

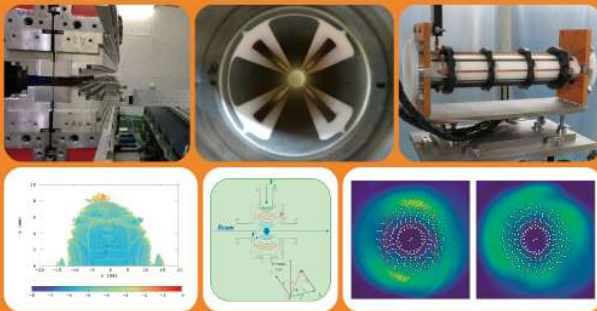
第 42 回 高エネルギー加速器セミナー

OH0'25

放射光源加速器の基礎

2025 年 9 月 2 日 火 ▶ 5 日 金

KEK + オンライン開催



Tuesday, September 2, 2025	Wednesday, September 3, 2025	Thursday, September 4, 2025	Friday, September 5, 2025
9:00 AM 受付	9:00 AM 非線形オブティクスの最適化 (1) - 下崎 亮人 (KEK)	9:00 AM 放射光源加速器の真空システム (1) - 金 秀光 (KEK)	9:00 AM 放射光リング入射技術と要素開発 - 洲田 史雄 (KEK)
9:30 AM 開会のセッション			
9:50 AM 加速器の歴史と利用研究 (1) - 原田 健太郎 (KEK)	9:55 AM 休憩	9:55 AM 休憩	9:55 AM 休憩
10:45 AM 休憩	10:00 AM 非線形オブティクスの最適化 (2) - 下崎 亮人 (KEK)	10:00 AM 放射光源加速器の真空システム (2) - 金 秀光 (KEK)	10:05 AM 放射光源加速器の入射パルス電磁石電源 - 榎原 智史 (KEK)
10:55 AM 加速器の歴史と利用研究 (2) - 原田 健太郎 (KEK)	10:55 AM 休憩	10:55 AM 休憩	
11:50 AM 集合写真	11:05 AM 放射光源加速器の高周波システム (1) - 山本 尚人 (KEK)	11:05 AM 挿入光源 (1) - 阿達 正浩 (KEK)	11:00 AM 閉会のセッション
12:00 PM 昼休み	12:00 PM 昼休み	12:00 PM 昼休み	
1:30 PM ラティスと線形オブティクス - 設計と運転への適用 - (1) - 東 直 (KEK)	1:30 PM 放射光源加速器の高周波システム (2) - 山本 尚人 (KEK)	1:30 PM 挿入光源 (2) - 阿達 正浩 (KEK)	
2:25 PM 休憩	2:25 PM 休憩	2:25 PM 休憩	
2:30 PM ラティスと線形オブティクス - 設計と運転への適用 - (2) - 東 直 (KEK)	2:30 PM インピーダンスとビーム不安定性 - TANAKA OLGA (KEK)	2:30 PM 施設見学	
3:25 PM 休憩	3:25 PM 休憩		
3:35 PM 放射光源に必要なDC電磁石電源 - 内藤 大地 (KEK)	3:35 PM 放射光は粒か波か? - 加藤 政博 (広大・分子研)		

2025/09/03. 11:05-12:00, 13:30-14:25

放射光源加速器の 高周波システム

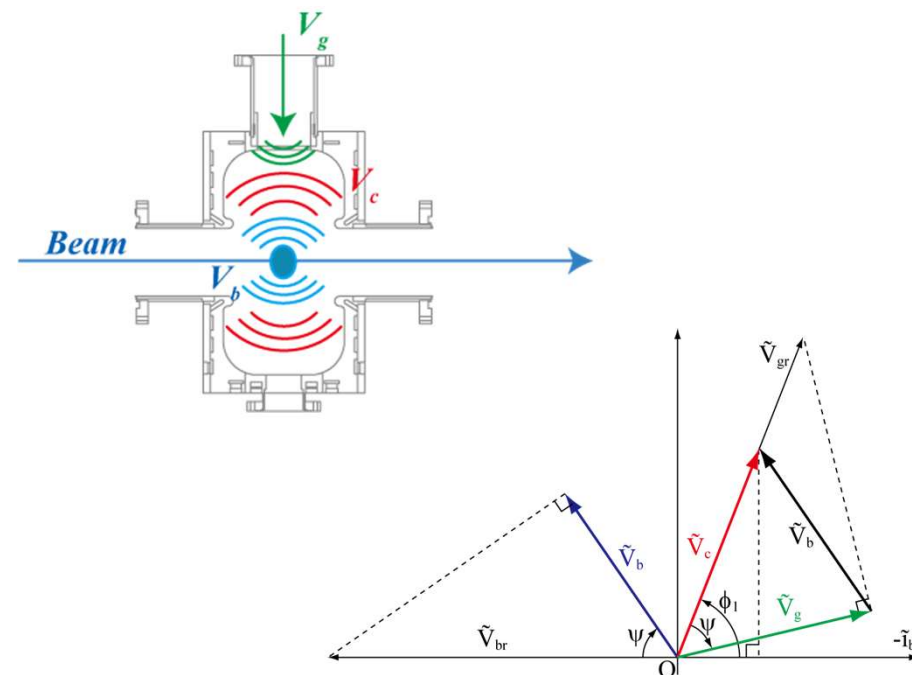
高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 第6研究系
山本尚人

内容

1. はじめに
2. 放射光源リングの高周波システム
 - 2.1 放射光源リング
 - 2.2 RF システムの役割
 - 2.3 概要
3. RF 加速とビーム物理
 - 3.1 RF 加速, RF 電場からRF 電圧
 - 3.2 RF 電圧と位相
 - 3.3 重ね合わせの原理
 - 3.4 シンクロトロン振動
 - 3.5 運動量の安定領域
 - 3.6 ビーム負荷とDC Robinson 不安定性
 - 3.7 空洞起因のバンチ結合型不安定性
4. 高周波システムの構成要素
 - 4.1 主加速空洞(RF空洞)
 - 4.2 大電力伝送系
 - 4.3 高周波増幅器
 - 4.4 低電力制御システム
 - 4.5 機器保護システム
5. 最近のトピック
 - 5.1 バンチ伸張システム
 - 5.2 究極の光源を目指して

前半

後半



前半は、
「RFの基礎となる避けて通れない基礎」
後半は、
「将来に向けた夢のある話」
を目指します。

4. 高周波システムの構成要素

主加速空洞(RF空洞)

