

放射光施設ニュースバルの新入射加速器の タイミング・低電力高周波制御システム

大島隆^{#, A,B)}, 細田直康^{A,B)}, 前坂比呂和^{B)}, 岩井瑛人^{A,B)}, 出羽英紀^{A)},
松原伸一^{A)}, 吉岡正倫^{C)}, 皆川康幸^{C)}, 稲垣隆宏^{A,B)}, 上島 考太^{D)}

A)JASRI B)RIKEN C)SPring 8 service D)QST



目次

- はじめに
- LLRFシステムへの要求項目と方針
- マスタユニット (Li-SR同期)
- マスタトリガ・マスタクロックの伝送
- サブユニット (空洞位相・振幅制御)
- 空洞ピックアップ信号の安定度
- まとめ

はじめに

- New SUBARU (NS)

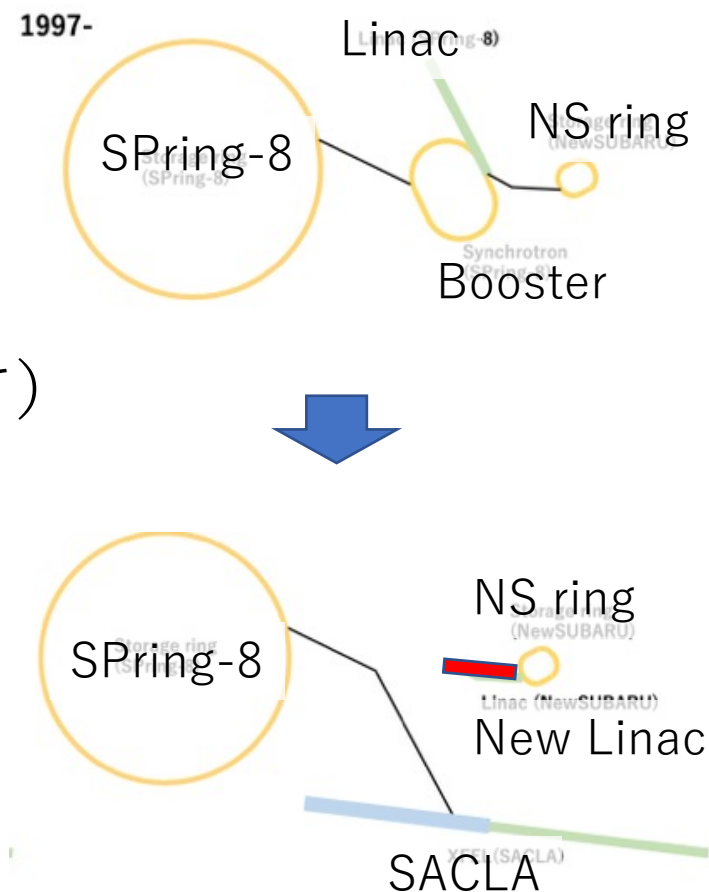
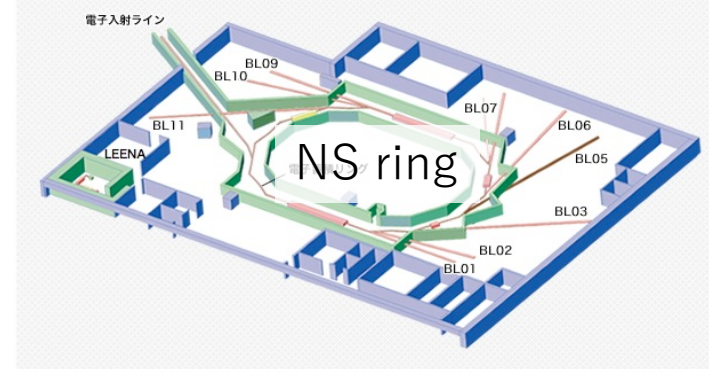
- 兵庫県立大が運用する放射光施設
- 1GeV/350mAのTopUp 運転, 1.5GeV decay運転
- 主に軟X線放射光の産業利用に向けた研究
- SPring-8の入射器からビーム供給していた

- 1GeV線型加速器のシャットダウン

- SPring-8へSACLAから入射開始 (SP8 upgradeを見据えて)
- このままではNSの入射器が無くなる

- 新入射器の建設

- 1GeVのエネルギー 0.3nCの電荷 1ppsの繰り返し
- グリッド付き熱電子銃, **238MHz**, **476MHz** 空洞,
2856MHz(**SB**), 5712MHz(**CB**) 加速管の構成



Low Level RF システムへの要求項目と方針

- 要求
 - リングへの入射効率90%以上
 - 振幅安定度 $8E-4$ 以下 位相安定度0.2以下
 - SRとLinacとのタイミング同期 $< \sim 5\text{ps rms}$
 - 高信頼性 低コスト
- MTCA.4規格のモジュールを中心に構成
 - **高集積、高速データ転送、省配線、モジュールのマネジメント機能**
 - 市販品で賄える機能はそのモジュールを使用
 - 16bit 250Ms/sデジタイザ
 - CB, SB, 476MHzダウンコンバータRTM
 - crate, MCH, CPU, Power Supply
 - 市販品に無いものは新規開発
 - タイミング同期用RTM
 - トリガ伝送用AMC

