

ビームローディング補償 に関する検討

三浦

<中村氏より>

LCS運転時の運転モードについて

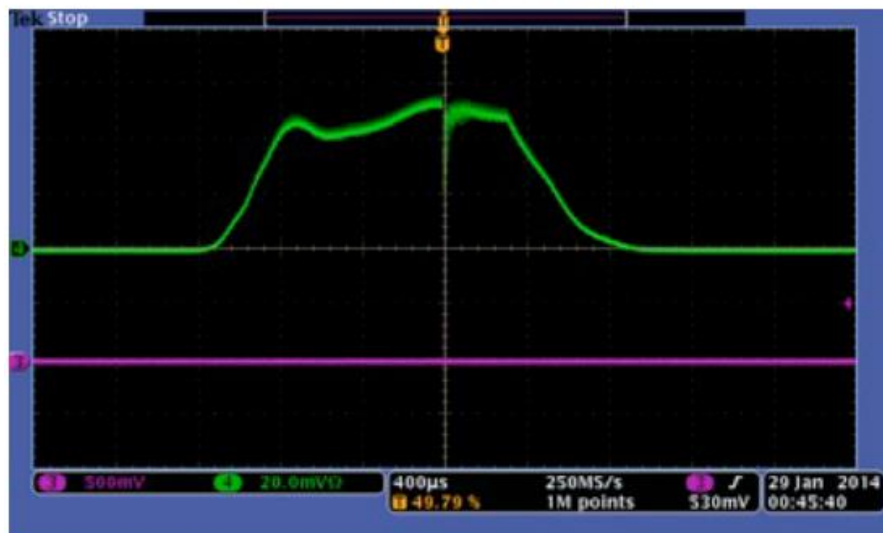
CW運転も1つの候補だが、

現状では平均電流が100uA以下なのであまりピーク電流を上げられない。

マクロパルス(バースト)モードにして、例えばピーク電流1mA(0.77pC/bunch),
マクロパルス幅1ms辺りが1つの目安になっている。(フラットトップで1msとのこと)

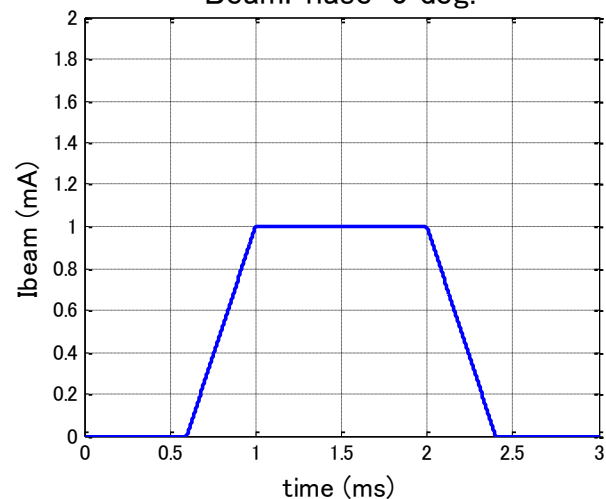
この辺りのパラメータで、ビームローディングの影響について検討すること。

ロングパルス運転



立ち上がり、立下り時間で、
各400 μs程度を想定

BeamPhase=0 deg.



RF Powerの計算式

$$P_g = \frac{V_{cav}^2}{R_L} \frac{\beta + 1}{8\beta} \left(\left[1 + \frac{2 R_L I_{b0}}{V_{cav}} \cos \phi_b \right]^2 + \left[\tan \psi + \frac{2 R_L I_{b0}}{V_{cav}} \sin \phi_b \right]^2 \right) \quad (3.45)$$

In the case of superconducting cavities with $\beta \gg 1$, this formula can be simplified to

$$P_g = \frac{V_{cav}^2}{\left(\frac{r}{Q}\right) Q_L} \frac{1}{4} \left(\left[1 + \frac{\left(\frac{r}{Q}\right) Q_L I_{b0}}{V_{cav}} \cos \phi_b \right]^2 + \left[\frac{\Delta f}{f_{1/2}} + \frac{\left(\frac{r}{Q}\right) Q_L I_{b0}}{V_{cav}} \sin \phi_b \right]^2 \right) \quad (3.46)$$

T. Schilcher

%% Injector Cavity 1 %%

Vc=0.8 MV;

r/Q=205 Ω;

QL=1.2e6;

Inj1: Pg= 0.6kW @ w/o beam

Inj1: Pg= 1.1kW @ beam:1mA

⤵ x 1.8

%%Main Cavity1 %%%

Vc=8.3 MV;

r/Q=897 Ω;

QL=1.3e7;

