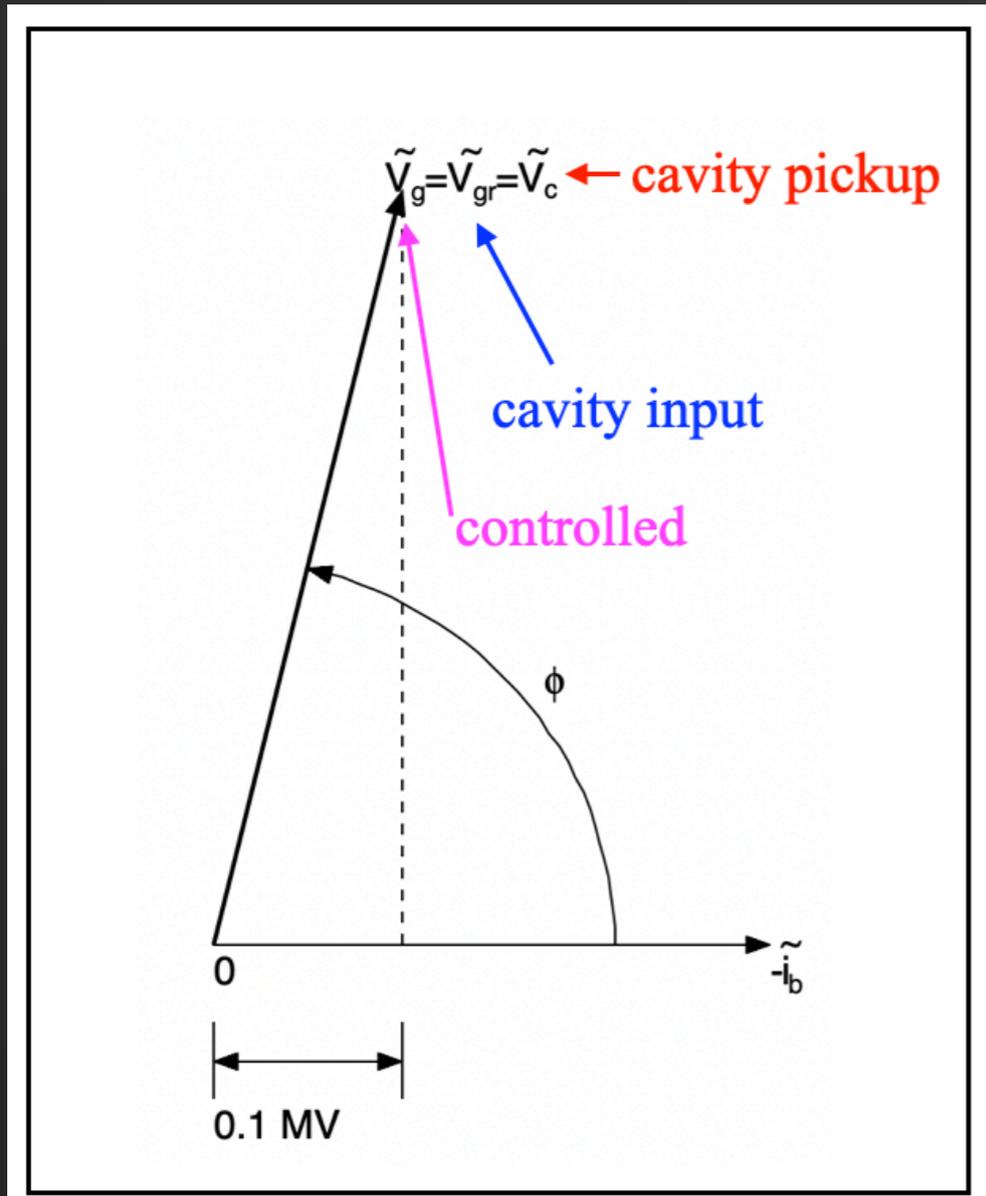
PF LLRFの特徴 3 (振幅/位相ダブルループ制御)



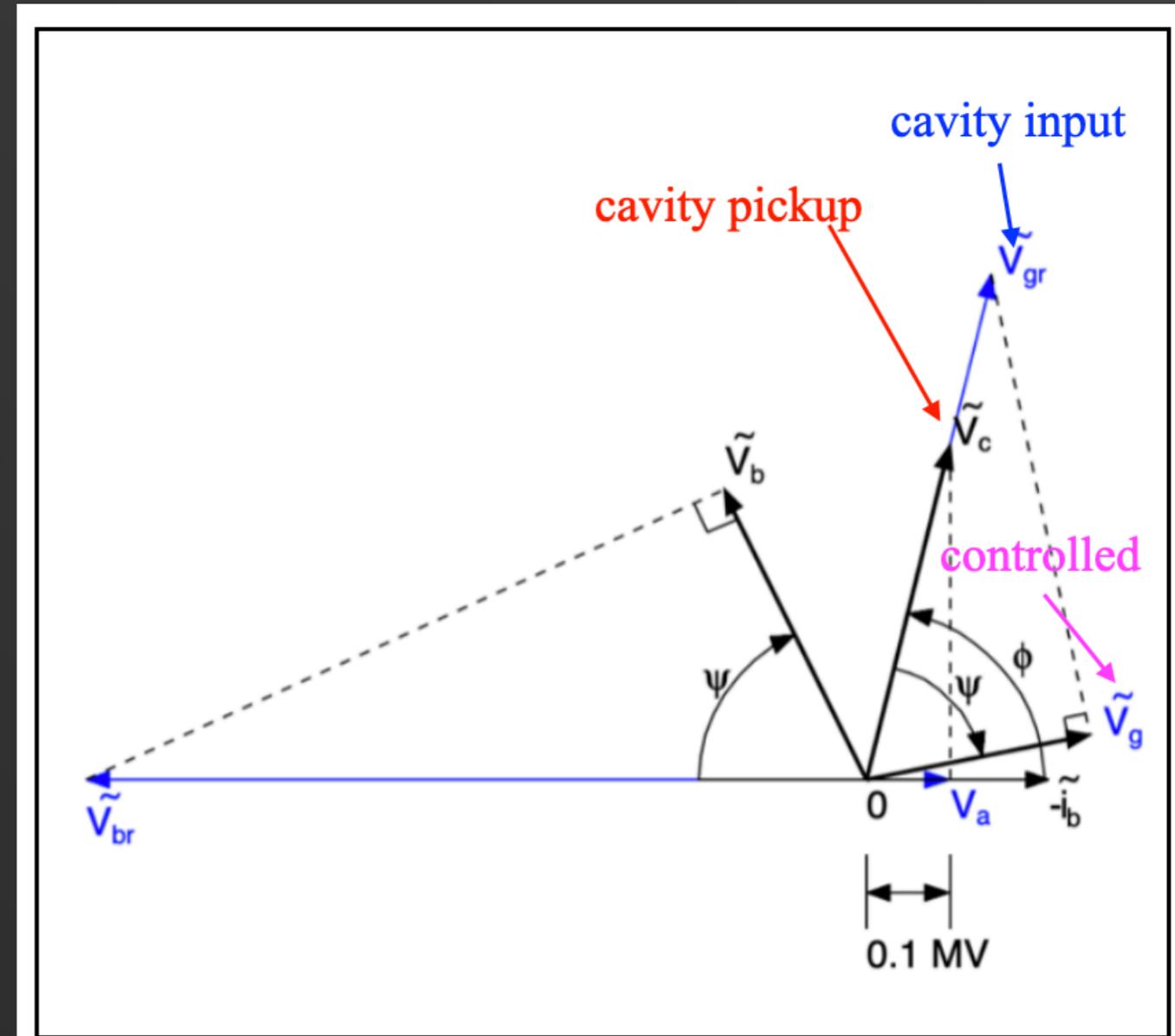
- 空洞入力信号をFBする事でクライストロン由来の電源リップルを抑制(< 10 kHz).
- 空洞ピックアップ信号をFBする事でビーム負荷由来の変動を抑制(~数 Hz).
- 二つのFBを直列に繋いだ、ダブルループ構造。
- IQ信号は振幅/位相に変換して制御。

振幅/位相制御

<RF phase at 0mA>



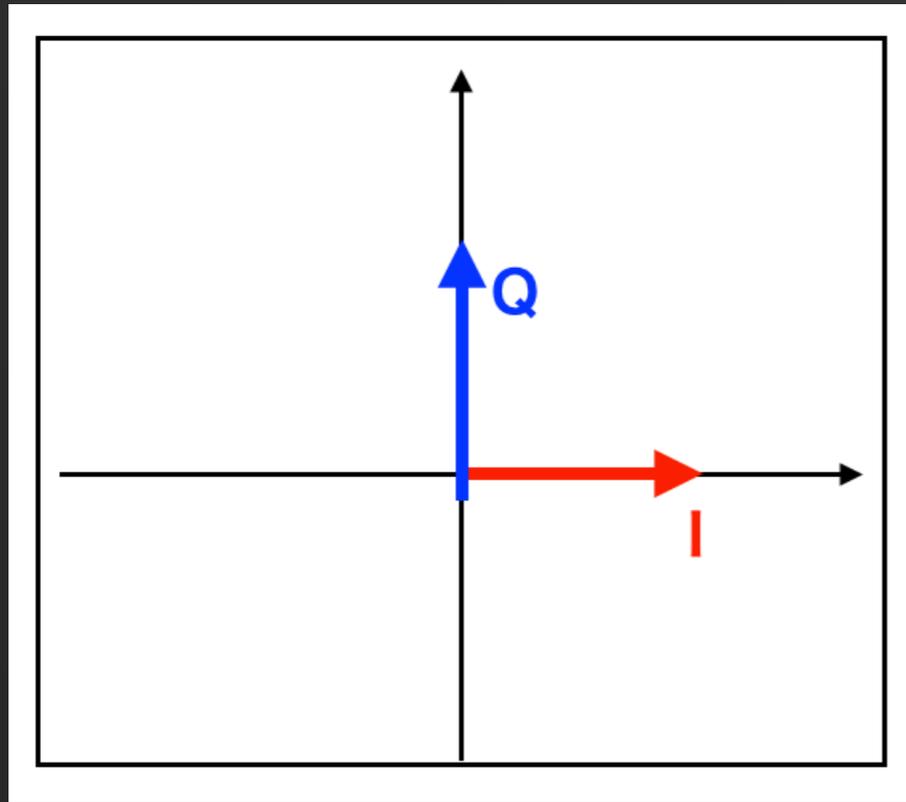
<RF phase at 450 mA>



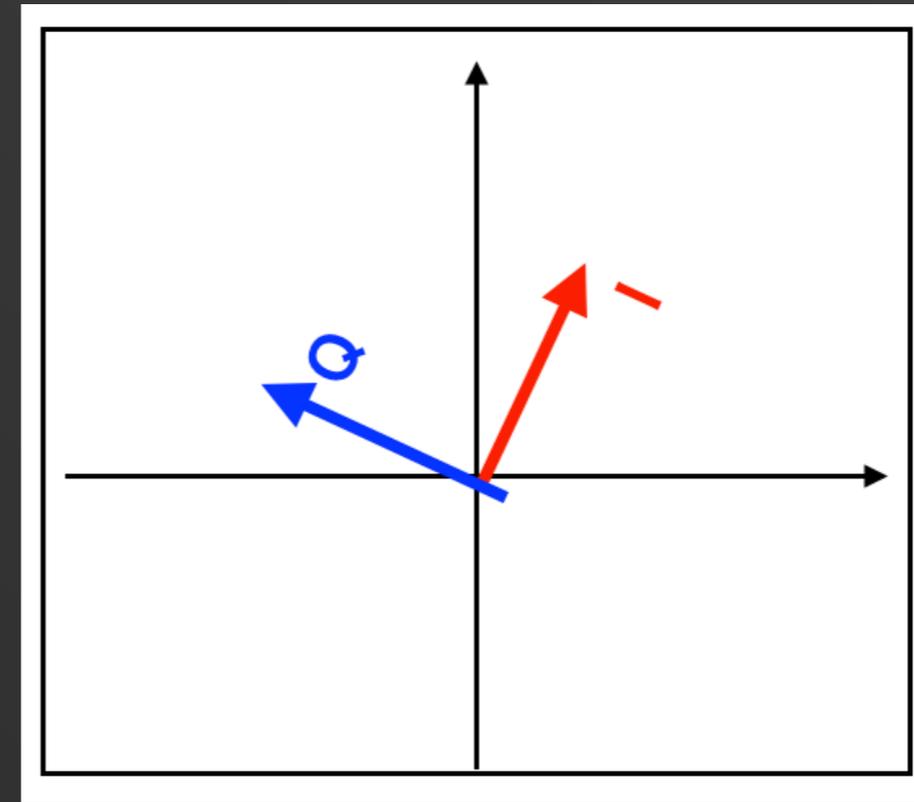
- 空洞内のRFの位相(ψ)がビーム電流が増えるに従って0から65°に変化。
 - 制御対象(cavity pickup)と制御しているもの(クライストロン電圧)に位相差が発生。
=>IQ制御だと制御が不安定になる。
 - 振幅/位相制御の利点：位相差ができてても制御に影響がない。
 - 振幅/位相制御の弱点：制御ループの遅延が大きくなる。

