

第20回日本加速器学会年会 技術貢献賞 賞受賞講演
- 2023年8月29日 -

大電流パルスビーム陽子線形加速器の ビーム負荷補償システムの研究開発

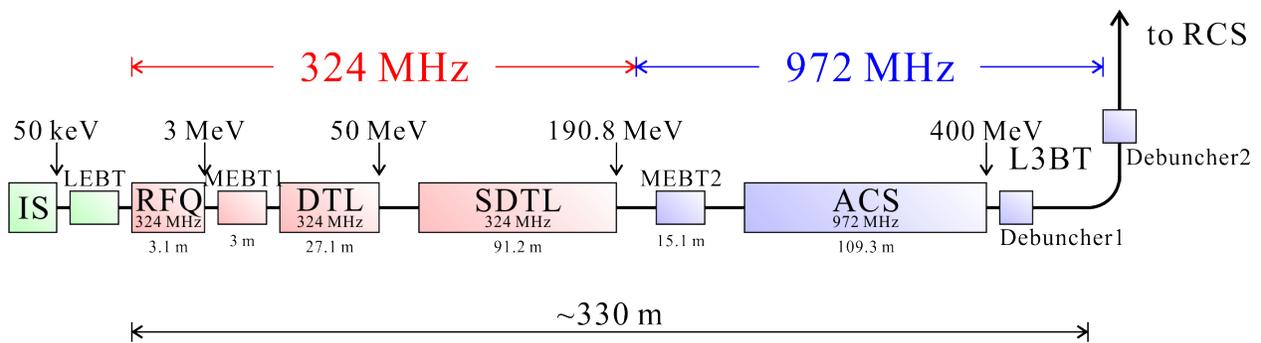
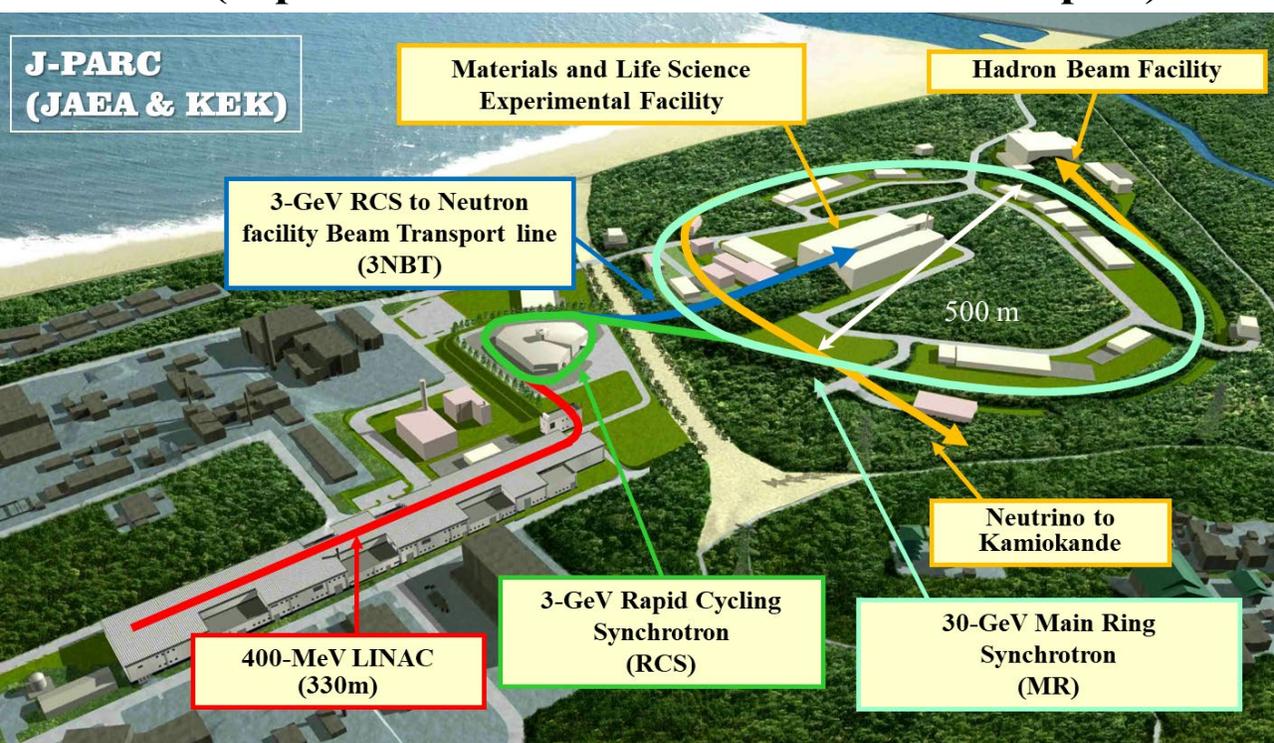
高エネルギー加速器研究機構 ニツ川 健太

リニアック LLRFメンバー 高エネルギー加速器研究機構 Ersin Cicek, 方志高, 福井佑治, 溝端仁志,

NAT 佐藤福克, 日本原子力研究開発機構 篠崎信一

特別な感謝: 三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズ株式会社様, J-PARCリニアックの空洞Gr・制御Gr・コミッショニングGr

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

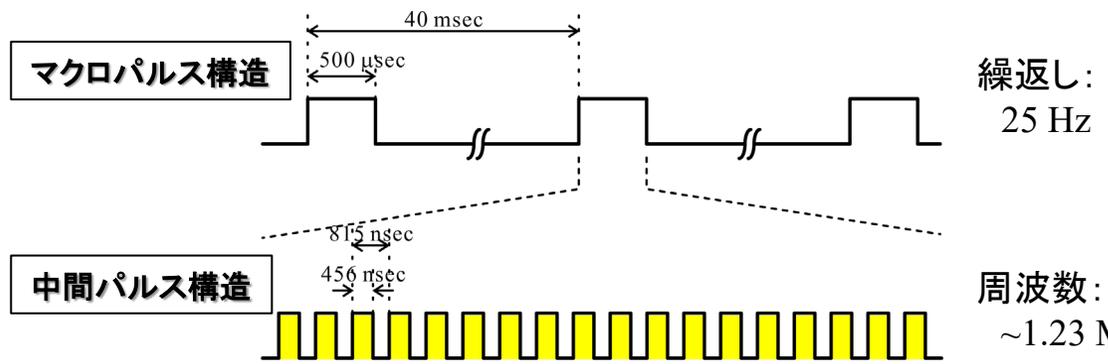


IS: H⁻ Ion Source
 RFQ: Radio Frequency Quadrupole Linac
 DTL: Drift Tube Linac (3 cavity modules)
 SDTL: Separate-type Drift Tube Linac (16 cavity stations)
 ACS: Annual Coupled Structure Linac (21 cavity stations)

J-PARC LINAC ビーム条件

- 加速粒子: H⁻ (negative hydrogen)
- 運動エネルギー: 400 MeV
- **ピークビーム電流: 50 mA**
- 加速周波数: 324 MHz / 972 MHz
- **パルス: 500 μs (ビーム), ~650 μs (RF)**
- 繰返し: 25 Hz (ADSを除く)

→ **大電流ビームを加速するため空洞内電界へのビーム負荷は大きく、ビーム負荷補償システムの性能が空洞内電界の安定度へ大きく寄与する。**



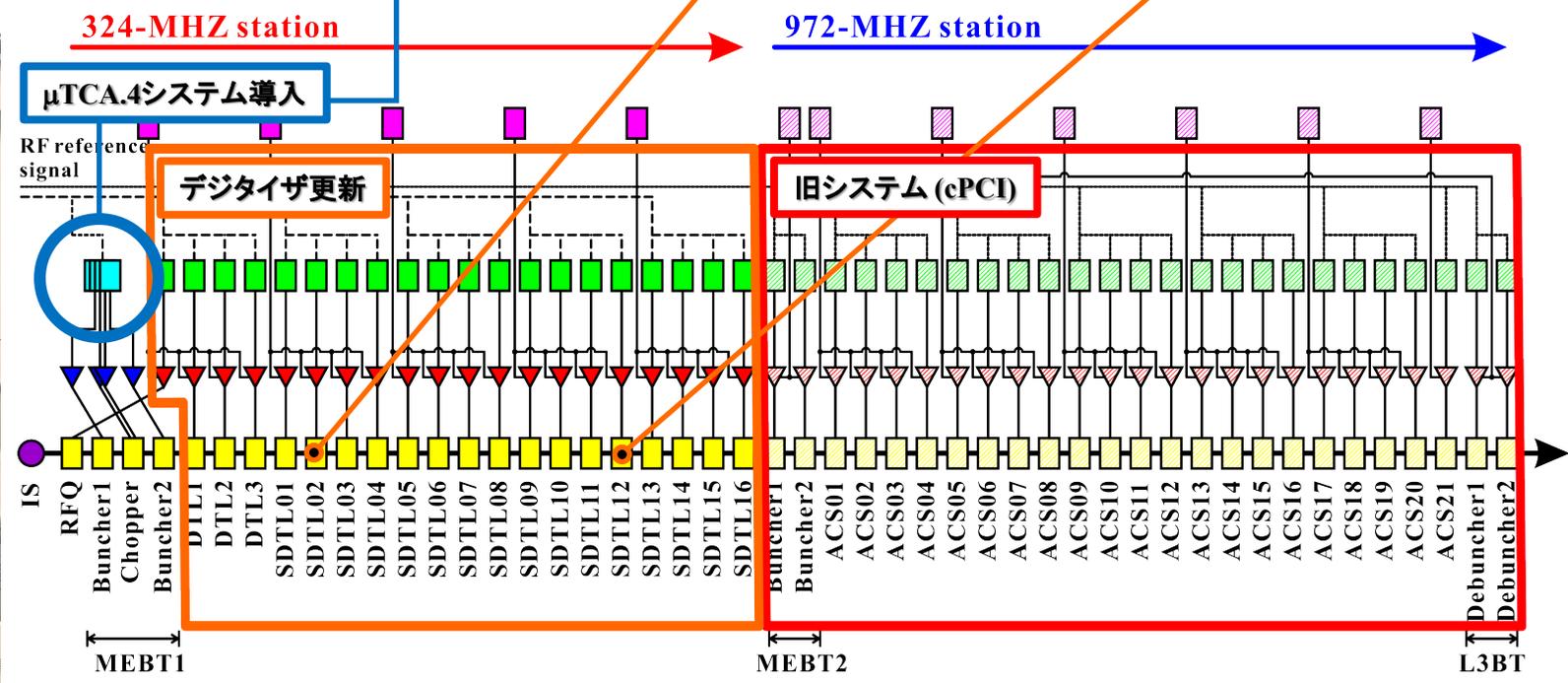
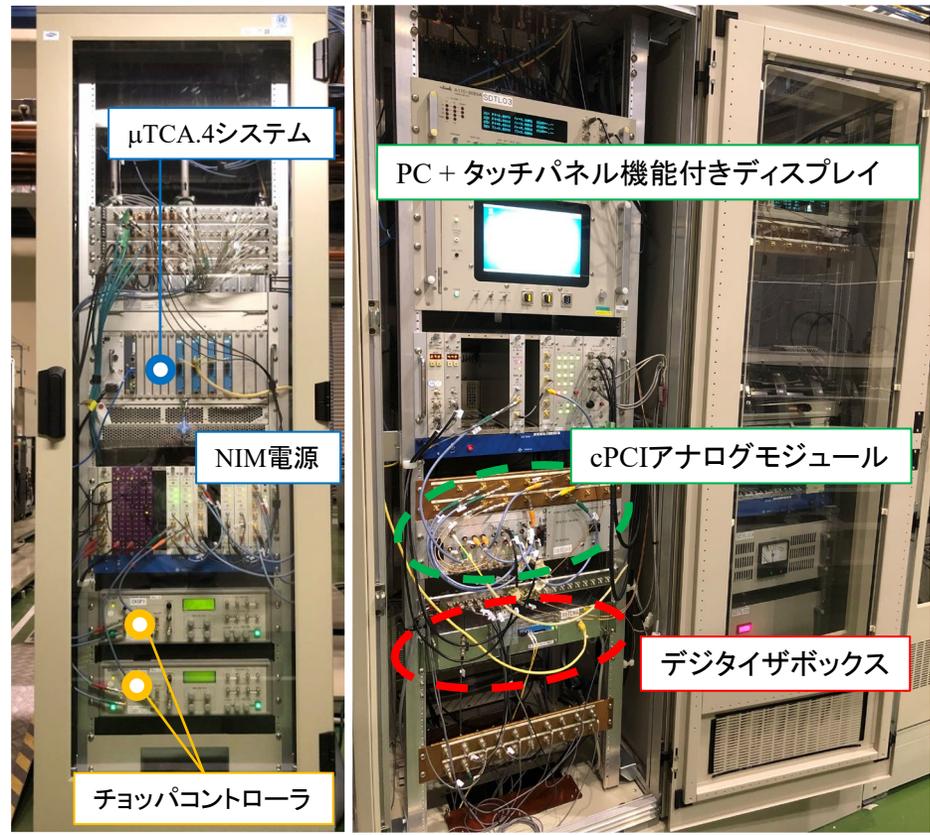
マクロパルス内で、ビームの有り無しが繰り返される。言い換えると、ビーム負荷の有り無しが繰り返され、空洞内電界が揺さぶられる。 2

μTCA.4システム導入 **デジタイザのみ更新**
 for MEBT1 B1-2, C1-2 @ RFQ, DTL1-3, SDTL01-16

μTCA.4システム導入: 2021年夏期シャットダウン @ MEBT1

デジタイザのみ更新 2020年5月 @ SDTL02

デジタイザのみ更新 2020年1月 @ SDTL12



#components	HVDC PS	LLRF (DFB and DFF)	RF source	cavity station
324 MHz	5	4(μTCA.4) 20(digitizer box)	20(klystron) 4(SSA)	24
972 MHz	7	25(cPCI)	25(klystron)	25

2021年の夏期シャットダウンで、324-MHz LLRFシステムのデジタル系を更新を完了した。**この新規導入したデジタル系を使用して、ビーム負荷補償システムを開発した。**