ML1 : Pg= 1.48kW @w/o beam

ML1 : Pg= 8.54kW @ beam:1mA

⤵ x 5.8

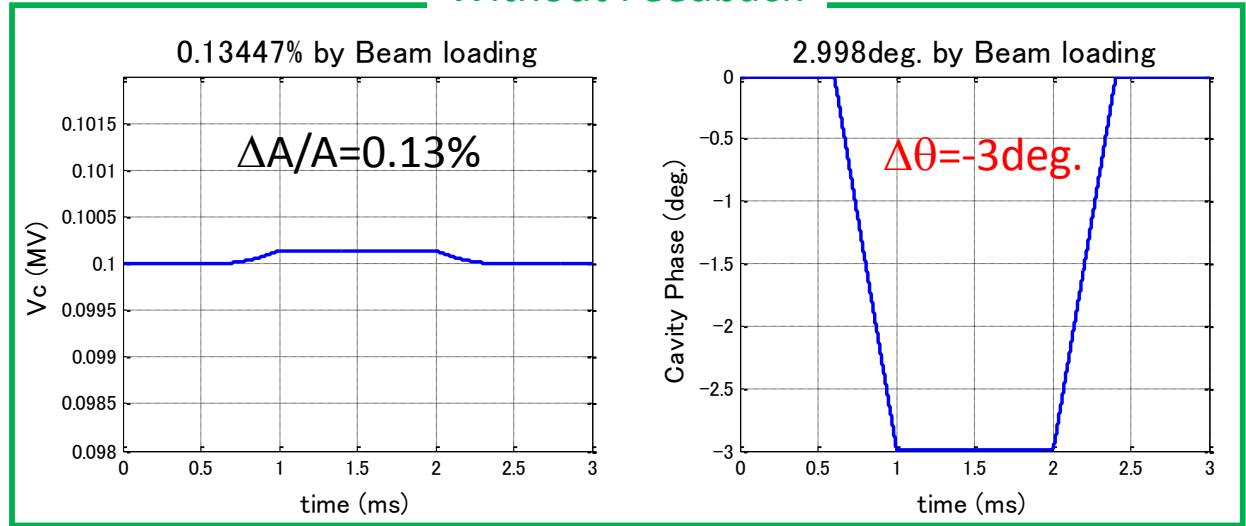
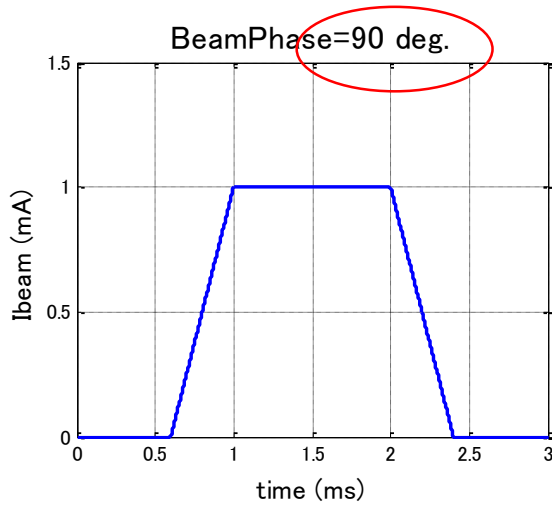
(w/o Energy Recovery)

$\Delta f=0, \phi_b=0$ を仮定

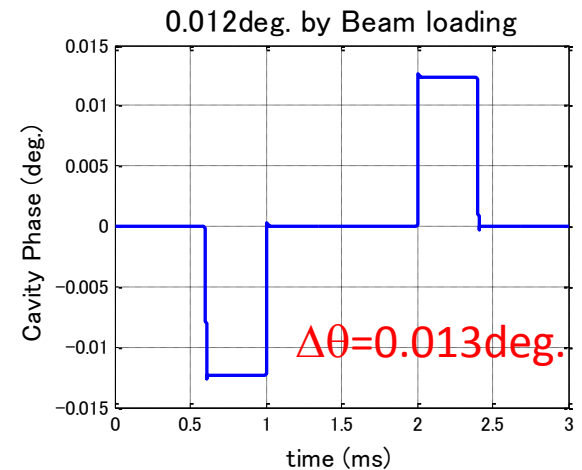
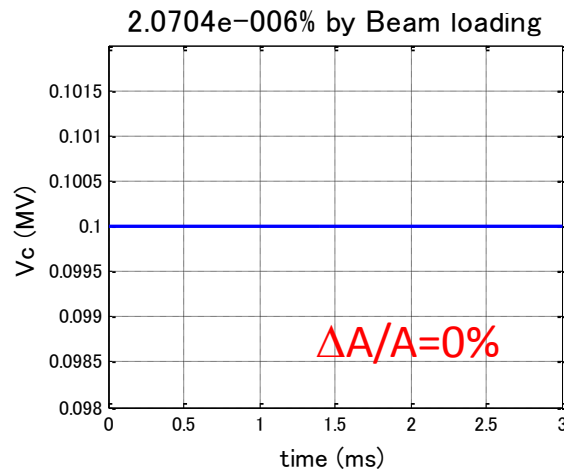
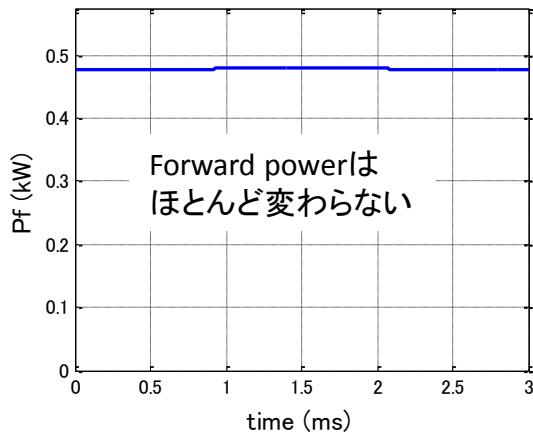
Buncher Cavity

$V_c = 0.1 \text{ MV}$; $r/Q = 232.8$; $QL = 2.25e+4$;

