

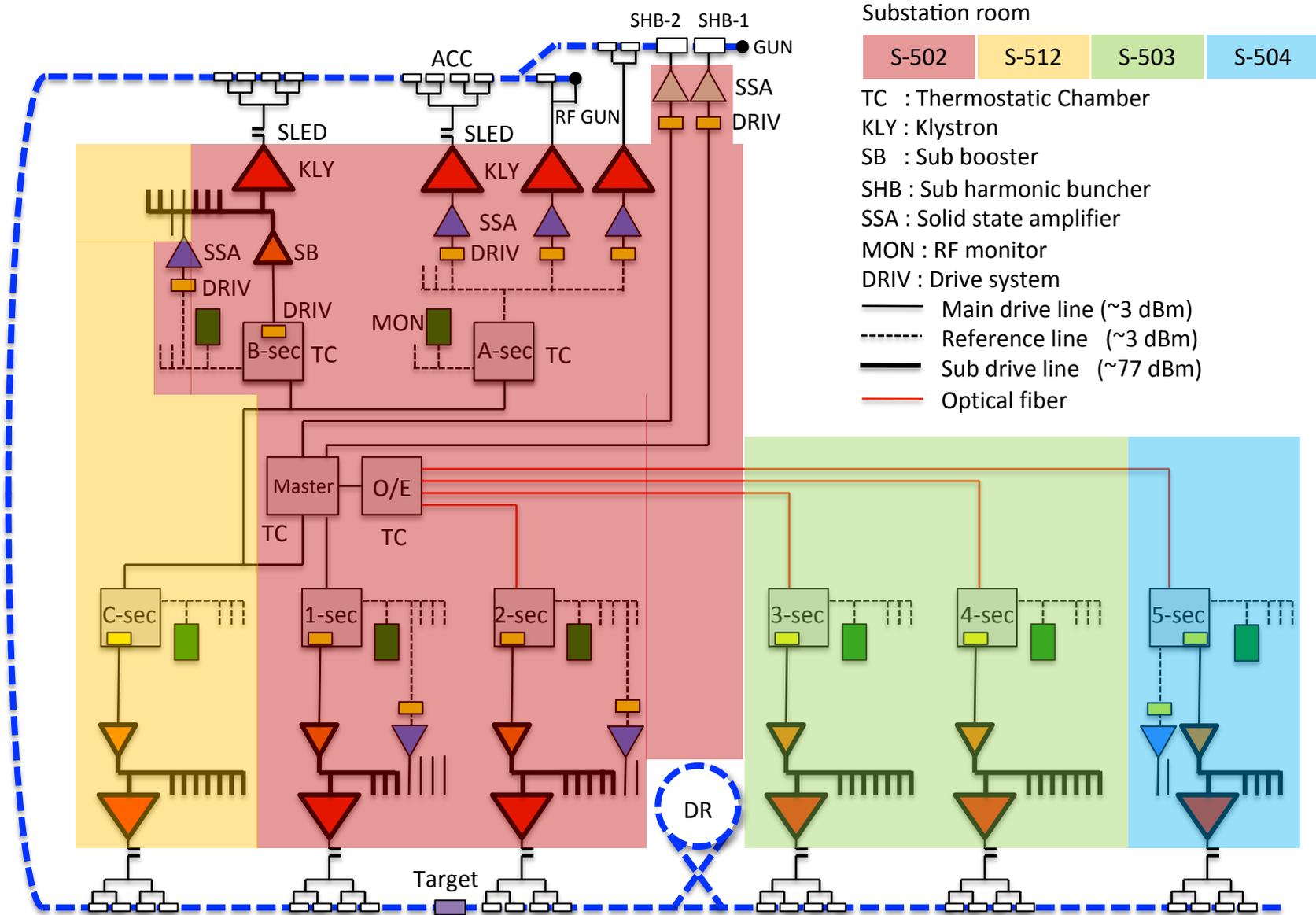
SuperKEKB入射器のノイズ対策-2

矢野喜治、明本光生、荒川 大、片桐広明、川村真人、中島啓光、夏井拓也、
本間博幸、松下英樹、松本修二、松本利広、三浦孝子（KEK）

要旨

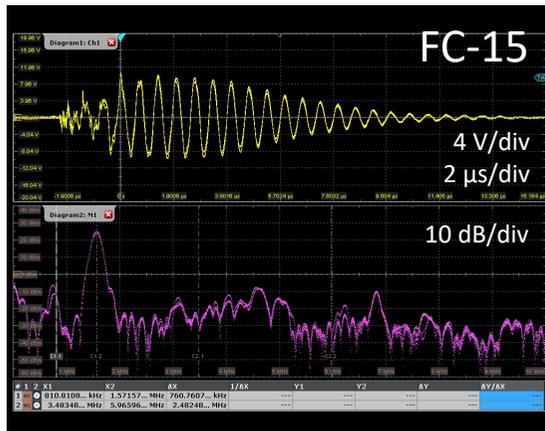
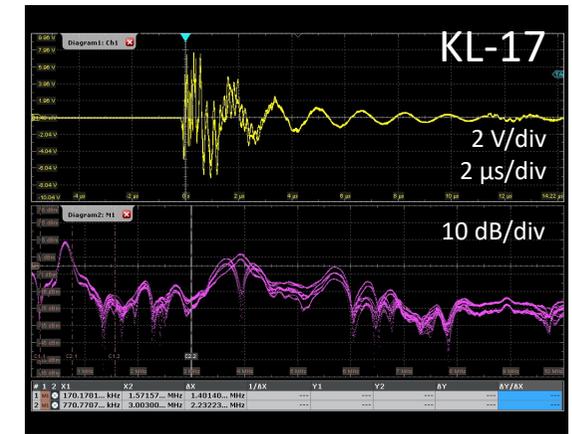
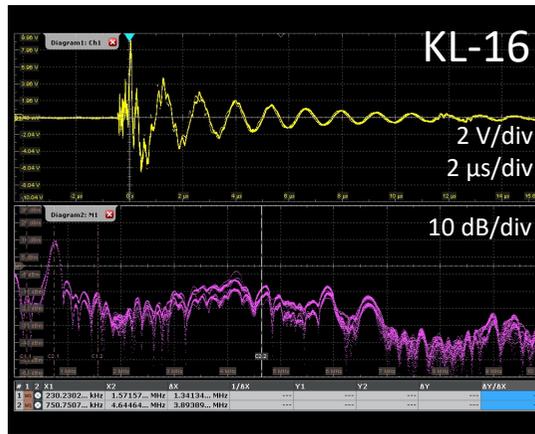
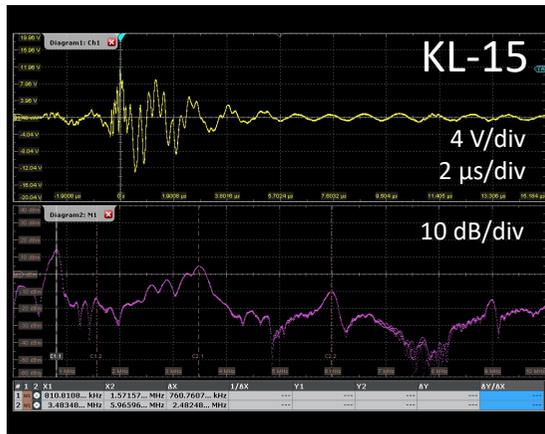
KEKの電子陽電子入射器は1982年にPFリングの電子入射器として稼働をはじめ、様々な増設、改造を重ね現在はPF、PF-AR、SuperKEKBの入射器として運用中である。入射器には60台の高周波電源がありサイラトロンのノイズが原因と思われる機器の誤動作に悩まされて来た。サイラトロンは放電管なので運転を継続しているとジッタが増加し、ノイズも大きくなり機器の誤動作が目立ってくる。ジッタが増加したサイラトロンはリザーバー電圧を調整して正常な運転状態に戻すことを日常的に行なっている。調整が必要となるサイラトロンは選択的にオシロスコープを接続しジッタの確認を行なって決定している。60台の高周波電源にオシロスコープを接続しサイラトロンのジッタを常時観測することは現実的ではない。そこでRaspberry Piを使ったノイズモニタを製作し、高周波電源のノイズとサイラトロンのジッタの関係を調査した。

