
ERLにおけるRF安定度の評価

道園真一郎

(イントロダクション)

- 高周波系の構成
- フィードバック系 -フィードバックがかかる部分とかからない部分
- 外乱の諸要素
- 超伝導空洞でのビームローディング

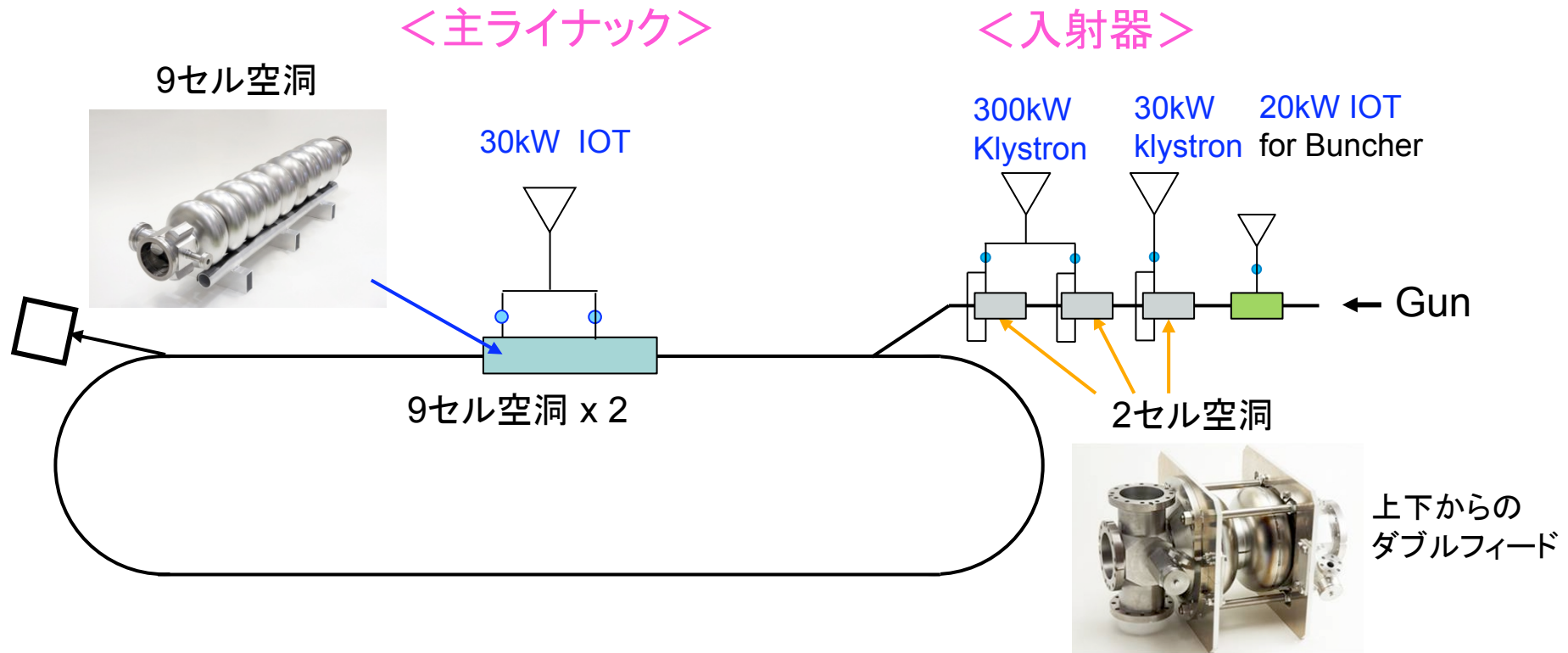
結果その1

- 入射部空洞のベクターサム運転 -2空洞に異なるビーム位相で加速

結果その2

- フィードバック特性 -入射部とML部分の比較
 - マイクフォロニクス
 - 高圧変動
 - ビーム変動

高周波源の構成 (35MeV,10mAバージョン)