大電力伝送系

高周波増幅器

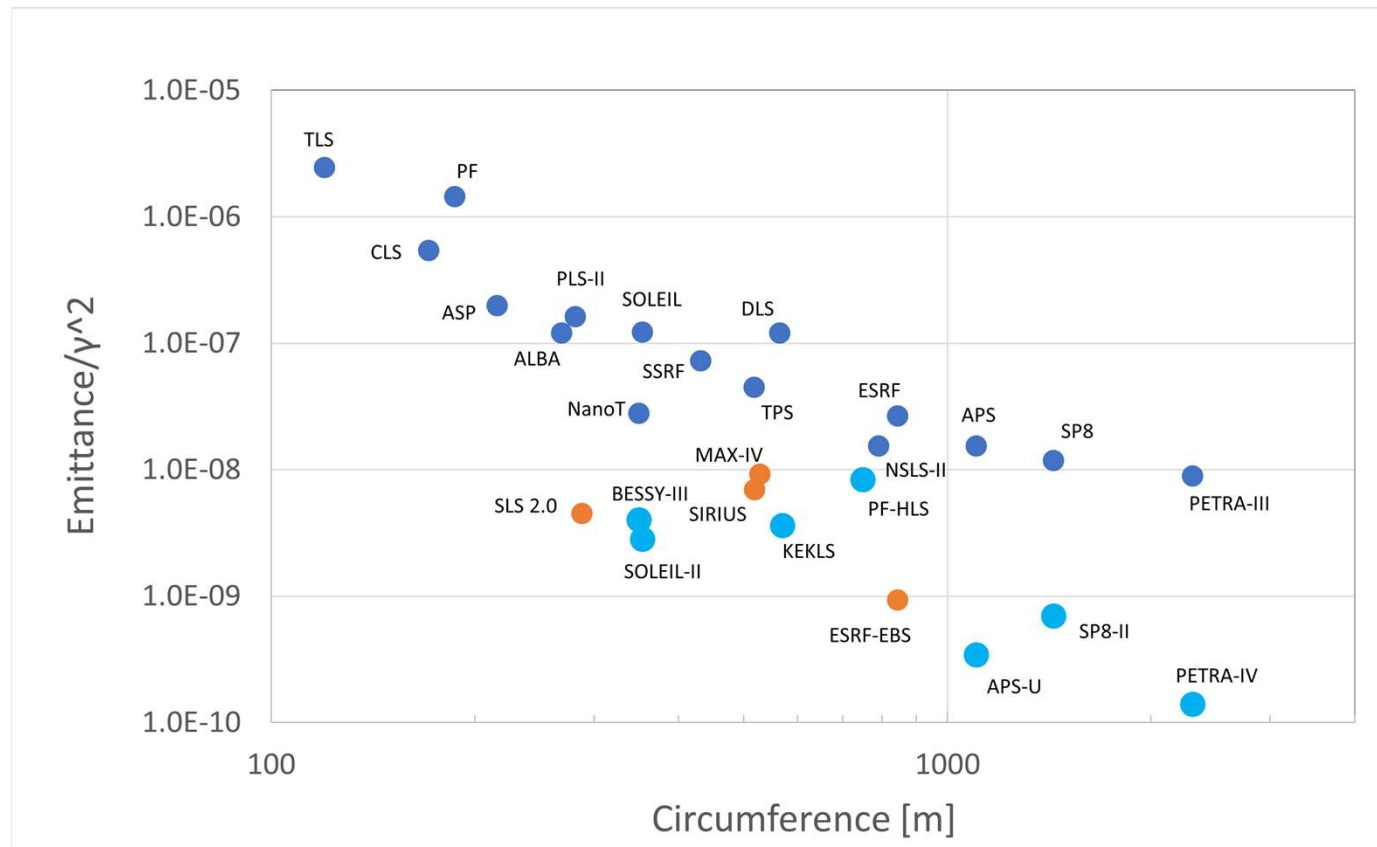
低電力制御システム

機器保護システム

読み上げるだけになるので、Skip

放射光源リングのトレンド

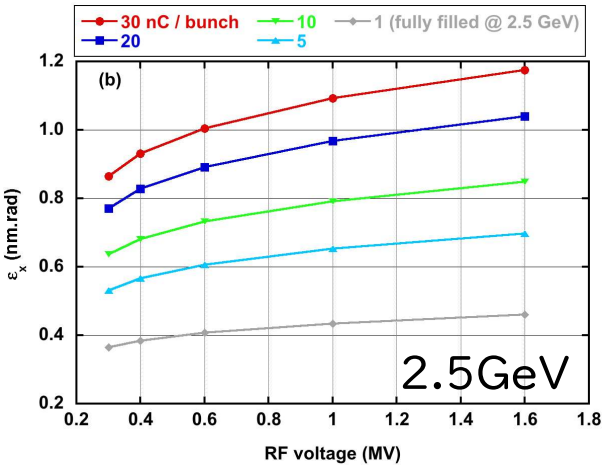
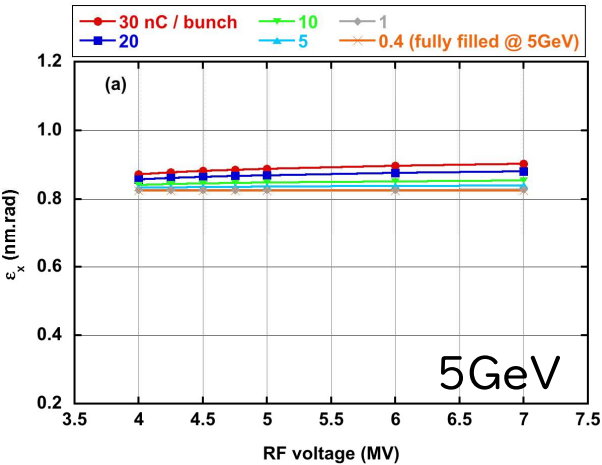
- 高輝度、高コヒーレンス → Inmradを大きく下回る水平エミッタンス



帯名さんのまとめ+α

放射光源リングのトレンド

- 高輝度、高コヒーレンス → 1nmradを大きく下回る水平エミッタンス
- 水平エミッタンスの極小化がビームに与える影響
 - バンチ内電荷密度の向上 → 電流値増加によるエミッタンス増大
ビーム寿命の減少
 - 放射減衰時間の増加 → ビーム不安定性が発生しやすい



← PFHLS の場合の計算結果(下崎さん)
バンチ電荷に対する水平エミッタンス増大

Table: Tentative PF-HLS Ring Parameter		
Energy [GeV]	2.5	5.0
Circumference [m]	749.5	
Lattice	Double DDBA/8BA (modified)	
Stored current [mA]	500	200
Natural emittance[nmrad]	0.208	0.832