振幅/位相制御

<IQ phase at 0 mA>

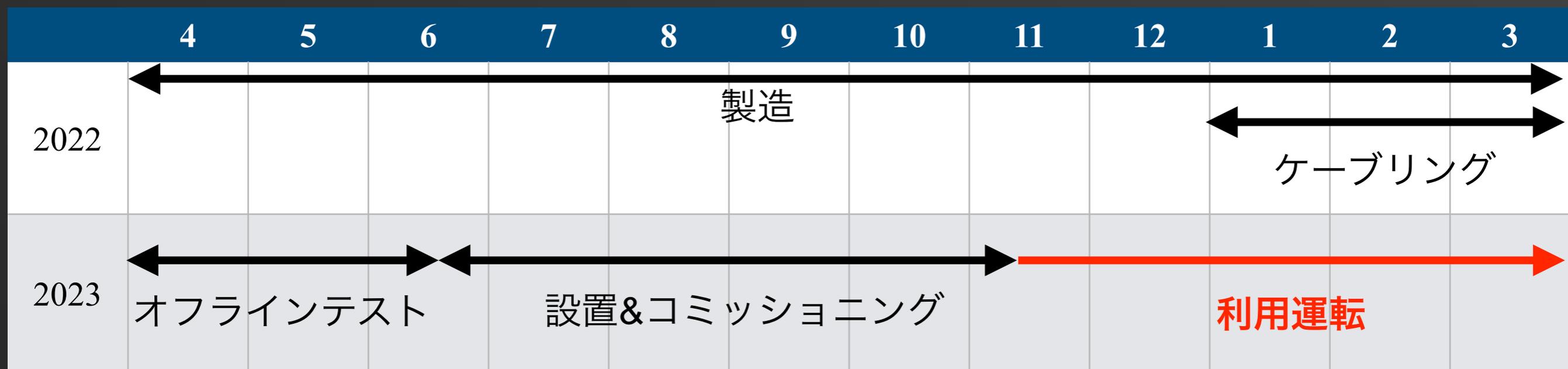


<IQ phase at 450 mA>

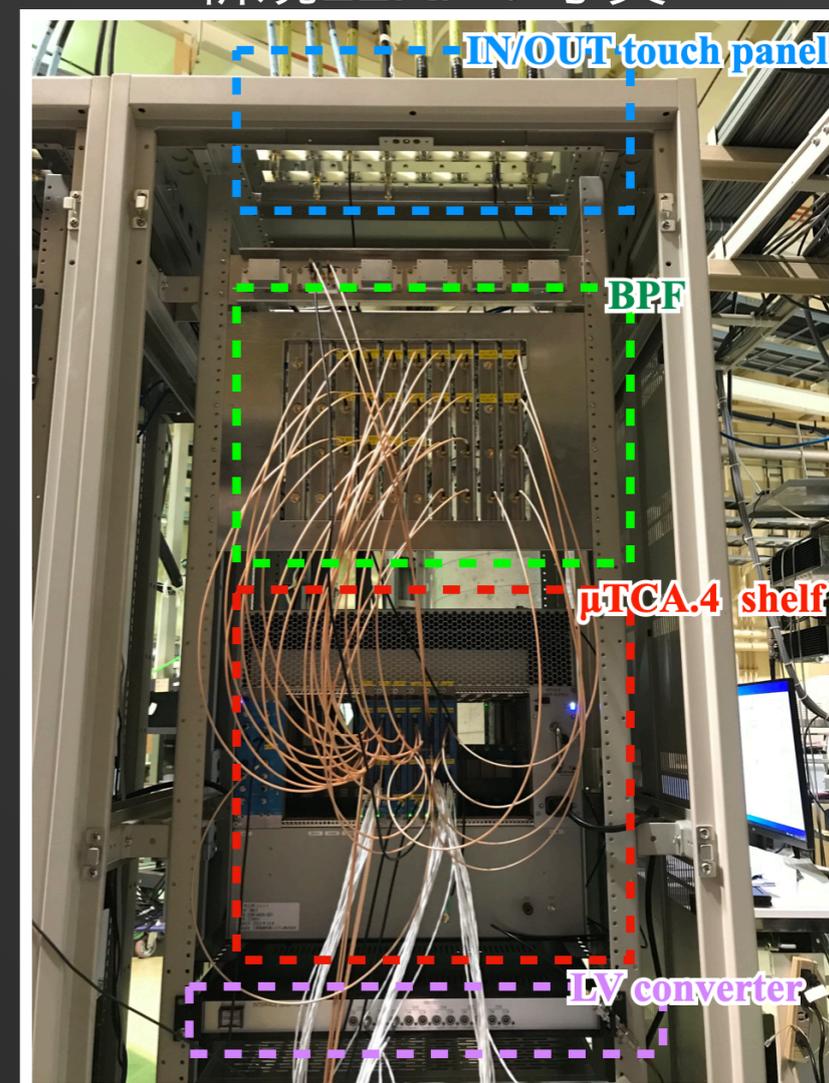


- 空洞内のRFの位相(ψ)がビーム電流が増えるに従って0から65°に変化。
 - 制御対象(cavity pickup)と制御しているもの(クライストロン電圧)に位相差が発生。
=>IQ制御だと制御が不安定になる。
 - 振幅/位相制御の利点：位相差ができてても制御に影響がない。
 - 振幅/位相制御の弱点：制御ループの遅延が大きくなる。

LLRF更新の歩み



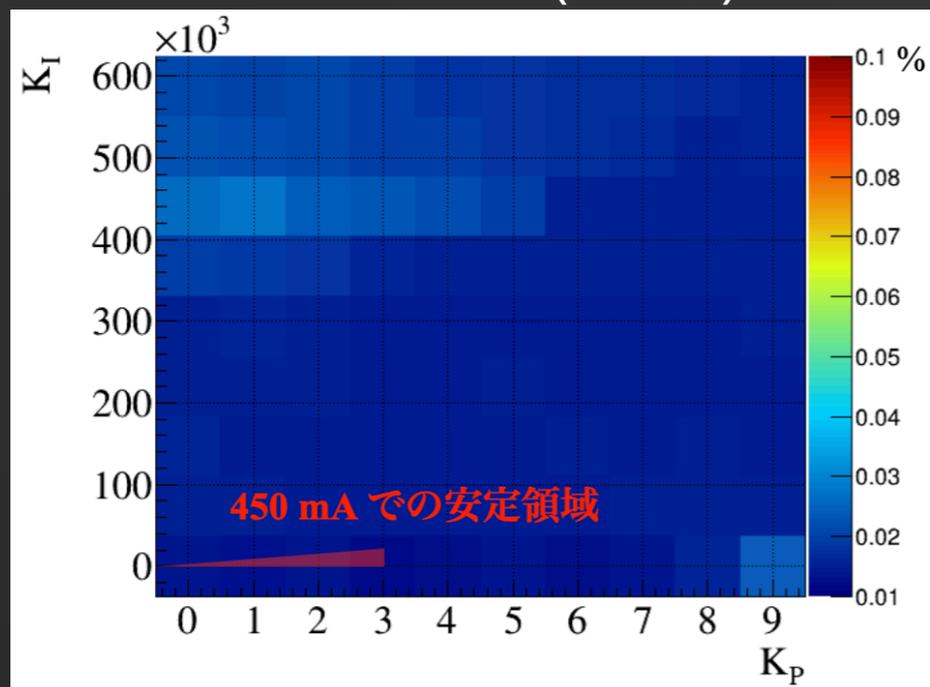
<新規LLRFの写真>



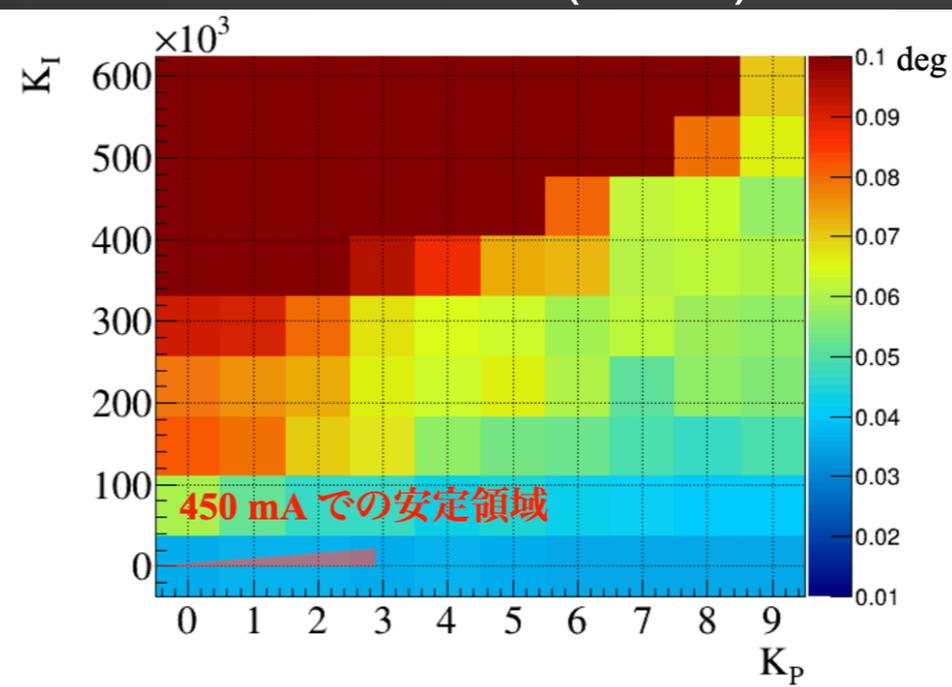
- 2022年に製造。
- 2023年夏に現場に設置。
 - 新規LLRFの性能評価やFBパラメータ調整を行なった。
- 2023年11月から運用開始。
 - 現在に至るまでトラブルもなく、非常に安定に動作。