35MeVバージョンのRFパラメータ

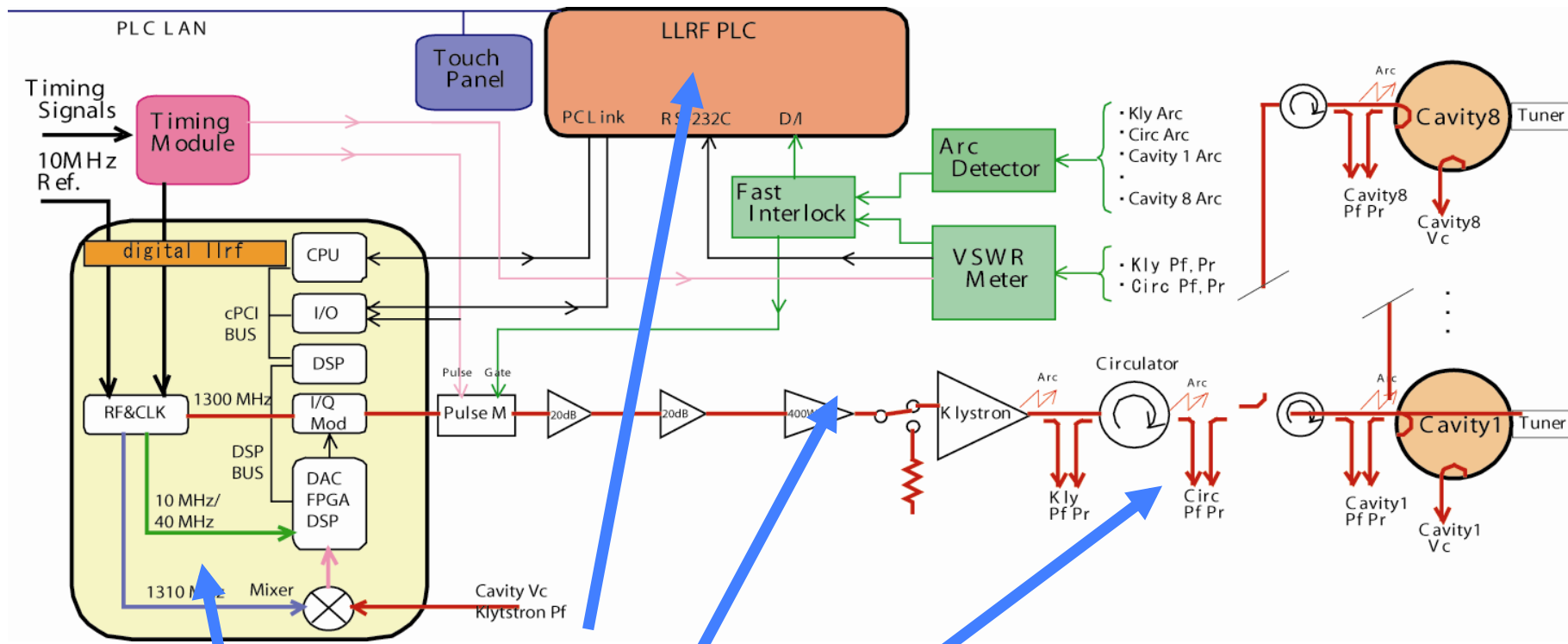
Item	Unit	Buncher	Inj-1	Inj-2	Inj-3	ML-1	ML-2
Structure		NC	SC	SC	SC	SC	SC
Gradient	MV	0.14	1	2	2	15	15
Q_L			5×10^5	2×10^5	2×10^5	1×10^7	1×10^7
Beam Phase	degree	-90	-15 to -30	-10	-10	0	0
Power Required	kW	4.5	10	37	37	5.8	5.8
Power Output	kW	6.2	17	122		18	
RF Source		IOT	Klystron	Klystron		IOT	
Power Available	kW	20	30	300		2 30	

cERLの高周波仕様

- 外乱は比例制御の場合フィードバックのゲイン分だけ抑えられる。

	Buncher	Injector	ML
Amplitude stability		0.1%	
Phase stability		0.1°	
LLRF error (LO, IQ, ADC, except cable drift)		0.03% 0.03°	
Beam-loading	0mA	10mA	0mA
RF-High Voltage		<0.5% (~0.5% in amplitude, 5° in phase)	
QI		2e5	1e7
f1/2 [Hz]	---	~6500	130
feedback	PI control	PI control	P control
Proportional gain	5	20	200

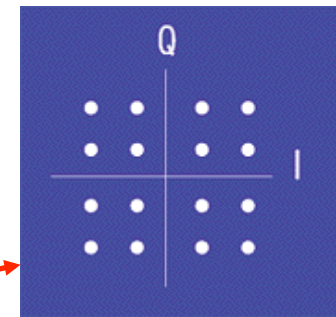
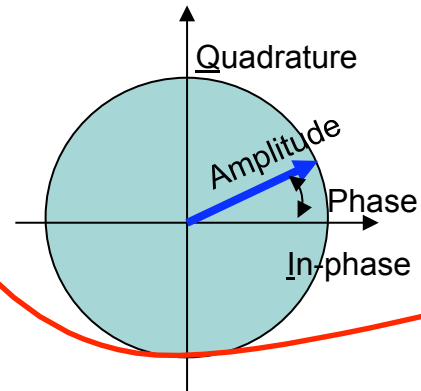
LLRF系



- 機器安全系 (MPS)
 - 速いインターロック: アーク検出、高周波反射
 - 通常のインターロック: 上位の安全系, 水, HV, クライオ
- 高周波モニター系
 - クライストロン出力、空洞入力、空洞反射、空洞電界
- 高周波増幅系
- デジタルフィードバック系

Digital Hrf system at KEK

	beam	amplitude	phase
J-PARC,SNS	proton	+/-1%	+/-1deg.
ILC	electron	0.1%	0.1deg.
ERL/Euro-XFEL	electron	0.01%	0.01deg.