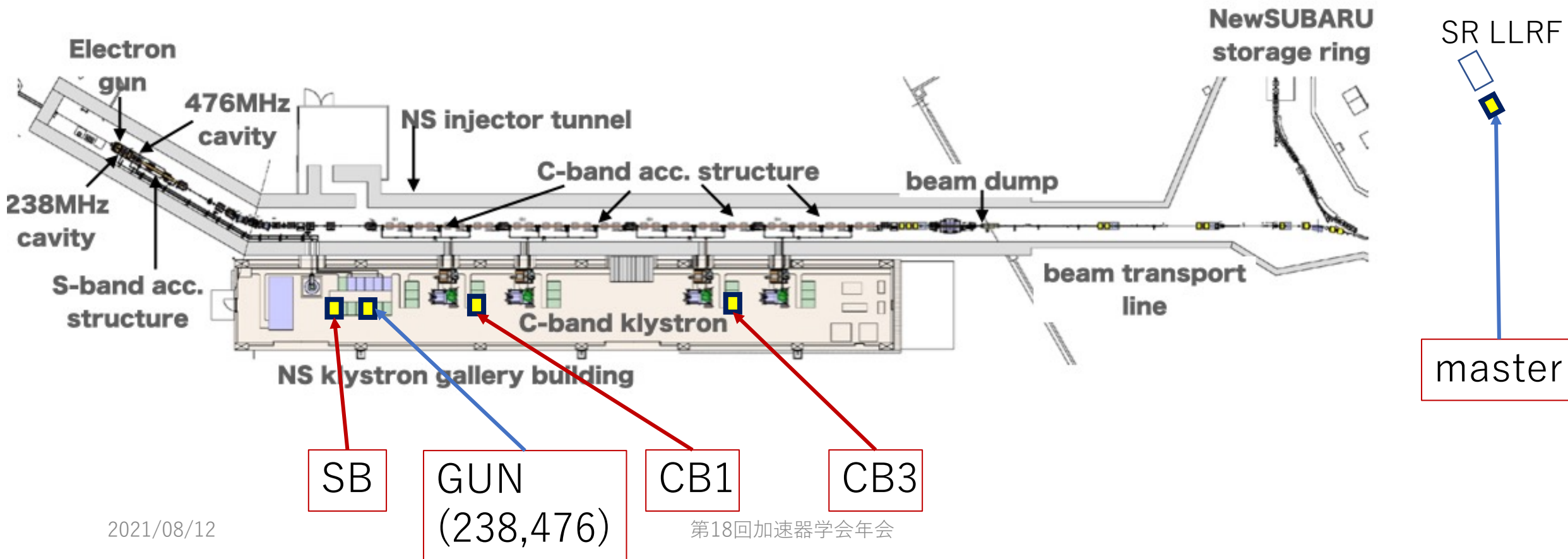


マスターユニットとサブユニット

19"ラックに LLRFモジュールを実装

マスターユニット：クロック生成・タイミング同期

サブユニット：加速空洞のパルス成形、位相振幅安定化



マスタユニット

SRの狙ったバケットと同期したlinacマスタ トリガの生成

- linacのマスタ クロック

- linacの基準238MHzクロック信号を storage ringの基準500MHzクロック信号からつくる。

$$f_{li} = \frac{m}{n} \times f_{sr} = \frac{308}{647} \times 499.9555 \text{ MHz} \cong 238 \text{ MHz} \times (1 + 1.2 \times 10^{-6})$$

- linacのマスタ トリガ

- 次の信号の同期

- AC60Hz
- SRの狙ったバケットアドレスM
- 238MHz

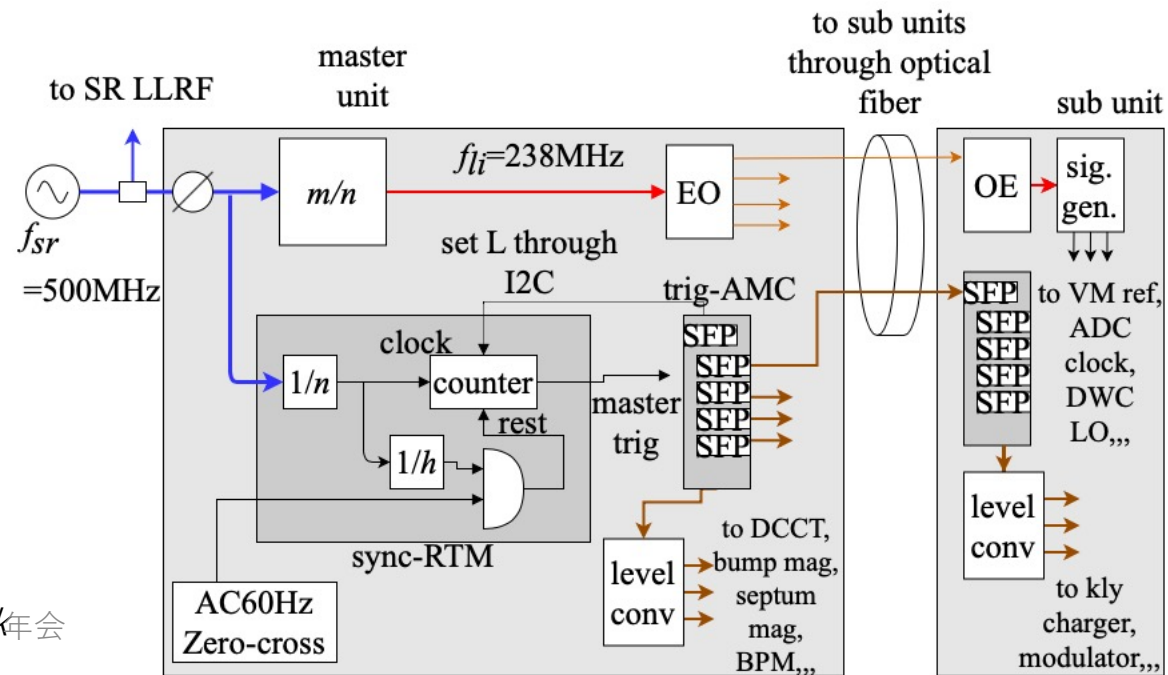
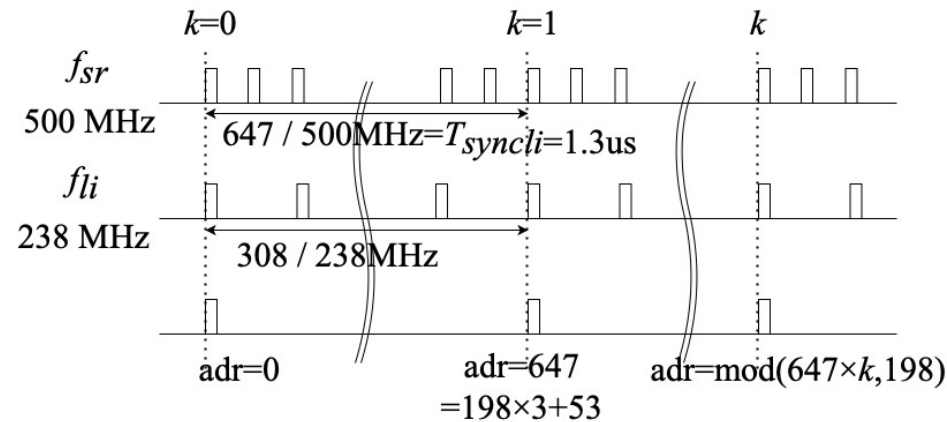
- 500MHzと238MHzが同期するタイミング