2021年夏期シャットダウン @ RFQ, DTL1-2

2020年夏期シャットダウン @ DTL2, SDTL01-16

□ 初期のビーム負荷補償システム

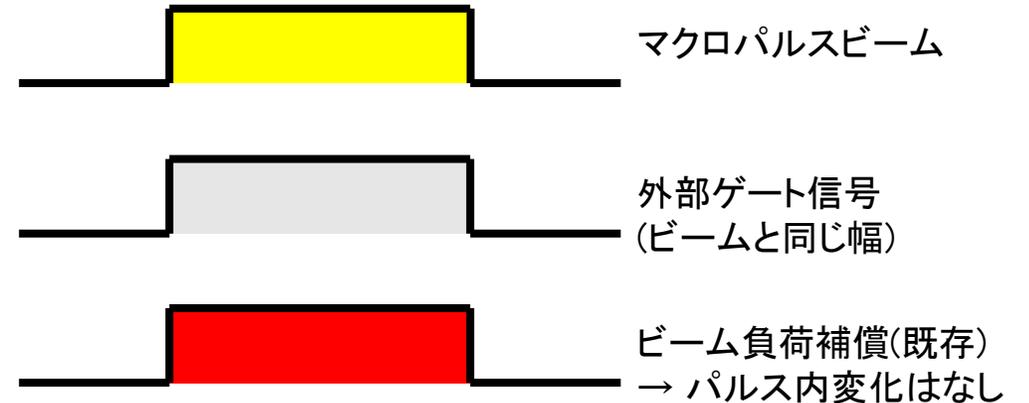
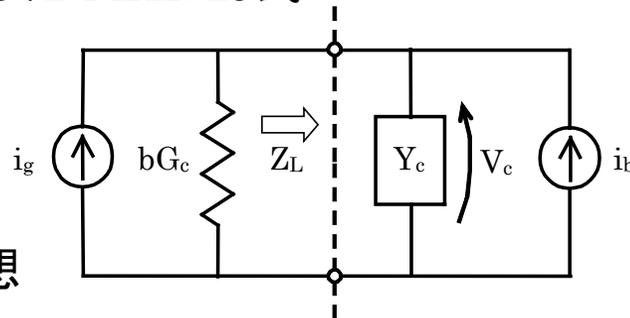
J-PARCリニアックでは、ビームが空洞を通過するタイミングでビーム負荷分の出力を加算させるフィードフォワードシステム(FF_BEAM)を採用している。初期のFF_BEAMでは、外部からのタイミングに応じて、**マクロパルス内変動がない**ビーム負荷補償システムを実装していた。基本的には、夏期シャットダウン明けのビームの立上げ時にパラメータ調整を行い、そのパラメータを使い続けていた。

FF_BEAMの3次元のパラメータ調整:

1. FF_BEAMの振幅
2. FF_BEAMの位相
3. 外部ゲート信号のタイミング調整

→ 324-MHz: 22式, 972-MHz: 25式

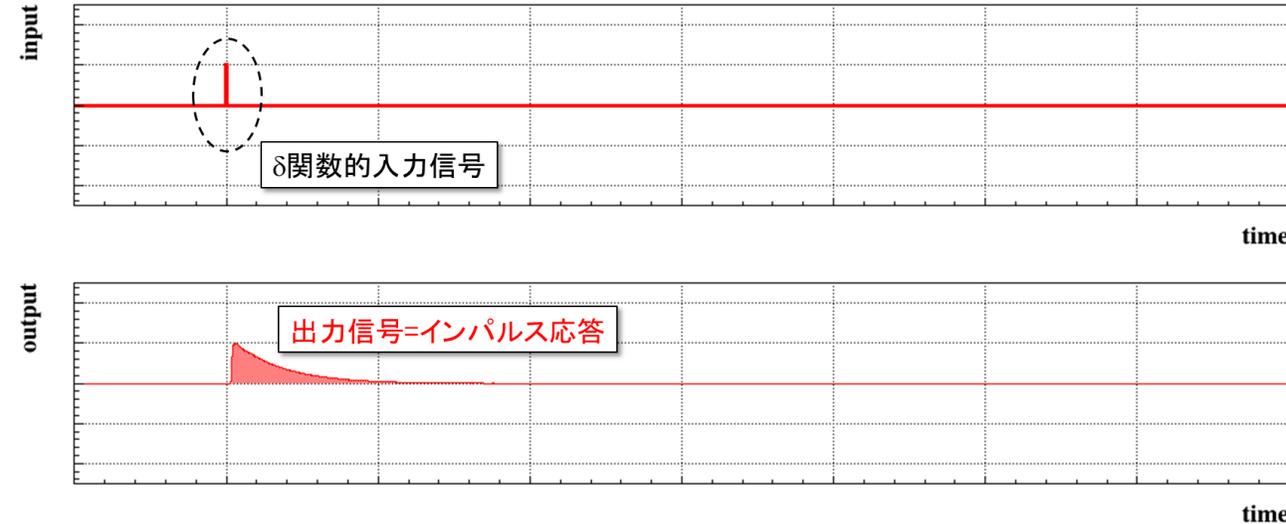
3次元スキャンは膨大な調整時間が必要
→ 等価回路と同期位相から大まかな値を予想



本題のビーム負荷補償システム

- 実測した応答関数を用いた適当型のビーム負荷補償システム
- 中間パルスのビーム形状に対応したビーム負荷補償システム

インパルス応答と応答関数 (一般的な話)



加速器高周波の場合の伝達関数

伝達関数を定義して, 設計・運用に利用
ex. 空洞($\Delta\omega = 0$)の伝達関数

$$G(s) = \frac{\omega_{1/2}}{s + \omega_{1/2}}$$

時間領域と周波数領域

時間領域

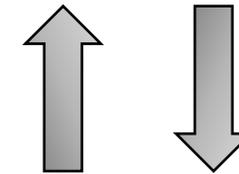
システムからの
出力波形

インパルス応答
(=システムに依存)

入力波形

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

フーリエ逆変換



フーリエ変換

周波数領域

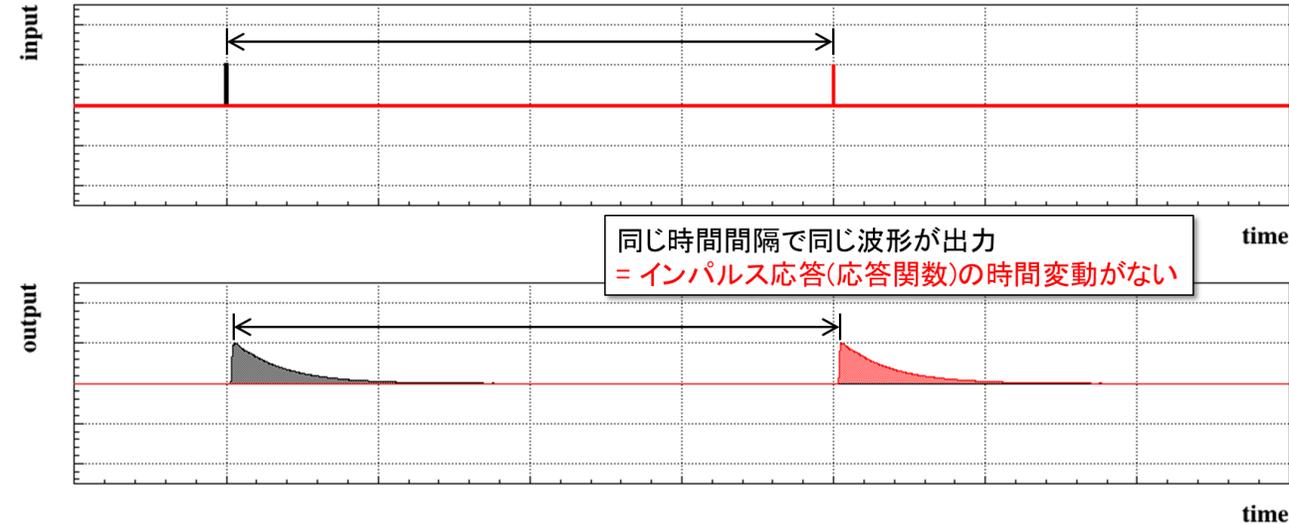
出力スペクトル
(=出力周波数成分)

応答関数
(→システムに依存)

入力スペクトル
(=入力周波数成分)

$$Y(\omega) = H(\omega) \times X(\omega)$$

インパルス応答と応答関数 (一般的な話)



加速器高周波の場合の伝達関数

伝達関数を定義して, 設計・運用に利用
ex. 空洞($\Delta\omega = 0$)の伝達関数

$$G(s) = \frac{\omega_{1/2}}{s + \omega_{1/2}}$$

時間領域と周波数領域

時間領域

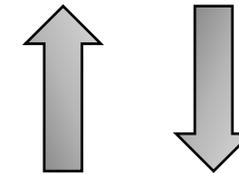
システムからの
出力波形

インパルス応答
(=システムに依存)

入力波形

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

フーリエ逆変換



フーリエ変換

周波数領域

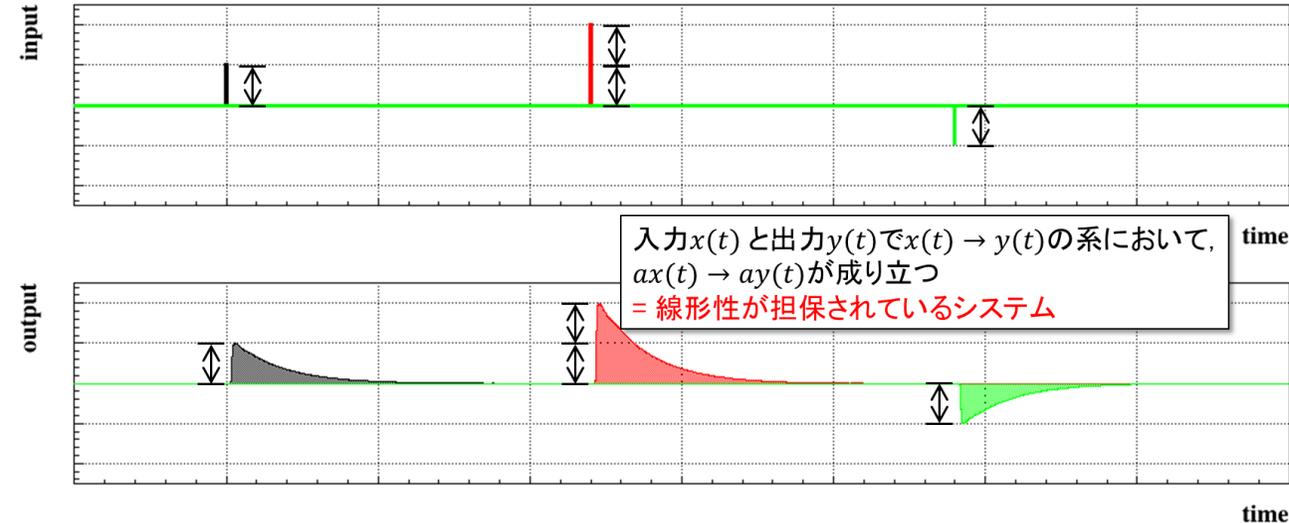
出力スペクトル
(=出力周波数成分)

応答関数
(→システムに依存)

入力スペクトル
(=入力周波数成分)

$$Y(\omega) = H(\omega) \times X(\omega)$$

インパルス応答と応答関数 (一般的な話)



加速器高周波の場合の伝達関数

伝達関数を定義して, 設計・運用に利用
 ex. 空洞($\Delta\omega = 0$)の伝達関数

$$G(s) = \frac{\omega_{1/2}}{s + \omega_{1/2}}$$

時間領域と周波数領域

時間領域

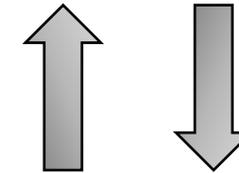
システムからの
出力波形

インパルス応答
(=システムに依存)

入力波形

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

フーリエ逆変換



フーリエ変換

周波数領域

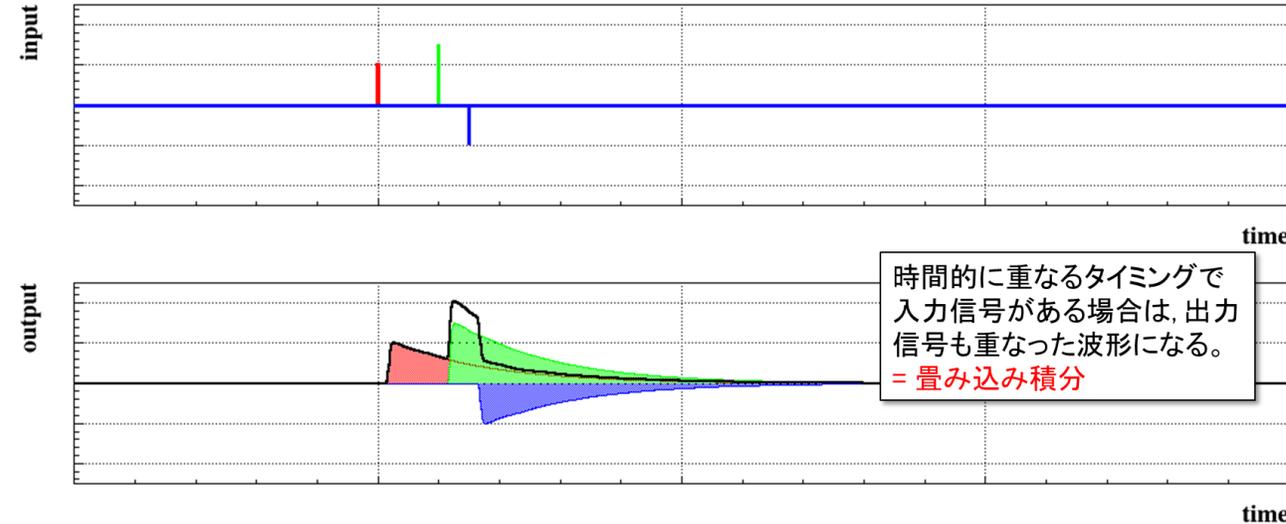
出力スペクトル
(=出力周波数成分)

応答関数
(→システムに依存)

入力スペクトル
(=入力周波数成分)

$$Y(\omega) = H(\omega) \times X(\omega)$$

インパルス応答と応答関数 (一般的な話)



加速器高周波の場合の伝達関数

伝達関数を定義して, 設計・運用に利用
ex. 空洞($\Delta\omega = 0$)の伝達関数

$$G(s) = \frac{\omega_{1/2}}{s + \omega_{1/2}}$$

時間領域と周波数領域

時間領域

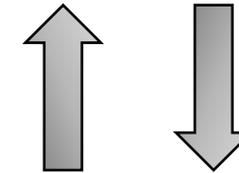
システムからの出力波形

インパルス応答
(= システムに依存)

入力波形

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

フーリエ逆変換



フーリエ変換

周波数領域

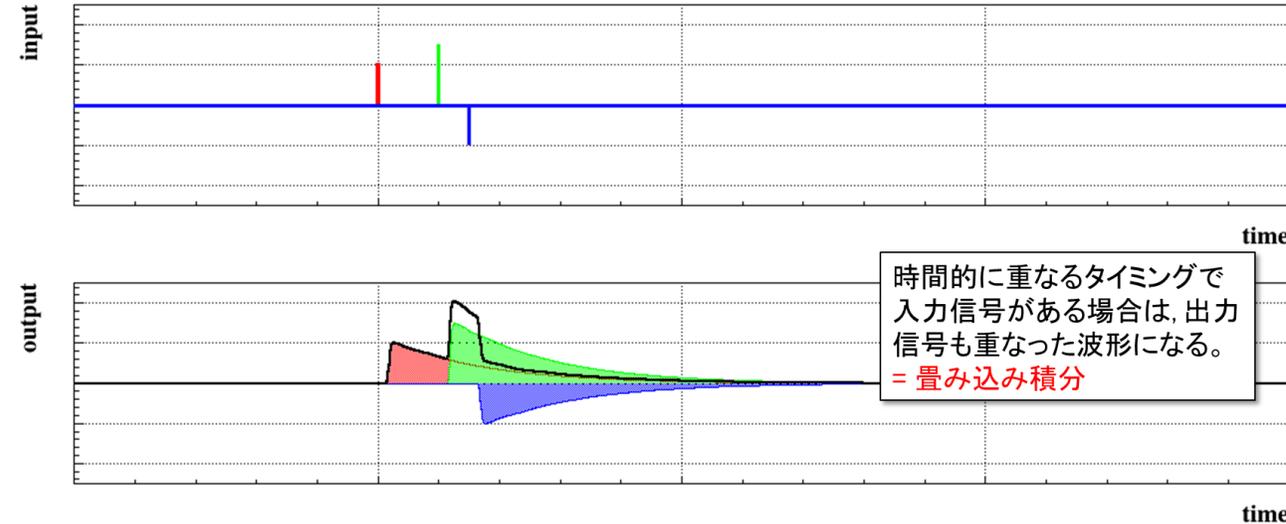
出力スペクトル
(= 出力周波数成分)