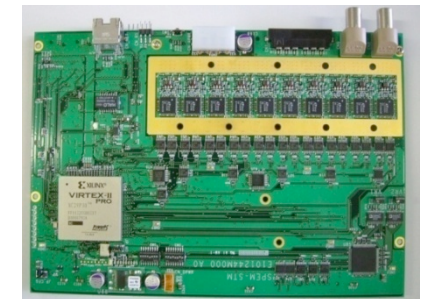


3,600,000points \leftrightarrow 16QAM

デジタル通信よりはるかに高精度のシステムが必要

アナログFB(~100ns)
↓
DSP(~数 μ 秒)
↓
FPGA(Field Programmable Gate Array、~数100ns)
(ロジック回路複雑処理は向かないが単純なFB演算は可能)

デジタル通信等の発展の恩恵を受け、安価で高性能の高周波素子、ADC等が提供されている。



(1999~)
J-PARC Linac
324MHz normal conducting
650 μ s 50Hz
2 cav. vector sum

(2005~)
STF 1.3GHz Superconducting
1500 μ s 5Hz
4 cav. Vector sum

一貫して新しいシステム設計にかかわることで、過去の経験と最先端技術の融合が可能

(2009~)
J-PARC400MeV upgrade
972MHz normal conducting

(2009~)
cERL 1.3GHz
superconducting
CW

フィードバック系と擾乱要素

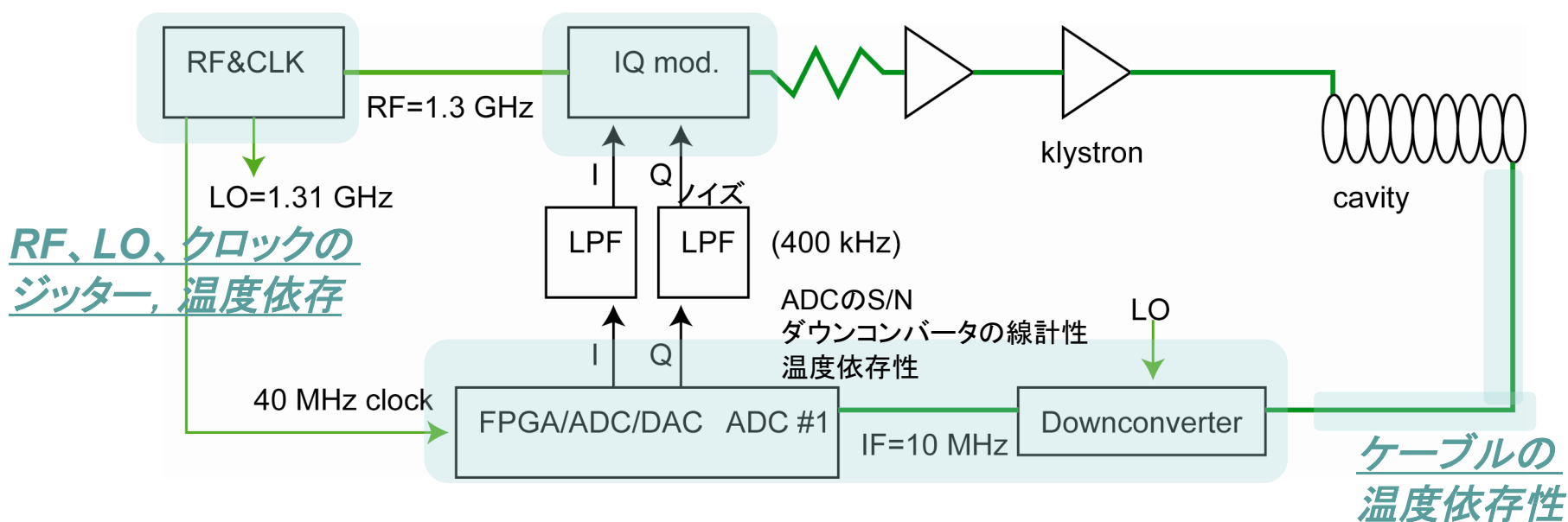
デジタル系を構成ハードウェアは

- **RF発振器**: RF周波数、ダウンコンバータ(ミキサ)で中間周波数に変換するためのLO(局部発振器)やADCのクロックも生成
- **IQ変調器**: RF周波数を変調する
- **ダウンコンバータ**: 空洞信号を中間周波数(IF)に落とす
- **ADC/FPGA/DACボード**: IF信号をIQ成分に分離, 設定値と比較しフィードバックを行う

主な擾乱要素:

温度ドリフト(日較差): マスター信号系, RFモニター系

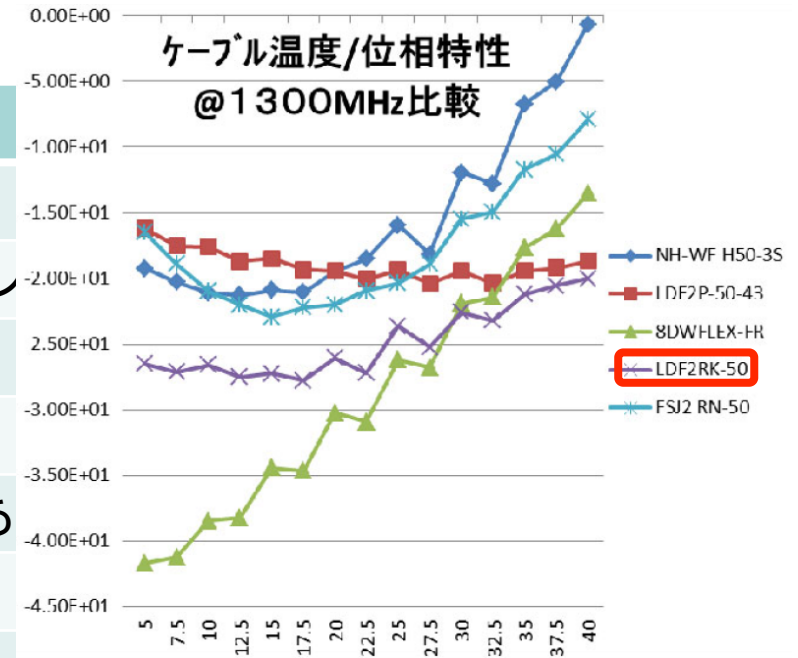
速い変動: マイクロフォニクス(空洞), RF出力変動(高圧電源変動), ビーム変動



モニター系

■ ピックアップ信号用位相安定化ケーブル

	空洞-ラック	ラック内
ケーブル長	40m	2m
ケーブル材料	超高発泡ポリエチレン	ポリエチレン
温度係数	1.3ppm*	20ppm
振幅変化	$3.2e-5 / ^\circ\text{C}/\text{m}^*$?
温度変化	10度(空調なし)	3°C(空調あ)
位相変化	0.8度	0.2度
振幅変化	1.28%	?



*荒川氏発表データ(@第49回ERL検討会)