$$f_{syncli} = \frac{f_{sr}}{n} = \frac{f_{li}}{m} \cong 0.77 \text{ MHz} \cong \frac{1}{1.3 \mu s}$$

- これをL回だけ待つ

$$L = \text{mod}(M \times 71, 198)$$

$\text{mod}(a,b)$ は a を b で割ったときの剰余
 71 は $\text{mod}(k \times 53, 198) = 1$ となる最初の k
 198 はリングのハーモニック数



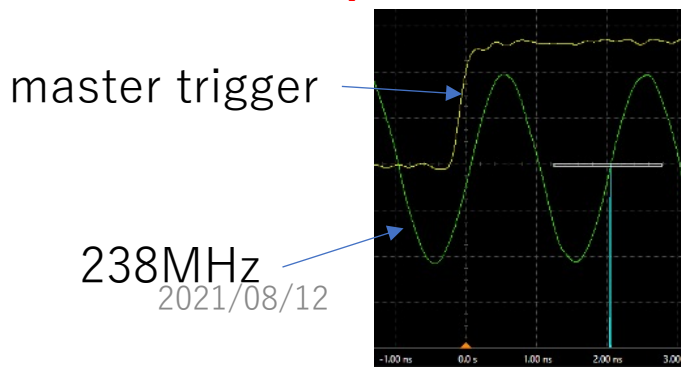
トリガ・クロック伝送

linacマスタトリガと基準RF信号を低ジッタで伝送

Linacマスタトリガ：RTM-sync（新規開発）
トリガの伝送：AMC-trig（新規開発）
SFPコネクタの光送信器でサブユニットに伝送
サブユニットのAMC-trigで238MHzに再同期

Linacマスタクロック
m/n信号発生器にて生成
位相安定化ファイバ経由（～200m）
238MHz信号をサブユニットに伝送
サブユニットのクロック発生器で
必要な信号をVOC/PLLを使って発生

master triggerと238MHz clock
とのジッタ **～6ps rms**

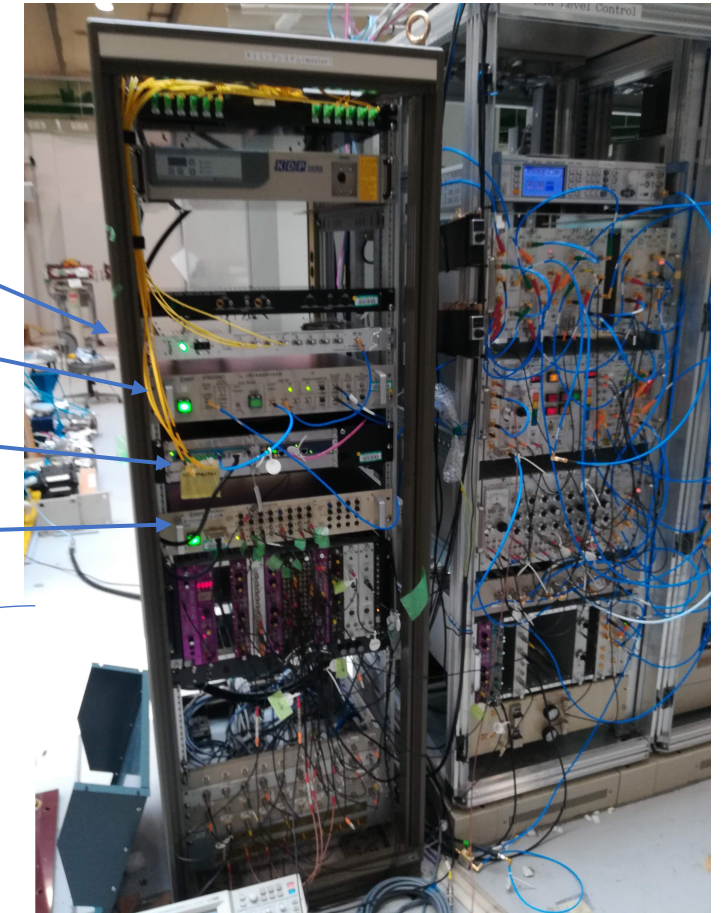


各サブユニットで
測定した位相雑音 **<～1ps rms**

frequency [MHz]	integral of phase noise [fs rms]
500	70
238	288
476	1062
2856	257
5712	248