応答関数
(→ システムに依存)

入力スペクトル
(= 入力周波数成分)

$$Y(\omega) = H(\omega) \times X(\omega)$$

インパルス応答と応答関数 (一般的な話)



時間的に重なるタイミングで
入力信号がある場合は、出力
信号も重なった波形になる。
= 畳み込み積分

加速器高周波の場合の伝達関数

伝達関数を定義して、設計・運用に利用
ex. 空洞($\Delta\omega = 0$)の伝達関数

$$G(s) = \frac{\omega_{1/2}}{s + \omega_{1/2}}$$

時間領域と周波数領域

時間領域

システムからの
出力波形

インパルス応答
(=システムに依存)

入力波形

$$y(t) = h(t) * x(t)$$



周波数領域

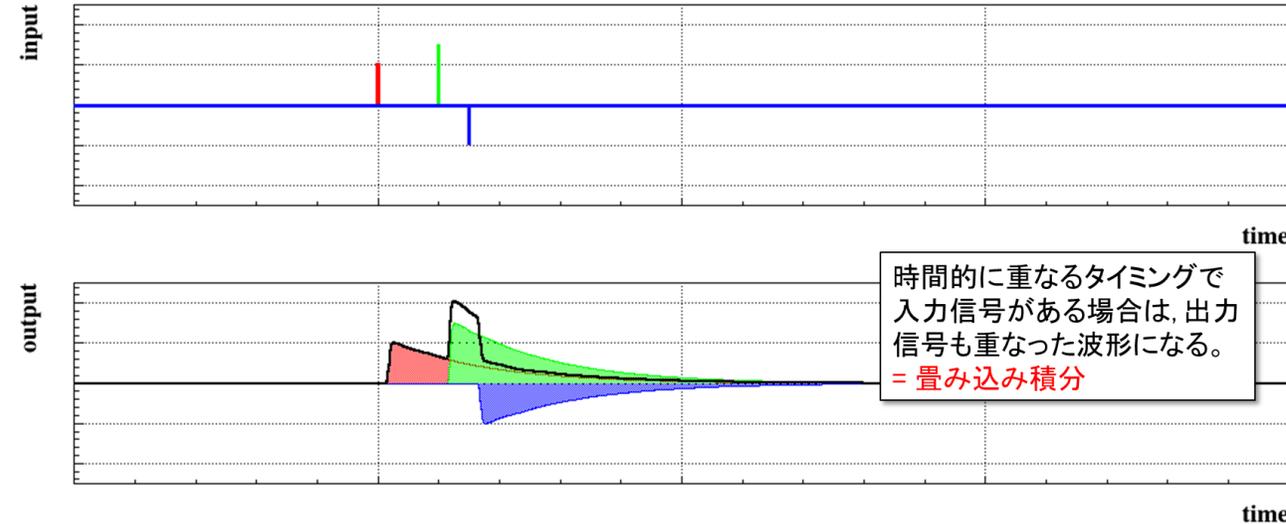
出力スペクトル
(=出力周波数成分)

応答関数
(→システムに依存)

入力スペクトル
(=入力周波数成分)

$$Y(\omega) = H(\omega) \times X(\omega)$$

インパルス応答と応答関数 (一般的な話)



加速器高周波の場合の伝達関数

伝達関数を定義して、設計・運用に利用
ex. 空洞($\Delta\omega = 0$)の伝達関数

$$G(s) = \frac{\omega_{1/2}}{s + \omega_{1/2}}$$

時間領域と周波数領域

時間領域

システムからの出力波形

インパルス応答 (= システムに依存)

入力波形

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

フーリエ変換

周波数領域

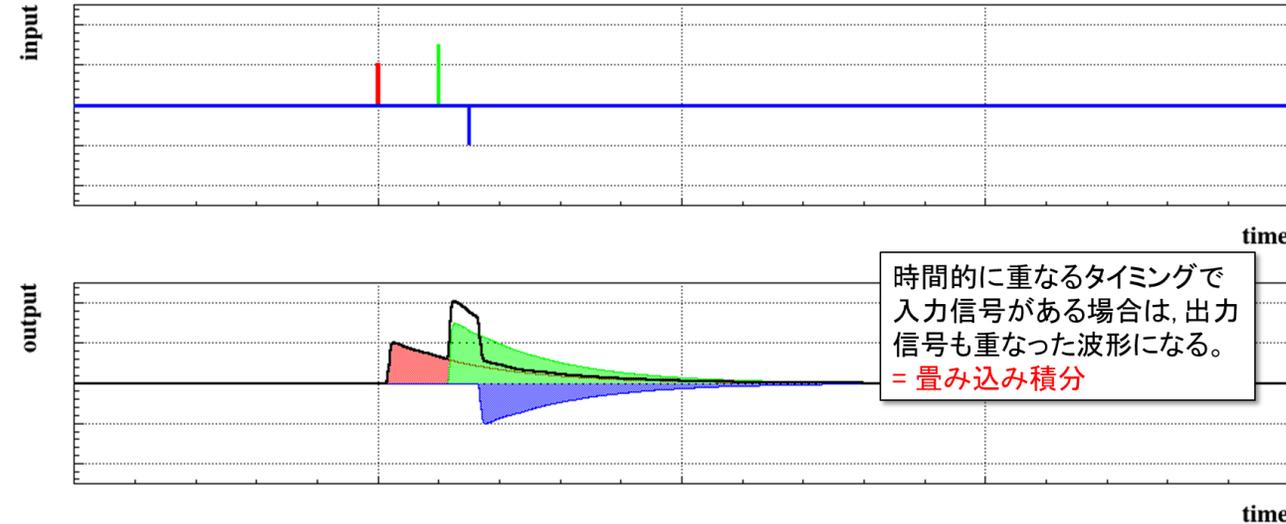
出力スペクトル (= 出力周波数成分)

応答関数 (→ システムに依存)

入力スペクトル (= 入力周波数成分)

$$Y(\omega) = H(\omega) \times X(\omega)$$

インパルス応答と応答関数 (一般的な話)



加速器高周波の場合の伝達関数

伝達関数を定義して、設計・運用に利用
ex. 空洞($\Delta\omega = 0$)の伝達関数

$$G(s) = \frac{\omega_{1/2}}{s + \omega_{1/2}}$$

時間領域と周波数領域

時間領域

システムからの
出力波形

インパルス応答
(=システムに依存)

入力波形

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

フーリエ変換

フーリエ逆変換

周波数領域

出力スペクトル
(=出力周波数成分)

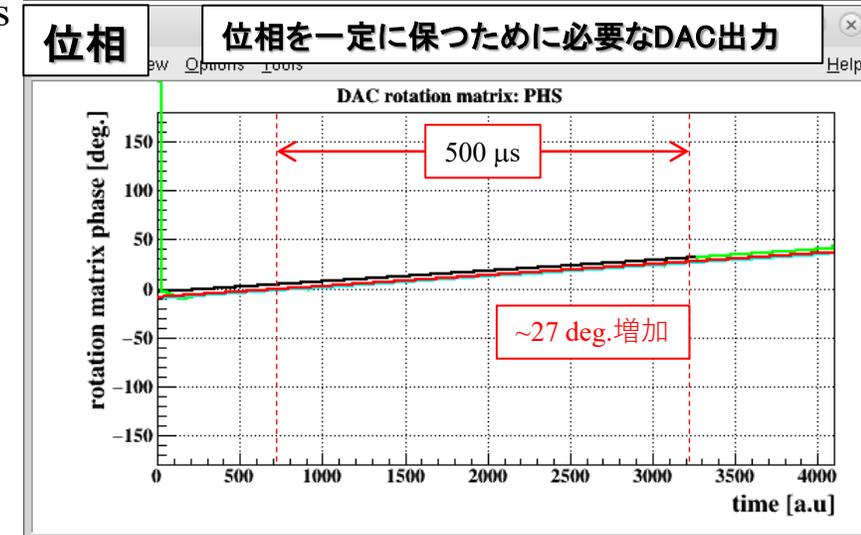
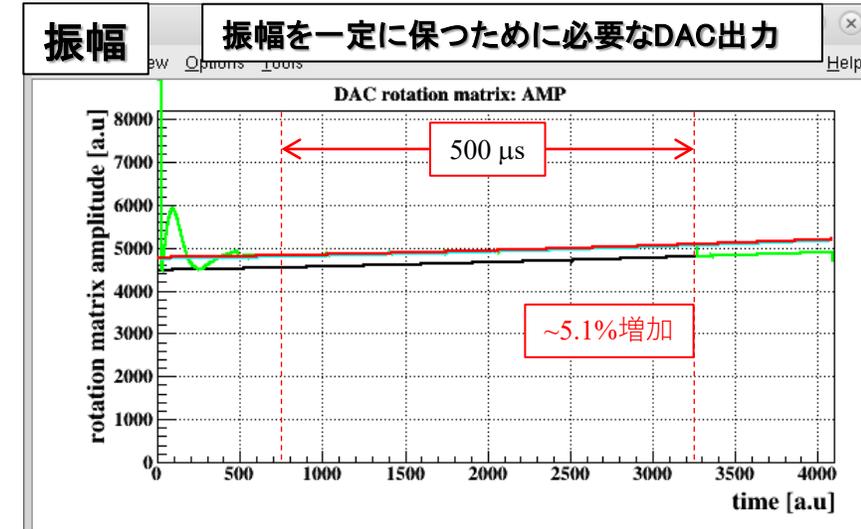
応答関数
(→システムに依存)

入力スペクトル
(=入力周波数成分)

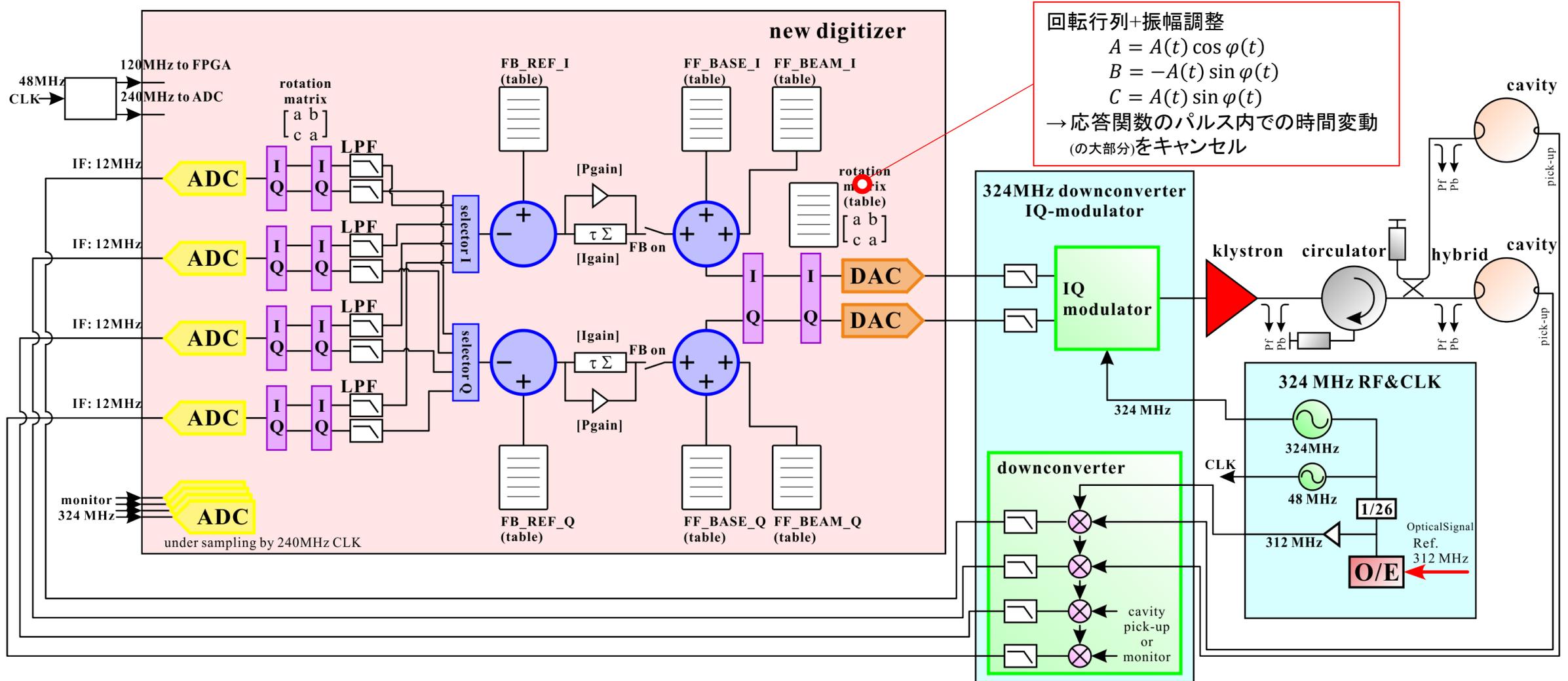
$$Y(\omega) = H(\omega) \times X(\omega)$$