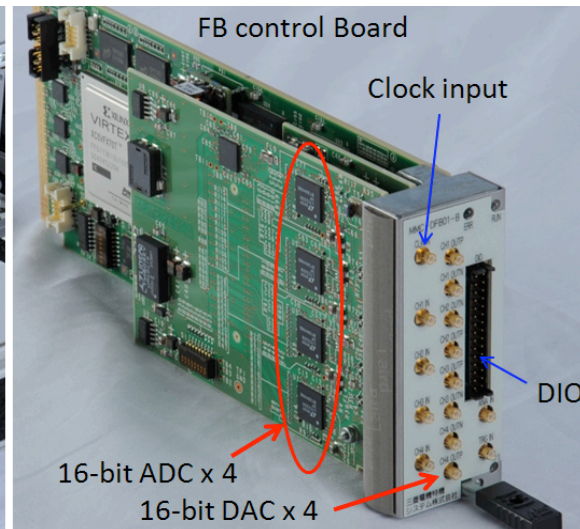
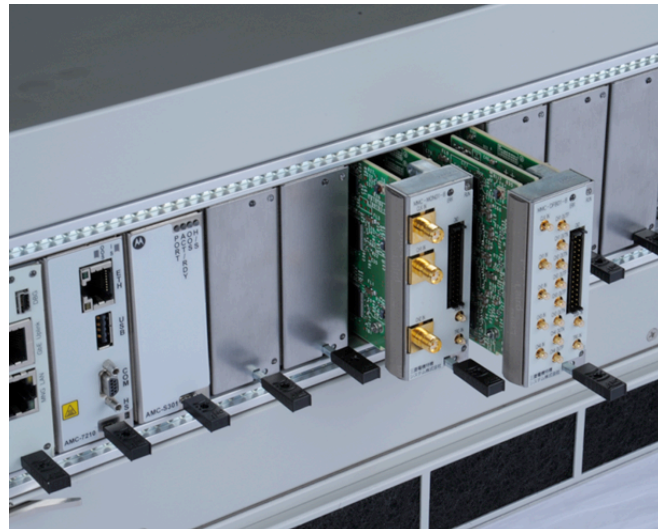
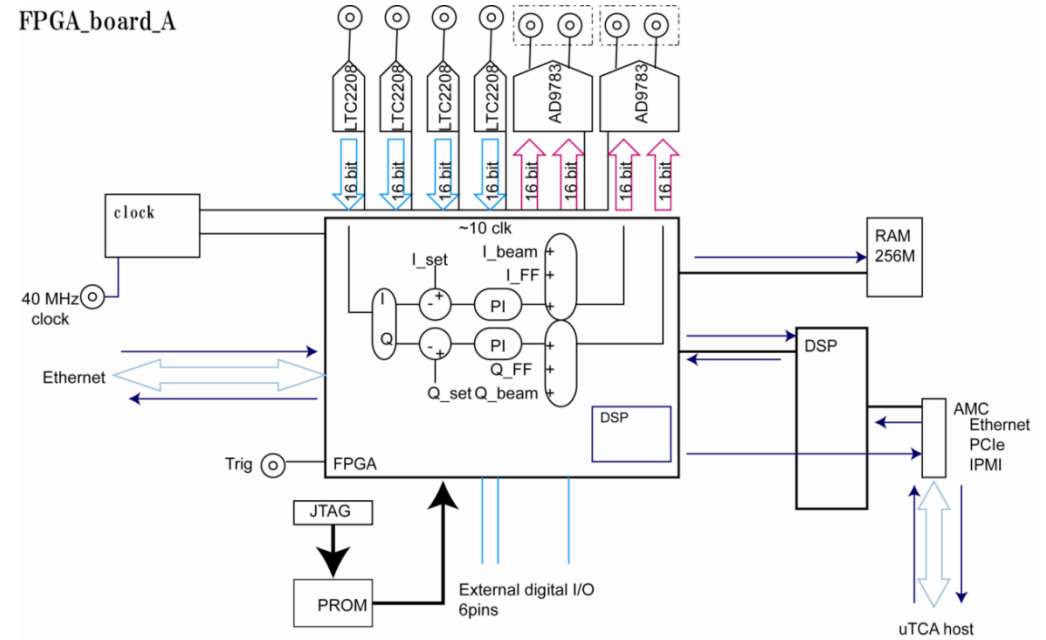
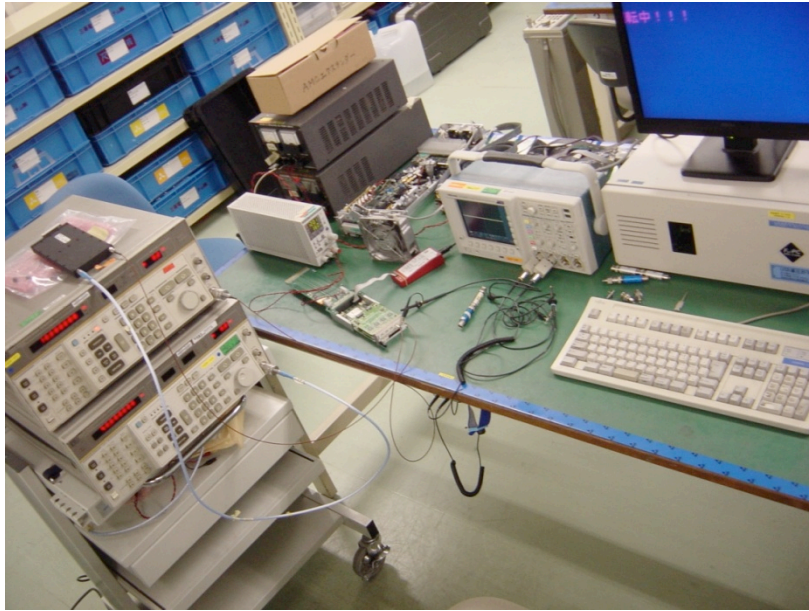
http://pfwww.kek.jp/ERLOffice/wg_1/erlmeetingsiryou/index.html

ケーブルの部分で仕様の0.1%, 0.1度を超えている。
 ケーブル部分は0.03%,0.03度程度に抑えるべき。
 → 温度を0.5度程度以下に抑えるような工夫が必要。

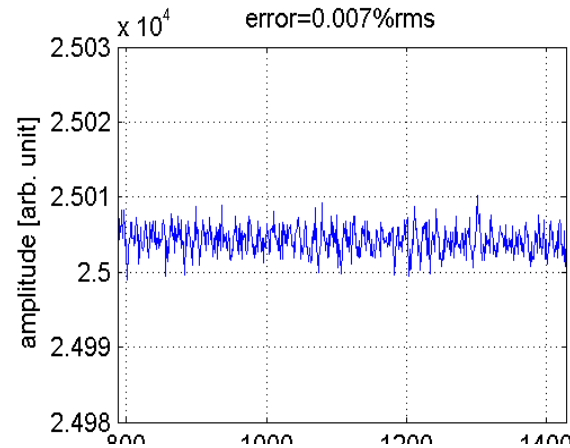
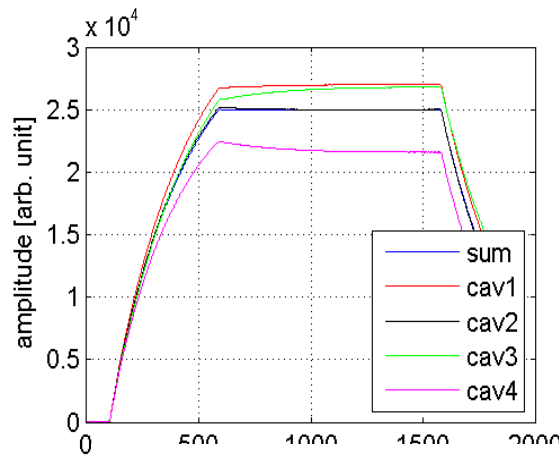
- リモートアッテネータ →STF用開発済
- パワーメータなど