新トリガシステム
新Li基準信号発生器

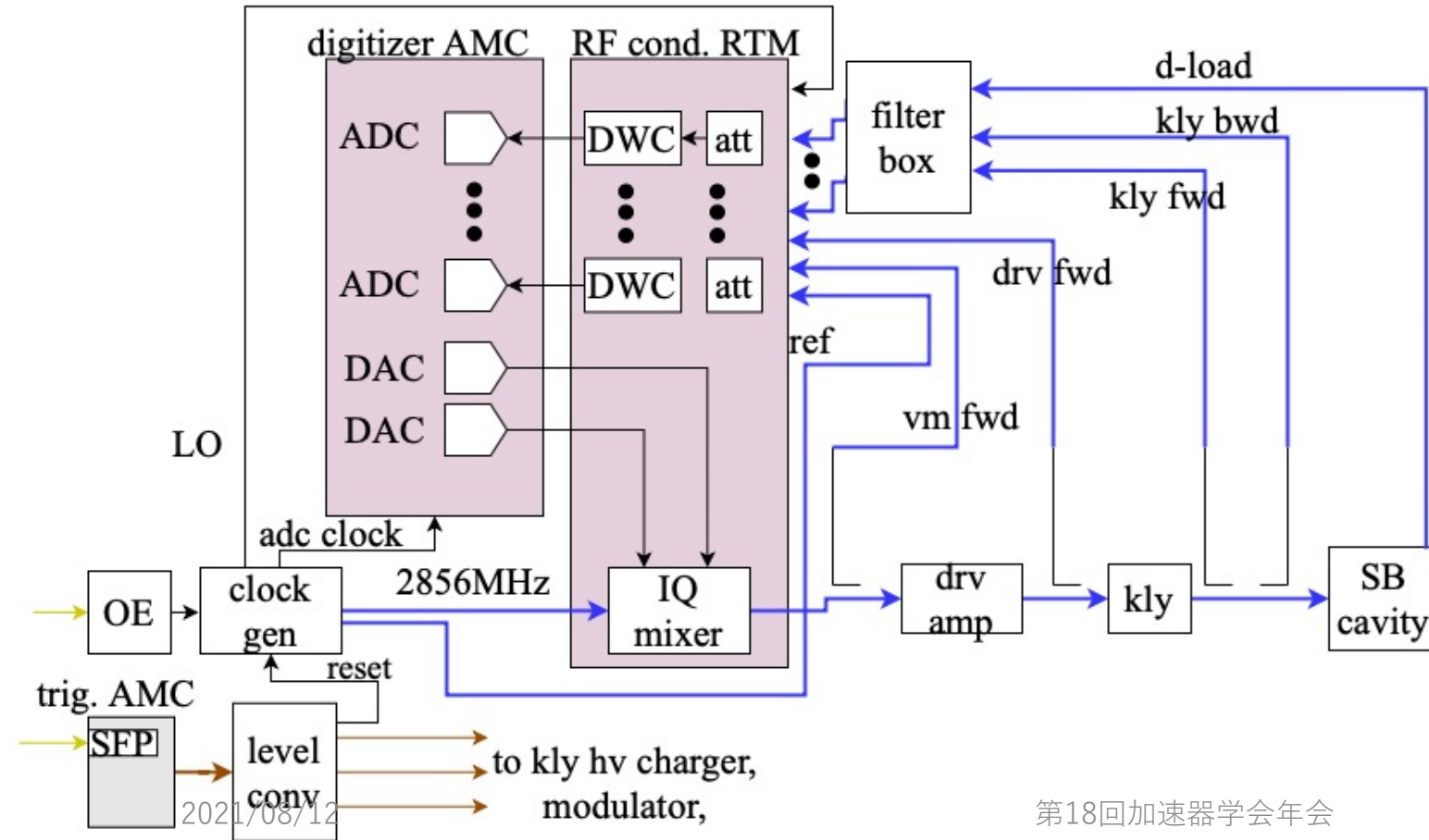
SRのLLRFシステム



サブユニット構成の例

空洞の励振信号生成と 空洞位相・振幅を安定化

- IQ 励振・検出 SBの例



Sバンド
クライストロン

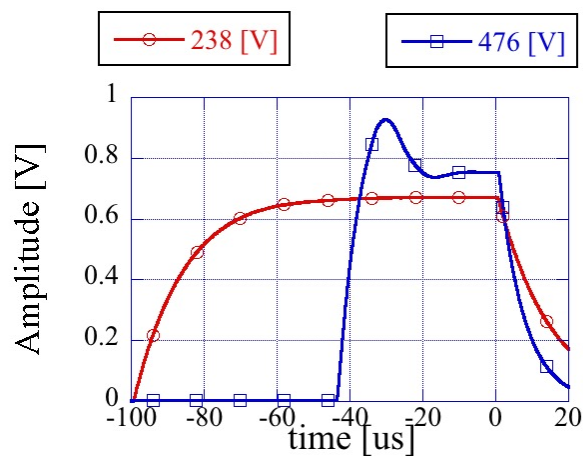


LLRF (パルス成形・検出)

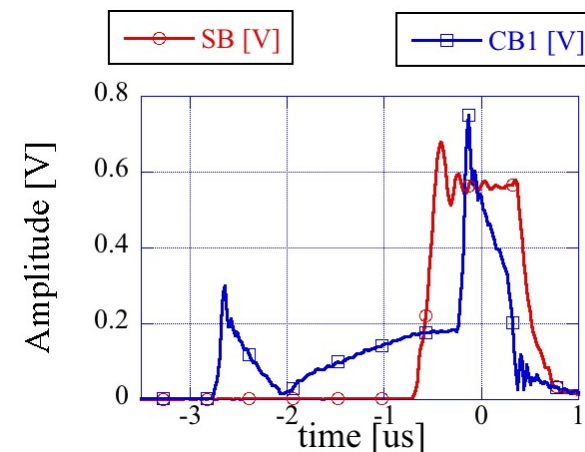
• IQ変調

subunit	frequency [MHz]	Pulse width	DAC clock [MHz]
GUN	238	100us	238
	476	40us	238
SB	2856	1us	238
CB1, 3	5712	3us(PSK)	238