バンチ伸長

5. 最近のトピック

- 高輝度、高コヒーレンス → 1nmradを大きく下回る水平エミッタンス

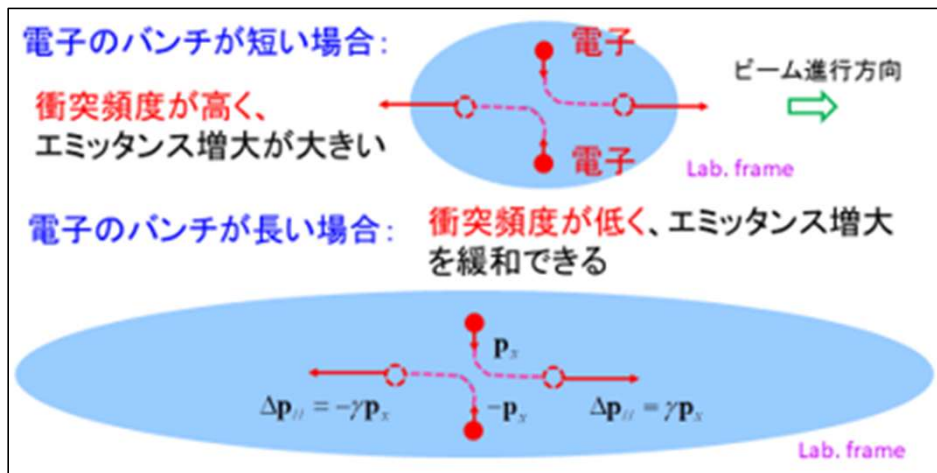
- 水平エミッタンスの極小化がビームに与える影響

- バンチ内電荷密度の向上 →

電流値増加によるエミッタンス増大
ビーム寿命の減少

- 放射減衰時間の増加 →

ビーム不安定性が発生しやすい



対策として考えられたのが、バンチ伸張

バンチ伸張とは

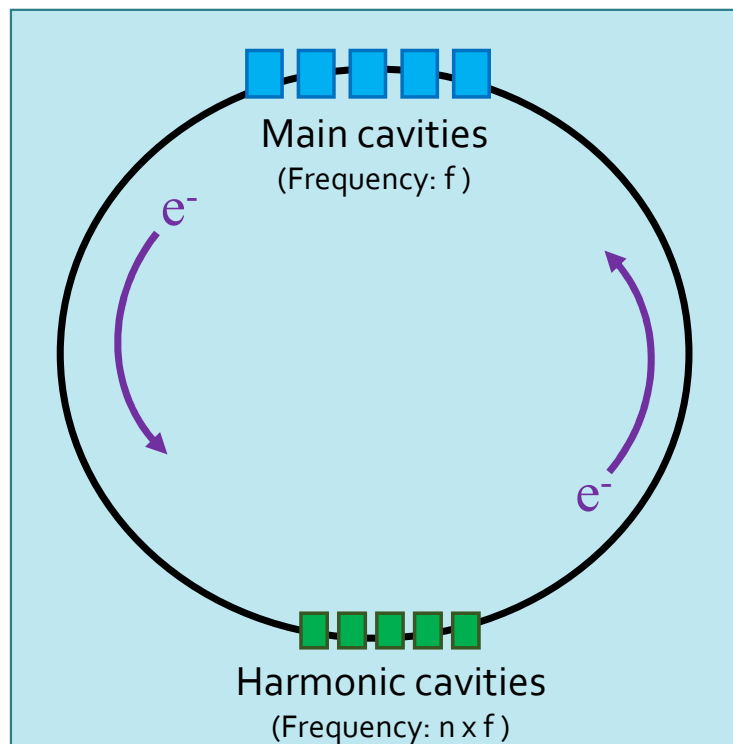
- 縦方向（時間方向）にバンチを伸張すること。
- 水平サイズは変わらないため、放射光の「高輝度、高コヒーレンス」を維持しながらバンチ内電荷密度を低減できる。
- バンチ伸張により発熱や不安定性など、インピーダンスの影響も低減できる。
* インピーダンスの詳細は、次のTanaka Olgaさんの講義参照。



バンチ伸張の方法

5. 最近のトピック

- 粒子加速用のRF空洞（主空洞）の整数倍の周波数を持つRF空洞（高調波空洞）の導入。



例えば、

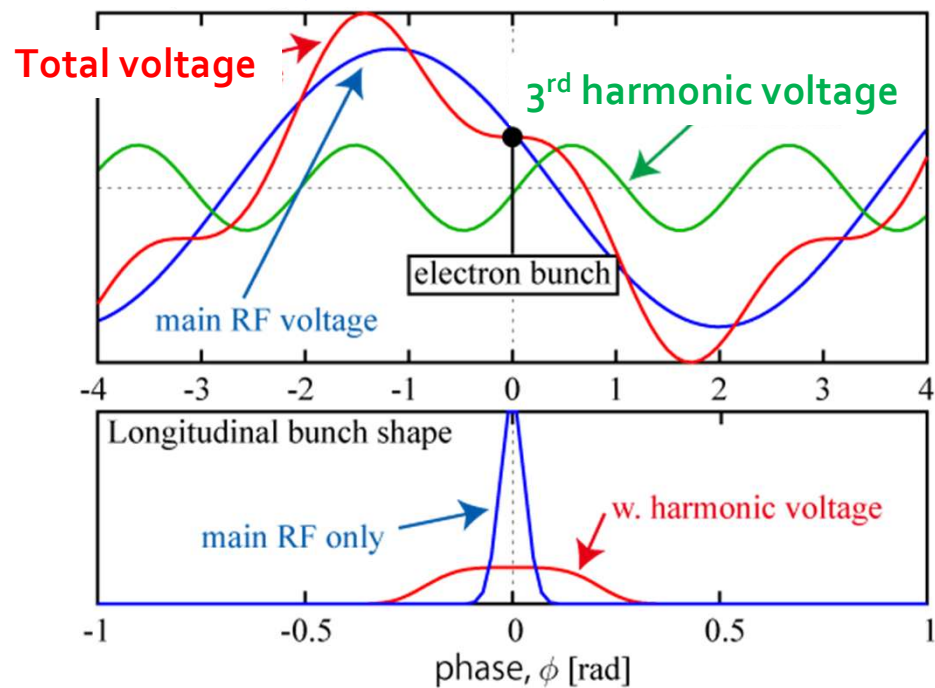
- 主空洞が500MHzであれば、3倍の1,500MHzの高調波空洞を導入。
- 4倍から5倍のバンチ伸張が期待できる。
- 高調波空洞により導入されるポテンシャルの非線形性により、ビームのランダウ減衰効果も期待できる。