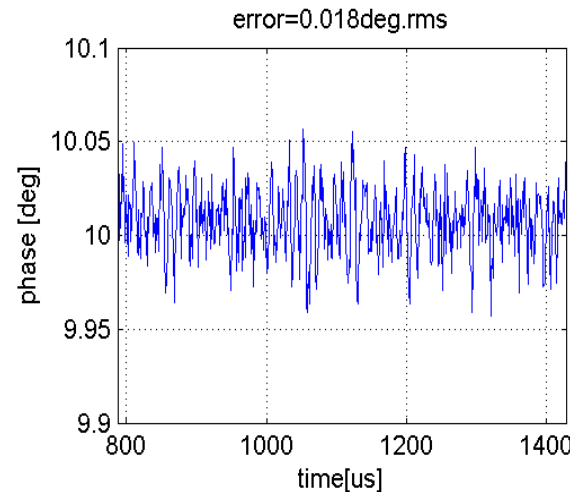
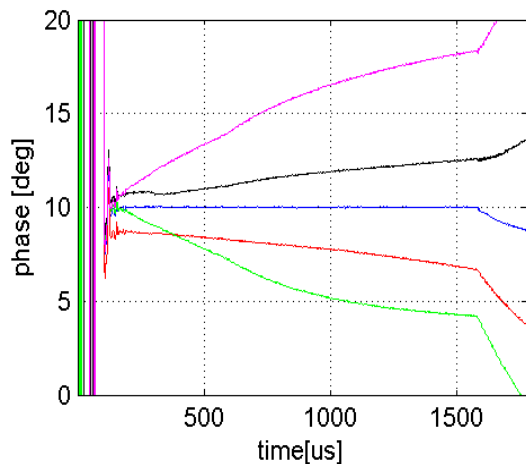
デジタル系