Without Feedback



With Feedback



振幅、位相とも問題無

Injector SCC-1 @High Gain FB

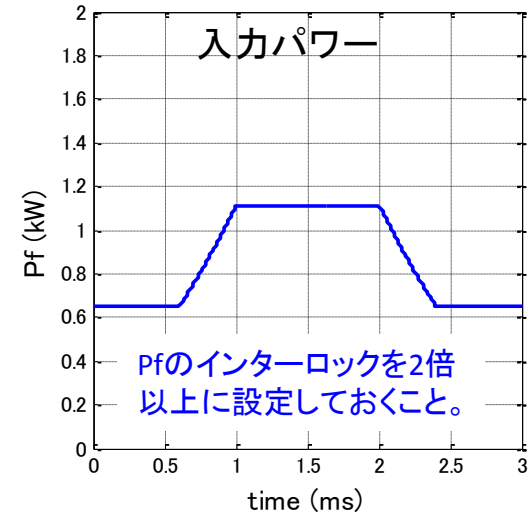
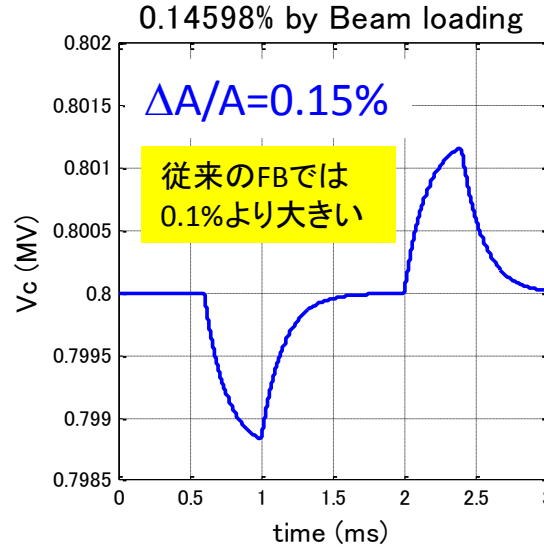
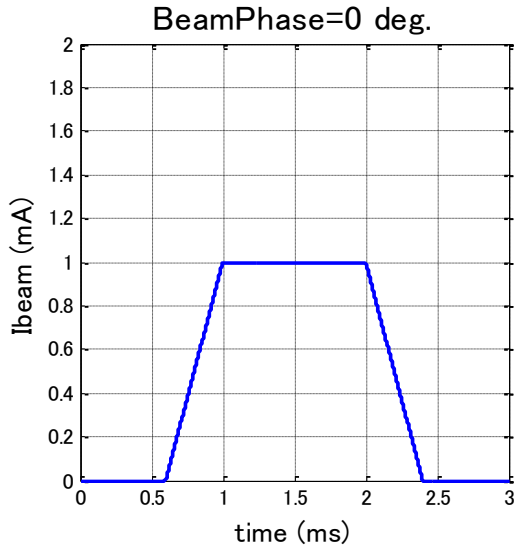
操作パネル上の値

$V_c=0.8$ MV; $r/Q=205$; $QL=1.2e+6$;

Feedback (High Gain)

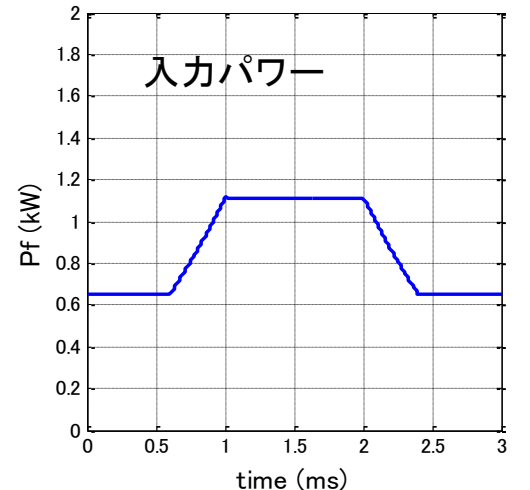
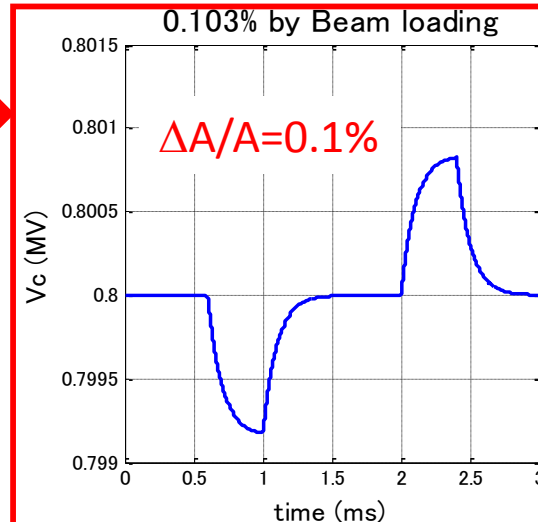
$K_p=300/8*2=75$;

$K_i=3200/128/dt/4096 = 4.88e+5$;