振幅波形



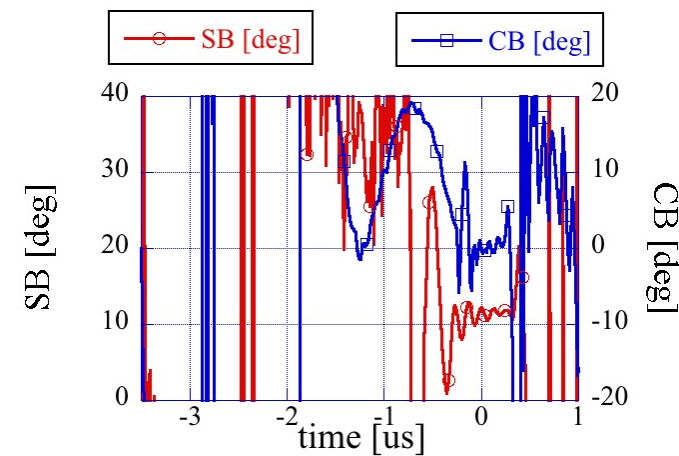
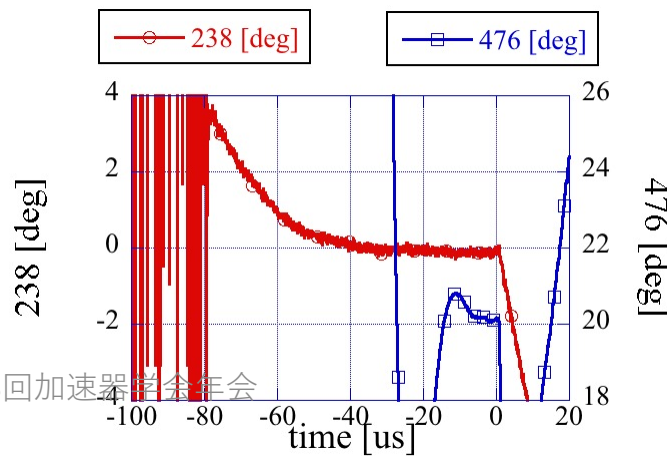
位相・振幅の
サンプルポイント



• IQ検出

subunit	frequency [MHz]	type	ADC clock [MHz]	LO clock [MHz]
GUN	238	Under sampling	$238 \times 4/5$	-
	476	Down conversion	238	$476 - 238/4$
SB	2856	Down conversion	238	$2856 - 238/4$
CB1, 3	5712	Down conversion	238	$5712 - 238/4$

位相波形

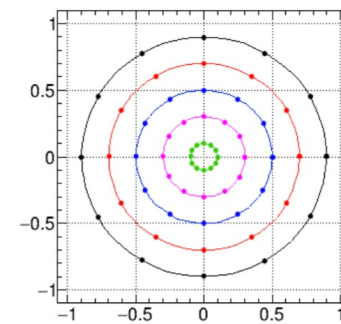
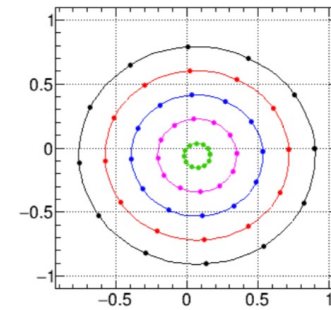


サブユニット (励振信号のひずみ補正)

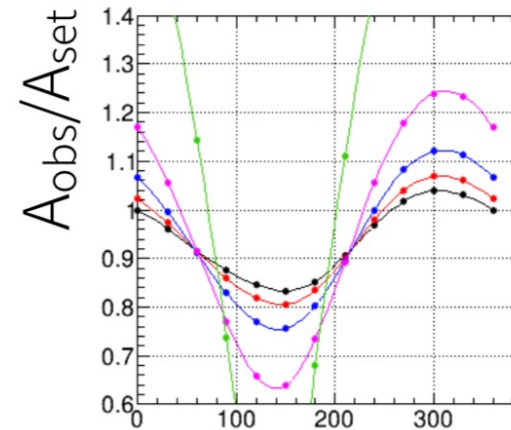
空洞励振信号の制御性向上

- Vector ModulatorとしてIQミキサと2chのDACを使用
- 位相・振幅にひずみが見られた
振幅 $\sim \pm 20\%$ 位相 $\sim \pm 20\text{deg}$
- I,Qのオフセット、ゲイン誤差、軸の直交からのズレをパラメータとして補正
- 振幅 $\pm 1\%$ 位相 $\pm 0.5\text{deg}$ に収まった

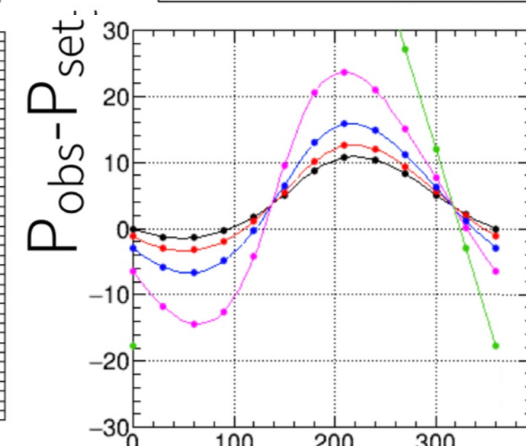
CBの例



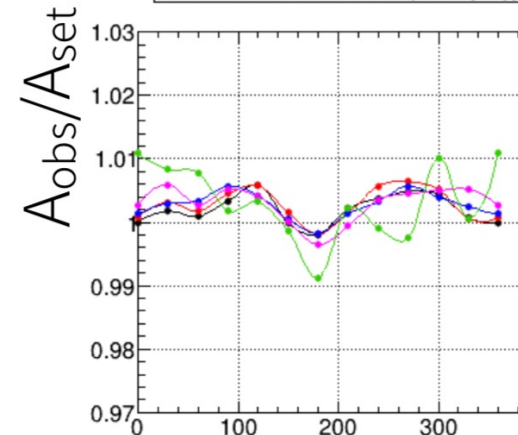
dA/A as a function of set_phase[deg]