ビーム蓄積状態でのFB安定領域の確認

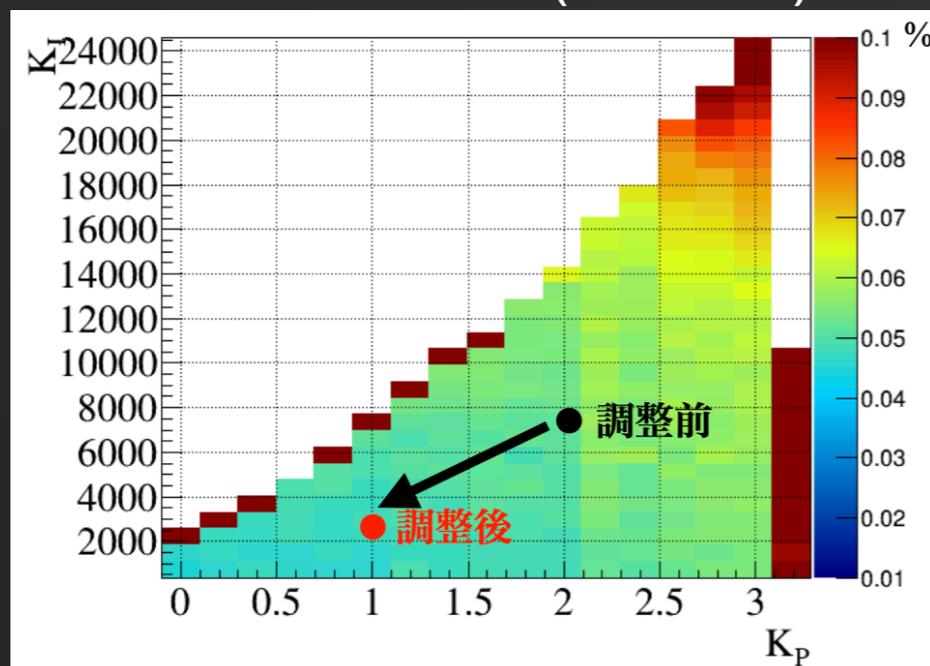
<振幅変動(0 mA)>



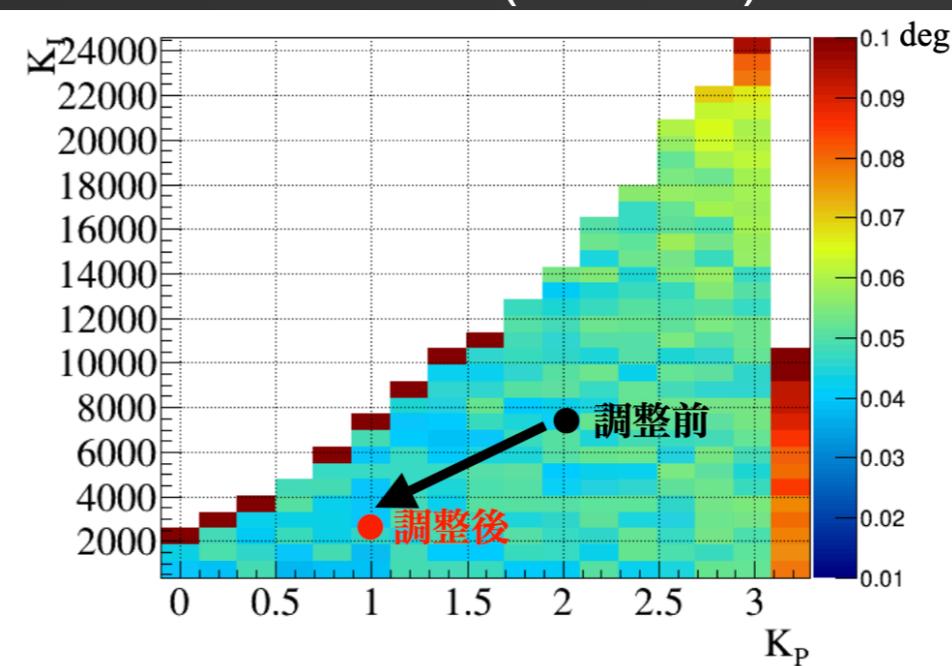
<位相変動(0 mA)>



<振幅変動(450 mA)>

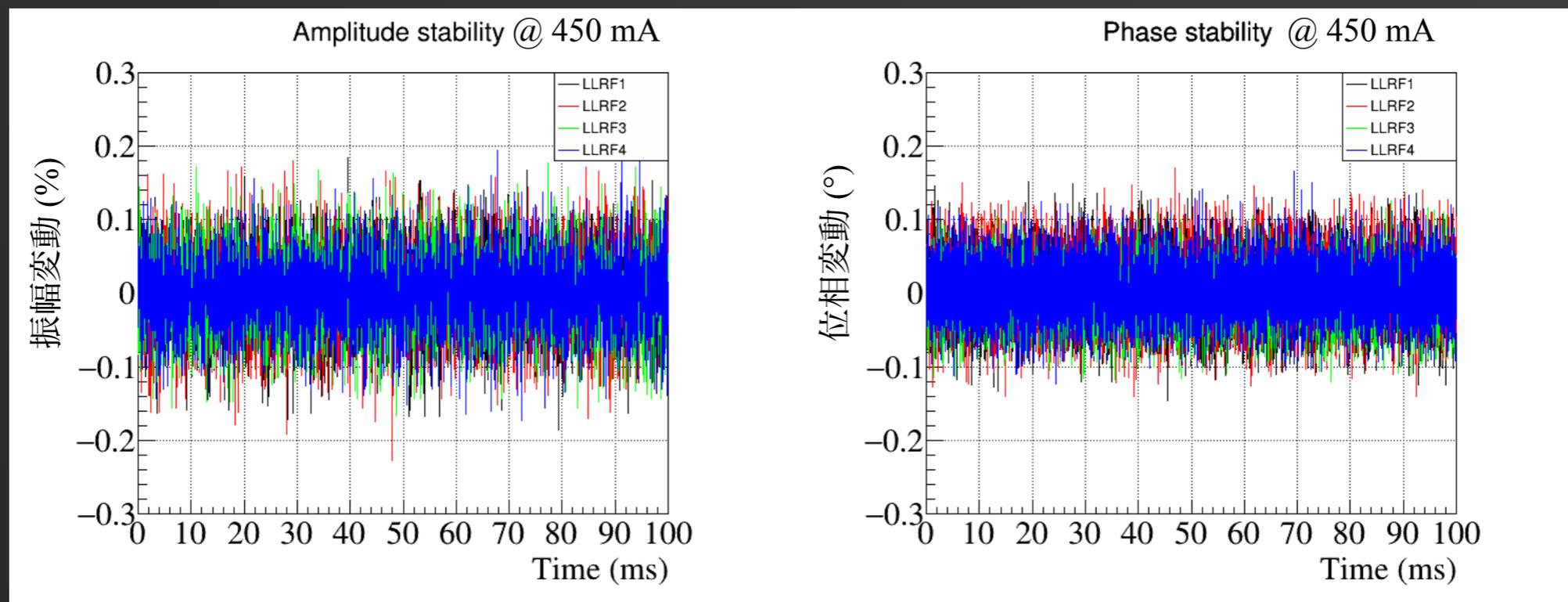


<位相変動(450 mA)>



- ・ビーム蓄積中にFBパラメータを変えていき、LLRFが発振してビームが落ちたら再蓄積。
- ・10時間のスタディーのうち7時間が再蓄積時間(PFだからできる贅沢なビームの使い方)。
- ・ビーム負荷により安定領域が非常に狭くなる事が分かった(理由は現在調査中)。

ビーム運転中の安定性

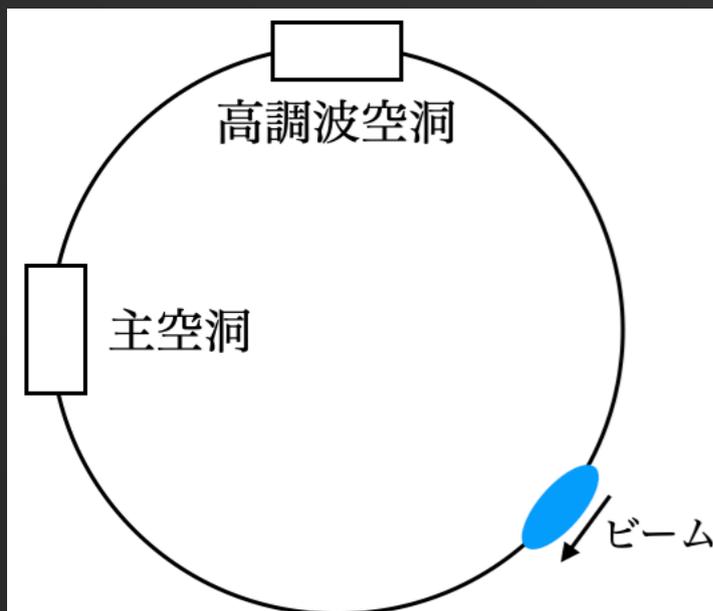


項目	LLRF1	LLRF2	LLRF3	LLRF4
振幅変動(デジタル)	0.051%	0.056%	0.053%	0.051%
振幅変動(アナログ)	-	-	-	0.52%
位相安定性(デジタル)	0.050°	0.053°	0.041°	0.047°
位相安定性(アナログ)	-	-	-	0.12°

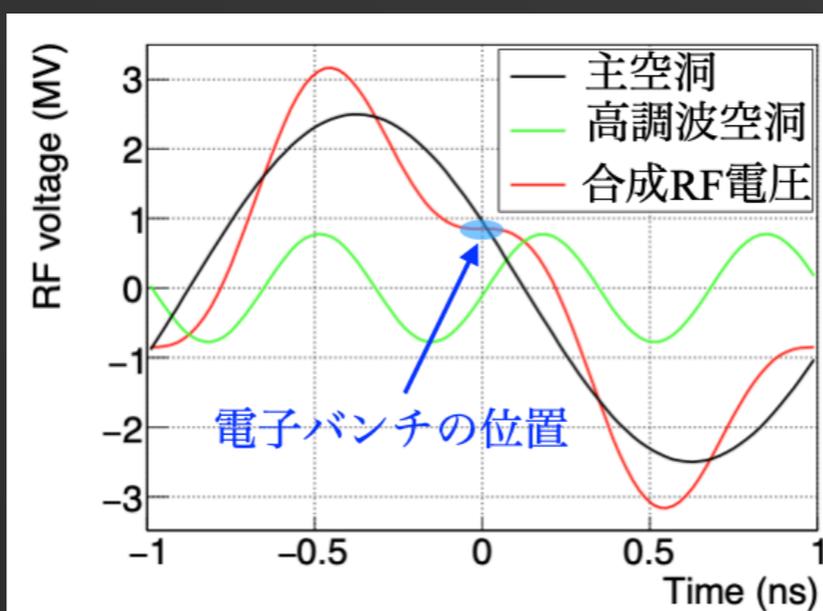
- **振幅変動 $\pm 0.056\%$ 以下, 位相変動 $\pm 0.053^\circ$ 以下を達成。**
 - 当初設定した目標を達成(振幅変動 $< \pm 0.1\%$ 、位相変動 $< \pm 0.1^\circ$)
 - 変動の主成分はビームノイズ由来の ~ 50 kHzで、LLRFでは対処が難しい。
 - ビーム立ち上げ時に多少のトラブルがあったが、その後は順調に稼働(~ 3 ヶ月間)。

8. 次世代光源～PFでの取り組み2～

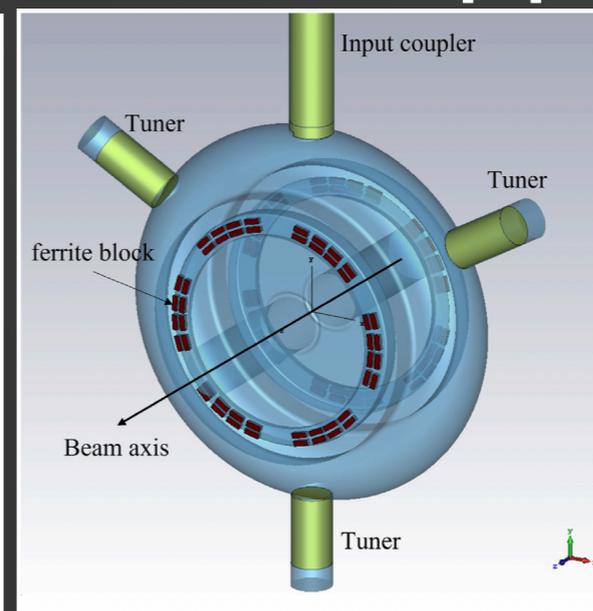
<次世代光源のRFシステム>



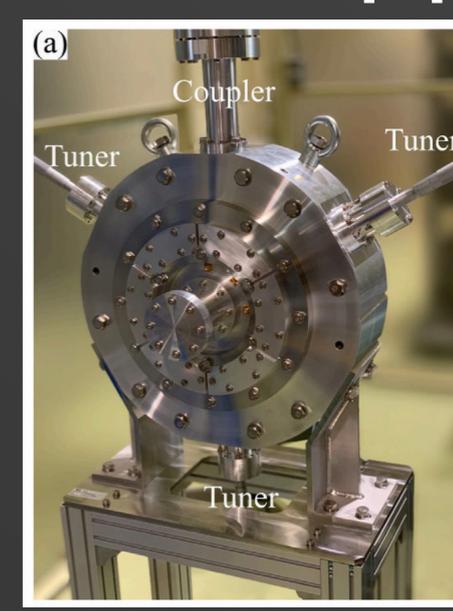
<次世代光源でのRF電圧>



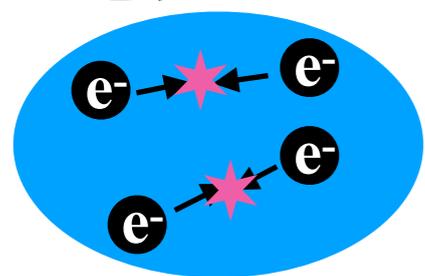
<新型高調波空洞[11]>



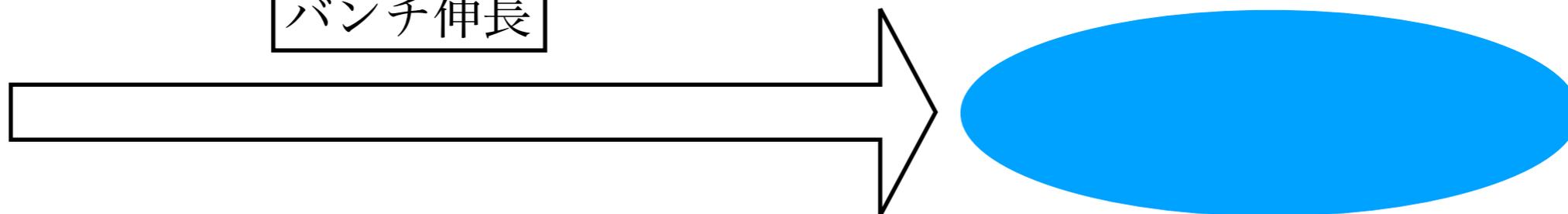
<低電力モデル[11]>



<電子バンチ>



バンチ伸長



- バンチ伸長によってバンチ内散乱を抑制。
 - ・ エミッタンス増大を抑制。
 - ・ ビーム寿命の減少を改善。
- PFではRFの応答を組み込んだ他粒子のトラッキングコードを開発中(MBTRACK2[10])。
- 新型寄生モード吸収機構(NanoTerasuで実用化)を搭載し、ビーム負荷の発生を抑制した高調波空洞を開発 [11]。

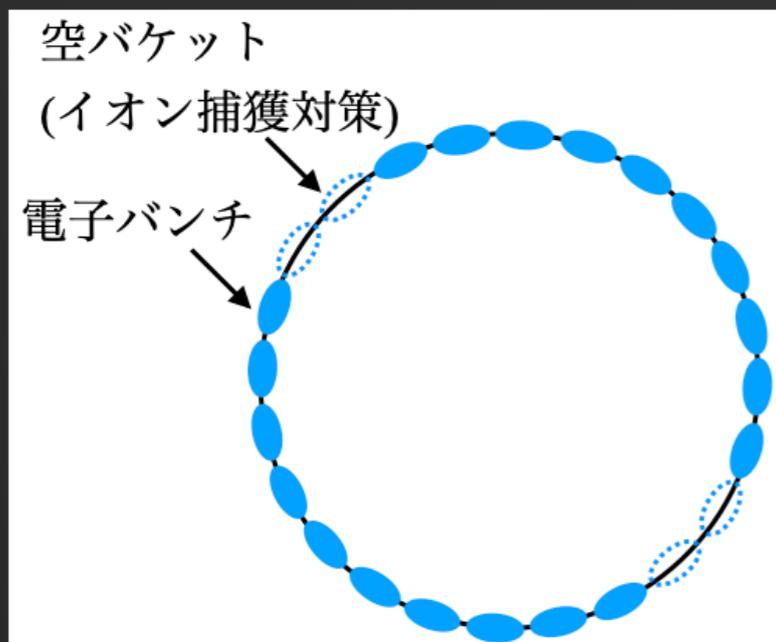
[10] N. Yamamoto *et al*, proc PASJ 2021, MOP023