RF 信号系の全体図と給電網

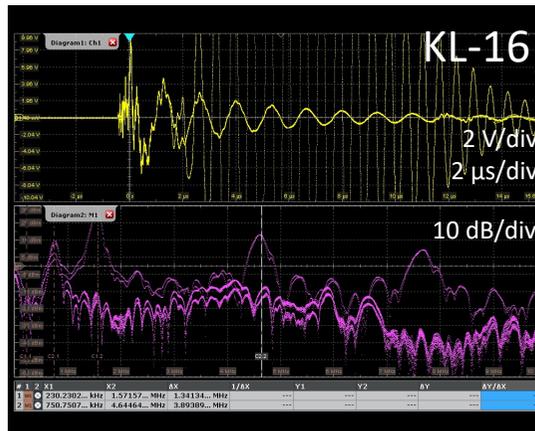


Linacの機器は上図の様に4箇所の変電室から給電されている。クライストロンモジュレータのA種アースはそれぞれの分電盤下部に設置された端子台から外部に配線され接地処理されている。D種アースは分電盤から該当する変電室のD種アース端子へ配線されている。Targetに設置されたフラックスコンセンレータのモジュレータ (FC-15) はS-502から給電されている。

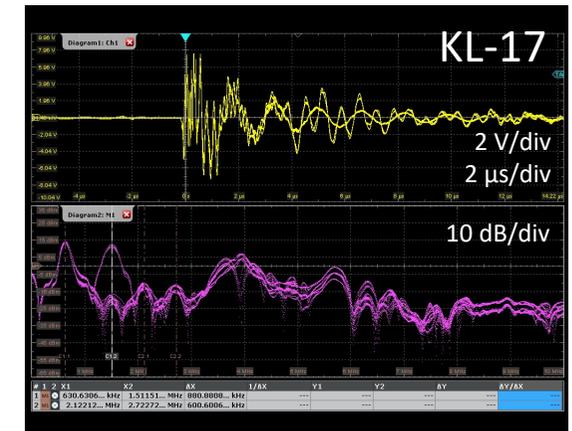
モジュレータA種アース線の共通モードノイズ波形とスペクトル



10 dB ATTを設置



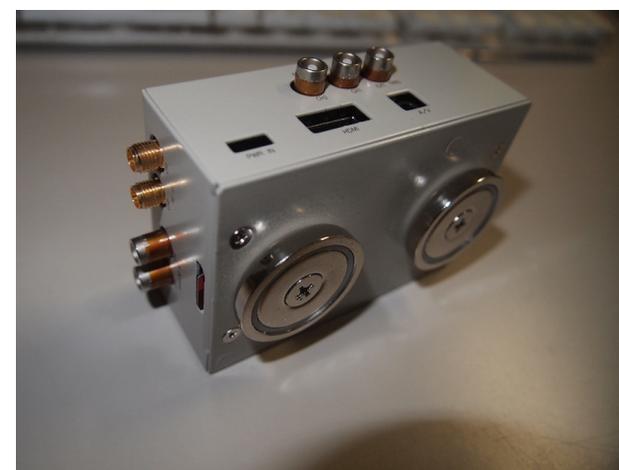
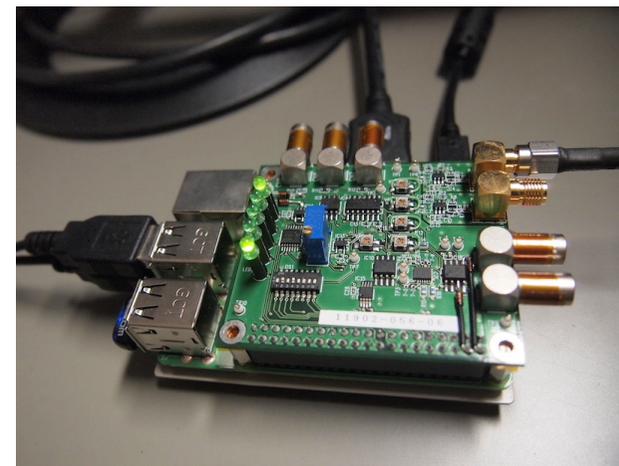
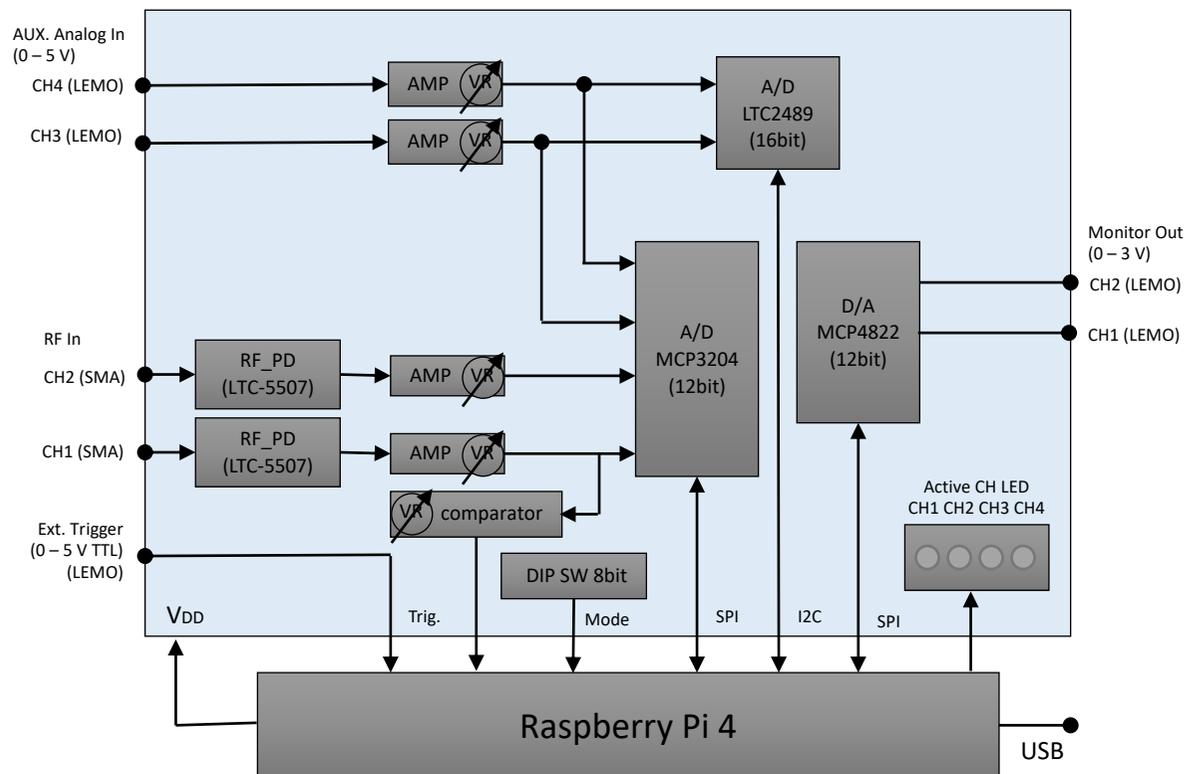
FC-15のノイズが混入