高調波空洞によるバンチ伸張の原理

- 粒子加速用のRF空洞（主空洞）の整数倍の周波数を持つRF空洞（高調波空洞）の導入。

Cavity voltage

$$V(\phi) = V_{c,1} \cos(\phi + \phi_1) + V_{c,n} \cos(n\phi + n\phi_n)$$



Flat potential condition

$$V'(0) = V''(0) = 0$$

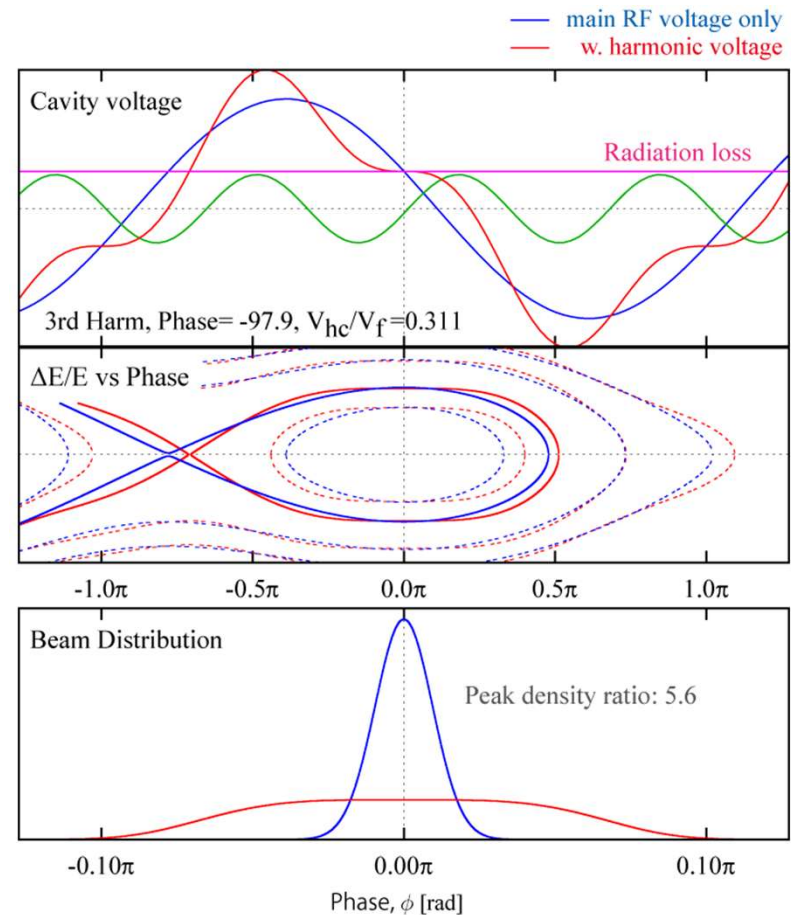
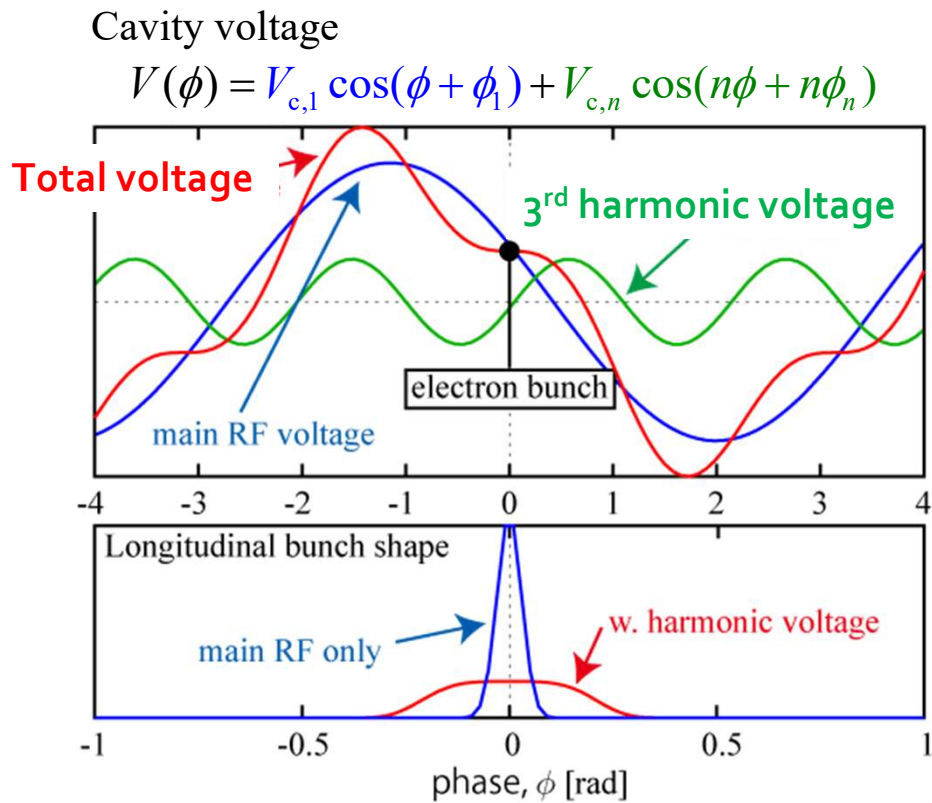
$$\cos \phi_1 = \frac{n^2}{n^2 - 1} \frac{U_{\text{loss}}}{eV_{c,1}}$$