K_i を1.5倍大きくすると、改善された。

K_i をどこまで上げれるか事前にテストが必要



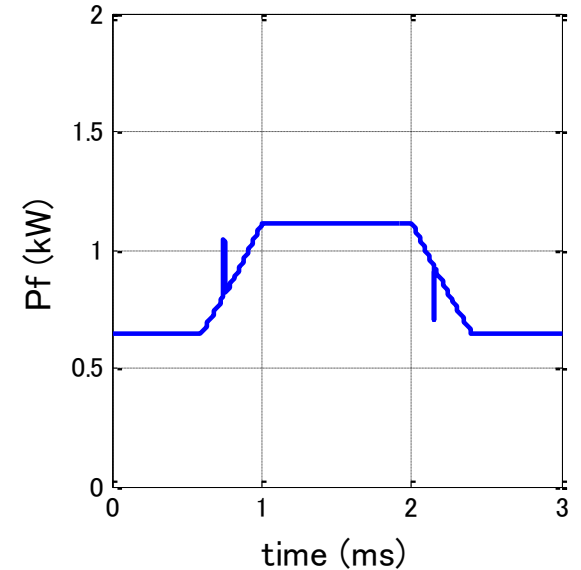
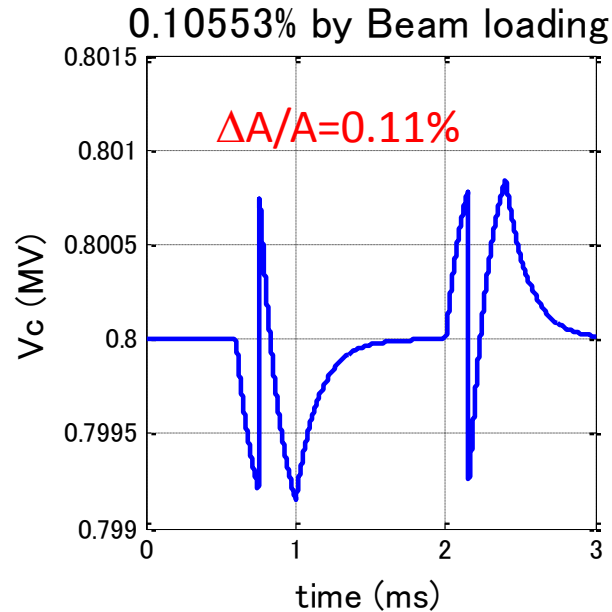
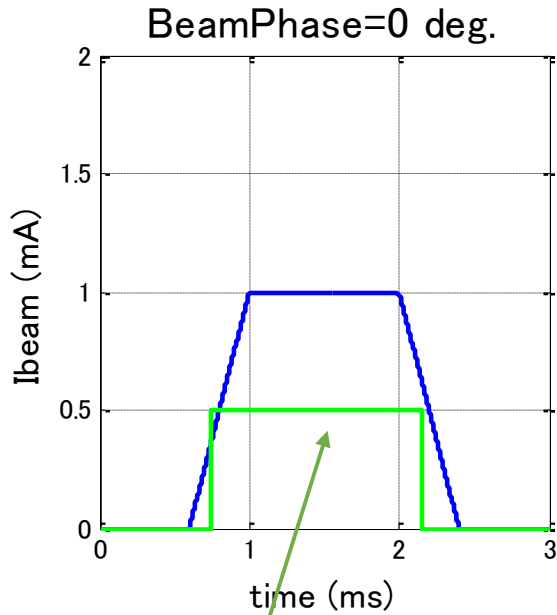
Injector SCC-1 (バーストモードを使った場合)

本来は矩形パルスの補正用だが、
今回のパルス形状にも適応してみた。

Feedback (High Gain)