FC-15のノイズが混入

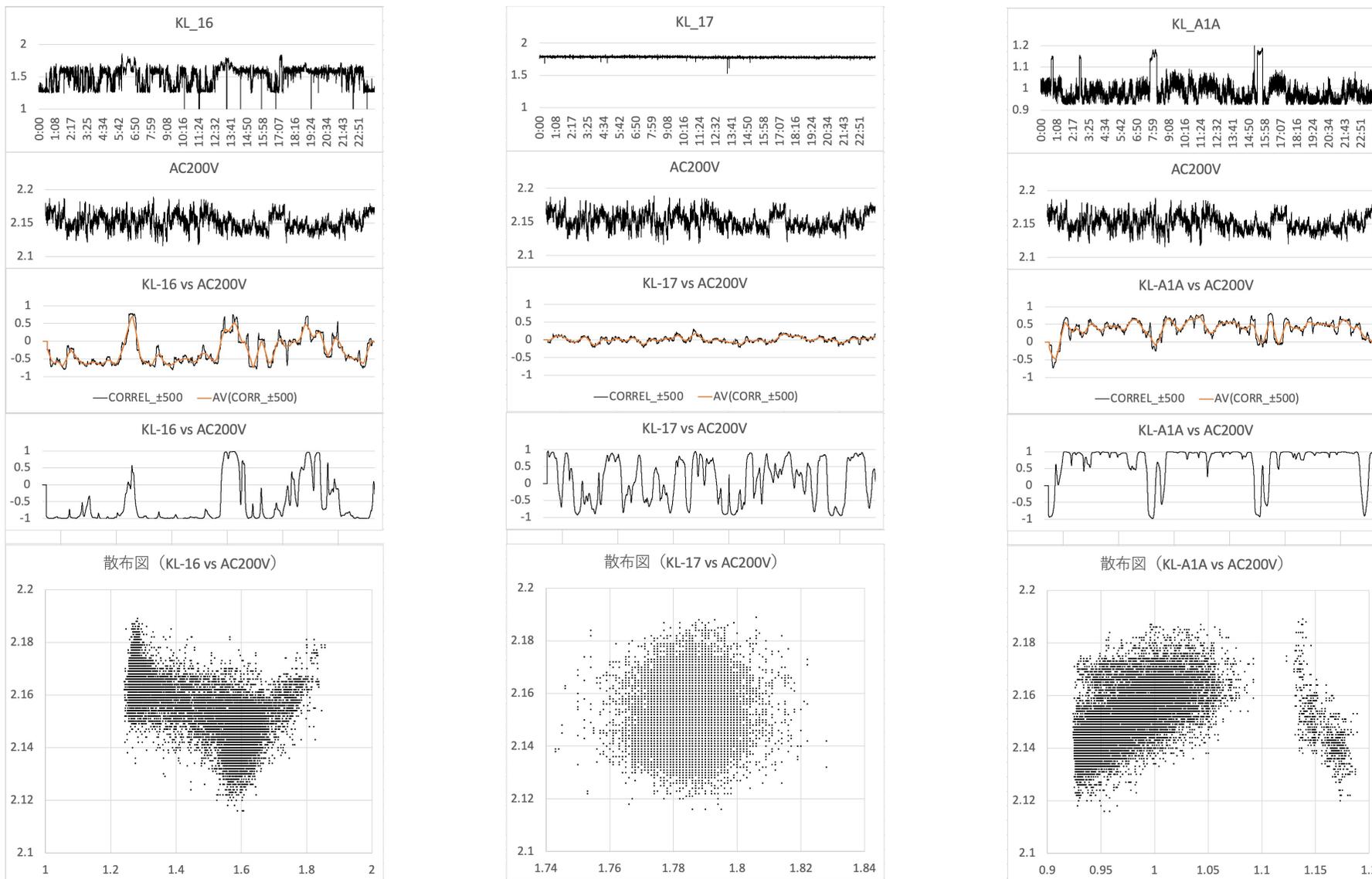
モジュレータはKL-15、FC-15、KL-16、KL-17の順に1セクタに設置されている。KL-16のA種アース線には非常に大きなFC-15のノイズ（1.6 MHz）が混入している。大小の違いはあるがS-502変電室から給電されている分電盤のアース線全てにFC-15のノイズが混入している。このFC-15のノイズに関しては今年の夏メンテナンスで対策を取る予定である。