$$\tan \phi_n = n \tan \phi_1$$

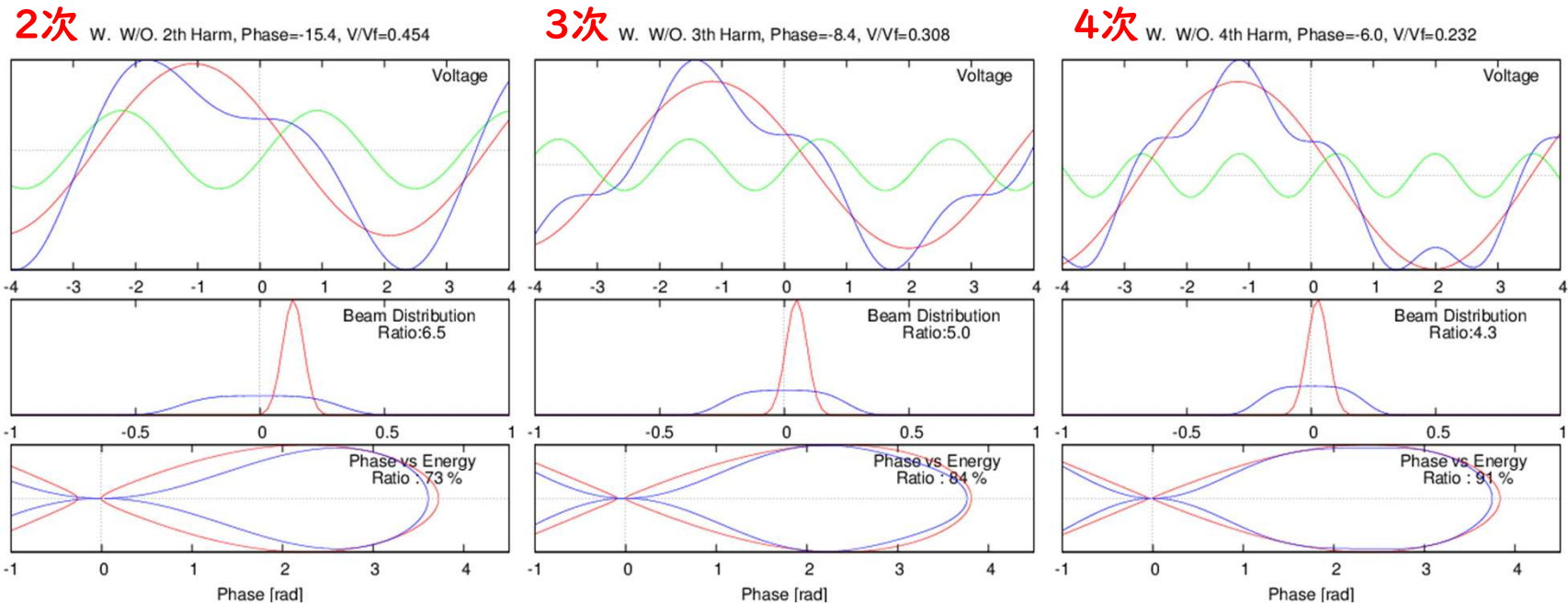
$$k \equiv \frac{V_{c,n}}{V_{c,1}} = -\frac{\sin \phi_1}{n \sin \phi_n}$$

高調波空洞によるバンチ伸張の原理

- 粒子加速用のRF空洞（主空洞）の整数倍の周波数を持つRF空洞（高調波空洞）の導入。



バンチ伸張、次数の選び方



Energy : 3 GeV,
Freq : 500.123 MHz
Harm. : 736,
Vrf : 2.0 MV
Turn loss : 0.723 MeV,
dP/P : 7.687e-4
Alpha : 4.02e-4
*Natural Bunch Length : 4.0 mm

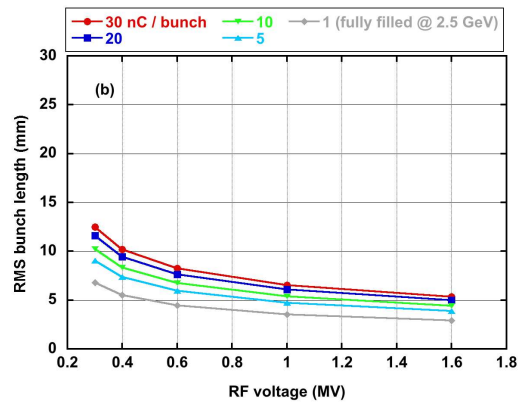
次数		2	3	4
高調波電圧比	k	0.454	0.308	0.232
シンクロナス位相	ϕ_s	2.64	2.72	2.75
高調波位相	ϕ_n	-0.268	-0.147	-0.104
バンチ伸長率		6.5	5.0	4.3
RFアクセプタンス減少率		0.731	0.843	0.910
ビームロス@0.5A, R/Q=233Ω		120 kW	45.2 kW	24.2 kW

5. 最近のトピック

バンチ伸張の効果

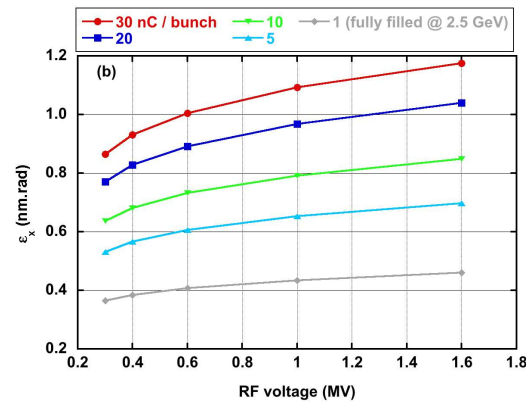
- PF-HLS, 2.5GeV でのバンチ伸張の効果 (下崎さん)

バンチ長

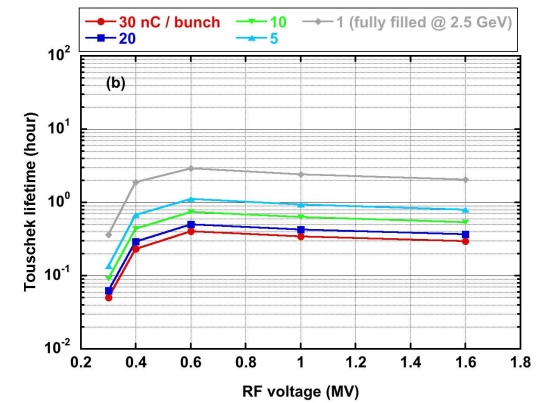


高調波空洞
無し

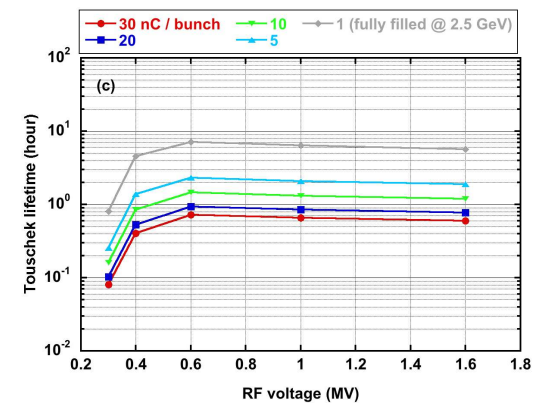
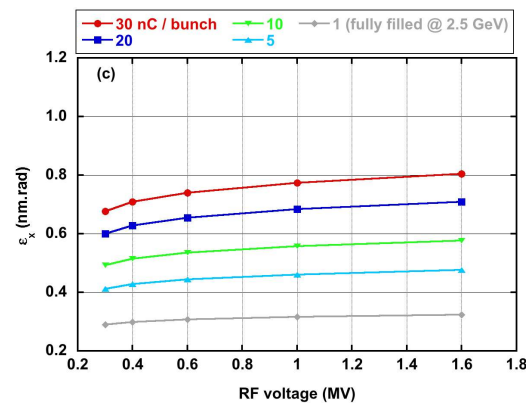
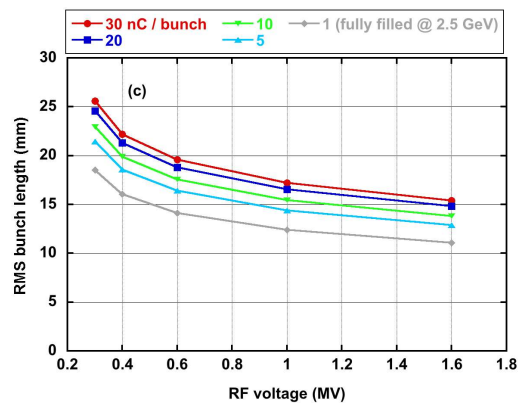
水平エミッタンス