[11] T. Yamaguchi *et al*, NIM, Volume 1053, 2023, 168362,

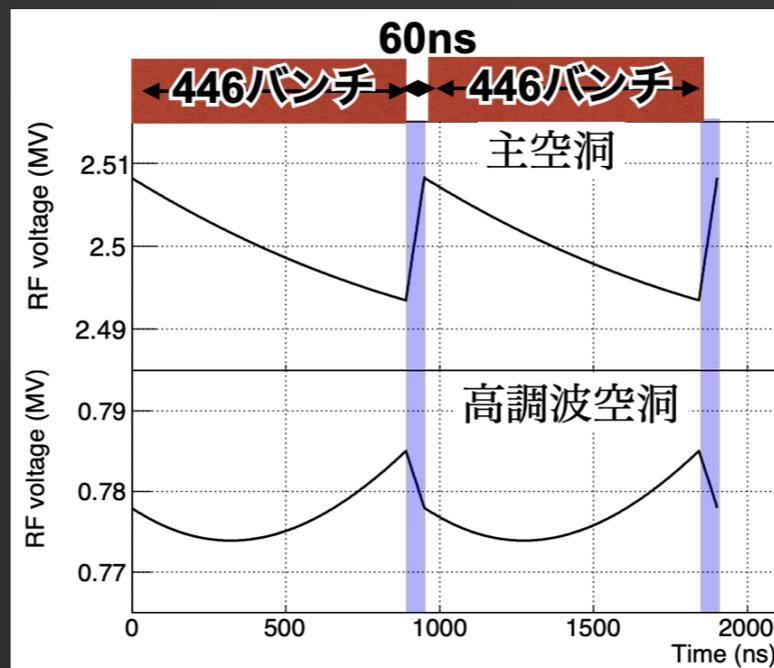
8. 次世代光源～PFでの取り組み3～

- バンチギャップが大きいと過渡的電圧変動(TBL)が起きてしまう。

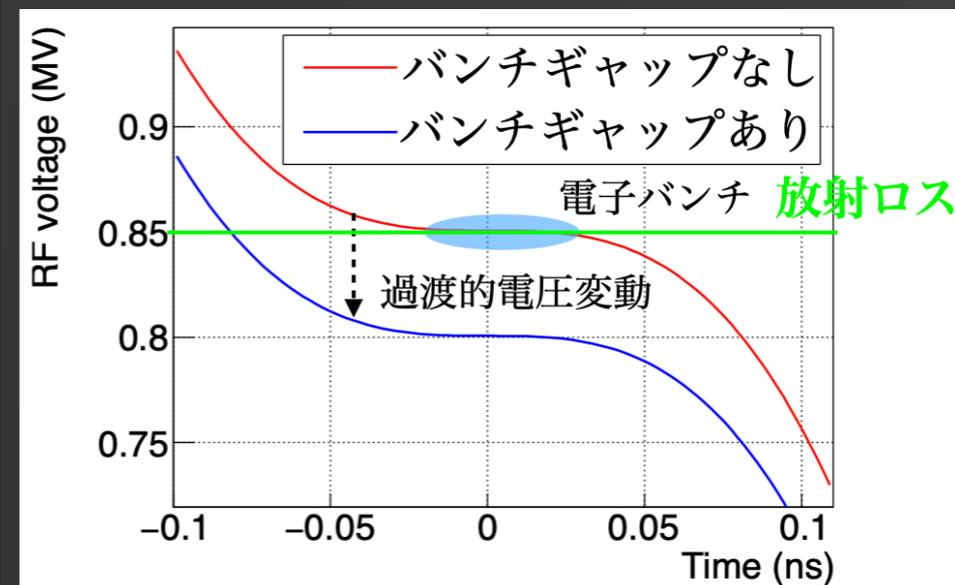
<バンチトレインの様子>



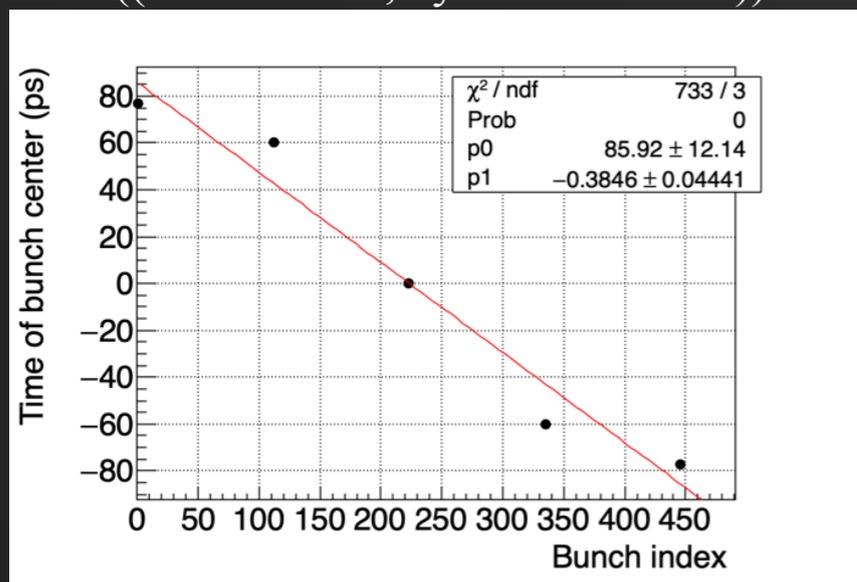
<過渡的電圧変動(TBL)>



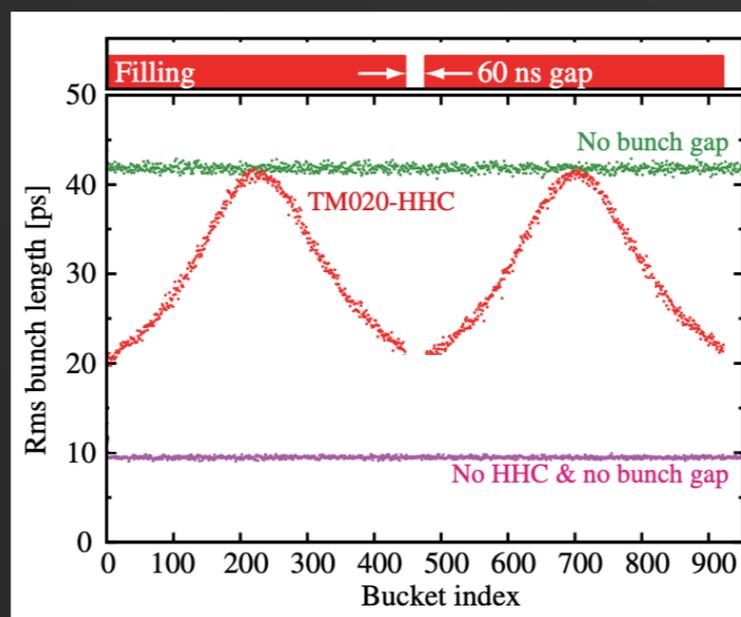
<TBLの影響1>



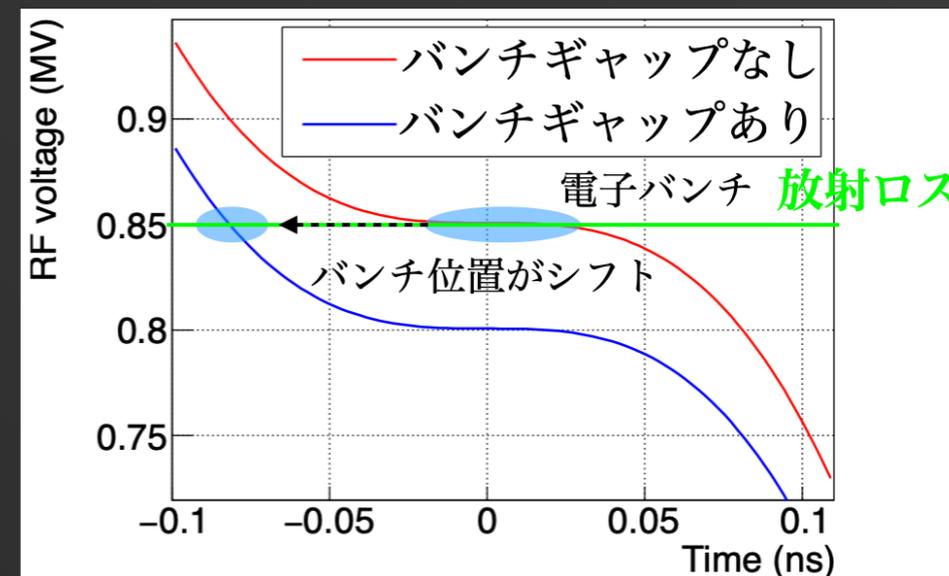
<バンチ位置の変動>
(MBTRACK, by N. Yamamoto)



<各バンチのバンチ長 [1]>



<TBLの影響2>



[1] N. Yamamoto *et al*, PRAB 21 012001 (2018)

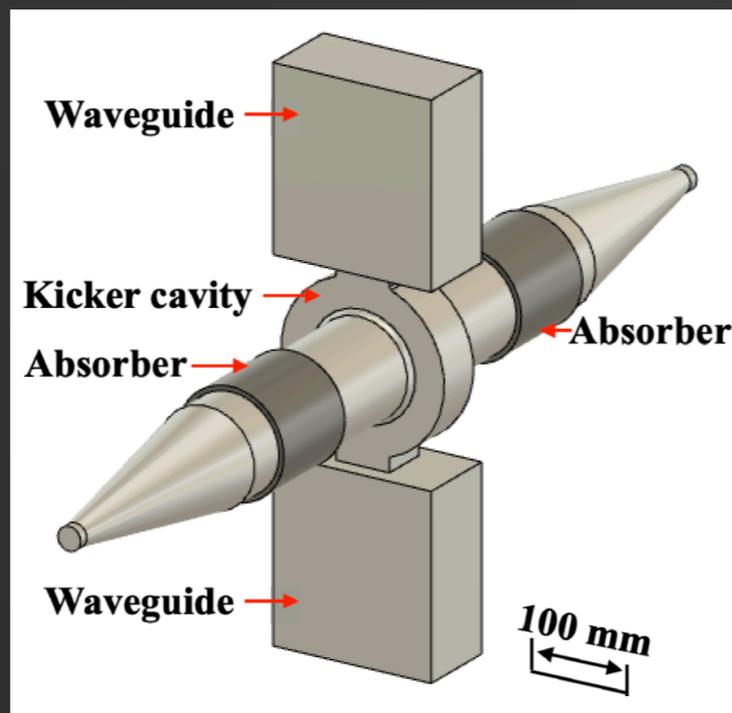
TBLによって十分なバンチ伸長が達成できなくなる。

8. 次世代光源～PFでの取り組み4～

<補償空洞のパラメータ>

Parameter	Value
Resonant frequency	1.50006 GHz
R/Q	60.38 Ω
Q_0	17937
Q_L	292.41
Synchronous phase	0 degree
Generator voltage	53 kV
Cavity voltage	44.2 kV
Generator power	49.5 kW
Power loss in cavity	2.59 kW
Reflecting power	15.7 kW
Maximum power density	21.7 W/cm ²
Power loss in absorbers	101.9 W

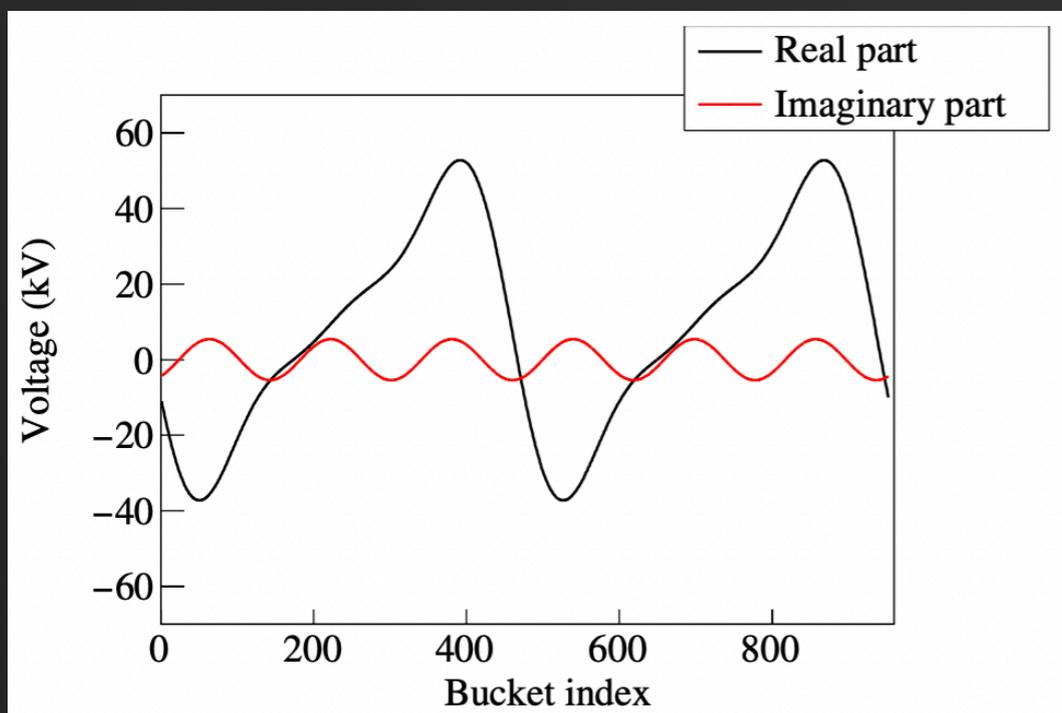
<補償空洞の模式図>



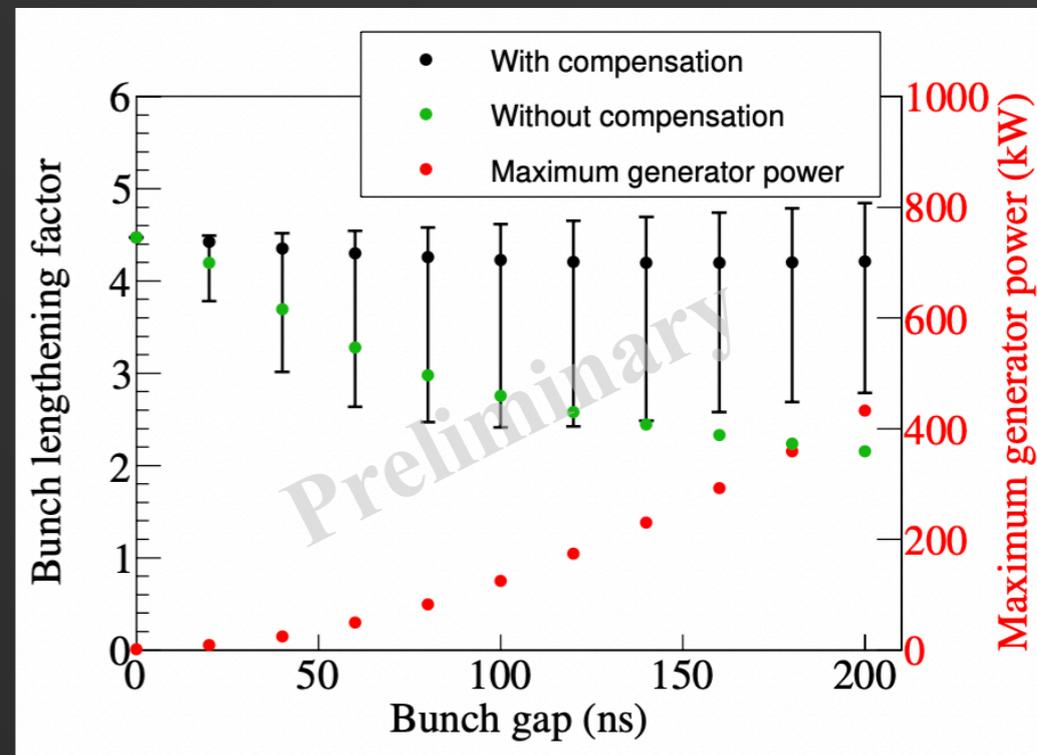
- ・ 補償空洞の位相はオンクレスト。
- ・ 過渡的電圧変動の実部だけを補償。

$$\begin{aligned} \text{Re}[\tilde{V}_{c,k}(m)] &= -\text{Re}[\tilde{V}_{c,f}(m) + \tilde{V}_{c,h}(m)] + U_0/e \\ \tilde{V}_{c,f}(m) + \tilde{V}_{c,h}(m) &= \tilde{V}_{g,f}(m) + \tilde{V}_{b,f}(m) + \tilde{V}_{g,h}(m) + \tilde{V}_{b,h}(m) \end{aligned}$$