$K_p = 300 / 8 * 2 = 75;$

$K_i = 3200 / 128 / dt / 4096 = 4.88e5;$



バーストモードで
ビームに同期した矩形パルス
を入れながらフィードバックを行う。

ビームが矩形ならばよいが、三角波に近い場合は、
タイミングやゲイン調整が難しい。 → あまりお勧めできない

Injector SCC-2 & 3 @High Gain Feedback

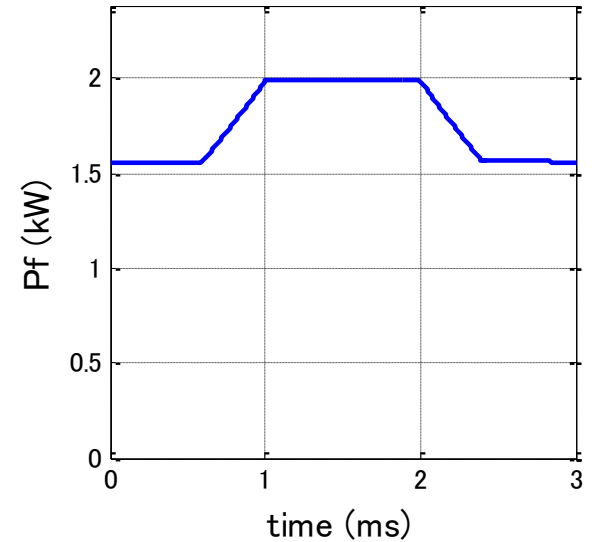
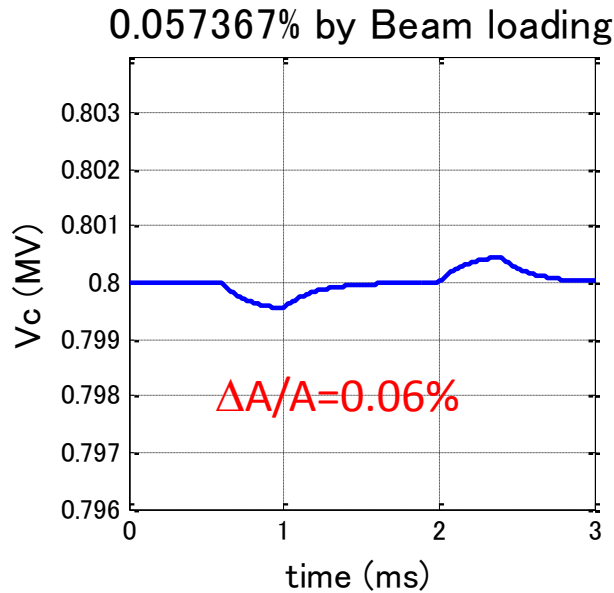
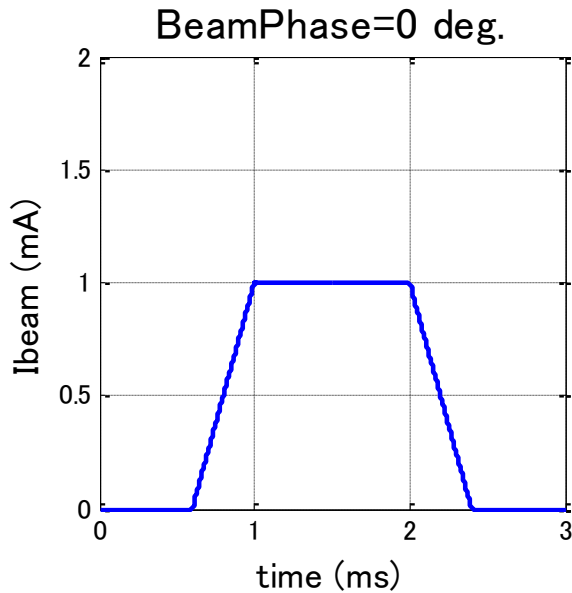
$V_c=0.8$ MV; $r/Q=205$; $QL=5e+5$;

InjSC1に比べQLが1/2

Feedback (High Gain)

$K_p=375/8*2=94$;

$K_i=3200/128/dt/4096 = 4.88e+5$;



Cav2,cav3を励振するので
およそこの2倍のパワーが必要

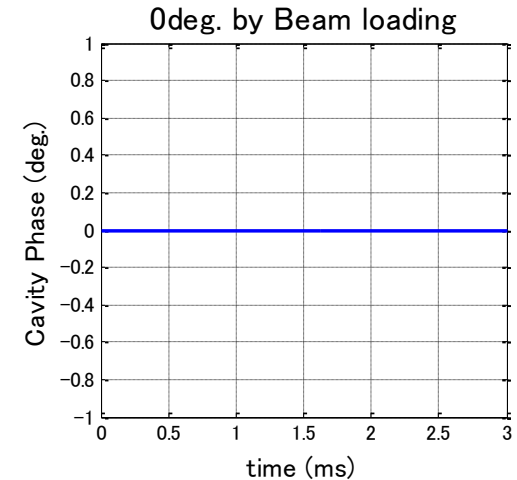
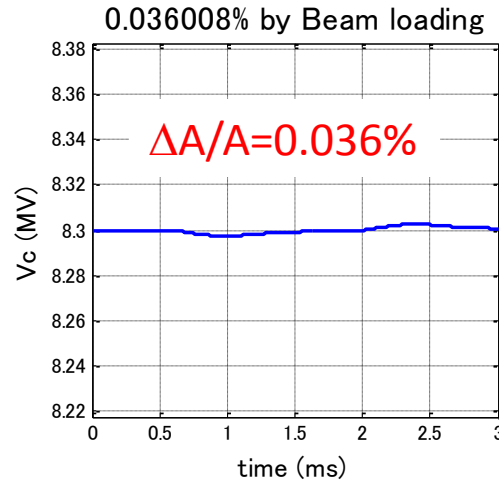
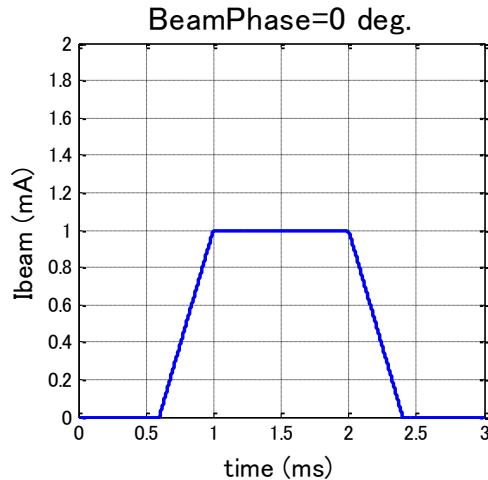
通常のfeedbackで問題無し

$V_c=8.3$ MV; $r/Q=897$; $QL=1.3e7$;

High Gain Feedback

$K_p=1000/8*2=250$;

$K_i=4000/128/dt/4096 = 6.1E+5$;