ビーム寿命



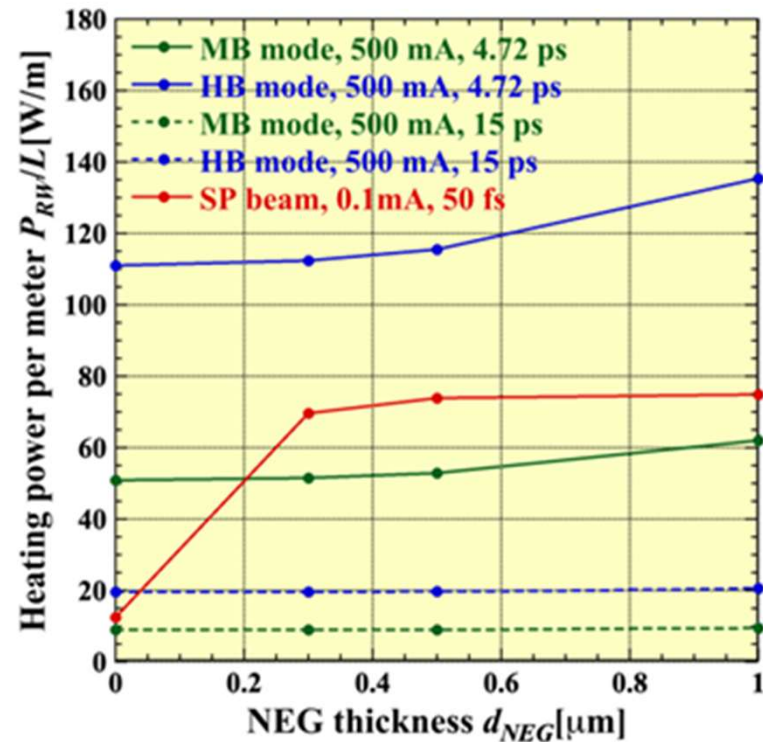
高調波空洞
有り



PF-HLS CDR v1.3;
https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/pfhls_cdr_ver1.3.pdf

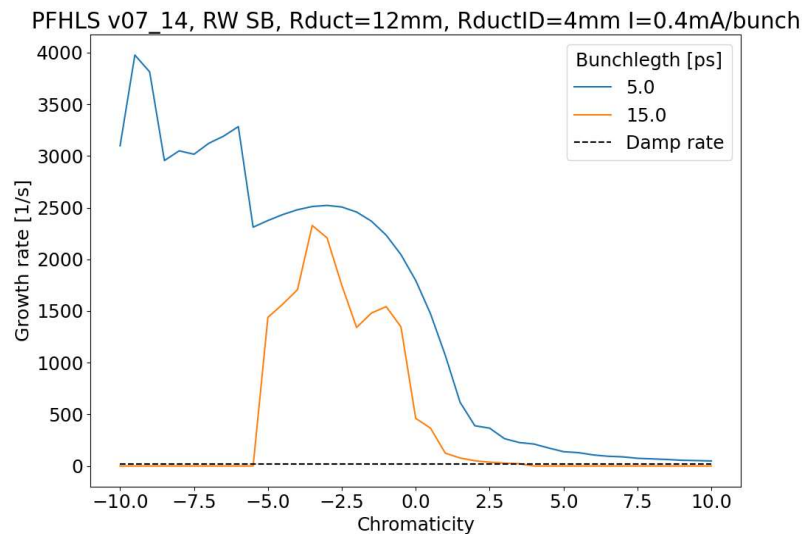
バンチ伸張の効果

- PF-HLS, 2.5GeV でのバンチ伸張の効果（中村さん）
 - IDダクトの発熱

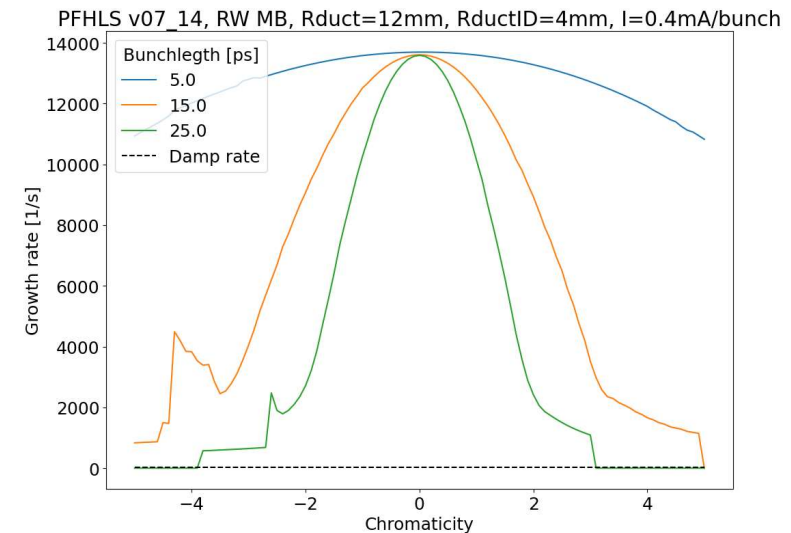


バンチ伸張の効果

- PF-HLS, 2.5GeV でのバンチ伸張の効果 (山本)
 - ダクトの抵抗性インピーダンスによる不安定性閾値 (ランダウ減衰は含まず)



シングルバンチ0.4mAの場合のクロマティシティに対する不安定成長率



マルチバンチ(0.4mA x 1250バンチ)の場合のクロマティシティに対する不安定成長率

PF-HLS CDR v1.3;