<フィードフォワードパターン(Bunch gap=60ns)>



<自然バンチ長からのバンチ伸長率>



過渡的電圧変動によるバンチ伸長率の低下を改善可能。

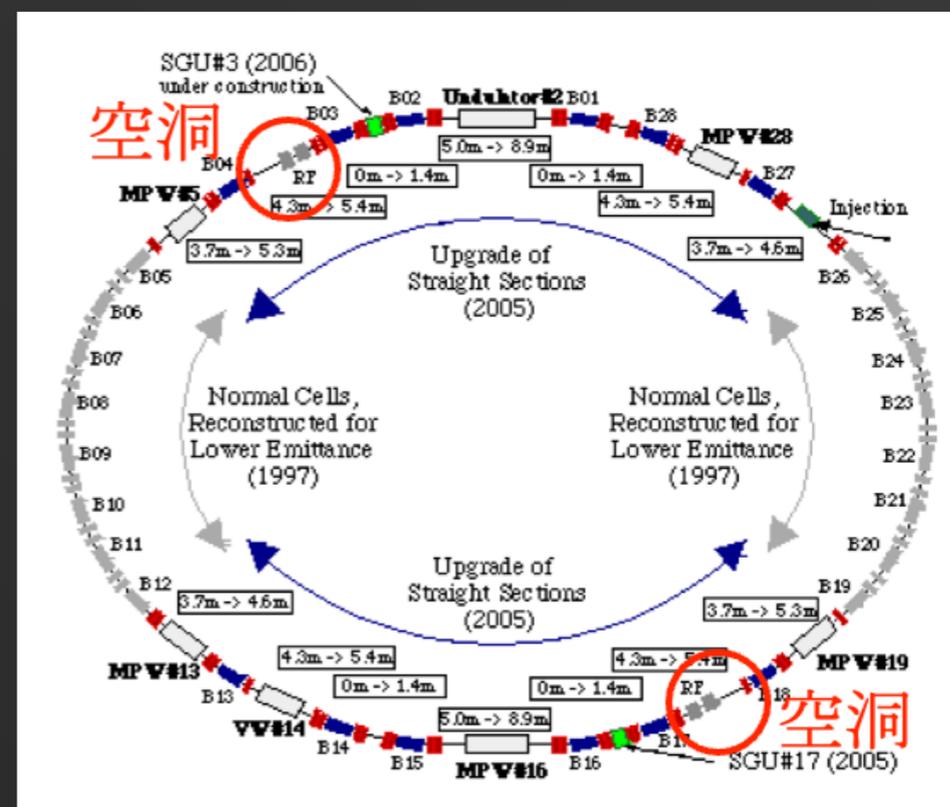
8. 次世代光源～PFでの取り組み5～

- 空洞電圧の補償によりバンチ位相の変動抑制を試みた。
- PFのRFシステム
 - ・ 基本波空洞×4
 - ・ 空洞1台につき1台のクライストロンを繋いで制御。
- (4.1) わざと過渡的電圧変動を補正しやすい状況を作って試験。
- (4.2) 空洞電圧の補償にはdigital low-level RF (DLLRF) systemのfeedforward機能を使用。
- (4.4) バンチ位相の測定にはBunch-by-Bunch feedbackでの位相検波信号(iGP)を使用。

<代表的なPFのパラメータ>

エネルギー	2.5 GeV
周長	187 m
ハーモニック数	312
ビーム電流	450 mA
ビームロス/turn	0.4 MeV
ビームライン数	38
自然エミッタンス	34.6 nm rad
RF 周波数	500.1 MHz
合計加速電圧	1.7 MV
クライストロン電力	287 kW

<リング内での空洞位置>



4.1 過渡的電圧変動を補正しやすい条件

<空洞パラメータ>

Parameter	Symbol	Value
Loss factor	k	5.48e11 V/C
Filling time	τ_f	1.24e-5 s
Bunch interval	t_b	2 ns
Harmonics	h	312
Tuning angle	ψ	-0.44 rad
Rev. frequency	F_{rev}	1.6 MHz
Cavity bandwidth	F_c	21.53 kHz

- $\tau_f \gg t_b$ の時かつバンチ間隔が変動しないと仮定すると、
m番目のRFバケットにビームが励起する電圧は

$$V_b(m) \sim kq_b \frac{1 + \alpha N_t}{\alpha} \frac{N_t}{h} (1 - N_g \alpha) + \frac{kq_b h}{\pi^2} (1 + \alpha) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left\{ \cos\left(\frac{2\pi n m}{h}\right) - \cos\left(\frac{2\pi(nm - N_t)}{h}\right) \right\}$$

$$\text{with } \alpha = -\frac{t_b}{\tau_f} (1 - i \tan \psi)$$

- 過渡的電圧変動は周回周波数とその高調波で近似できる。

- 過渡的電圧変動を補正しやすい条件

1. 周回周波数成分が一番大きい。

- 基本波空洞では周回周波数の高次が補正不能なため。

2. 過渡的電圧変動の振幅が小さい。

- バンチ位相が検出可能な範囲でビーム電流を下げる。

3. 空洞電圧が小さい。

- 過渡的電圧の補正に使える電圧を最大化。
(空洞電圧+補正電圧 < 出力可能 最大電圧)

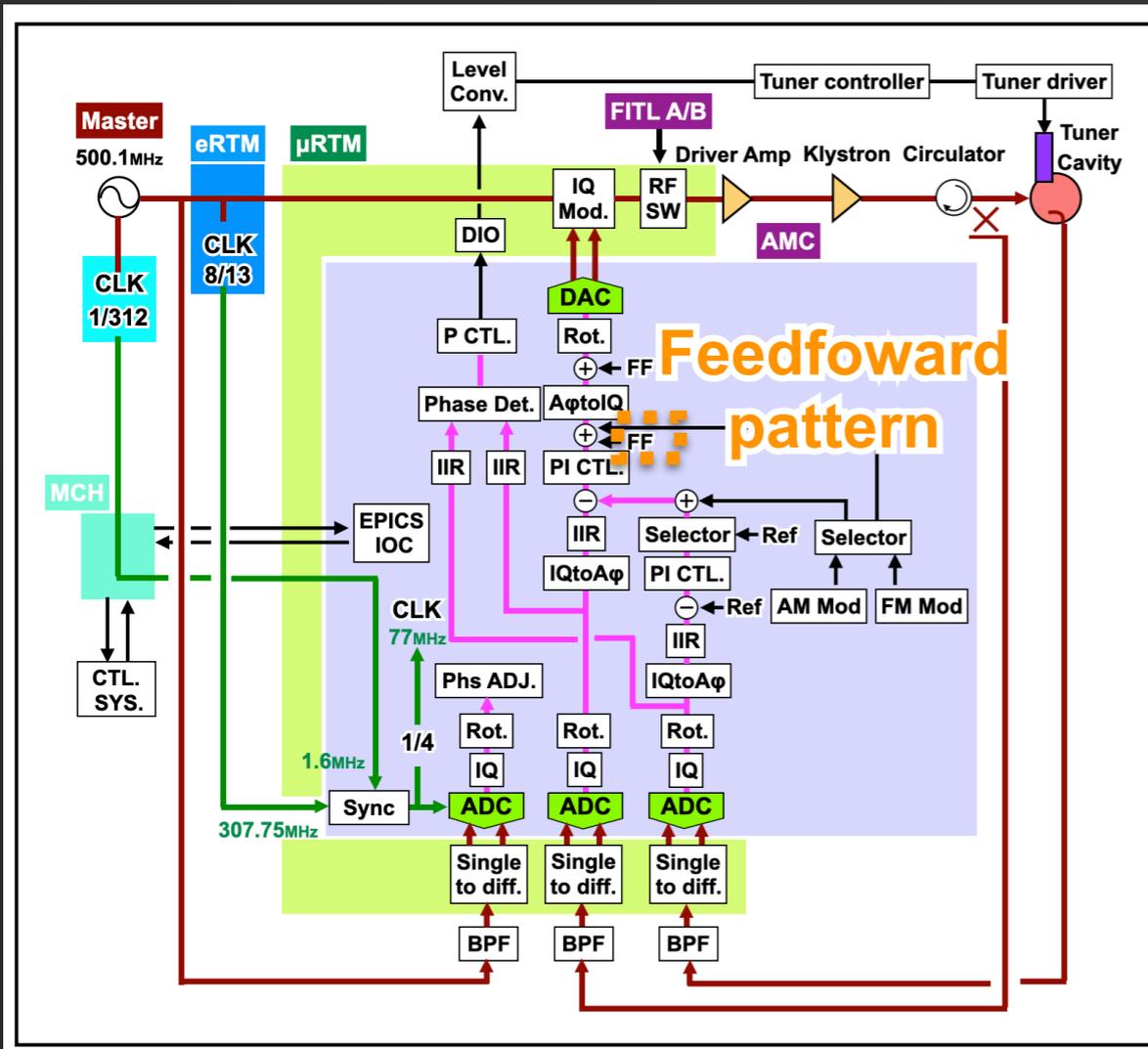
- ビーム蓄積可能な最小値に設定。

<過渡的電圧が補正しやすい条件>

Parameter	Symbol	Value
# of bunch gaps	N_g	156
# of bunches	N_t	156
Beam current	I_b	0.1 A
Bunch charge	q_b	4e-10 C
Cavity voltage	V_c	1 MV
Generator power	P_g	26 kW

4.2 DLLRFを用いたRF電圧補償

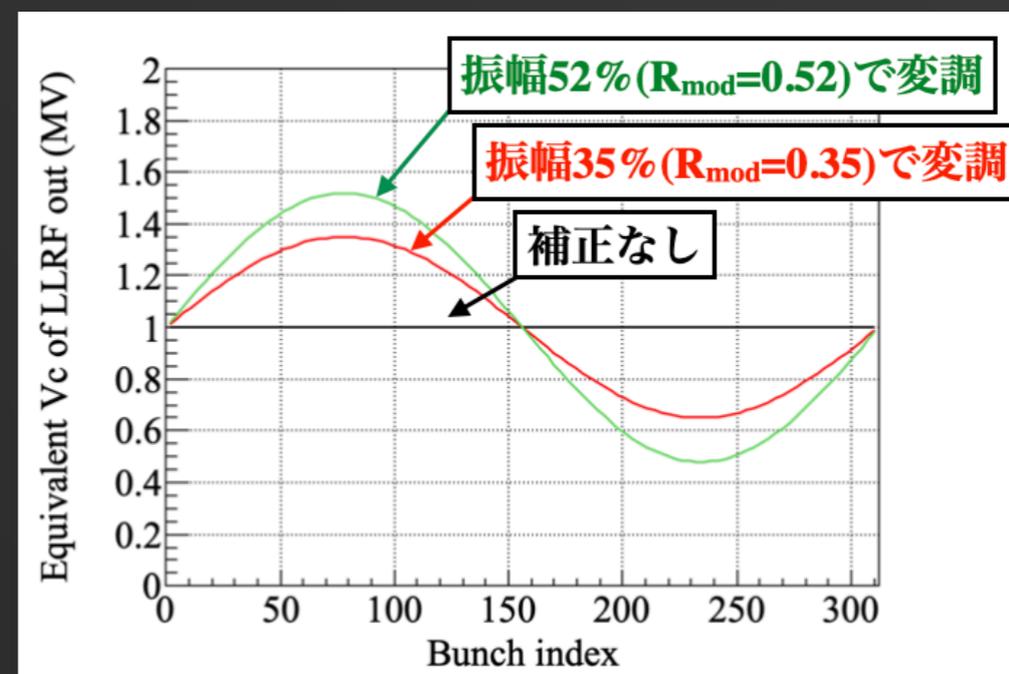
<DLLRFシステムの構成>



- Feedforward (FF) 機能をRF出力の直前に実装。
- 外部トリガー信号と同期した任意の波形での振幅/位相変調パターンをRF出力に重畳可能。
- 今回はRF出力の振幅を周回周波数で変調。

$$V_{out}(t) = V_c \left(1 + R_{mod} \sin(2\pi f_{rev}t + \theta_{offset}) \right)$$
- FF patternは周回周波数と同期。
- FF patternの位相は7.7度刻みで変更可能。