RF Stability @KEK-STF



4 vector sum control 0.007%rms 0.018deg.rms



短時間の安定度は仕様を満たせると思うが、ビームの安定度、ケーブルの振幅・位相のドリフト等の影響も考慮が必要。

ベクトル図

- 超伝導空洞の場合は、ビームローディングが大きな割合を占める。
- 下記のベクトル図は、定常状態の場合で、時間変化する系では一部正しくないことに注意が必要。

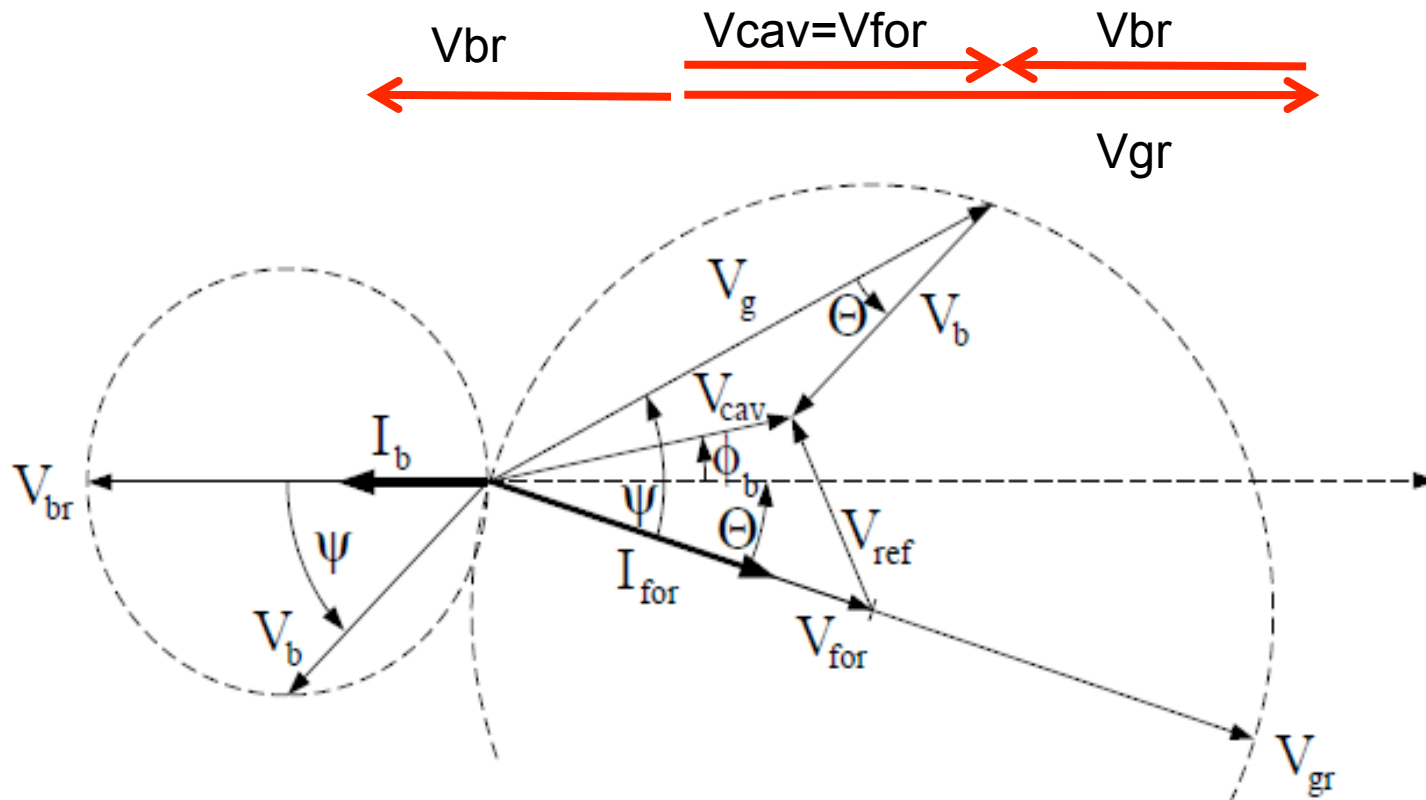


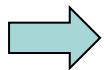
Figure 3.9: Vector diagram of generator- and beam-induced voltages in a detuned cavity. The angle ϕ_b denotes the beam phase and ψ the tuning angle.

ERLにおけるRF安定度の評価

道園真一郎

(イントロダクション)