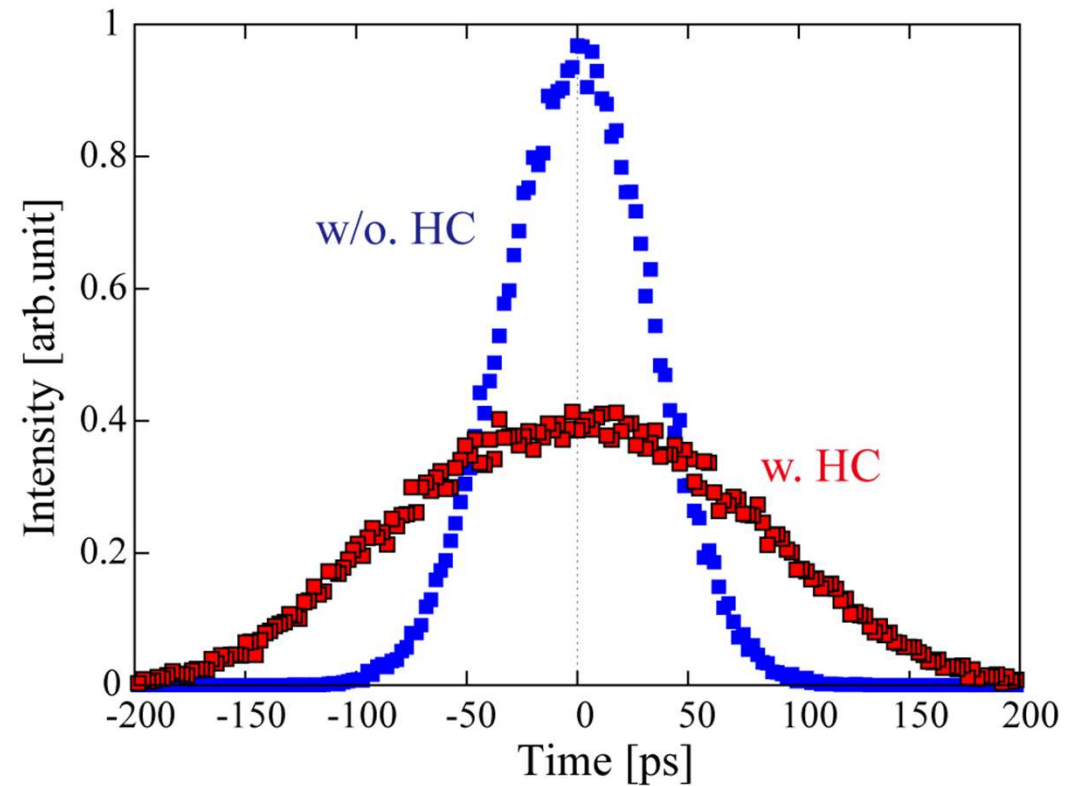
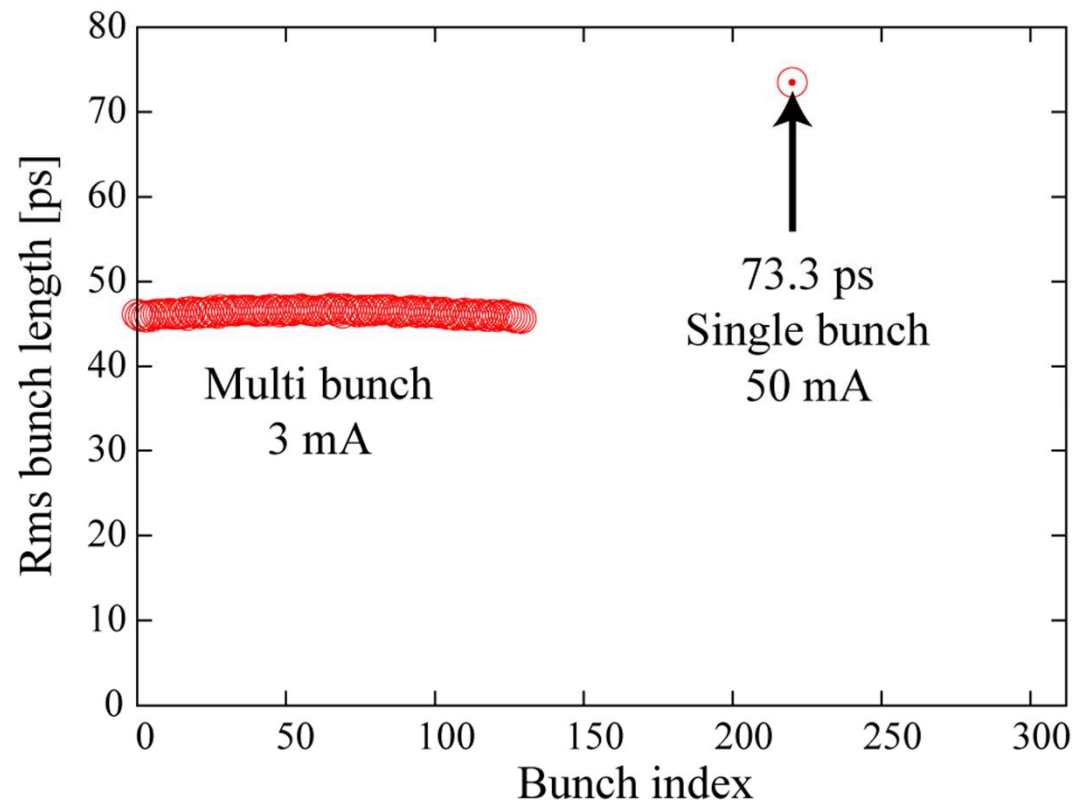
https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/pfhls_cdr_ver1.3.pdf