Raspberry Pi を使ったノイズモニタ(EMIM)



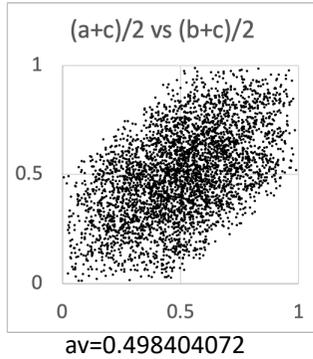
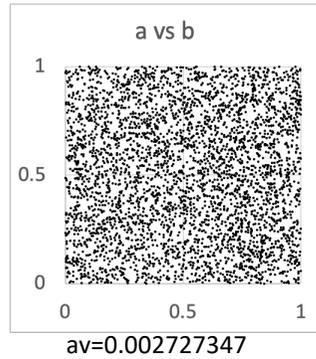
- メインボードにRaspberry Piを採用した理由を以下に示す。
 - ✓ 高速で比較的安価である。(600円~6,600円)
 - ✓ 20 msec以内に様々な処理が可能である。
 - ✓ ソフトウェアの改修で様々な機能を追加できる。
 - ✓ 様々な周辺機器が作られ世界中にプログラマーがいる。
 - ✓ EPICSによるデータ収集も実現容易。
- 専用のADボードを開発。
 - ✓ ノイズ信号用にRFパワー検出器(LTC5507; 100 kHz~1GHz)を採用。
 - ✓ 入出力信号はRF入力×2、アナログ入力×2、アナログ出力×2とした。
 - ✓ 運転モードはDIP SWで選択。(自走モード、外部トリガモード、セルフトリガモード)。
 - ✓ 高ノイズ環境下で使用するためケースは鉄製とした。
 - ✓ 設置の簡便性を考慮して底部にマグネットをつけた。

モジュレータA種アース線のコモンモードノイズ波形とスペクトル

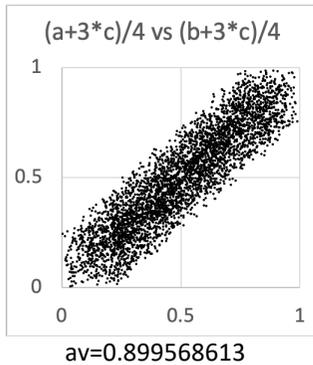
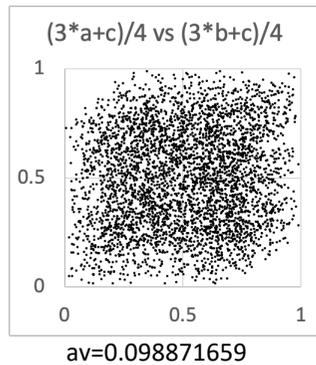
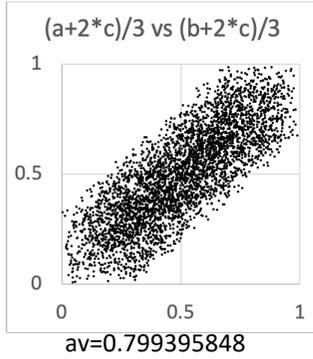
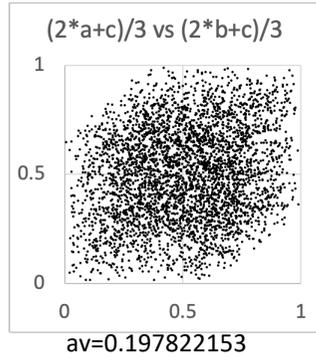