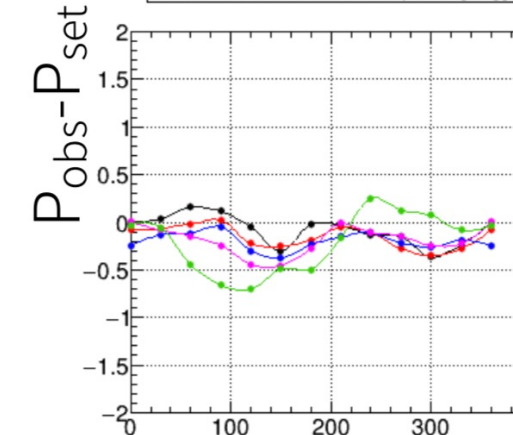
dPhi as a function of set_phase[deg]



dA/A as a function of set_phase[deg]



dPhi as a function of set_phase[deg]



DACへの位相・
振幅設定

補正パラメータ計算

補正演算

VM

IQ det

RFの位相・
振幅読み取り

第18回加速器学術年會

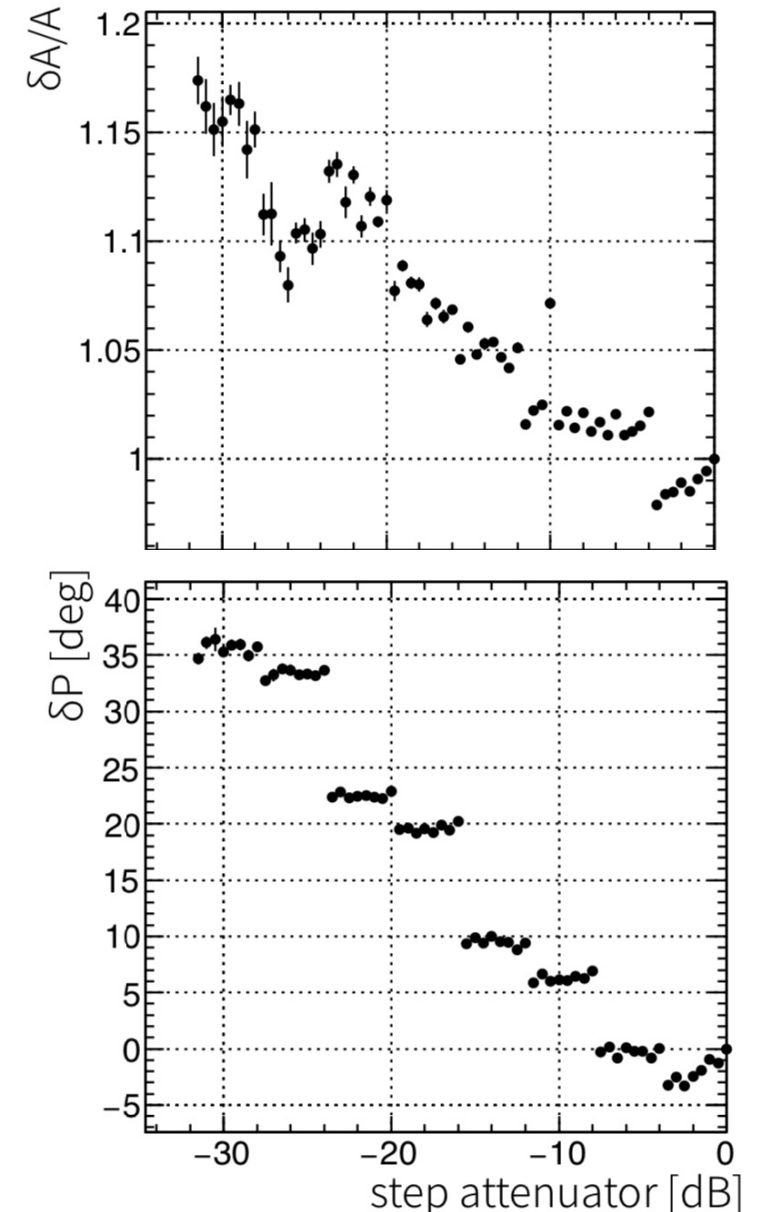


サブユニット (RTM内蔵アッテネータの補正)

CBのRTMの例

空洞位相・振幅検出の精度向上

- RF信号入力部アッテネータの機能
 - 0.5dBステップで 0dB~31.5dB
- 設定を変えた際の誤差を減らしたい
 - [例] -23dB : クライストロン励振時
 - 0dB : ビーム誘起信号の位相測定
- 誤差測定方法
 - $P_{in} = +0\text{dBm}$, $Att = 0\text{dB}$: $A[0\text{dB}]$, $P[0\text{dB}]$
 - $P_{in} = +0\text{dBm}$, $Att = -6\text{dB}$: $A[-6\text{dB}]$, $P[-5\text{dB}]$
 - $dA/A[-5\text{dB}] = A[-6\text{dB}] * 10^{(6/20)} / A[0\text{dB}]$
 - $dP = P[-6\text{dB}] - P[0\text{dB}]$
 - ...
 - Pinの大きさは適宜変更