原理は簡単ではあるが、現実には？ → “理想的なシステム”ではない！

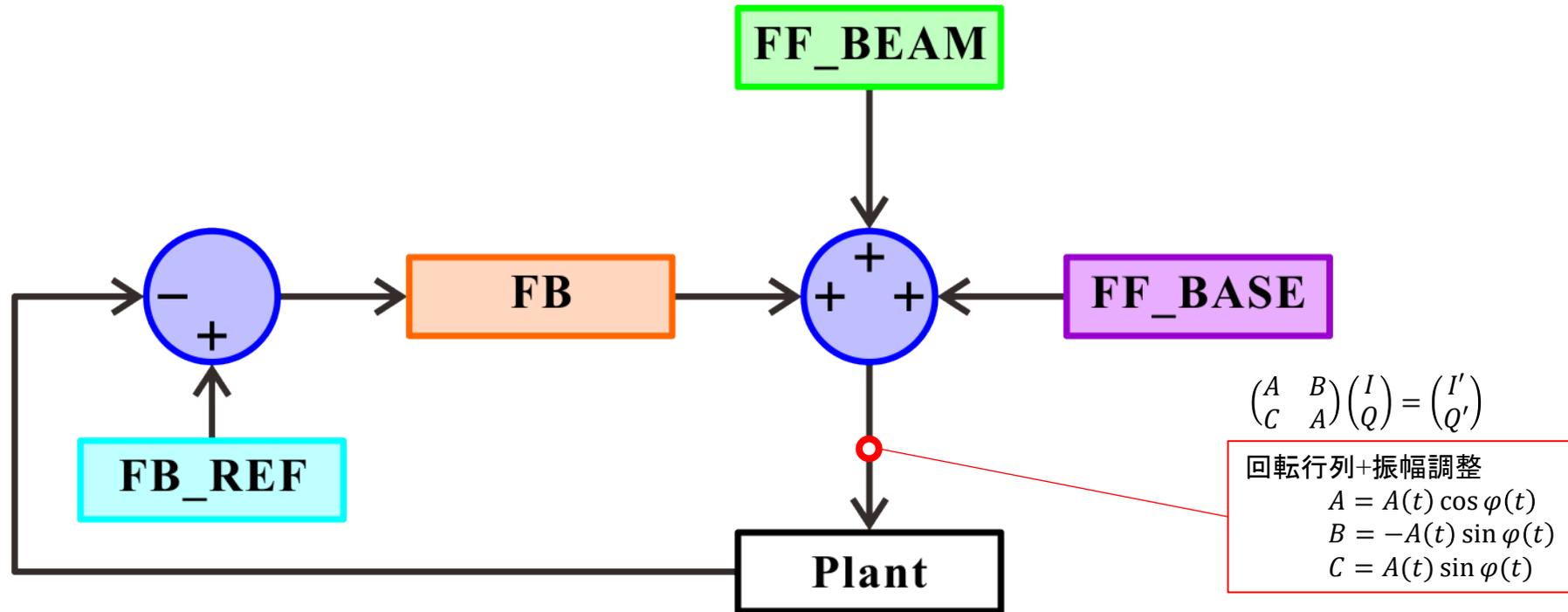
- ✓ 応答関数のパルス内の時間変動：⇒ **近似的に時間変動がない系に変更**
現在のJ-PARCリニアックのクライストロン用のHVDCは、コンデンサバンクを使用した方法を採用しているため、パルス内でクライストロンへの印加電圧の降下がある。
 - 利得の低下
→ パービアンスの低下：~8% @500 μ s
 - 位相の回転
→ クライストロン内の電子ビームの速度の変動：~25 deg. @500 μ s
- ✓ システムの線形性：⇒ **無視可能？**
クライストロンは、出力が小さい領域では線形性のあるデバイスとして仮定できるが、J-PARCリニアックで使用するような領域では非線形要素が大きい。
- ✓ ビームの有無による応答関数の変化：⇒ **無視可能**
空洞はビームの有無で応答関数が変化するが、これを考慮するのは容易ではない。
- ✓ IQの非独立性：⇒ **無視可能**
IQが独立のbasebandとして扱えるように調整しても、デバイス(主にHPRF)が変動して非独立性が生じる。



適応型ビーム負荷補償システムのデジタイザ



適応型ビーム負荷補償システムのデジタイザ

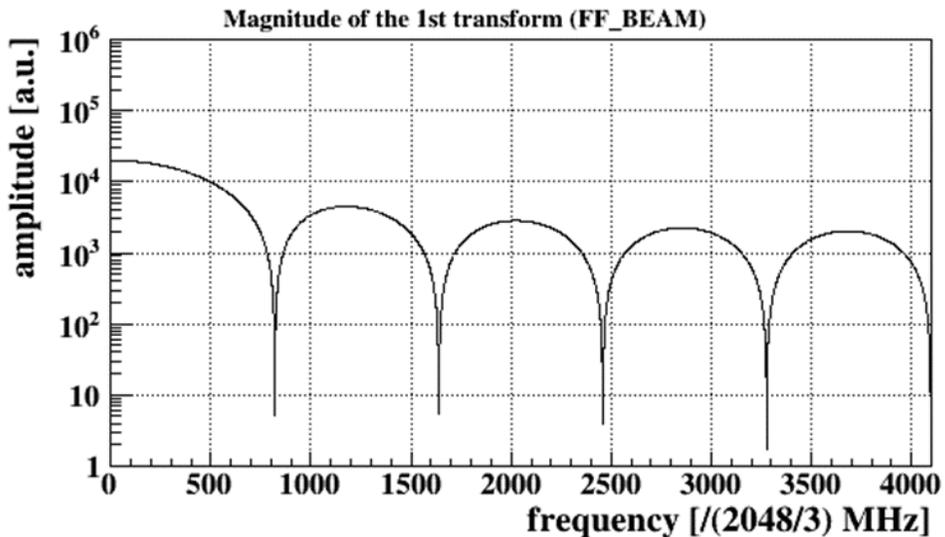
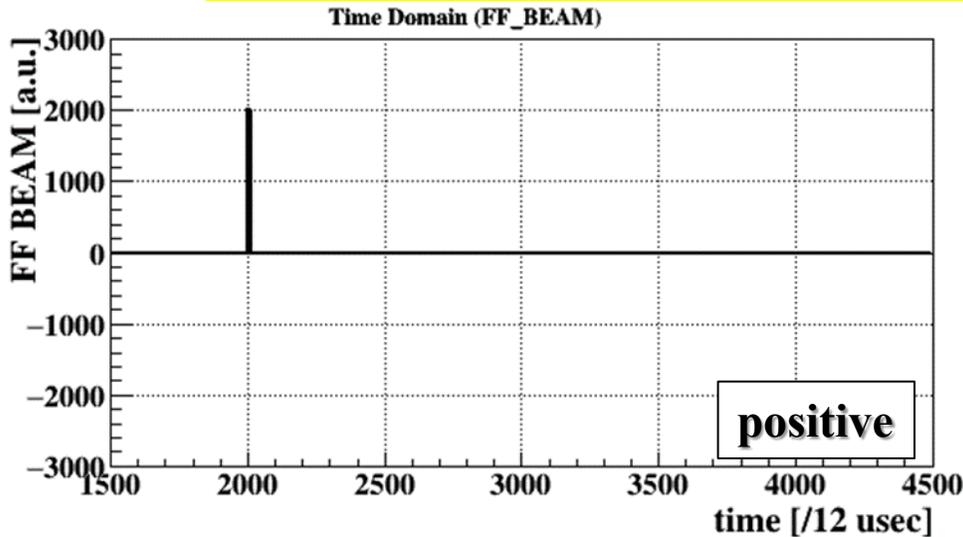


非常に単純化すると、DFB&DFFシステムは上図になる。FFには、ビームの有無に関わらず出力するFF_BASEとビーム負荷補償用に実装されているFF_BEAMがある。

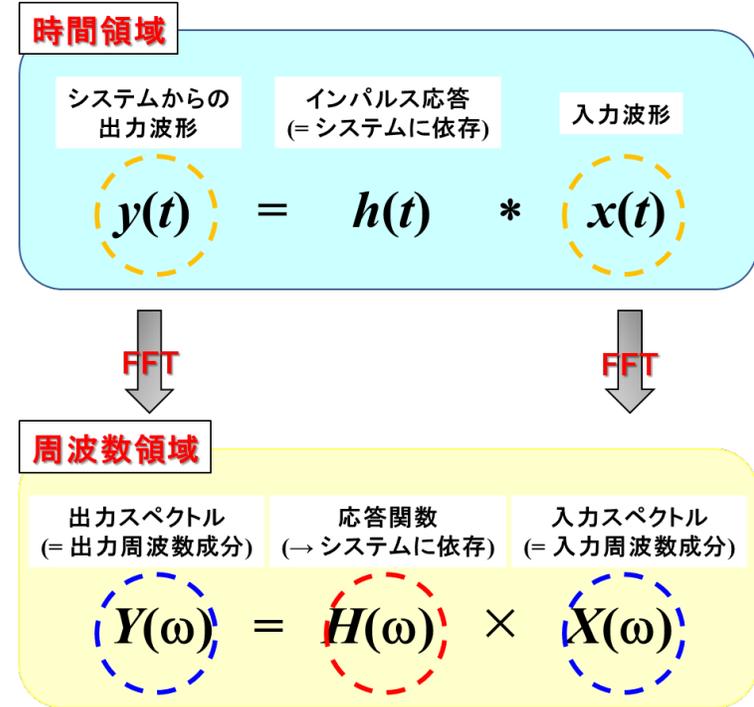
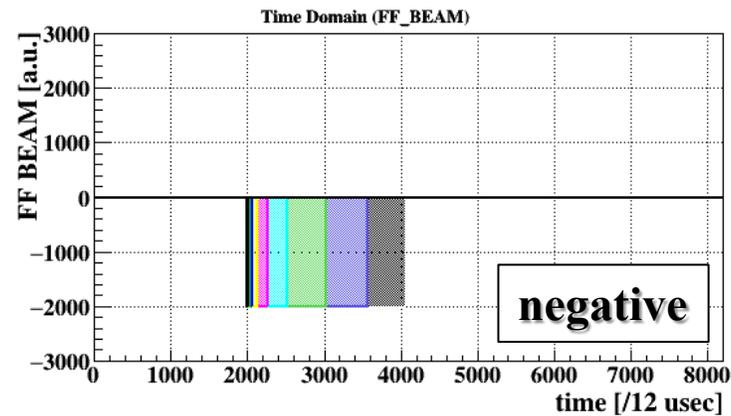
応答関数の求め方

帯域の狭い加速空洞を含む系において、大電力での周波数スキャンは不可

→ 色々なパルス幅, 周波数の入力に対する応答を解析することで, 応答関数を算出



数学的には, δ 関数入力時は, 一様な周波数成分の出力スペクトルに相当 → 現実的には不可
 ← 有限のパルス幅の入力信号は, 周波数成分で帯域が無い箇所が離散的に存在する。



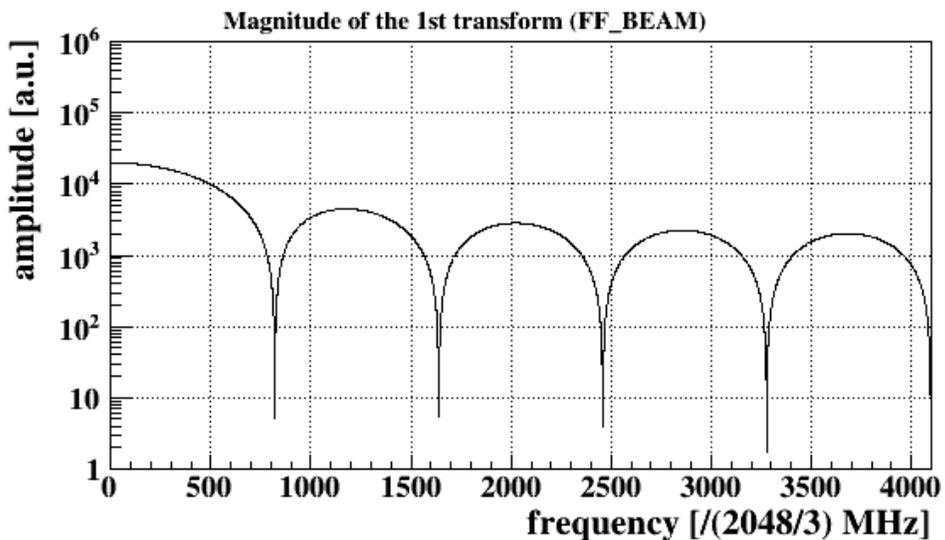
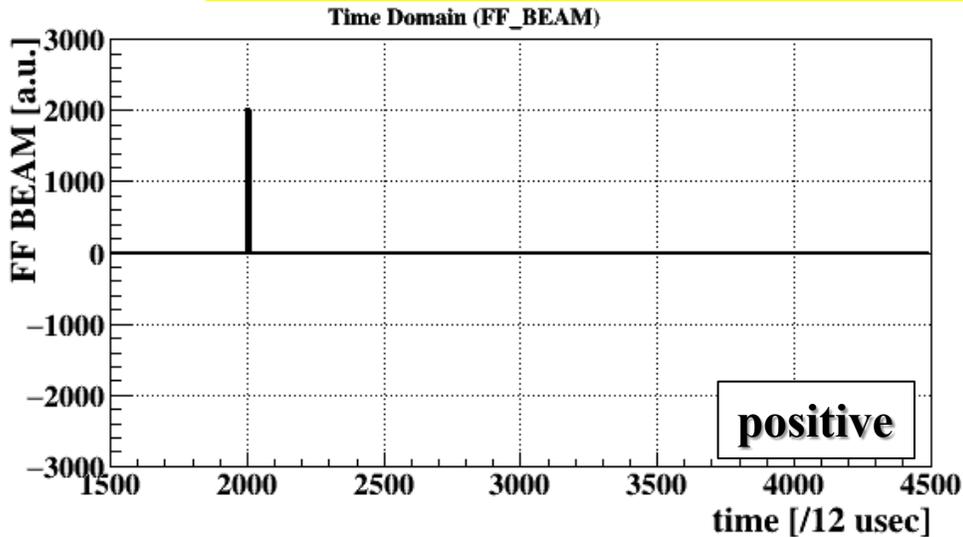
入力/出力波形が分かれば, 入力/出力スペクトルが得られ, 応答関数が計算可能

← 実際は, 様々なパルス状に増減させて, 応答関数を計算している。

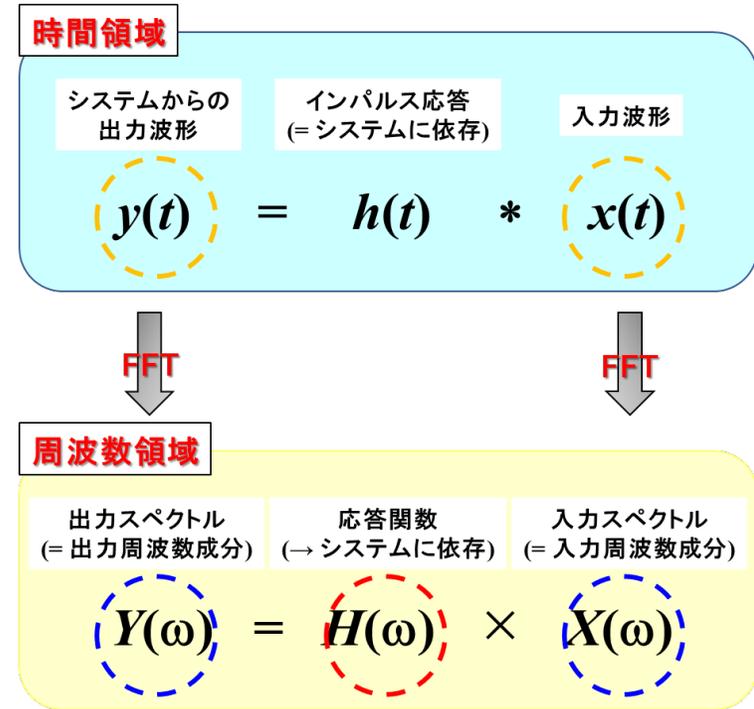
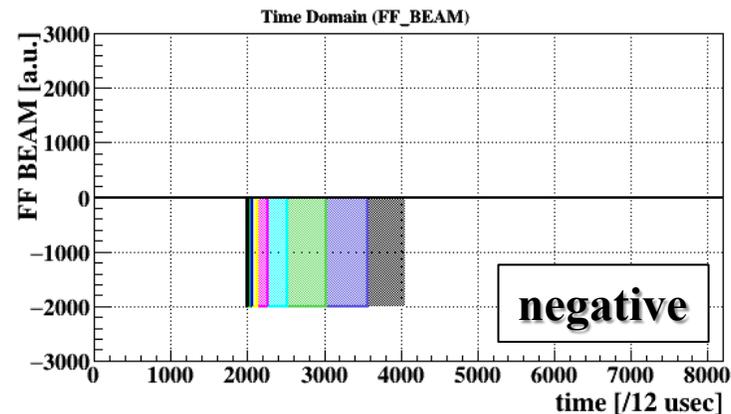
応答関数の求め方