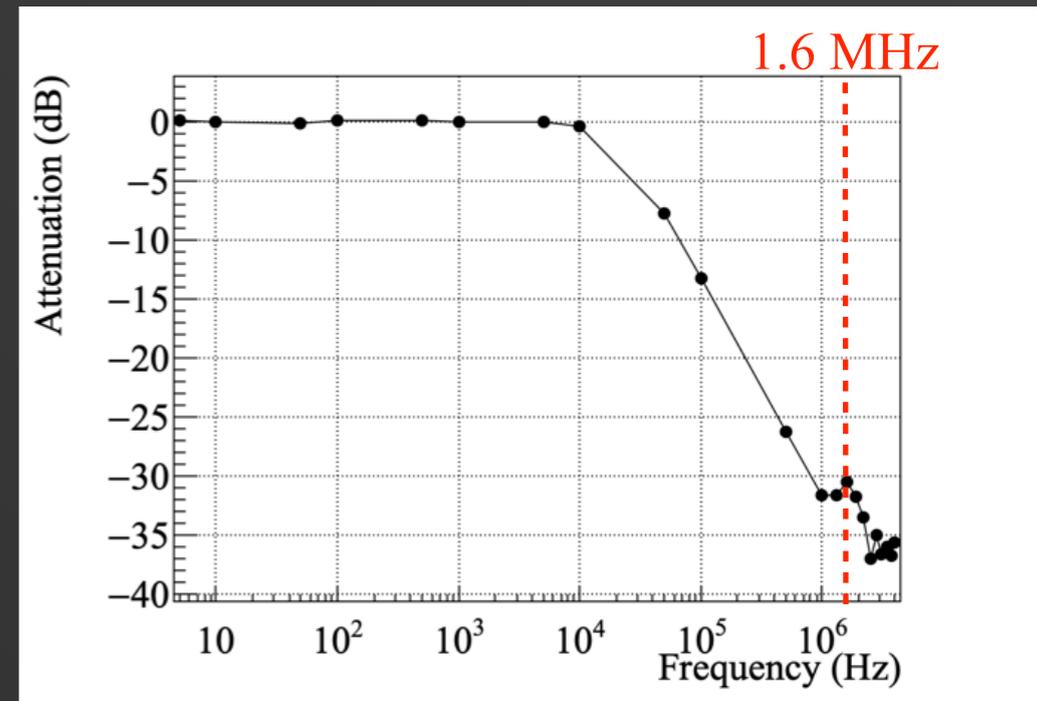
<振幅補正パターン>



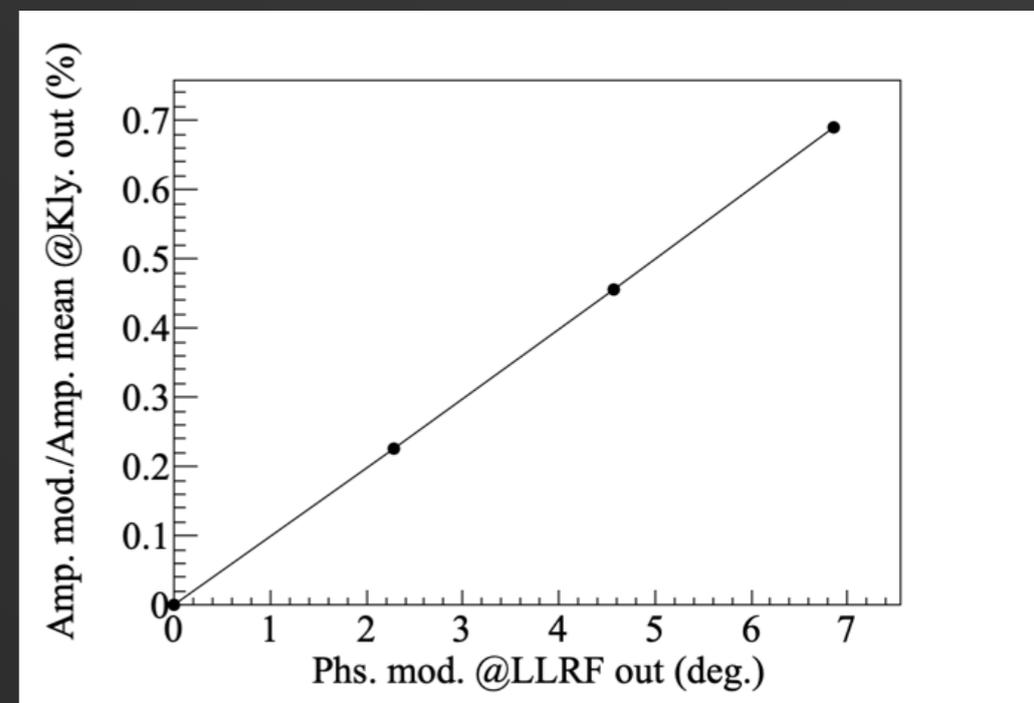
4.3 RF電圧補償の注意点

- 変調信号が空洞への入力で大きく減衰する。
 - ・ 空洞の周波数帯域 < ~ 22 kHz
 - ・ 変調信号(1.6 MHz)の大部分が空洞入力で反射する。
=> **反射パワーの許容値 (40 kW)が変調の大きさを制限。**
- LLRFでは生の過渡的電圧変動が測定できない。
 - ・ デジタル処理過程でカットオフ周波数100 kHzのIIRフィルターが存在(サンプリングノイズ除去のため)
 - ・ **LLRFでは1.6 MHzが1/10に減衰して見える。**
 - ・ **LRRFでは過渡的電圧変動の時間積分が観測される。**
- FFパターンの位相が各RFステーション毎に異なる。
 - ・ RFステーション毎に空洞までの経路長が異なるため。
- クライストロン中で振幅変調と位相変調が交換する。
 - ・ 振幅から位相への交換は小さい。
 - ・ 位相変調をかけると位相から振幅への変換量が、過渡的電圧変動を上回って制御が複雑化する。

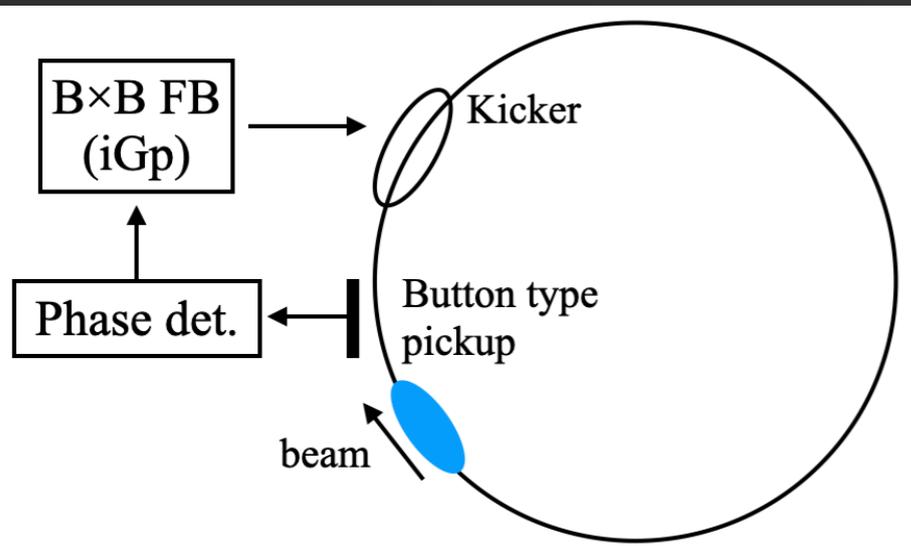
<LLRF出力から入力までの信号減衰>



LLRFで測定したクライストロン
入出力での位相=>振幅変換



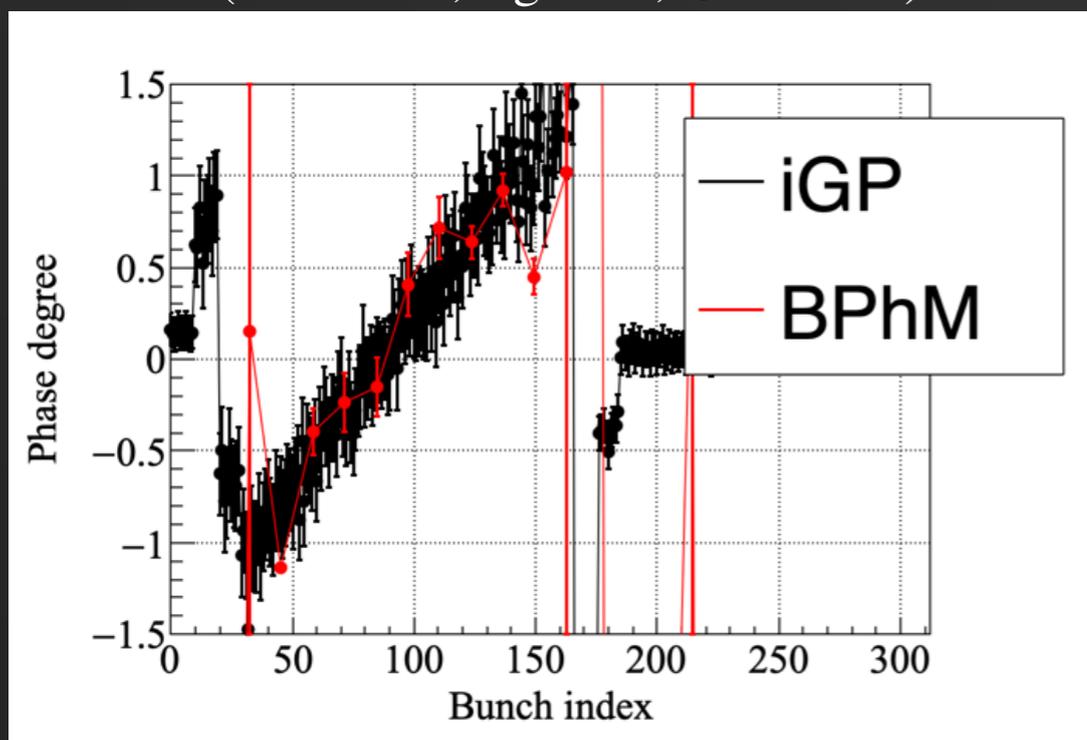
4.4 バンチ位相の測定



- バンチ位相の測定にはBunch-by-Bunch feedback (iGP)で処理された位相検波信号を使用。
- 各バンチ毎にビーム4万ターン分の平均値を計算。

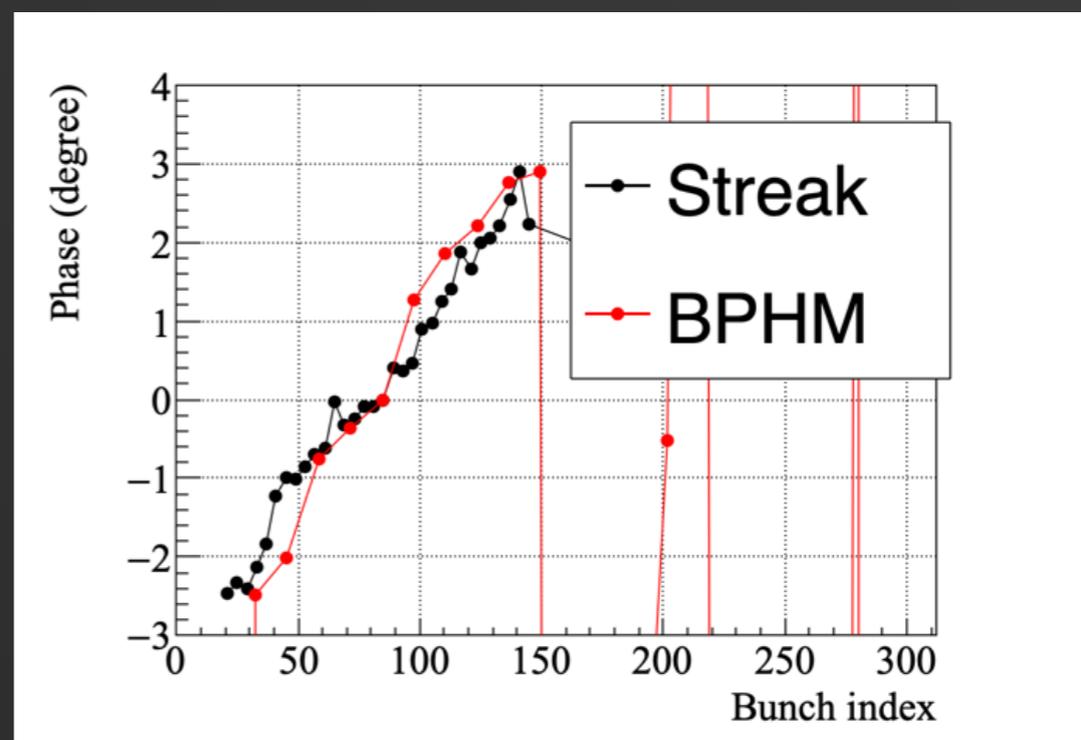
<iGpとバンチ位相モニター(BPhM)での測定比較>

(Vc=1 MV, Ng=156, Ib=100mA)