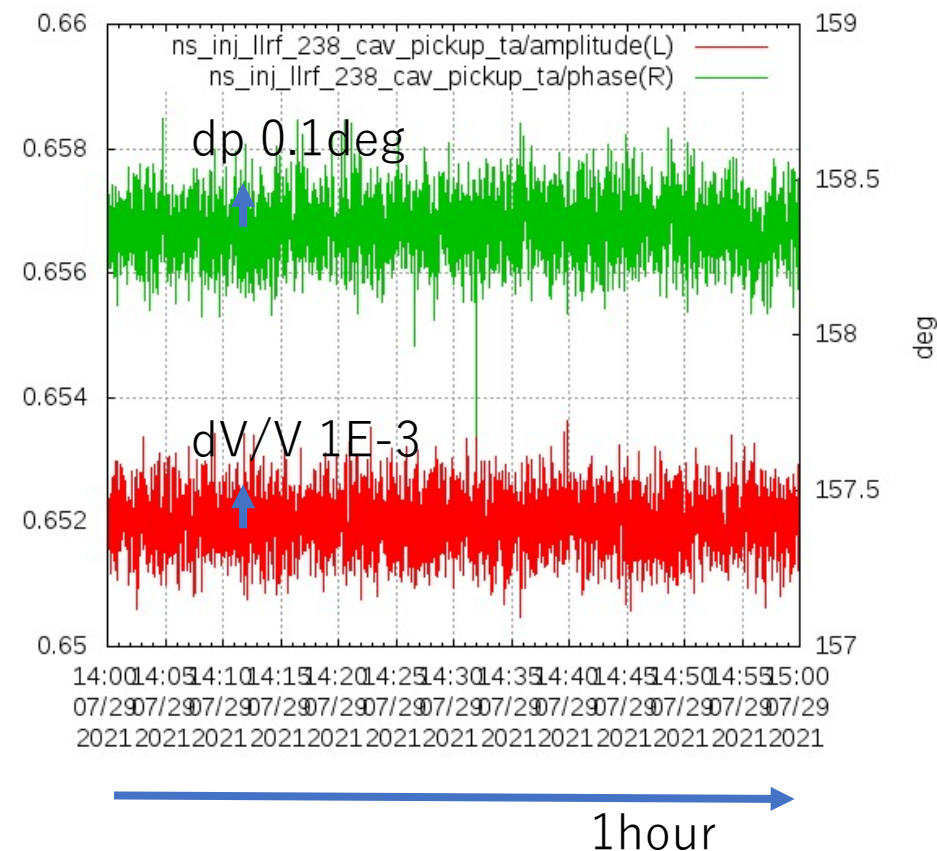


空洞ピックアップ信号の位相・振幅

1時間の測定から求めた電圧・位相変動 (rms)

	dV/V	required	dp [deg]	required
238	7.0E-04	8.0E-04	0.098	0.5
476	2.9E-04	1.5E-03	0.170	0.2
sb	6.4E-04	3.0E-03	0.107	0.5
cb1	6.7E-04	3.0E-03	0.064	2.5
cb2	5.3E-04		0.068	
cb3	8.9E-04		0.088	
cb4	5.3E-04		0.090	