帯域の狭い加速空洞を含む系において、大電力での周波数スキャンは不可

→ 色々なパルス幅, 周波数の入力に対する応答を解析することで, 応答関数を算出



数学的には, δ 関数入力時は, 様々な周波数成分の出力スペクトルに相当 → 現実的には不可
 ← 有限のパルス幅の入力信号は, 周波数成分で帯域が無い箇所が離散的に存在する。
 ← 色々なパルス幅の入力波形は, 色々な周波数成分を持っている。各出力信号を解析することで, 応答関数を算出することができる。

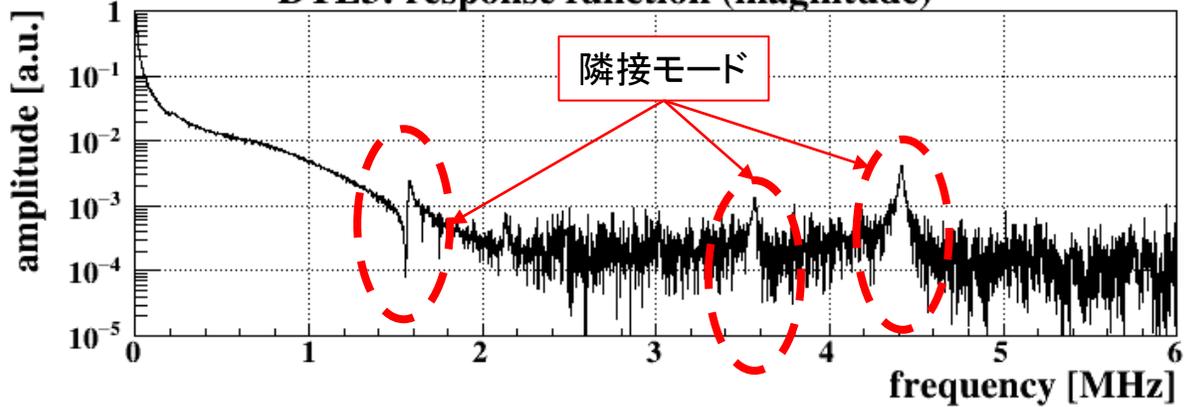


入力/出力波形が分かれば, 入力/出力スペクトルが得られ, 応答関数が計算可能

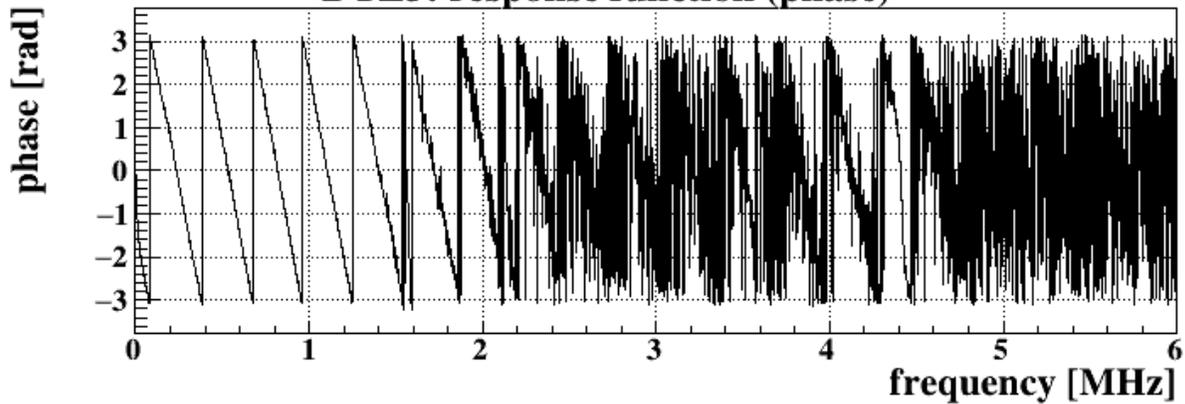
← 実際は, 様々なパルス状に増減させて, 応答関数を計算している。

DTL3 応答関数

DTL3: response function (magnitude)

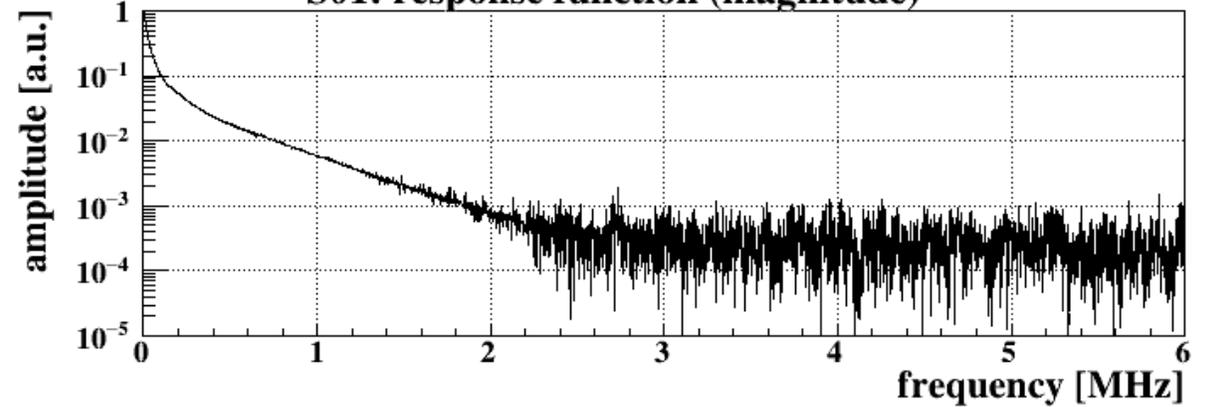


DTL3: response function (phase)

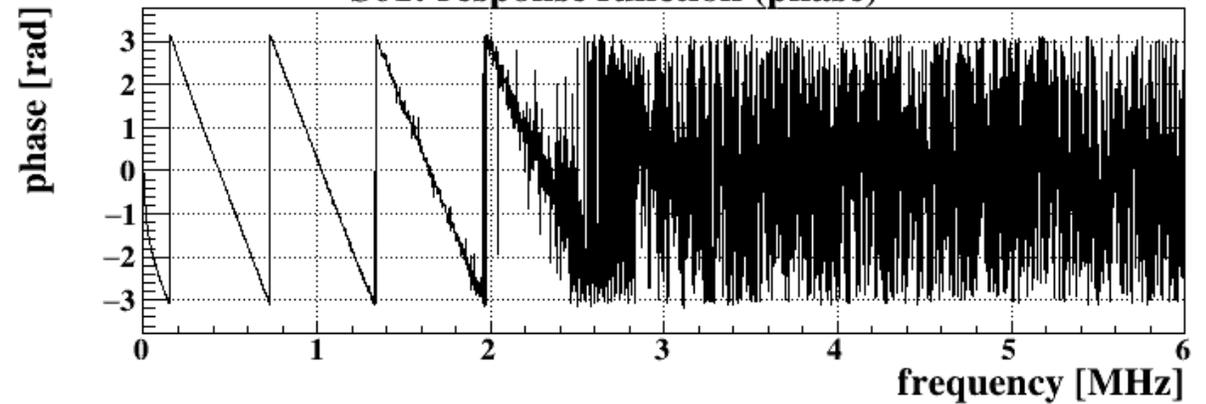


SDTL01 応答関数

S01: response function (magnitude)



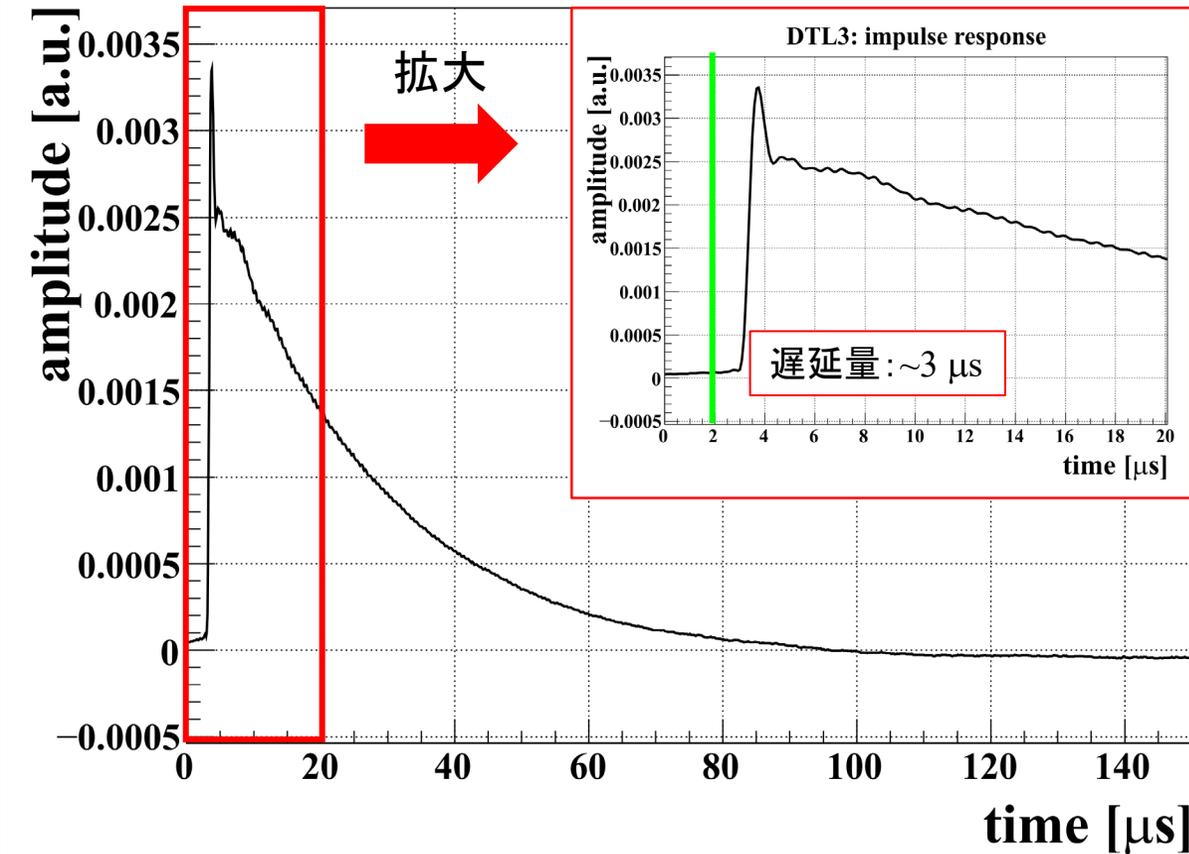
S01: response function (phase)