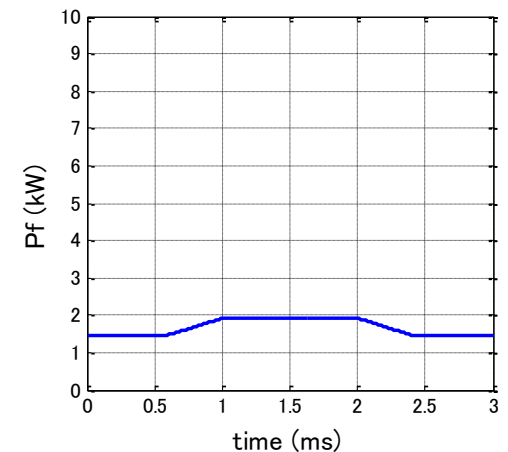


Circumference=90m

10%のビームロスがあったとして計算した。

問題なく運転が可能

入力パワーの変動も少ない



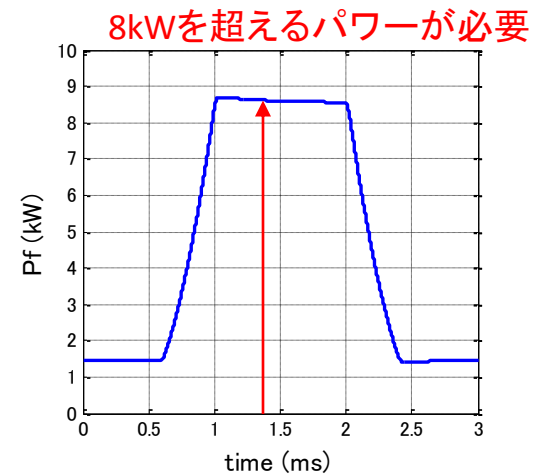
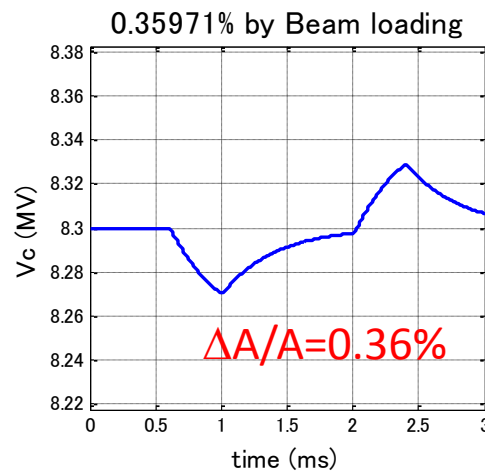
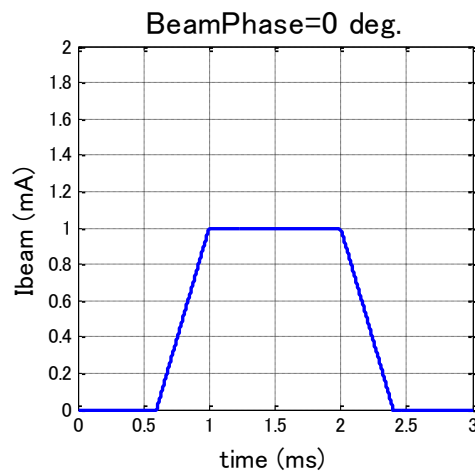
Main Linac SCC @High Gain

$V_c=8.3$ MV; $r/Q=897$; $QL=1.3e7$;

%High Gain%

$K_p=1000/8*2=250$;

$K_i=4000/128/dt/4096 = 6.1E+5$;



スクリーンなどでビームを止めての運転は、
ML2は、RF出力8kW Maxなので許容できない。安定度もよくない。

ML1のRF源は16kWなので、単独運転なら可能だが、インターロックを
設定し直す必要がある。

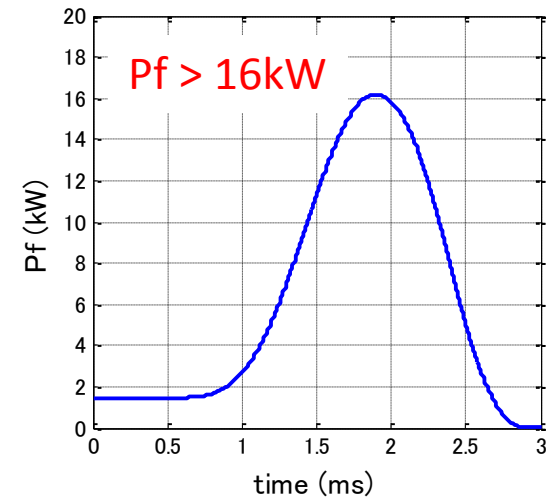
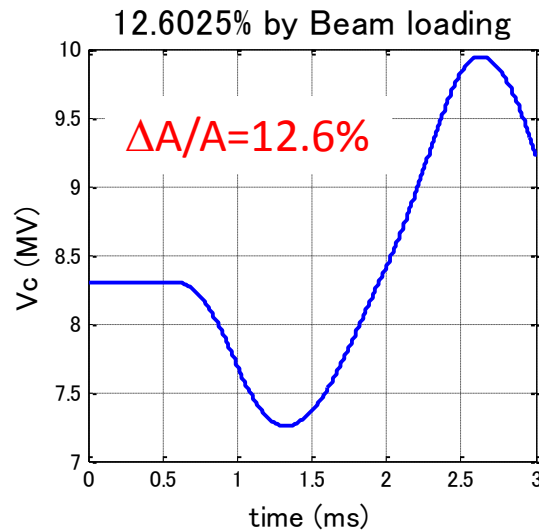
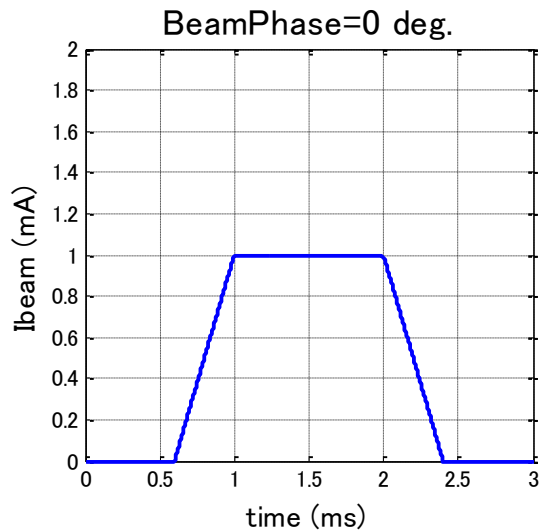
Main Linac SCC @ Low Gain