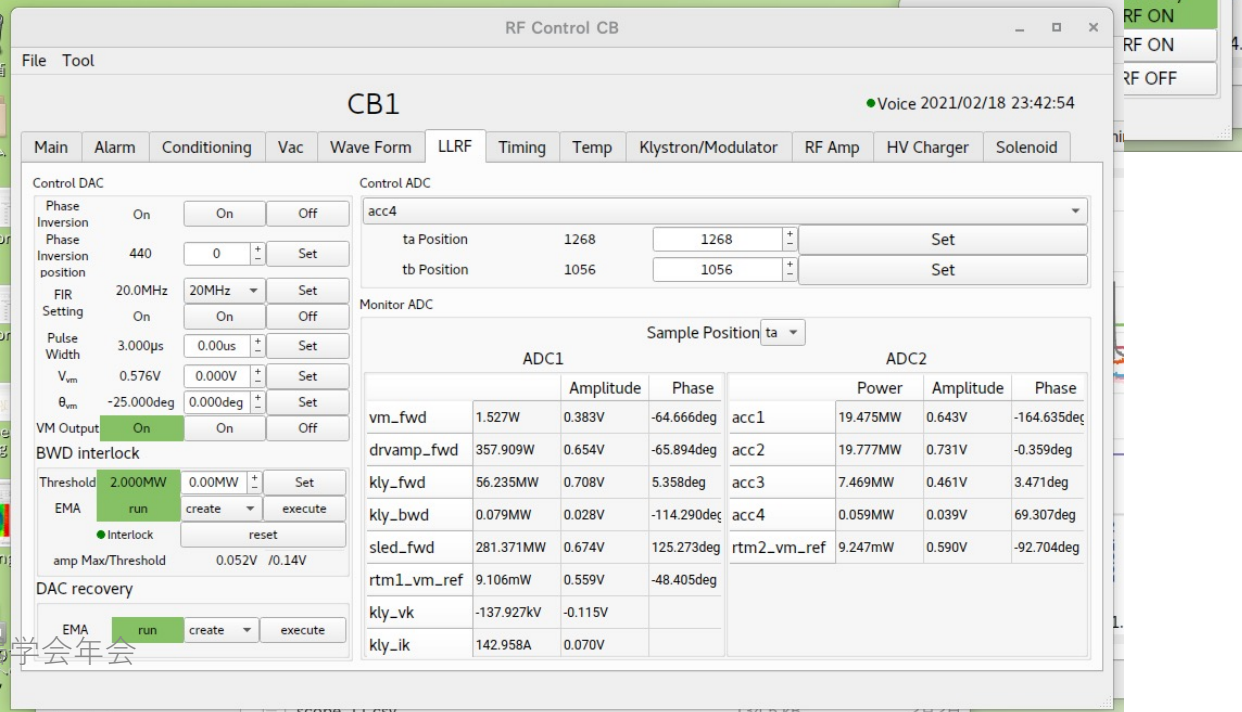
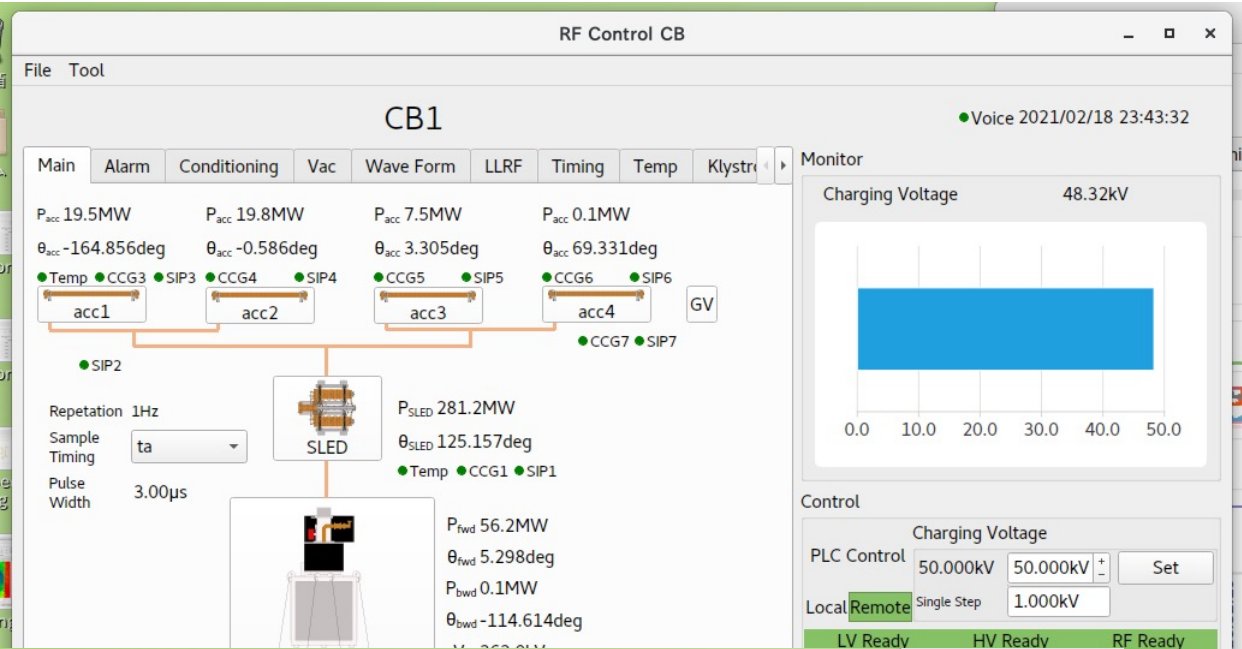
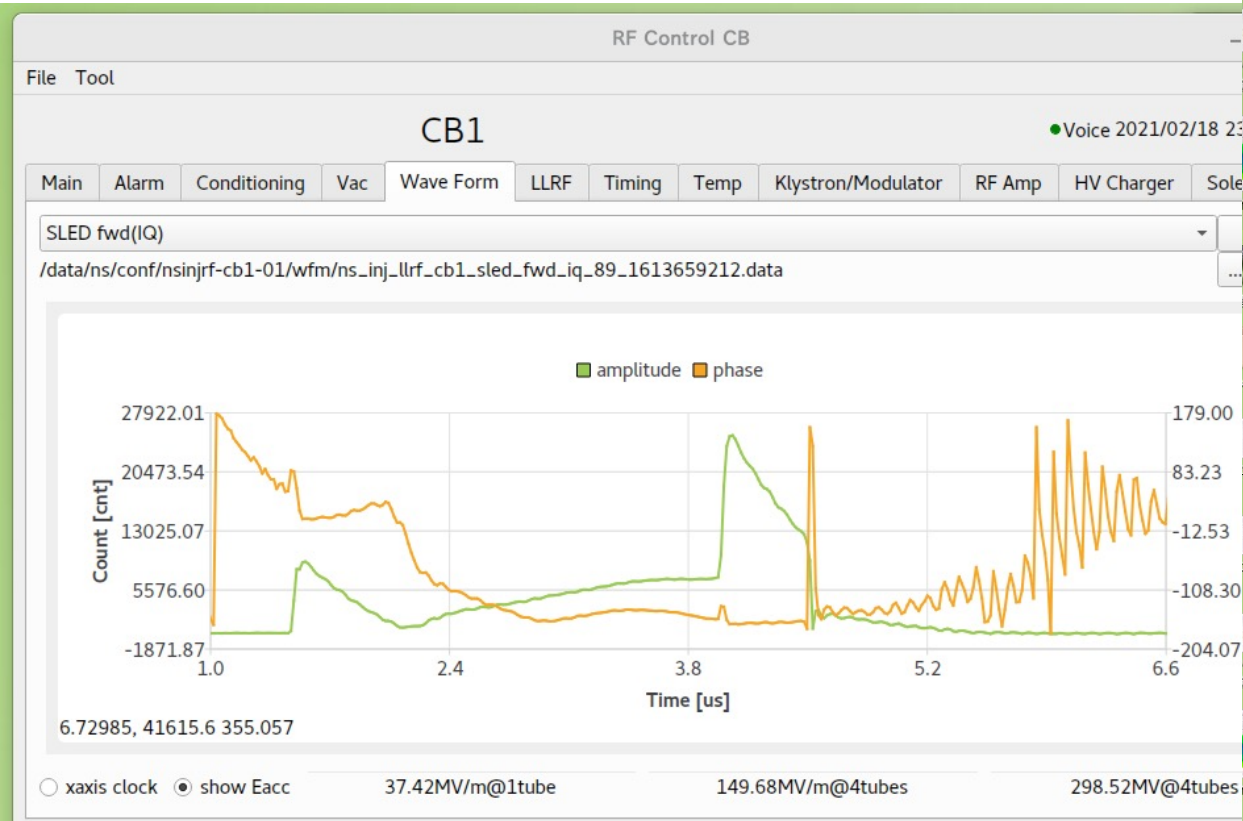
238 MHzピックアップ信号の例



• 結果

- 位相振幅の安定度は要求値を満足している

RF 制御GUI 画面の例



まとめ

- 兵庫県立大学の放射光施設NewSUBARUの入射器のタイミング・LLRFシステムをMTCA.4規格のモジュールで構築した
- 達成した加速空洞の振幅・位相安定度は要求を満たしていた
- 安定したビーム運転が継続されている
- 同様のシステムを 仙台に建設中の3GeV次世代放射光施設に導入予定である