DTL3の応答関数は、SDTL01の応答関数と比較して、位相の変動が大きい。→ 遅延量(伝達関数: e^{-sT})が大きい。

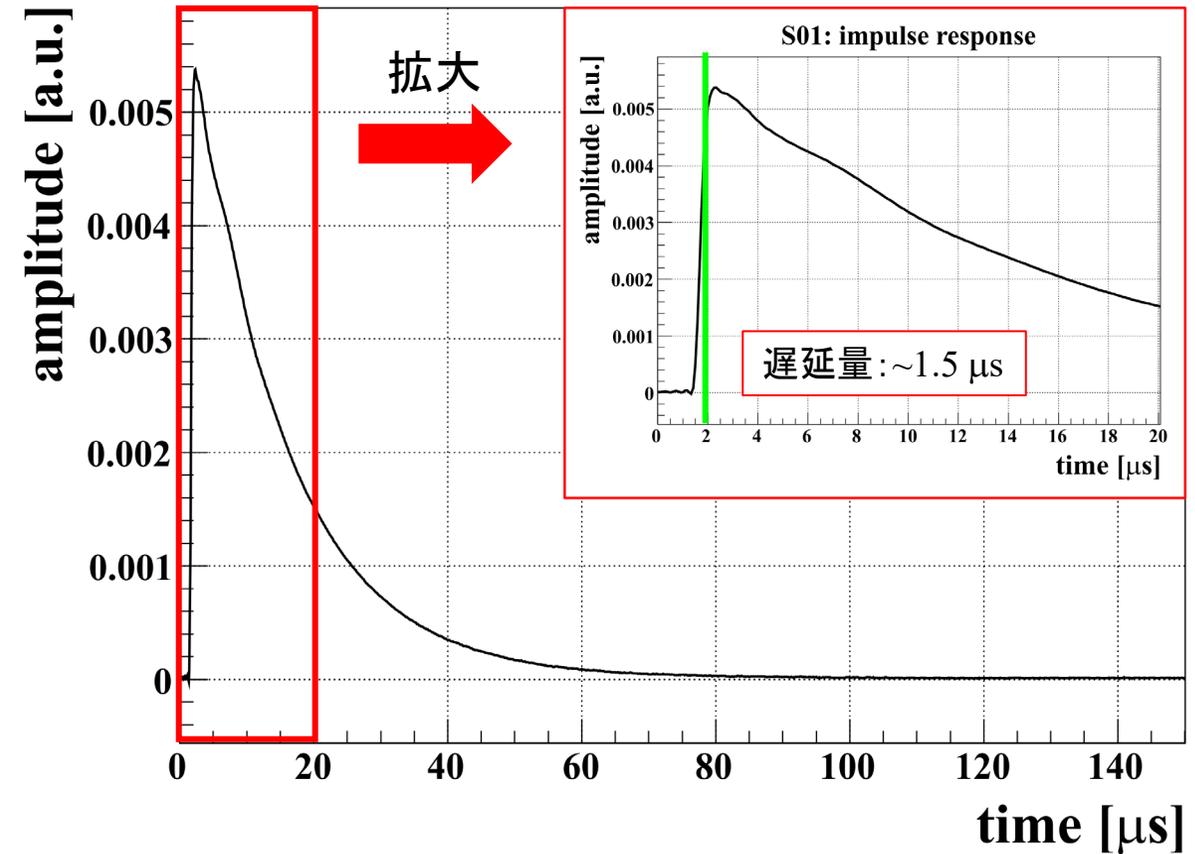
DTL3 応答関数 — IFFT → インパルス応答

DTL3: impulse response



SDTL01 応答関数 — IFFT → インパルス応答

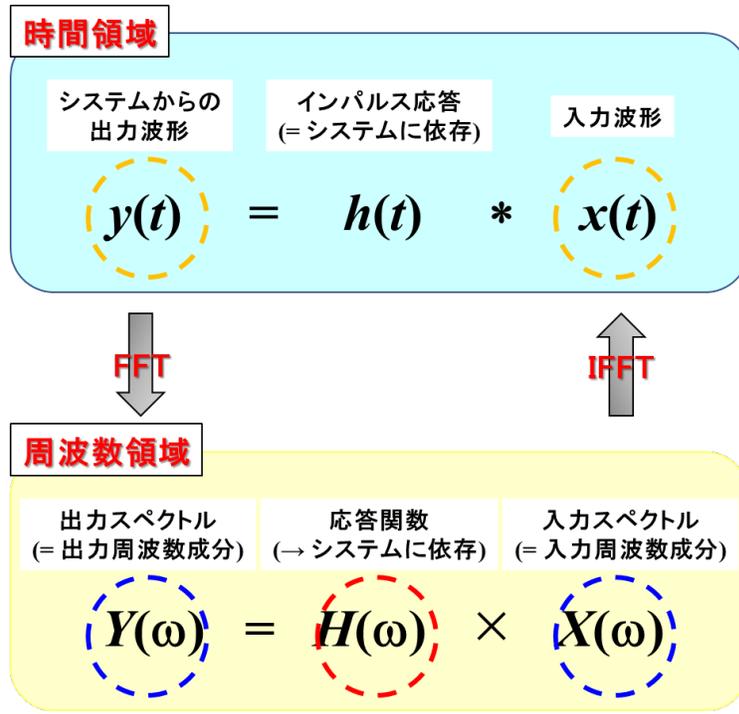
S01: impulse response



DTL3のインパルス応答は、SDTL01のインパルス応答と比較して、明確に遅延量が大きいという結果が得られた。

※ デジタルボードのADCの遅延量設定の問題であり、現在はこの問題は解決している。

FF_BEAM計算の方法

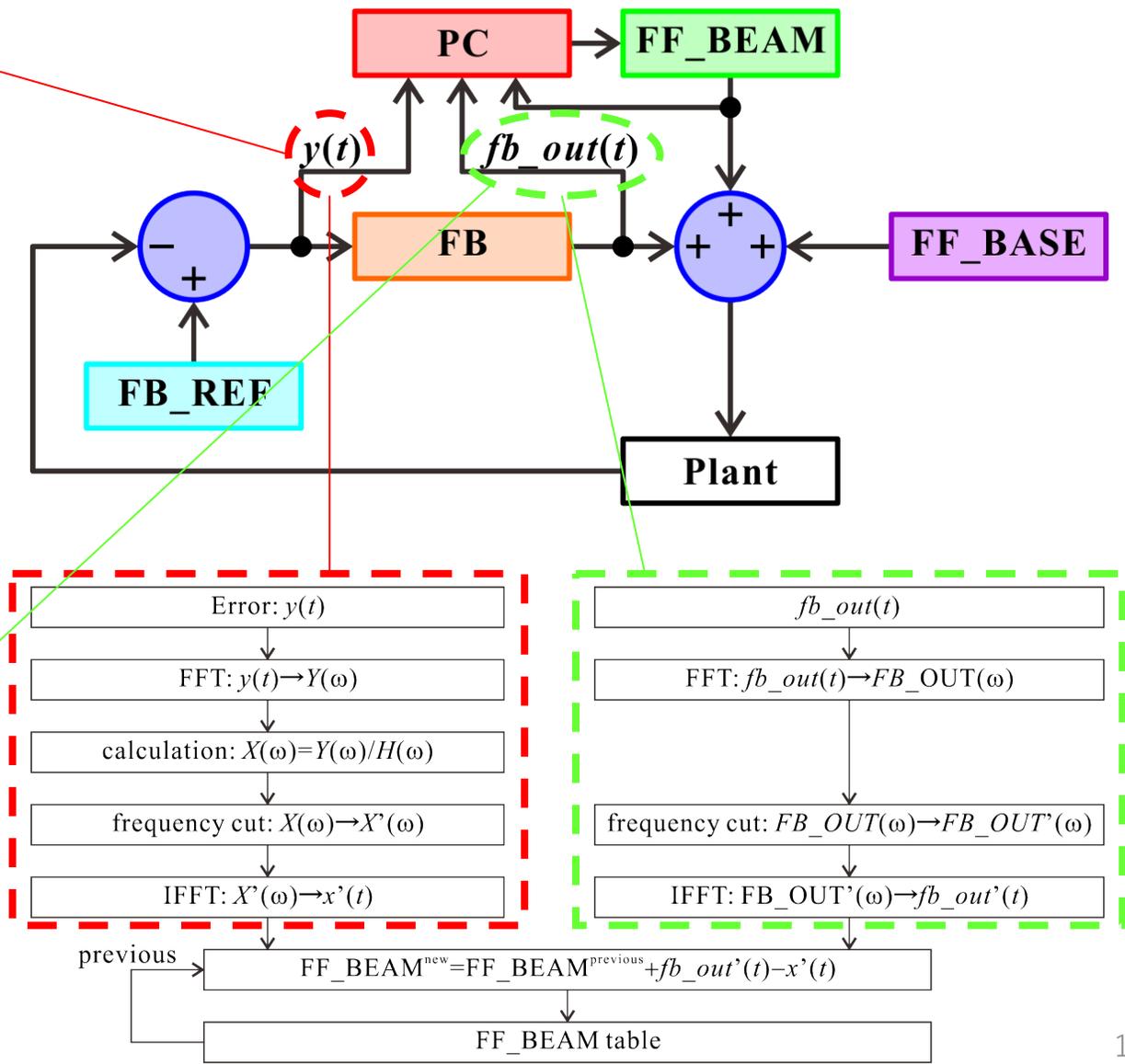


FB基準からの差: $y(t)$ どのような入力信号があるときに、このFB基準からの差が発生するかを周波数領域で応答関数を用いて計算する。
 $(x'(t))$
 この逆符号($-x'(t)$)をFF_BEAMに追加することで、FB基準からの差を打ち消す入力信号となる。

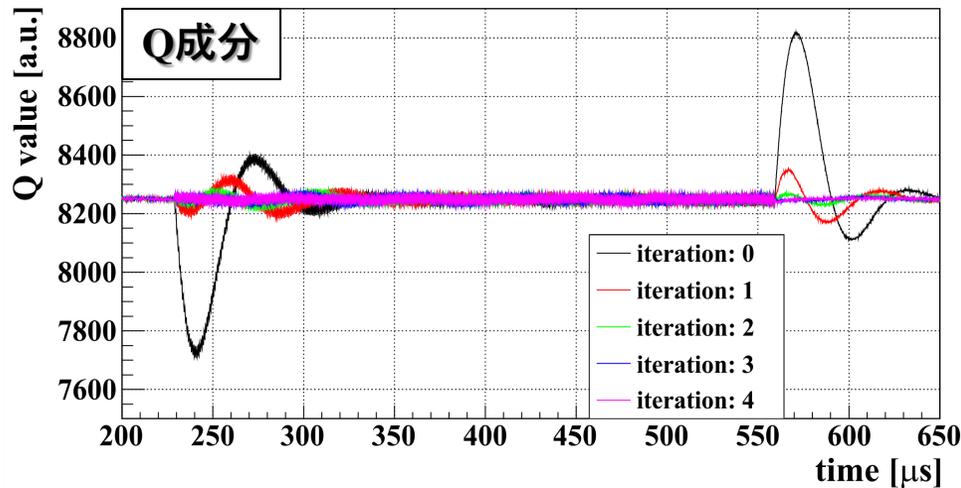
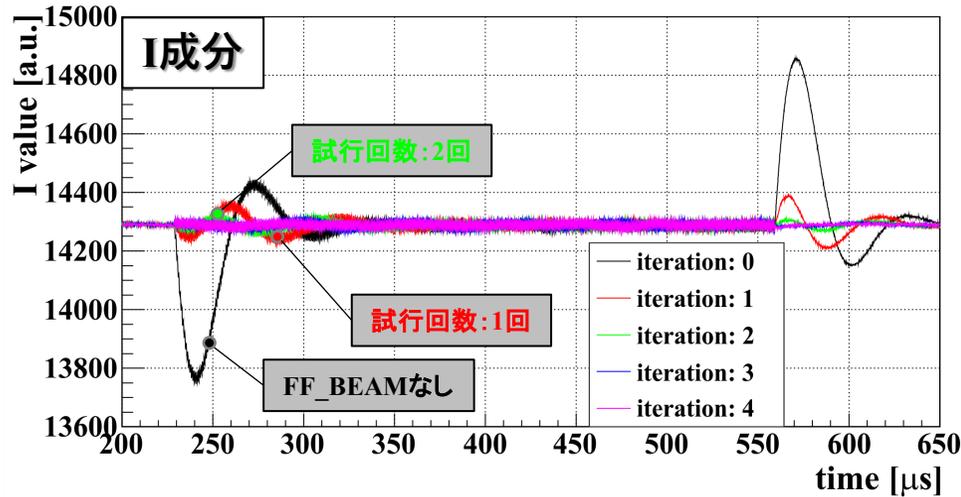
FBで補正した量($fb_out(t)$)を、次回はFF_BEAMが担うように新しいFF_BEAMに加算する。
 FFT/IFFT変換して周波数領域にしているのは、高周波成分をカットしているため

周波数カット: 0.4 MHz (brick-wall filter)

リングングが発生するがその影響は小さい。

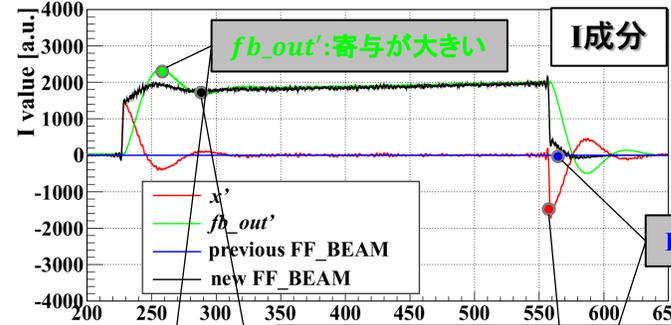


空洞ピックアップ信号

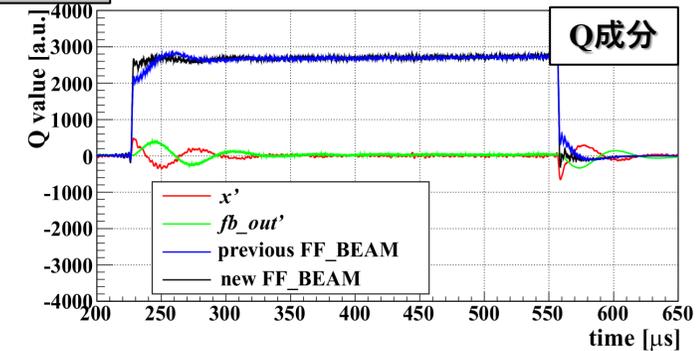
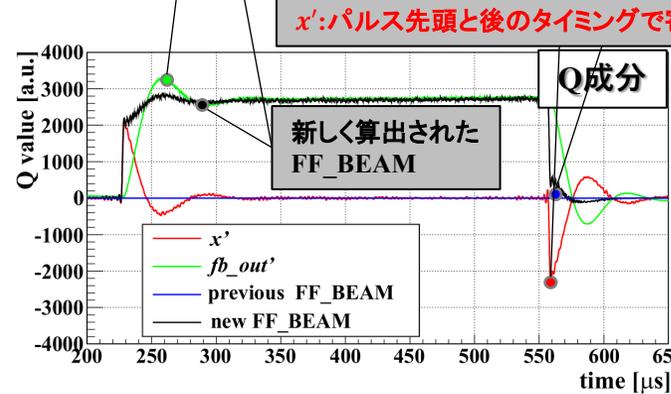
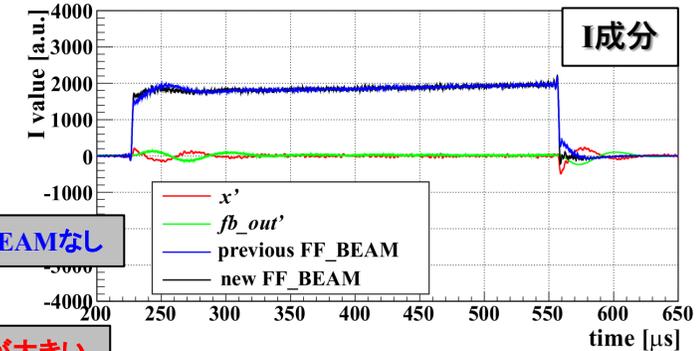


FF_BEAM計算値

“FF_BEAMなし”からの計算



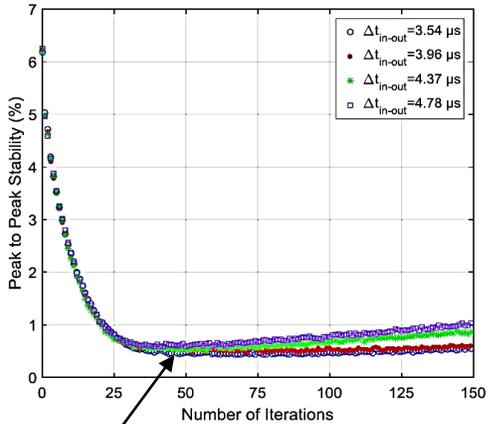
“試行回数: 1回”からの計算



“FF_BEAMなし”からの計算で、新しく算出されたFF_BEAMでは、マクロパルスの先頭で値が小さい。

- 主にクライストロン出力の非線形性を補正していない影響と考えられる。
- “試行回数: 1回”からの計算で、小さい分を若干補完される。
- 非線形性を補正していない影響を試行回数を増やすことで、補完できる。

時間領域での計算を用いた適応型の
ビーム負荷補償システム

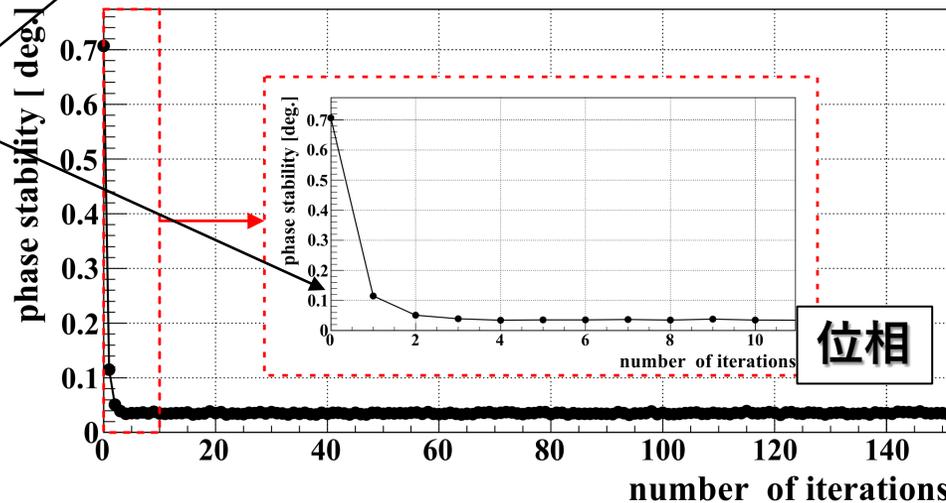
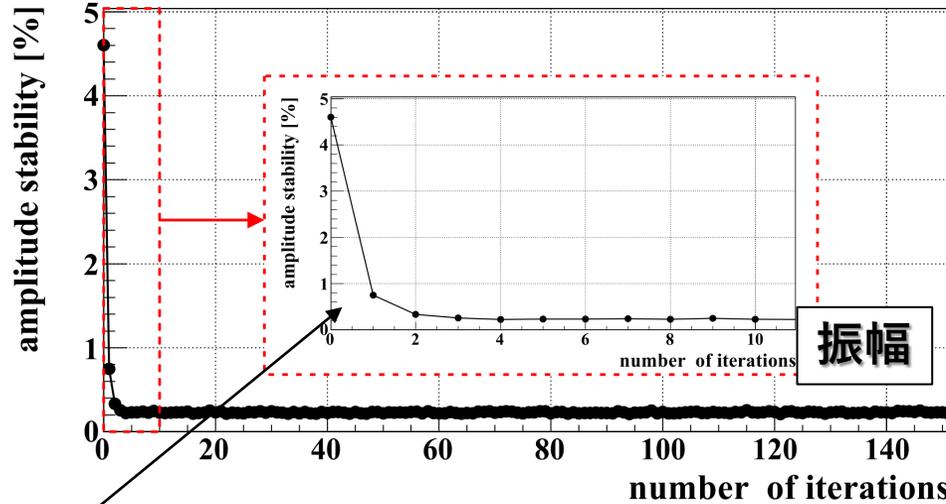