$V_c=8.3$ MV; $r/Q=897$; $QL=1.3e7$;

%Low Gain

$K_p=5/8*2=1.25$;

$K_i=160/128/dt/4096=2.44E+4$;



Low ゲインのフィードバック運転をすると、ますます悪い。
 運転不可能。

Main Linac SCC @ Low Gain

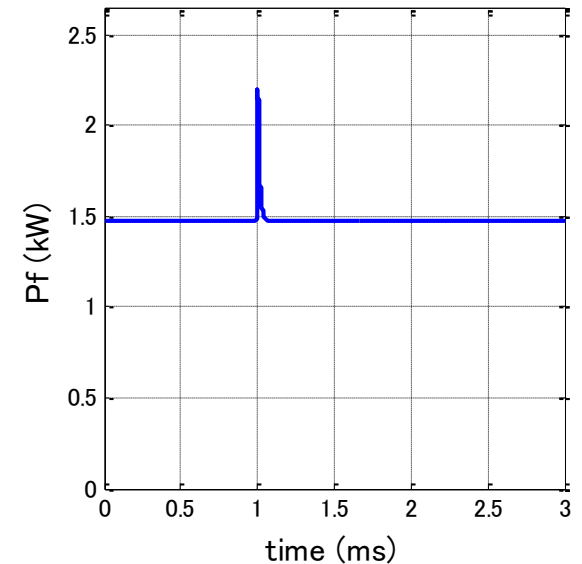
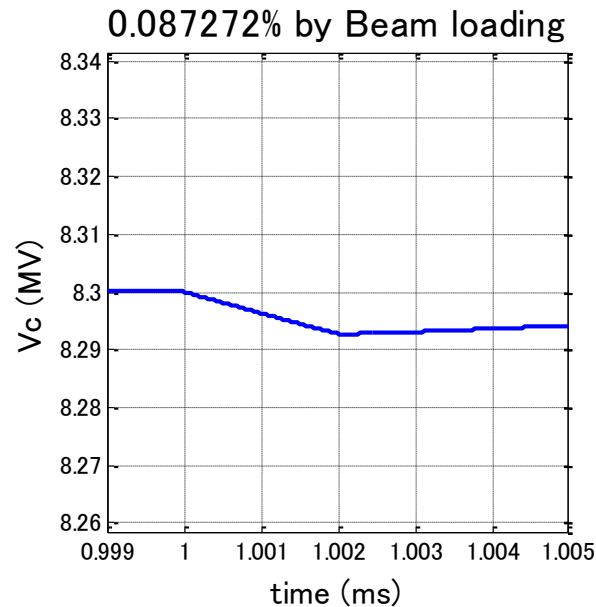
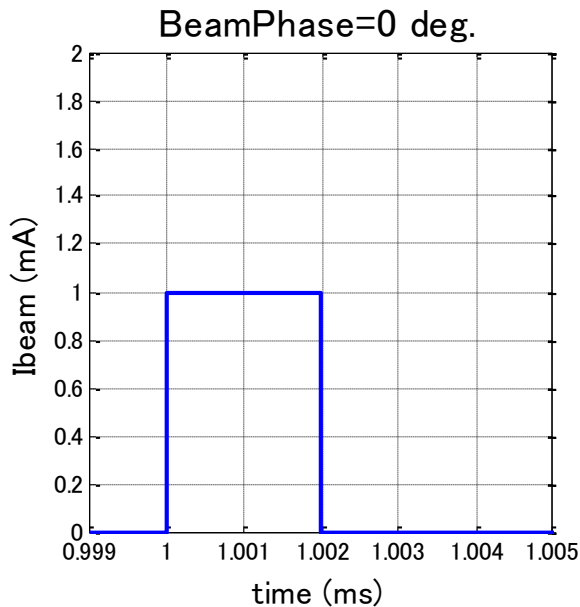
どうしてもビームをスクリーンで見たい場合は。。。。？

1~2 μ sの短パルス(矩形)ビームで行うこと。

%High Gain%

Kp=1000/8*2=250;

Ki=4000/128/dt/4096 = 6.1E+5;



マクロパルスモードのまとめ

Buncher

Inj2&3

ML1, ML2

} 通常のHigh Gainフィードバックで、安定度OK.