バンチ伸張の効果

- ビーム不安定性に弱いPFのHybrid運転でも一定の効果が期待できる（山本）

主空洞電圧	高調波空洞電圧
1.7 MV	340 kV

自然バンチ長@1.7MV : 32.5 ps
 シングルバンチ運転実績@2017 : 45 ps

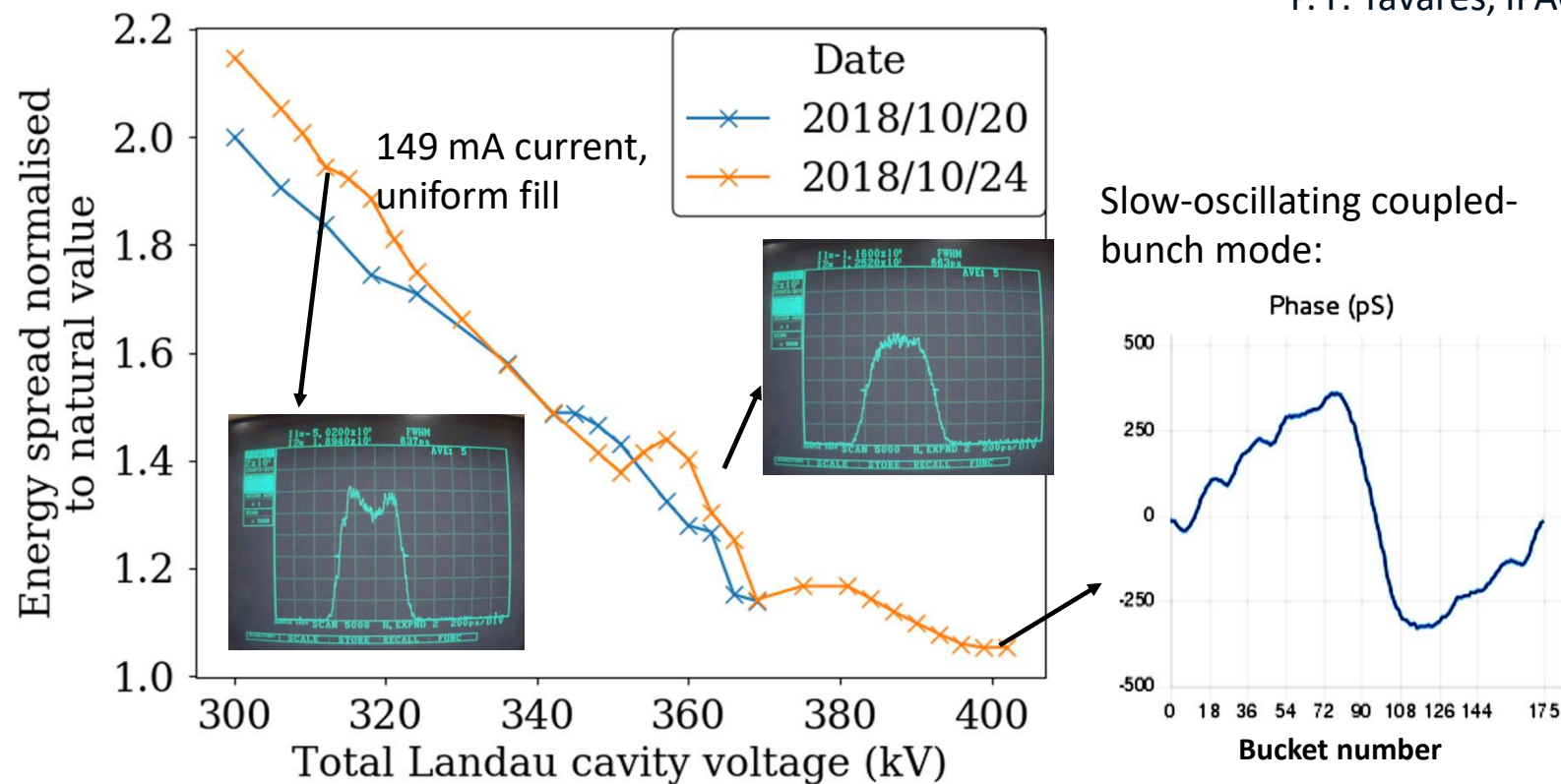


バンチ伸張の効果

5. 最近のトピック

- バンチ結合型不安定性の高調波空洞による抑制 (MAX-IV)

F. Cullinan, Å. Andersson, and
P. F. Tavares, IPAC2020, WEVIR05.



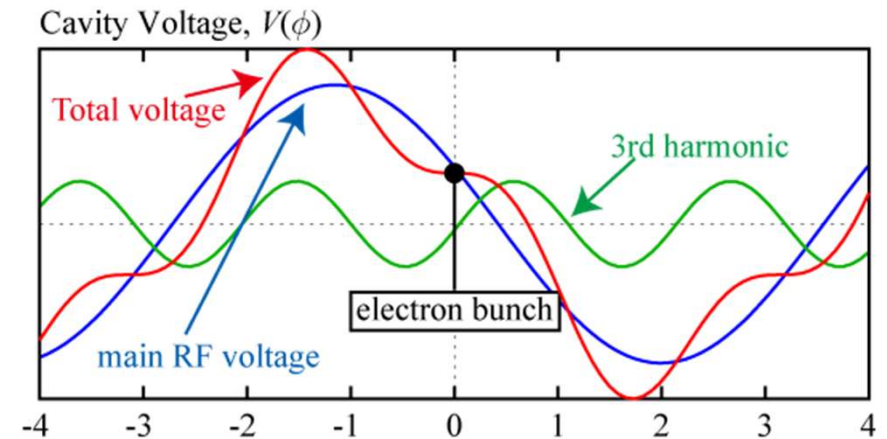
バンチ伸張は熱い

・ ビームダイナミクスが熱い

- バンチ伸張は電圧の傾きを減らす運転 → 「電圧の復元力」「位相安定性の原理」が失われる
- 空洞電圧・位相の高精度なモニタ・制御技術が必要とされる

・ ビームダイナミクスが熱い 2

- バンチ伸張は2つの空洞の電圧バランスが肝
- 通常空洞によってビーム負荷が異なる
- ビーム負荷の制御技術が必要とされる

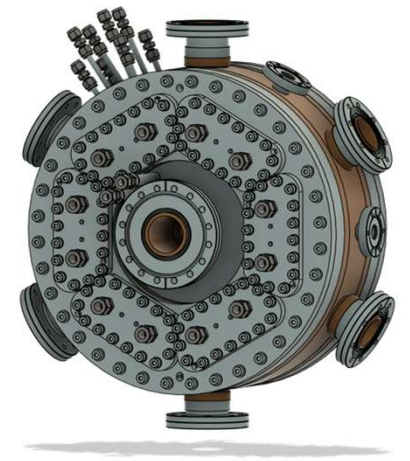


・ ビームダイナミクスが熱い 3

- 高調波空洞のインピーダンスは様々なビーム不安定性を引き起こす
- ビーム不安定性の抑制が大きな課題

・ 空洞開発が熱い

- 通常の加速空洞とは異なった高周波設計の最適化が必要とされる



まとめ

5. 最近のトピック

- 放射光源リングの高輝度化・高コヒーレンス化より、RFシステムに新たな機能「バンチ伸張」が求められている。
- 主RFの整数倍の周波数をもつ高調波空洞を用いることでバンチ伸張が期待できる。
- バンチ伸張は熱い。