特徴的な3台（ KL-16、 KL-17、 KL-A1A ）のモジュレータについてノイズと電源電圧（AC200V）の移動相関係数と散布図を示す。（2019/12/19）
 KL-16とAC200Vは負の相関有り、KL-17とAC200Vは相関無し、KL-A1AとAC200Vは正の相関がある。KL-16とKL-A1Aのノイズは2つのステージの間を行き来している様に見える。KL-A1Aはノイズが低いステージでは正の相関、高いステージでは負の相関が見られる。

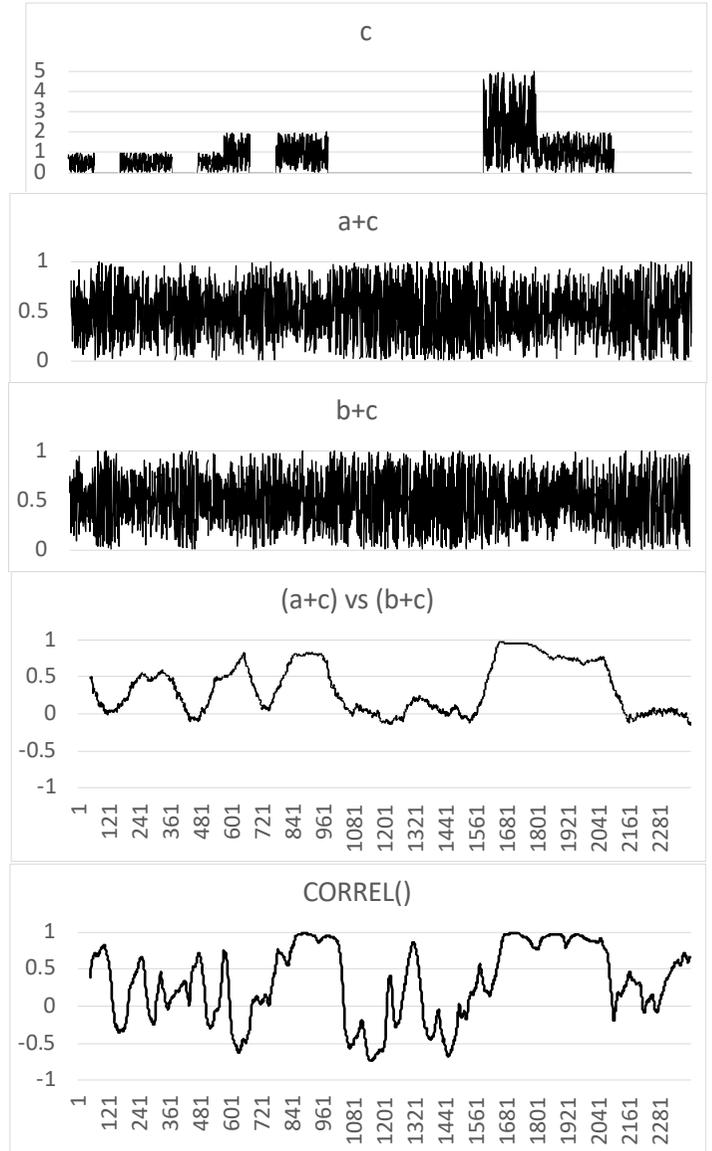
乱数で発生した変数間の移動相関係数と散布図



独立な2つの乱数aとbの相関係数の平均は約0.0、a,b,cの強度が同じ場合の相関係数の平均は約0.5、外部からのノイズであるcがaとbの1/2の場合は約0.2、cがaとbの2倍の場合は約0.8となった。