~30回の試行で最適値に収束

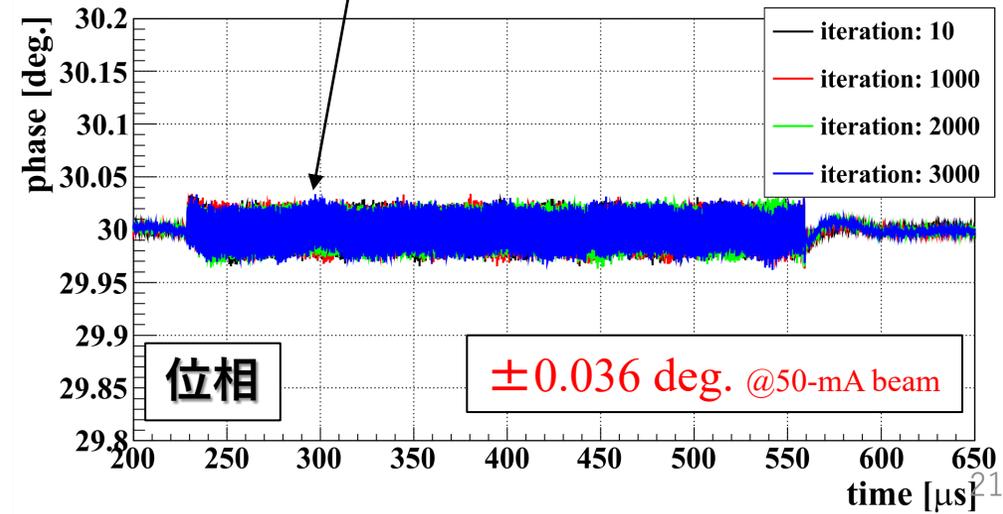
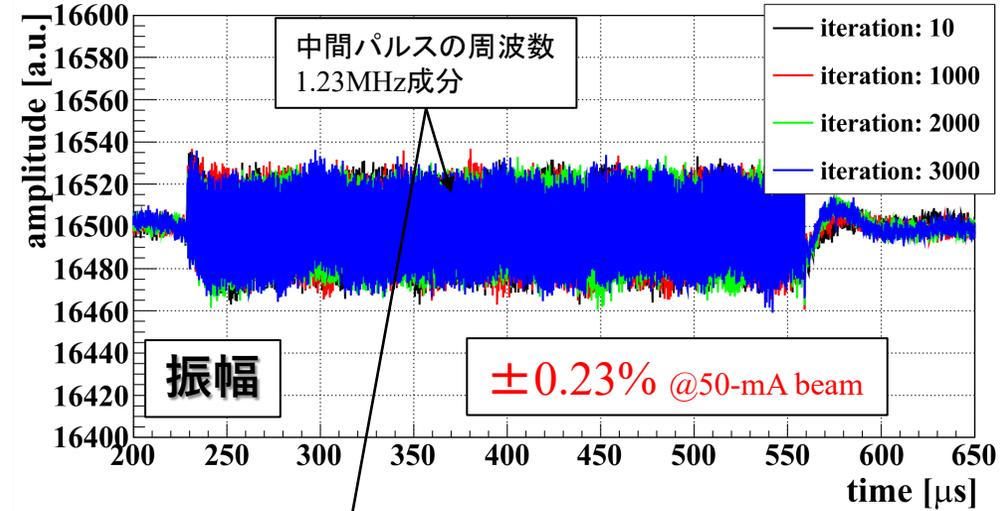
2回の反復で最適値
を算出
(1回でないのはクラ
イストンの非線形
性の影響)

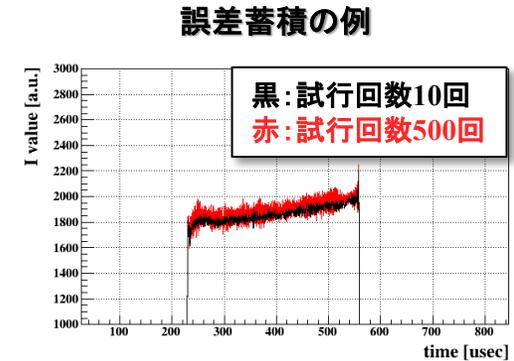
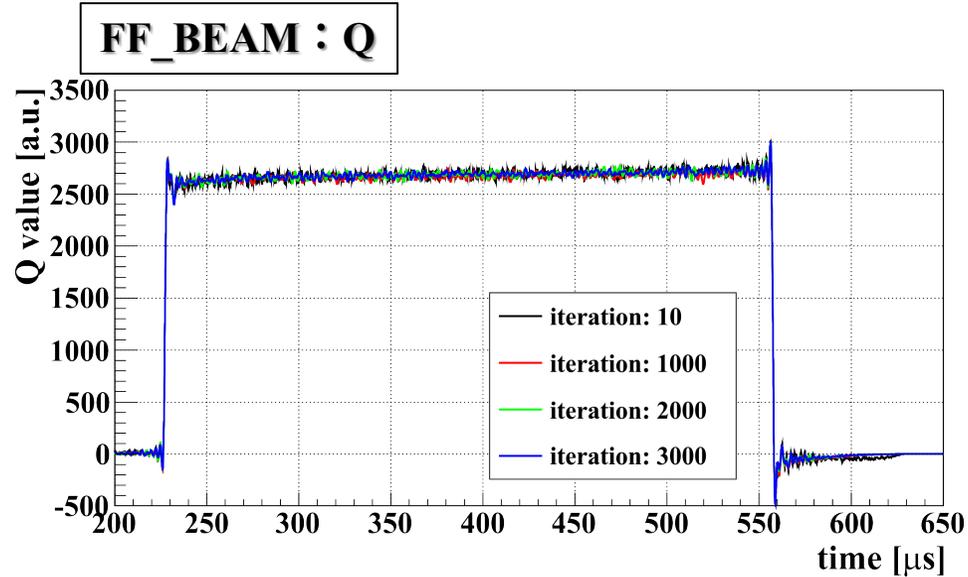
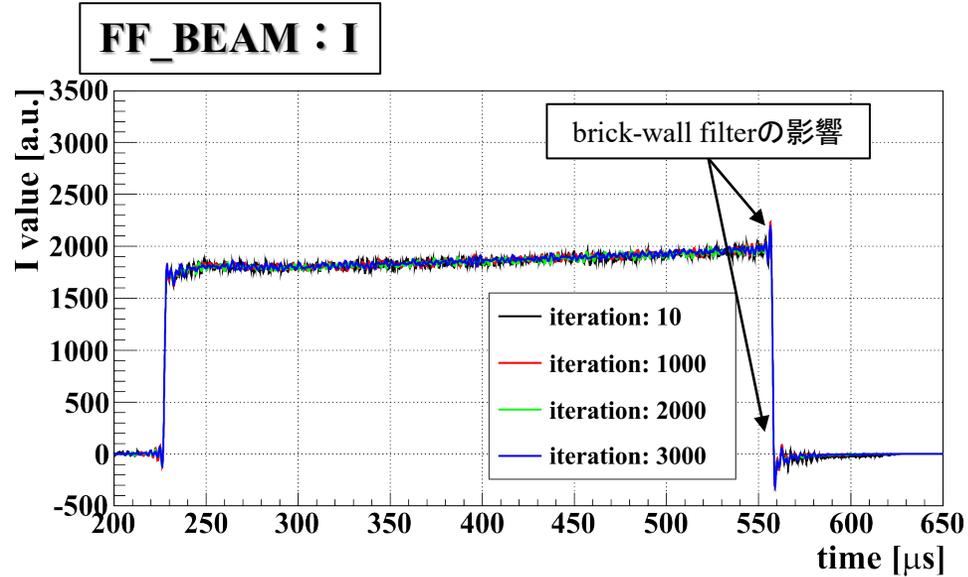
1回の試行で要求性能
は満たす。
3~4回の試行で最適値
に収束する。

試行回数と安定度



RF波形(MLF運転時)





例えば, $x'(t)$ にLPFで除去しきれないノイズ σ があると, n の試行でFF_BEAMには, $\sqrt{n}\sigma$ のノイズが蓄積される。
 → 有限の試行回数で発散
 → 試行回数に制限をかける必要あり

3000回の試行を繰り返してもFF_BEAMに全くゴミの蓄積がない。→ 試行回数に制限なし

実測した応答関数を用いたLLRF制御の応用

出力信号と入力信号の関係を, 実測データを元にモデル化に成功

✓ RFパルスの立上り:

RFパルスの立上り波形の最適化 → パルスの早い段階でFB利得を上げることが可能

- J-PARCリニアック: RF立上り時間 175 μ s @DTL, 145 μ s @buncher&SDTL → 40~60 μ s短縮 = 省エネの実現
- ミューオン線形加速器: RFパルス幅 40 μ sを実現

✓ SLEDを使用しても, 一定の空洞電場を得られる可能性に期待

初期のビーム負荷補償システム

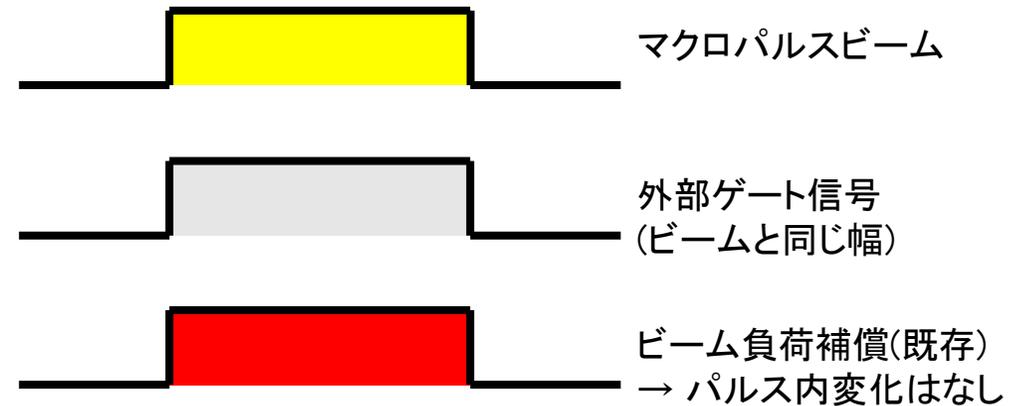
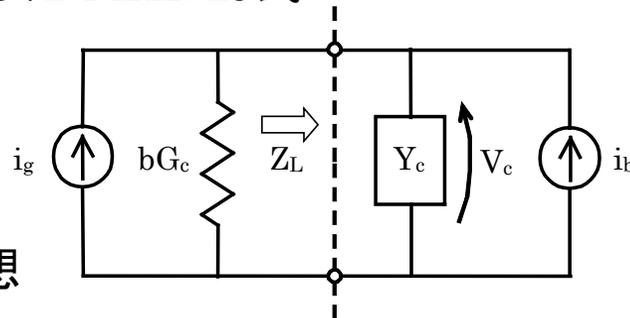
J-PARCリニアックでは、ビームが空洞を通過するタイミングでビーム負荷分の出力を加算させるフィードフォワードシステム(FF_BEAM)を採用している。初期のFF_BEAMでは、外部からのタイミングに応じて、**マクロパルス内変動がない**ビーム負荷補償システムを実装していた。基本的には、夏期シャットダウン明けのビームの立上げ時にパラメータ調整を行い、そのパラメータを使い続けていた。

FF_BEAMの3次元のパラメータ調整:

1. FF_BEAMの振幅
2. FF_BEAMの位相
3. 外部ゲート信号のタイミング調整

→ 324-MHz: 22式, 972-MHz: 25式

3次元スキャンは膨大な調整時間が必要
→ 等価回路と同期位相から大まかな値を予想

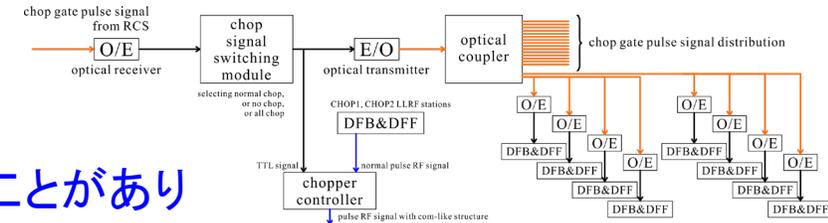


本題のビーム負荷補償システム

- 実測した応答関数を用いた適当型のビーム負荷補償システム
- **中間パルスのビーム形状に対応したビーム負荷補償システム**

現在のビーム負荷補償システムは中間パルスの構造には未対応:

- 通常はRCSで2バンチ運転のところ, 1バンチ運転
- ビーム強度の調整のために, 特定の間中パルスを“間引き”て運転することがあり
- ビーム強度の調整のために, 中間パルス幅の調整をすることがあり
- 特に, 間引き運転は空洞の電界安定度を著しく悪化
- ビーム試験中は頻繁に変更されるために, 自動的に対応するシステム構成が必要



中間パルス形状と同じ信号の分配システムを整備

通常運転

(a) standard two bunches



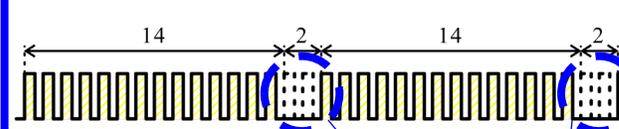
1バンチ運転

(b) single bunch

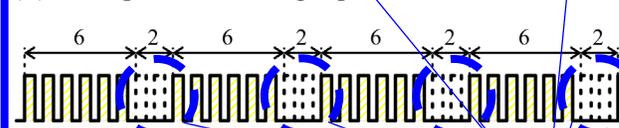


間引き運転

(c) example of thinnings: pattern 1



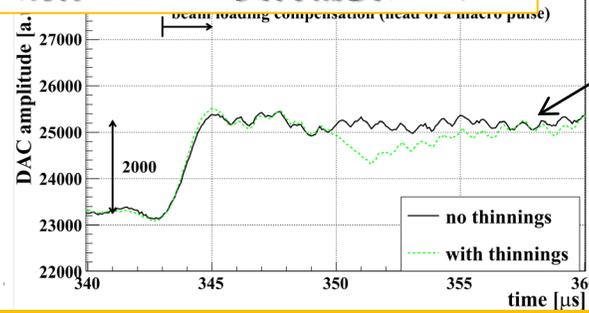
(d) example of thinnings: pattern 2



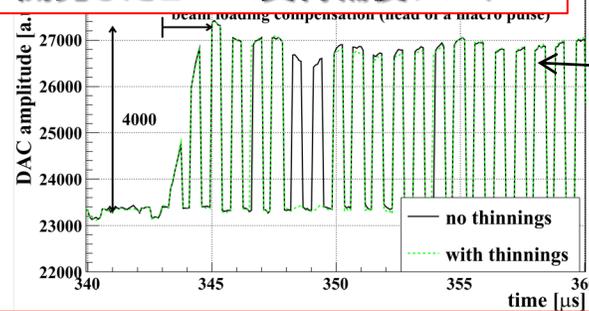
中間パルス構造の例

間引き

既存のビーム負荷補償システム



開発したビーム負荷補償システム



DAC出力の例

中間パルスの形状に関しては, 対応していなかった。
=ビーム負荷が平均的に存在していることが前提である。

中間パルスの形状に対応して, DFB&DFDシステムからのDAC出力も中間ビームと同じ形状にする。

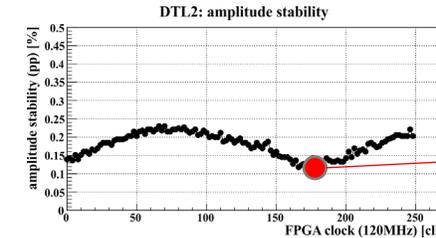
→ 外部からの中間パルス形状と同じ信号を受信して, FF_BEAMのスイッチON/OFFとして使用することで実現している。