<BPhMとストリークカメラの比較>

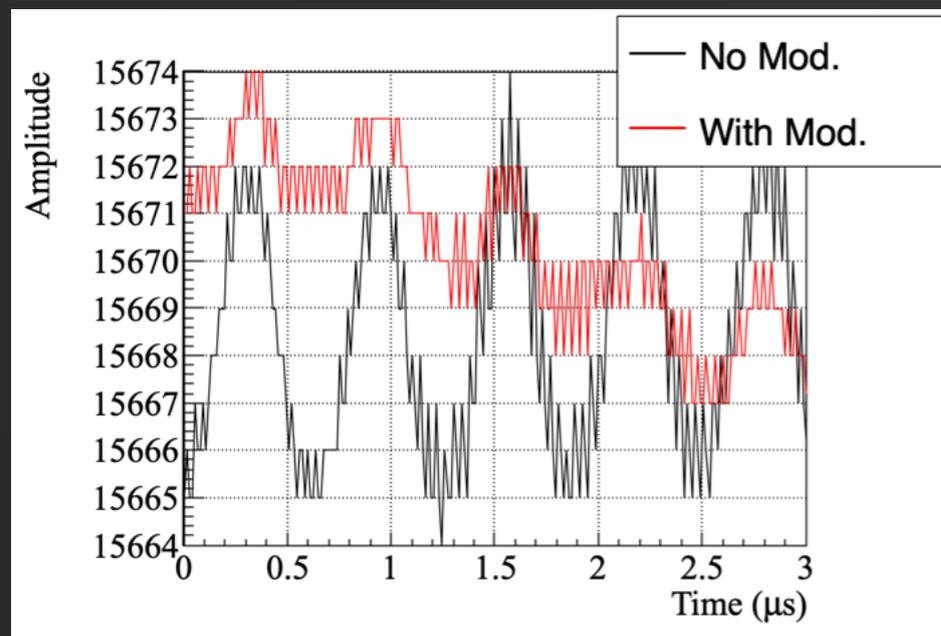
(Vc=1.7 MV, Ng=180, Ib=420mA)



- 間接的だが、iGpでバンチ位相が正しく測定できていることを確認。
- 今回の測定条件ではバンチ位相が1.8 deg./bunch傾いていることを確認。
- FFパターンのパラメータを調整してバンチ位相の傾きを解消できるか検証。

4.4 FFパラメータの位相調整

<空洞電圧の振幅波形の例>

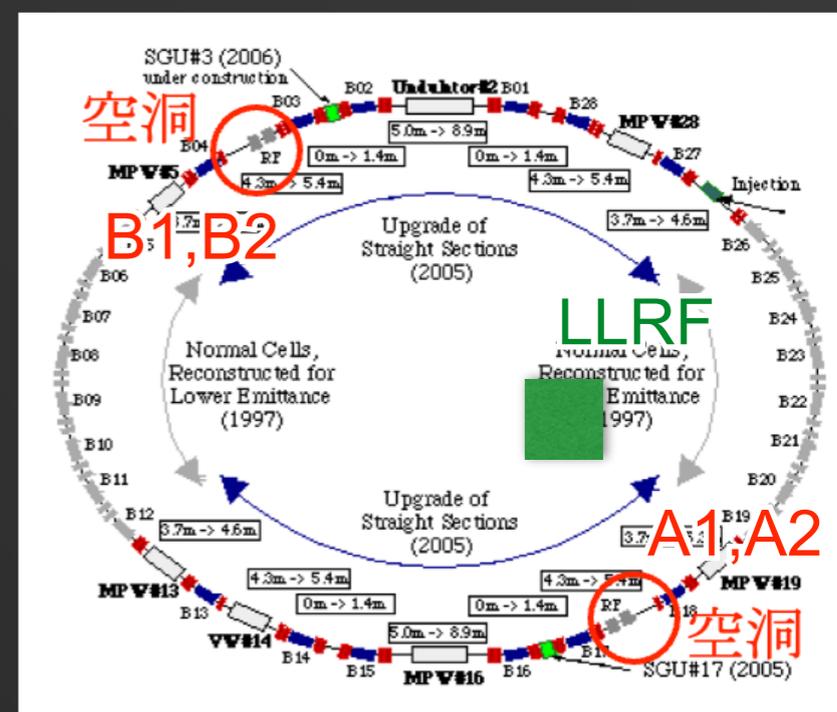


- 振幅変調を弱くかけた状態で空洞電圧の振幅を見ながら、周回周波数成分の変動が最小になるようにFFパターンの位相を調整。
 - ・ RFステーション毎に経路長が違うため、ビームから見たFFパターンの位相も違ってくるため。

<パターンのタイミング>

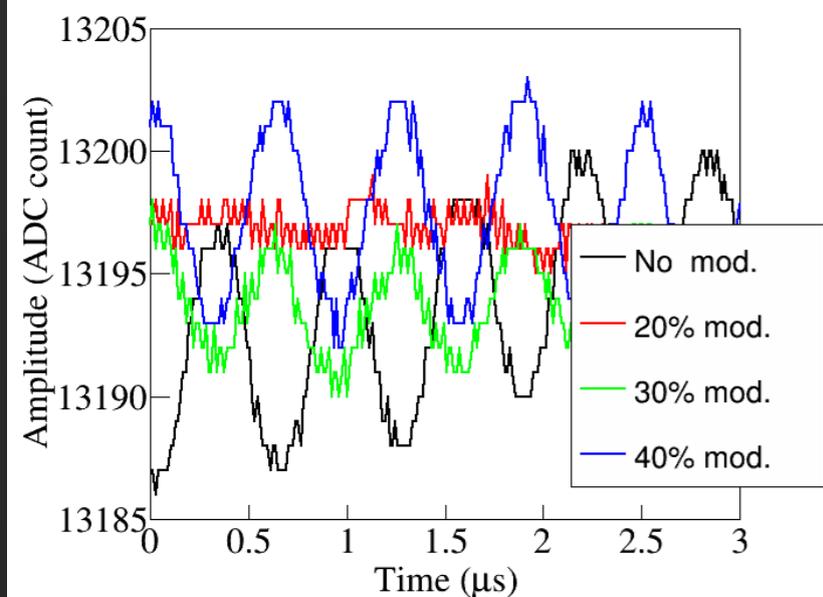
Station ID	A1	A2	B1	B2
A1 stationのRFからの位相差	90°	80.8°	122.2°	131.9°

<リング内の空洞位置>

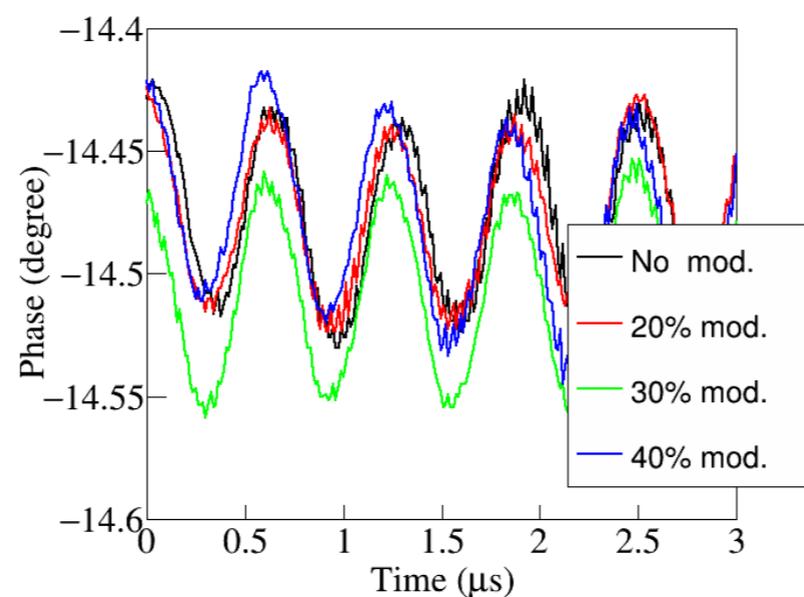


4.5 FFパラメータの振幅スキャン

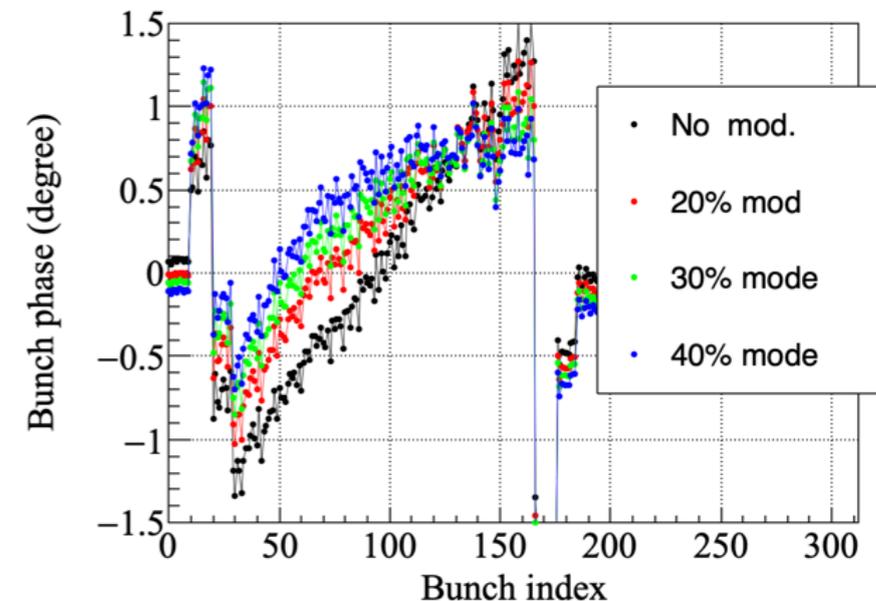
<空洞電圧の振幅>



<空洞電圧の位相>



<iGpでのバンチ位相>



- 変調の振幅が元のRF出力の20%になると空洞電圧の振幅変動がゼロになった。
 - ・ 空洞電圧の位相変動は変調の大きさに関わらず、ほとんど変化なし。
 - ・ iGpで測定しているバンチ位相もほぼ変化なし。
- 変調の振幅を出力可能な最大値(変調なしのLLRF出力の40%)まで上げてもほぼ効果なし。