(ただし、ML空洞はエネルギー回収モードでなくてはならない。)

Inj1のみ、ビームローディングの影響が0.15 %となり、0.1 %を超える。
ただし、積分ゲインをもっと上げれば、改善されるようだ。
事前に、どこまで上げることができるかの試験が必要。

MLでエネルギー回収しない場合は、短パルス運転に切り替えること。

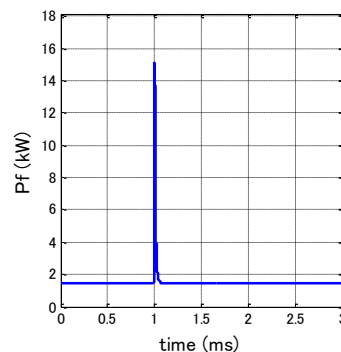
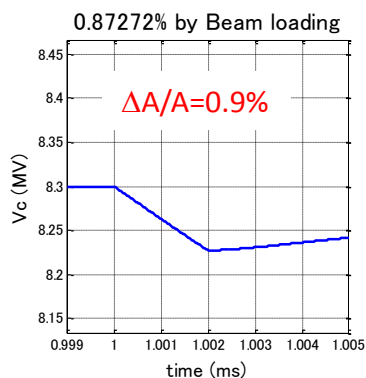
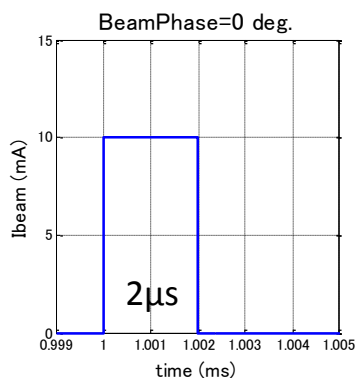
7.7pC/bunch(10mAピーク)の運転@6/18へのコメント

6/18 の運転ログ:

7.7 pC/bunch (10mAピーク相当)の運転では、ビームローディングが大きいため、主空洞でHighゲインフィードバックができず、Lowゲインで運転を行った。

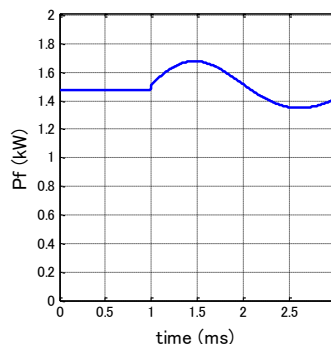
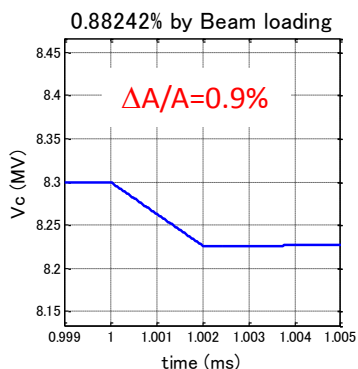
注意: MLSCで10mAの場合、

Energy Recoveryが無い場合は、**335kW**のRFパワーが必要@定常状態



<= High Gain FBの場合

Pfインターロックで落ちる



<= Low Gain FBの場合

BeamローディングはHigh Gain とほぼ同じ。

ただし、マイクロフォニクスの影響は大きい

Disturbance Observer-based Controller (DOBC) によるビーム補償の紹介

空洞のシステム(応答関数)がわかっているならば、空洞の変動からどのようなDisturbance(ビーム)が入ってきたかが再構成できる。

通常のPI制御のフィードバックループの他、伝達関数の逆数をかけてDisturbance分を算出し、リアルタイムにフィードフォワードで足し合わせるループを持つDOBCという手法についてQiuさんが構築している。

⇒ Qiuさんによる簡単な説明

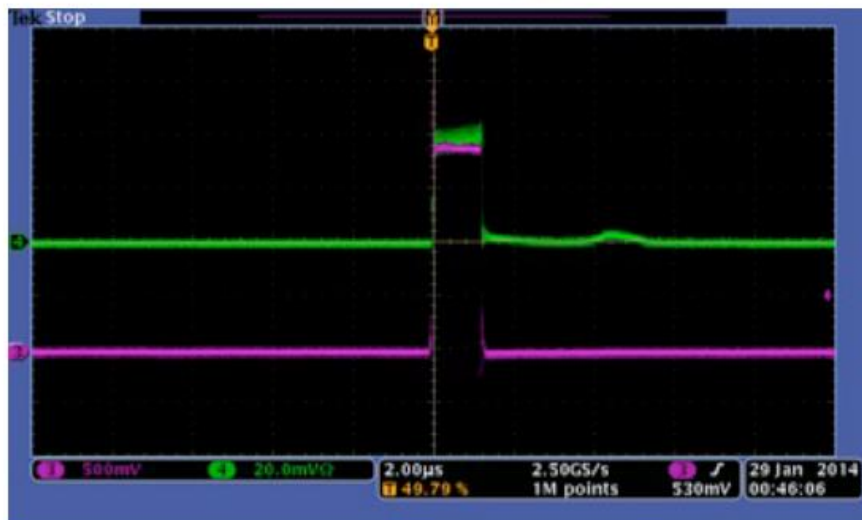
今後、マシンタイムをもらって性能評価していきたい。

Back-up slides

短パルスモードの補正について

LLRFのループ遅延時間は $1.25\mu\text{s}$ 程度なので、フィードバックがかからない。

通常の運転



ただし、非常にきれいな矩形波形であるので、LLRFのバースト補正を用いることが可能。

外部トリガーに同期させて矩形パルスを出力。外部トリガータイミングに対して、80MHzのクロック分解能で出力タイミングを調整することができる。

波高もデジタルで設定可能。

パルス幅は、信号発生器からのゲート入力幅で決まる。