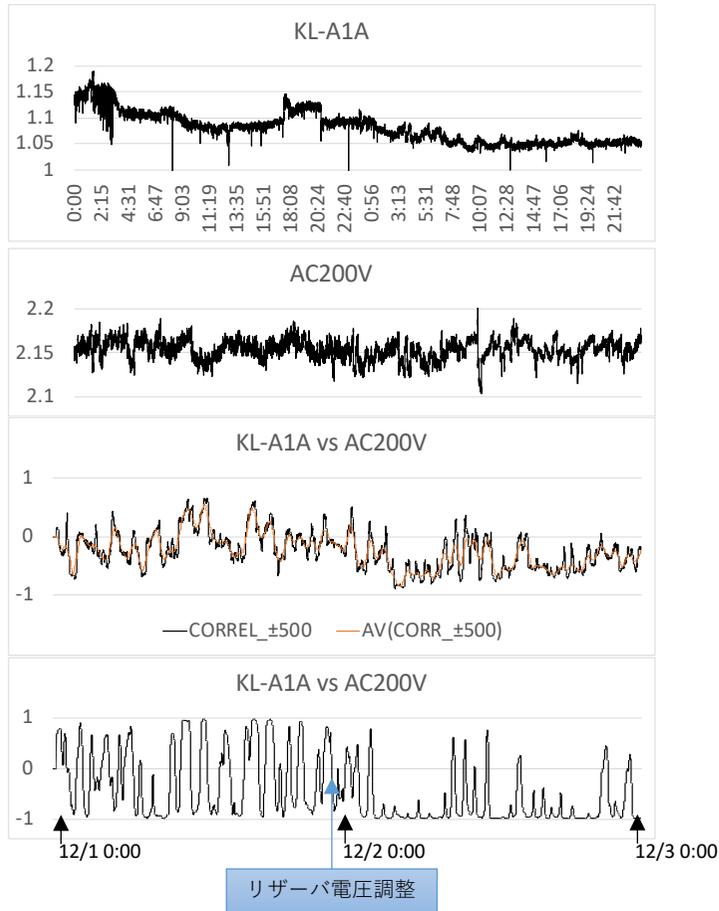


実際のノイズは常に変化しているのでその効果を考慮した結果を右図に示す。モジュレータの内部ノイズに該当するaとbの倍数は1とし外部からのノイズcの倍数が0~5に変化すると計算した。



ここで移動相関係数を算出する母数は100とした。外部ノイズcが内部ノイズと同等の時の移動相関係数は約0.5、外部ノイズが2倍の時は約0.8、5倍の時はほぼ1.0となっているのが分かる。ただ母数の取り方とノイズの様子によって移動相関係数のトレンドグラフが異なる事があるため注意が必要である。

サイラトロンのリザーバ電圧とノイズ



KL-A1AはLinacの最上流に設置されたモジュレータで熱電子銃の電源としても使用されているため安定に運転する事が非常に重要である。EMIモニタによるノイズ調査も長期間（一ヶ月程度）に渡っている。記録によるとノイズレベルも10%程度変動しており、電源電圧とノイズの移動相関係数も正の値を示したり負の値になったりと変化していた。但し、これらの変動とビーム品質に関係性は見られていなかった。サイラトロンのジッターが増加したためリザーバ電圧の調整を12/1の23時頃に行った。電源電圧とノイズの散布図を見ると12/1は相関があるように見えない。リザーバ電圧調整後の12/2の散布図を見ると明らかに負の相関が見られる。生データの移動相関係数のトレンドグラフからは変動の中心が少し負になった程度にしか見えないが移動平均の移動相関係数を見ると明らかに変わっている。

まとめ

コントロールユニットの誤動作の原因を探るためにノイズモニタを開発し監視を続けている。突発的なノイズが誤動作を引き起こすと考えてその様なノイズを捕まえるために運用している。しかし誤動作の発生頻度も非常に低いため記録されたノイズとの対応づけは出来ていない。

ノイズデータ間の移動相関係数を記録することでモジュレータの調子を監視出来る可能性が出て来た。現在はモニタの数が少ないため十分監視が出来ていないが今後数を増やして行きたい。ノイズに変化があるという事は何かの状態が変化したという事である。ビーム性能の悪化と監視しているノイズの変動が関係付けられるとそれらの機器を集中的に調べる事で効率的に改善が出来ると思われる。

今後、監視箇所を増やすとともにソフトウェアも改修し機器の安定運転に繋げたい。