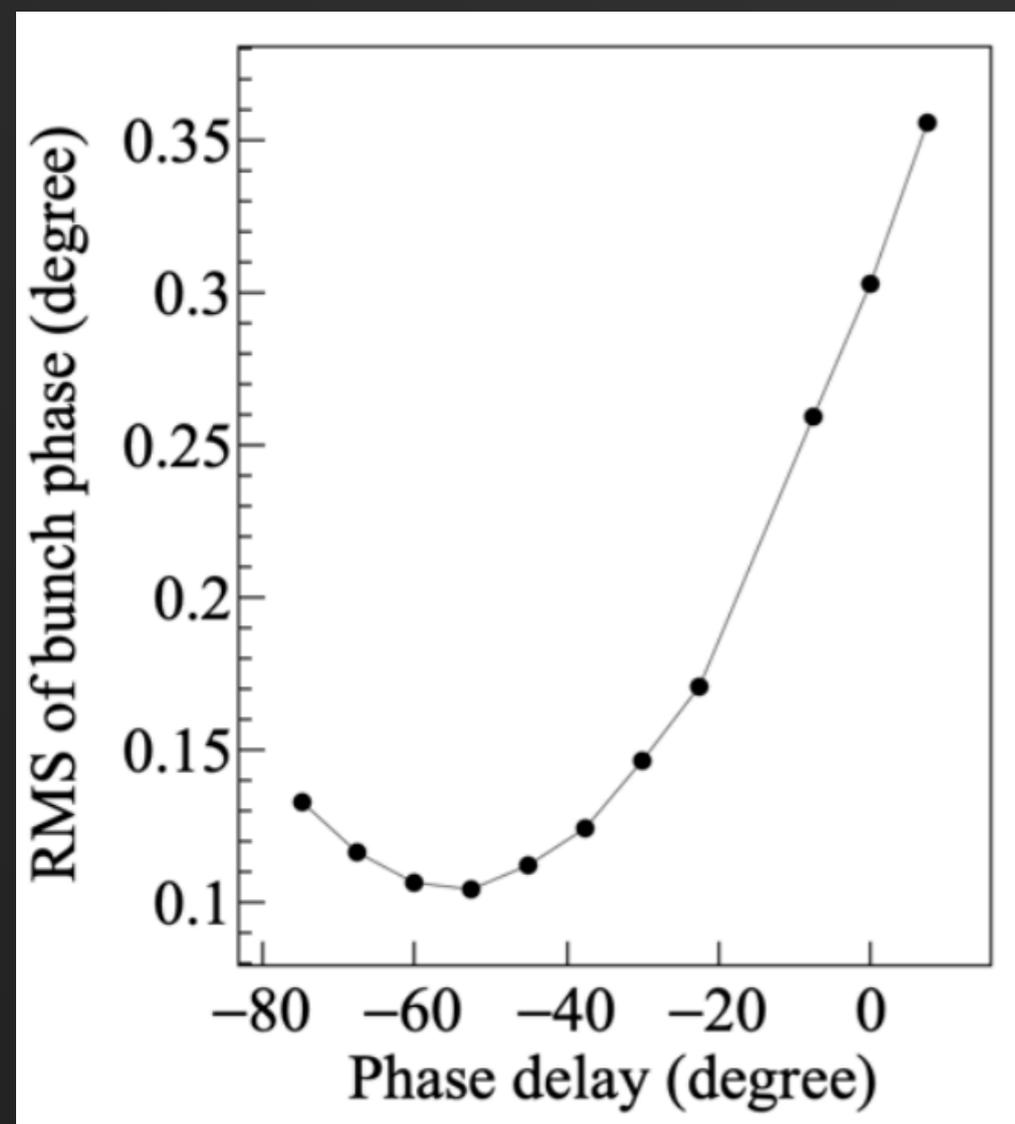
4.6 FFパラメータの位相スキャン1

- 変調の振幅を40%に固定。
- 全部のRFステーションの位相を一定量だけ同時にシフト。

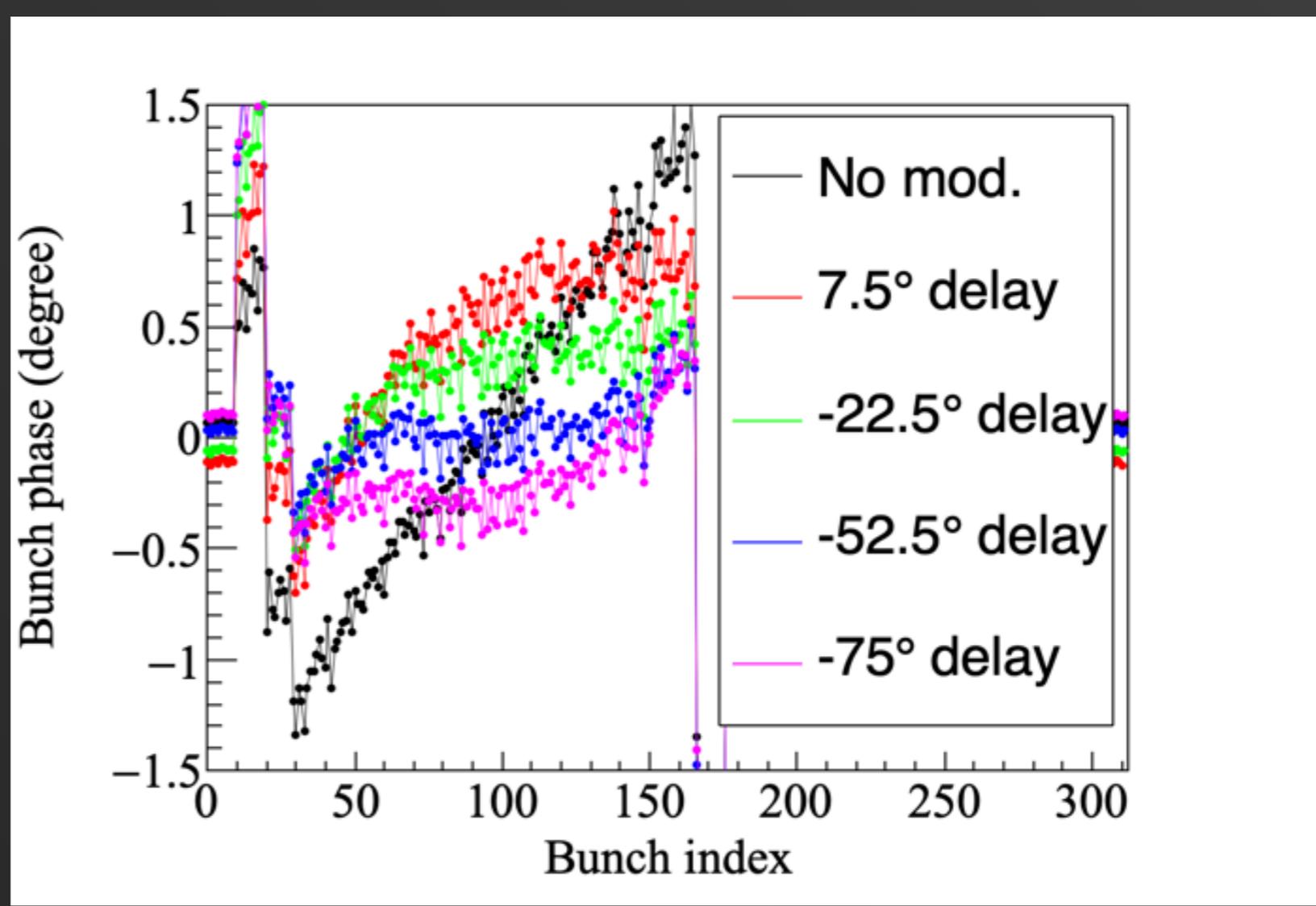
4.6 FFパラメータの位相スキャン1

- 変調の振幅を40%に固定。
- 全部のRFステーションの位相を一定量だけ同時にシフト。
 - ・ RF電圧を補償することでバンチ位相のずれを ± 1 度から ± 0.1 度まで減らすことに成功。

<40-150バンチ間の位相のRMS>

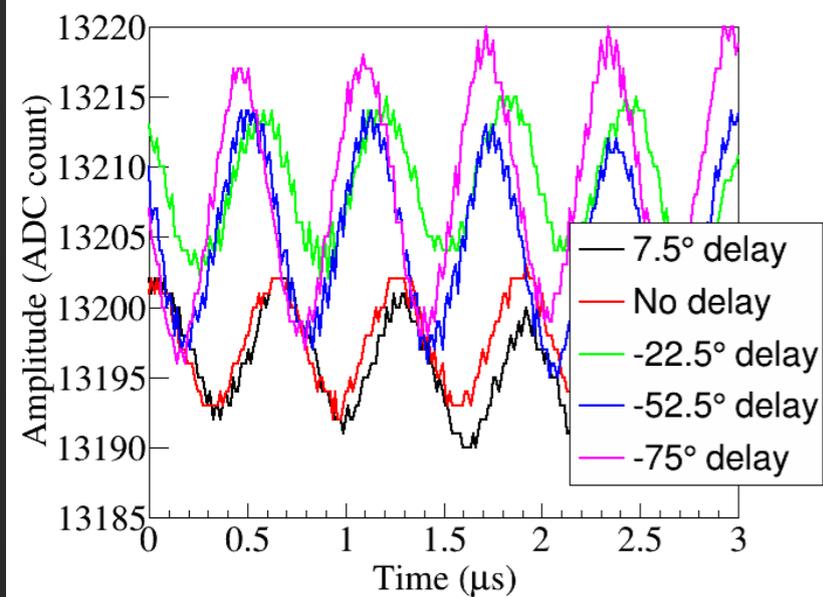


<iGpでのバンチ位相>

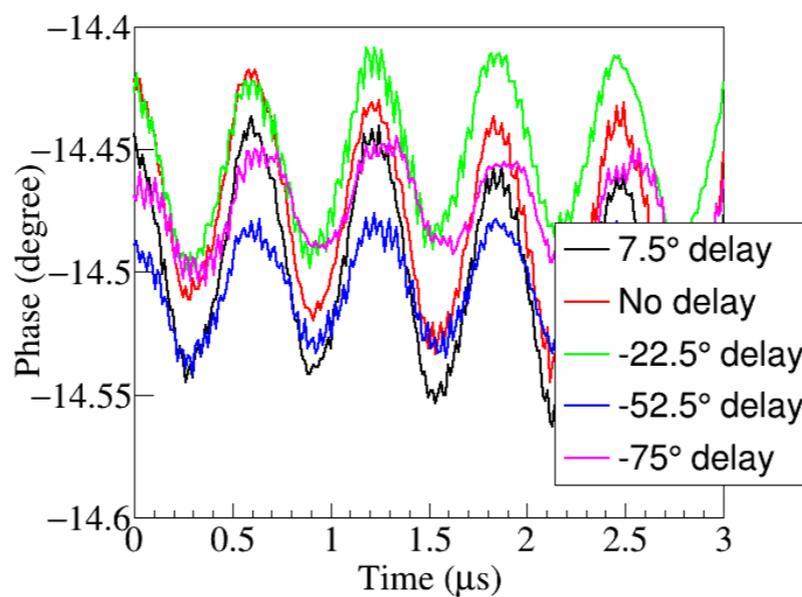


4.6 FFパラメータの位相スキャン2

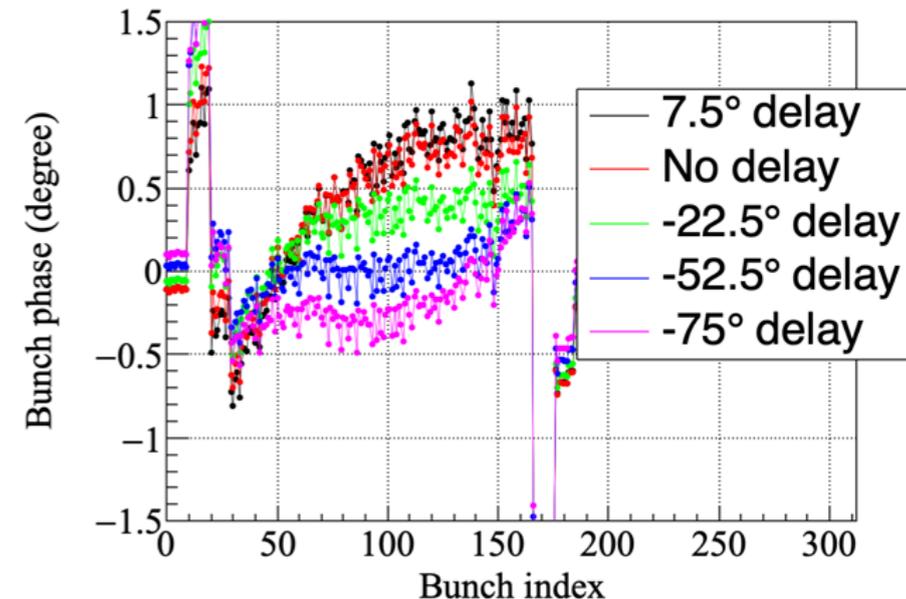
<空洞電圧の振幅>



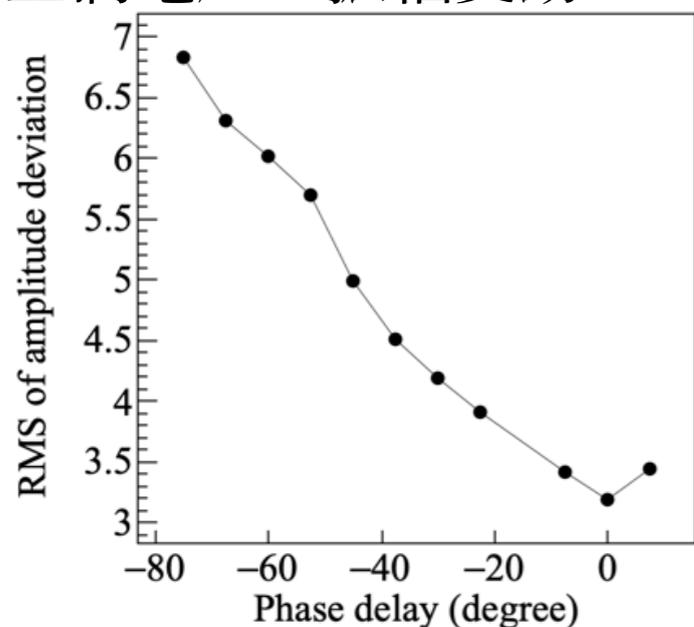
<空洞電圧の位相>



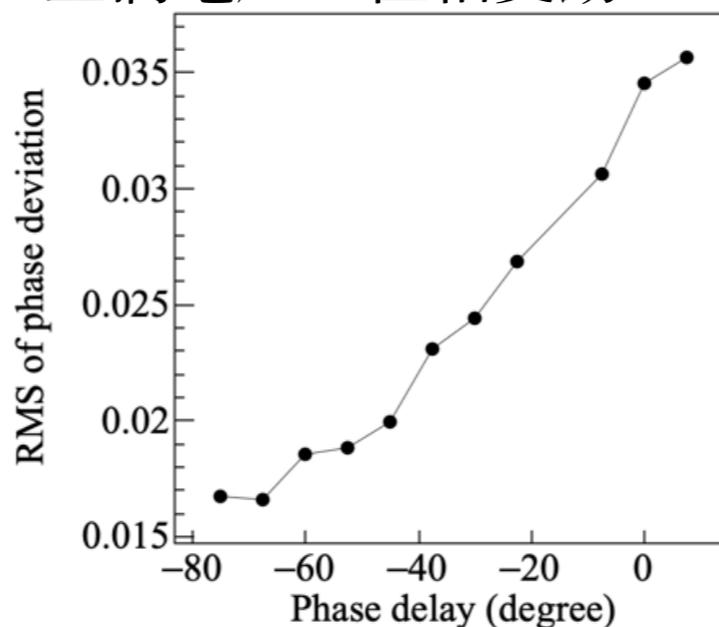
<iGpでのバンチ位相>



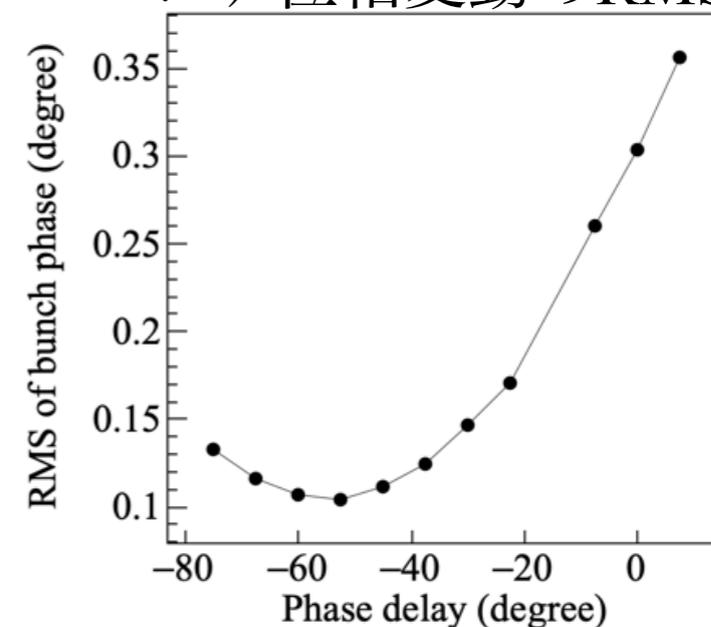
<空洞電圧の振幅変動のRMS>



<空洞電圧の位相変動のRMS>



<バンチ位相変動のRMS>



- FFパターンの位相を-50度程度ずらすとバンチ位相の変動ほぼ平にできた。
- 空洞電圧で見た時の位相変動とバンチ位相の変動の振る舞いが一致していない。
 - ・ LLRFでは制御のためにLPFが入っており、過渡的変動が積分されることが要因。