問題点

- ① 上記の信号のタイミング調整というビーム負荷補償のパラメータも増加 (4次元のパラメータ/ステーション)
→ 適当型ビーム負荷補償システムの使用や, 全ステーションの同時調整で解決
- ② ビーム負荷補償システムのために必要なクライストロン出力パワーの増加
→ 取り敢えず, ビーム試験の電流は, 利用運転時の半分の25 mAで実施

空洞ピックアップ波形

- FF_BEAMの振幅・位相は適応型のビーム負荷補償で1回だけ調整
- 中間パルスの形状のタイミング調整は1回だけ調整
- ビーム条件を変更しても, FF_BEAMパラメータの再調整は未実施



← タイミング調整の例

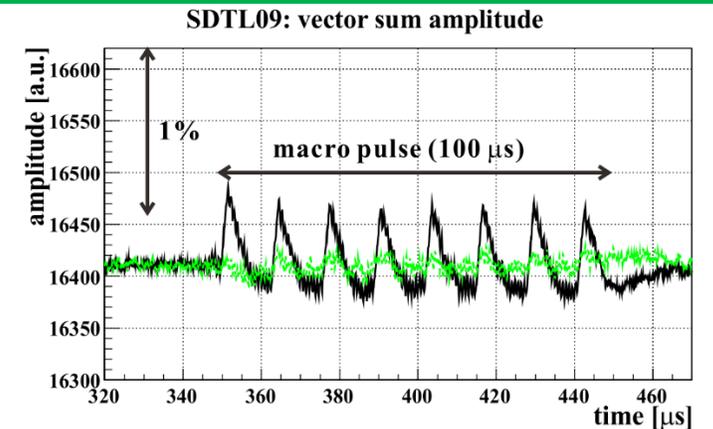
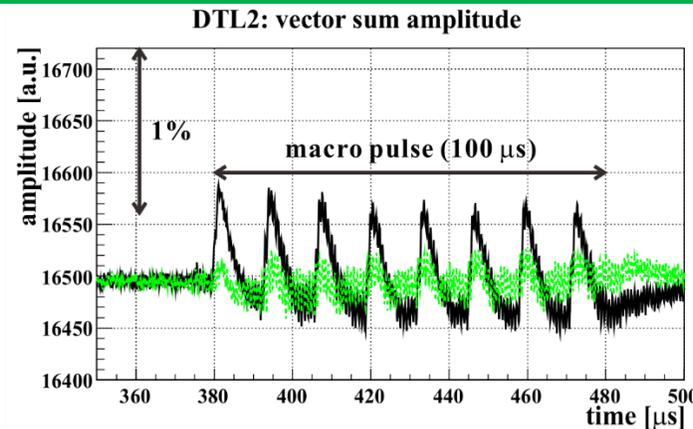
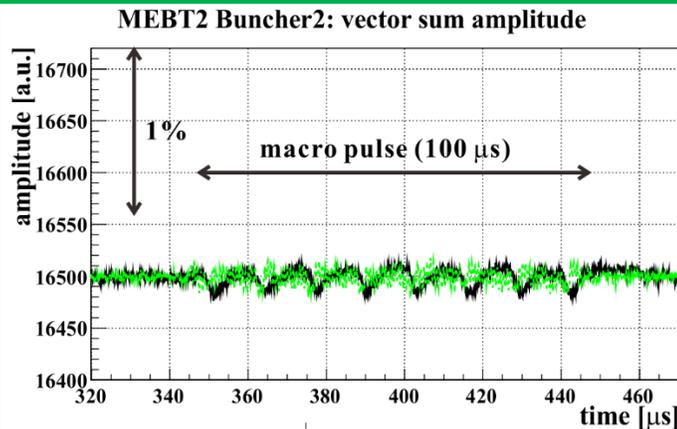
振幅(or 位相)安定度が最も良いタイミング = 最適なタイミング

MEBT1 Buncher2

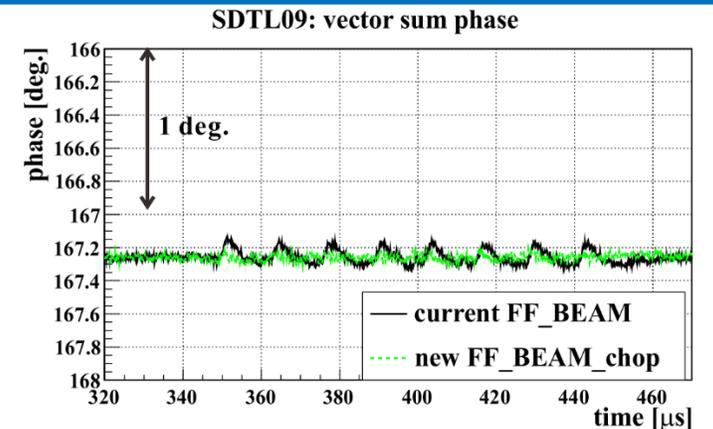
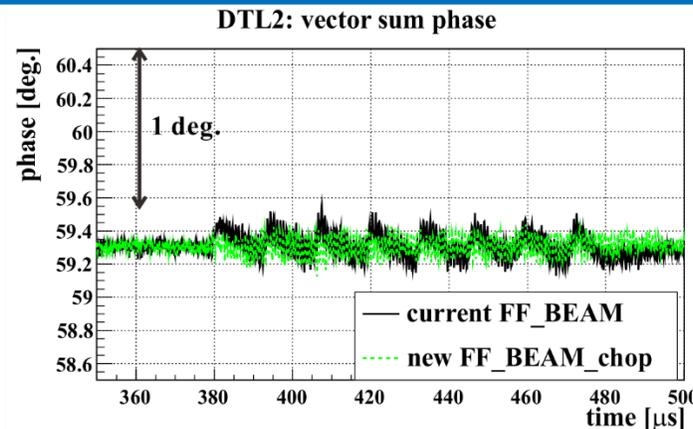
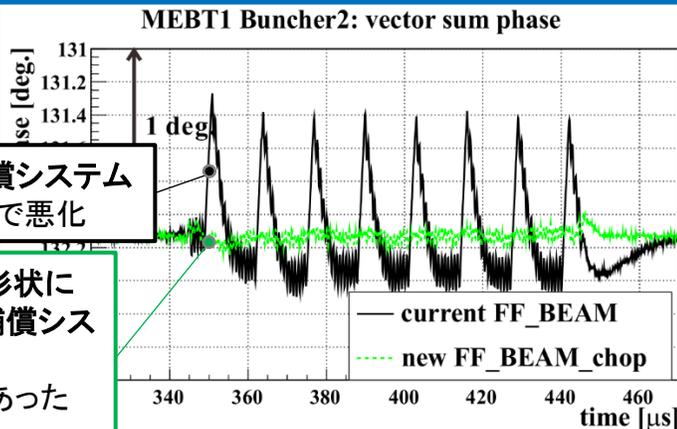
DTL2

SDTL09

振幅



位相



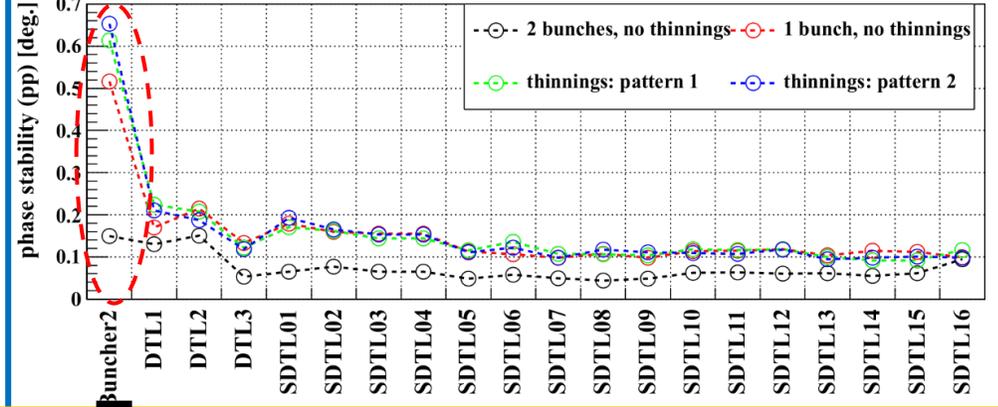
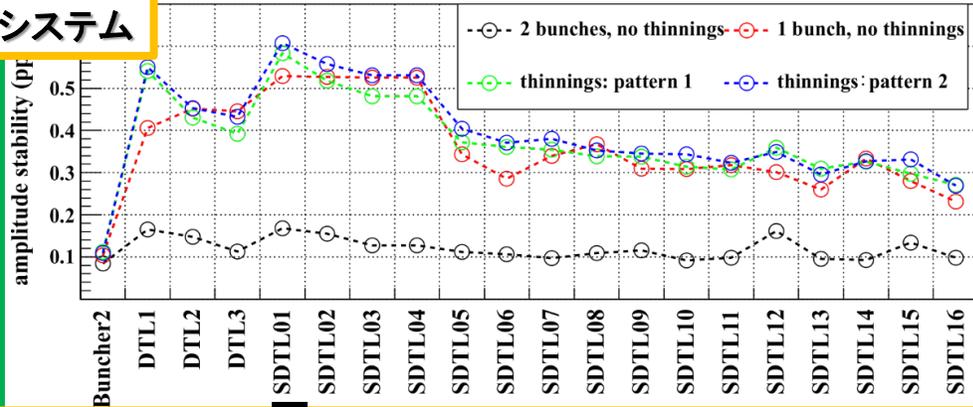
既存のビーム負荷補償システム
→ 間引きのタイミングで悪化

中間パルスのビーム形状に対応したビーム負荷補償システム
→ 既存のシステムであった悪化が抑制されている。

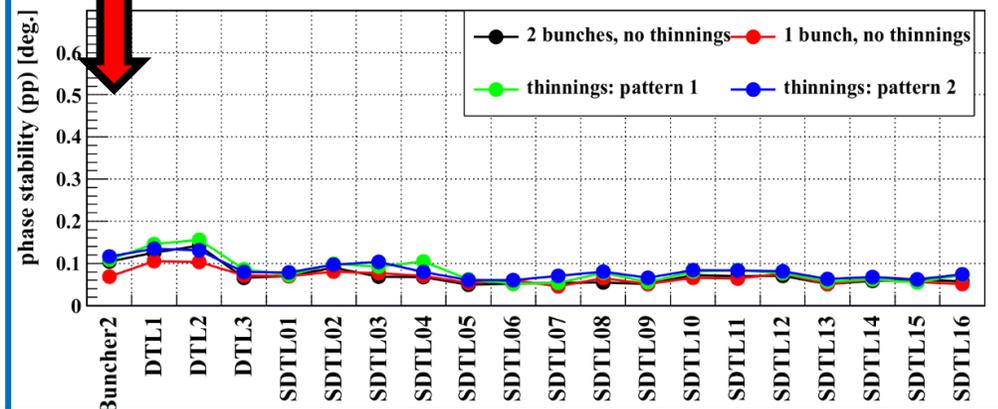
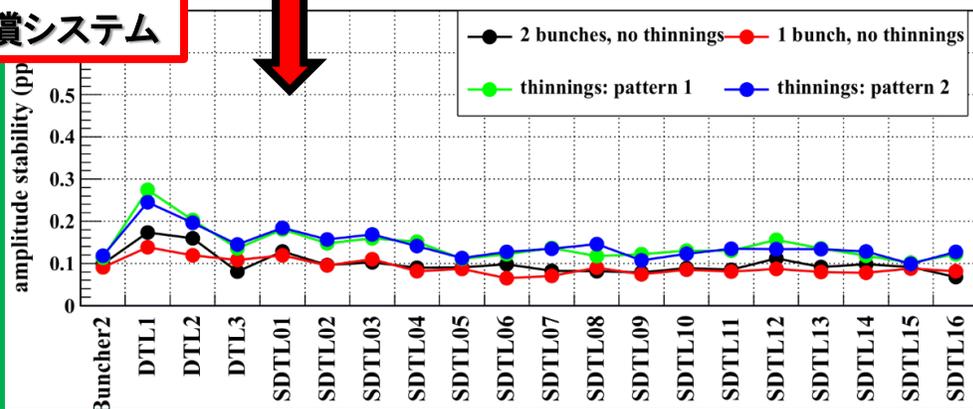
振幅

位相

既存のビーム負荷補償システム



開発したビーム負荷補償システム



既存のビーム負荷補償システムでは、間引き運転などのビーム条件が変更されると振幅・位相の安定度 ($\pm 0.5\%$, ± 0.6 deg.) が著しく悪化していた。開発したビーム形状に対応したビーム負荷補償システムでは、悪化を大幅に抑制でき、凡そ振幅 $\pm 0.2\%$ 以下、位相 ± 0.15 deg. 以下の安定度を達成できた。

まとめ:

- ✓ J-PARCリニアックのような大電流の線形加速器において, ビーム負荷補償システムは空洞内の電界安定度に対する寄与が大きく, 安定したビーム運転に重要な役割を果たす。
- ✓ デジタル系を更新した324-MHzステーションで, 下記のビーム負荷補償システムを開発した。
 - 周波数領域での計算を用いた適応型ビーム負荷補償システム
 - 中間パルス形状に応じたビーム負荷補償システム

今後の予定:

- ✓ 972-MHzデジタル系の更新:
 - 全てのステーションで開発したビーム負荷補償システムを適応して, ビーム品質の向上させる。
- ✓ 間引き形状に対応したビーム負荷補償システムの開発:
 - 中間パルス形状に応じたビーム負荷補償システムではクライストロン出力の増加させ実際の運用を敬遠されるため, クライストロン出力を増加させずに間引き形状の対応したビーム負荷補償システムを開発する。

特別な感謝:

貴重なご助言とご指導を頂きました先輩・同輩・後輩, またともに働いた同僚に, 深く感謝申し上げます。この研究開発にはLLRFのデジタル系の更新が不可欠でした。システム製作を行って頂いた三菱電機三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズ株式会社の皆様, システム更新にご協力を頂いたJ-PARCリニアック空洞Gr・制御Gr・コミッショニングGrの皆様には心から感謝の意を申し上げます。