- 高周波系の構成
- フィードバック系 -フィードバックがかかる部分とかからない部分
- 外乱の諸要素
- 超伝導空洞でのビームローディング



結果その1

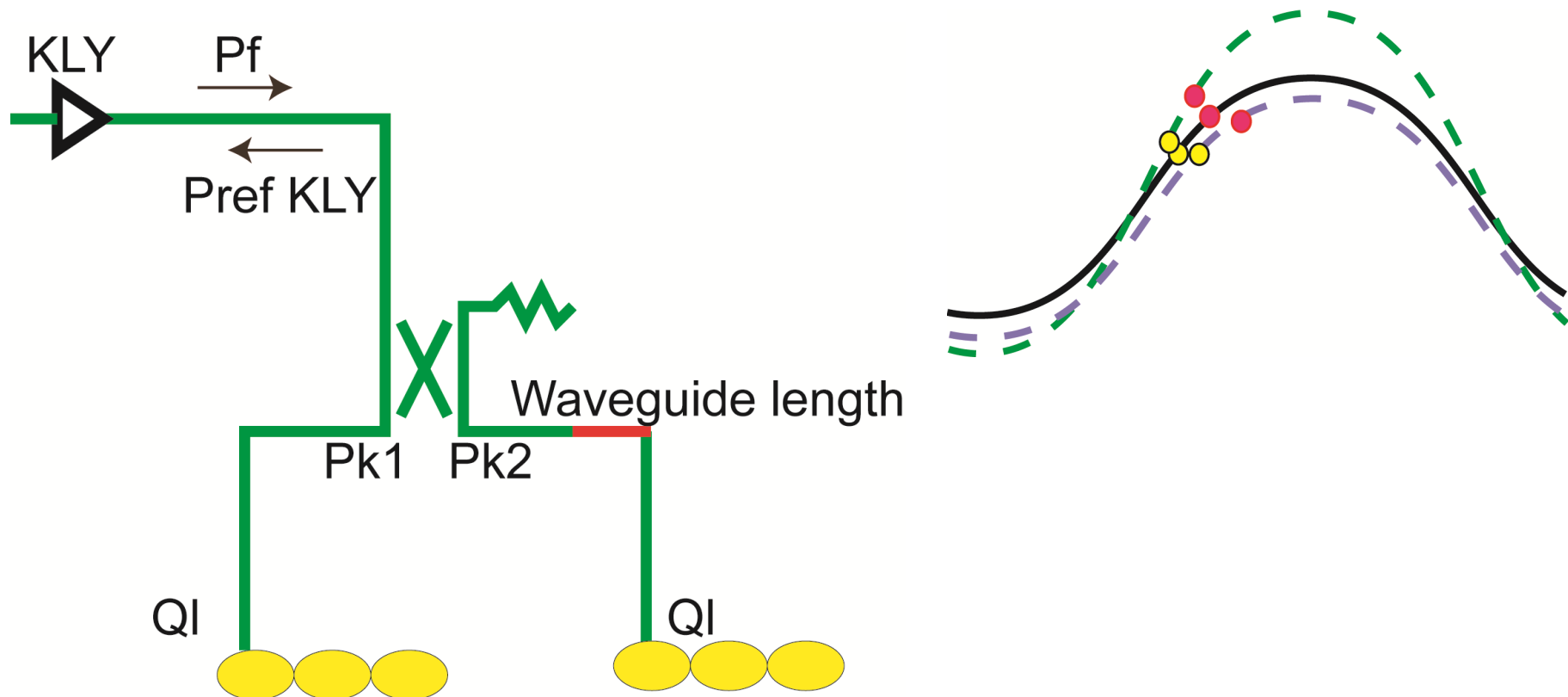
- 入射部空洞のベクターサム運転 -2空洞に異なるビーム位相で加速

結果その2

- フィードバック特性 -入射部とML部分の比較
 - マイクフォロニクス
 - 高圧変動
 - ビーム変動

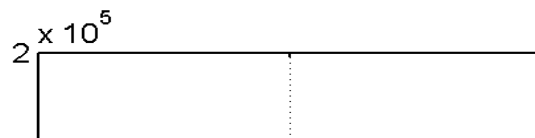
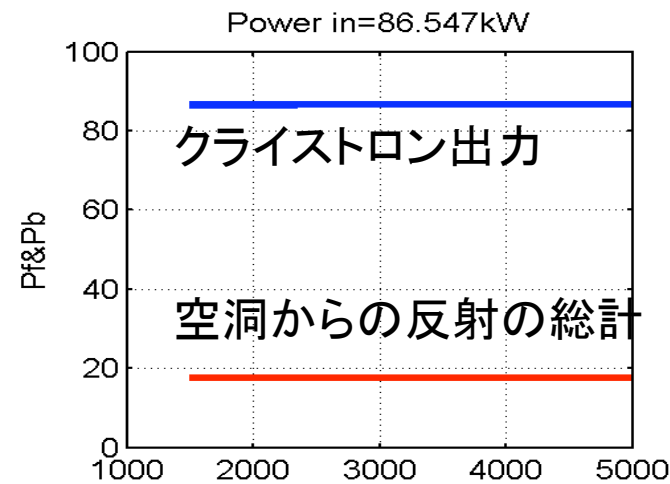
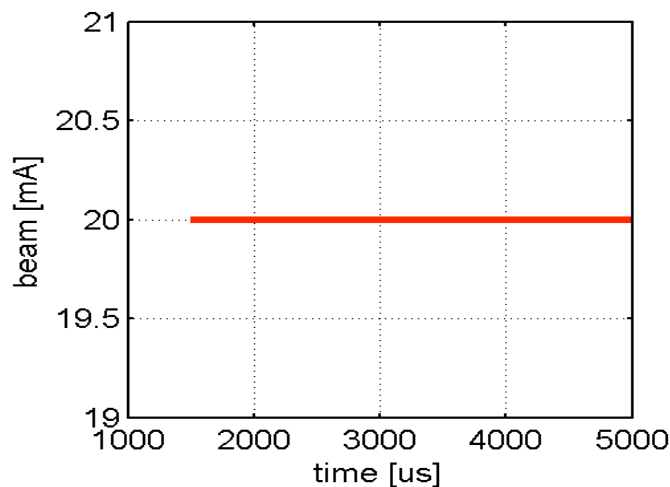
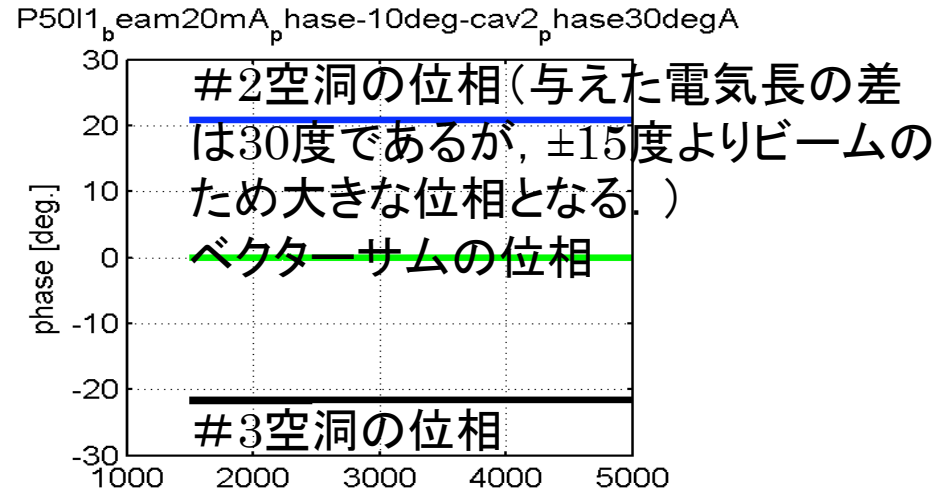
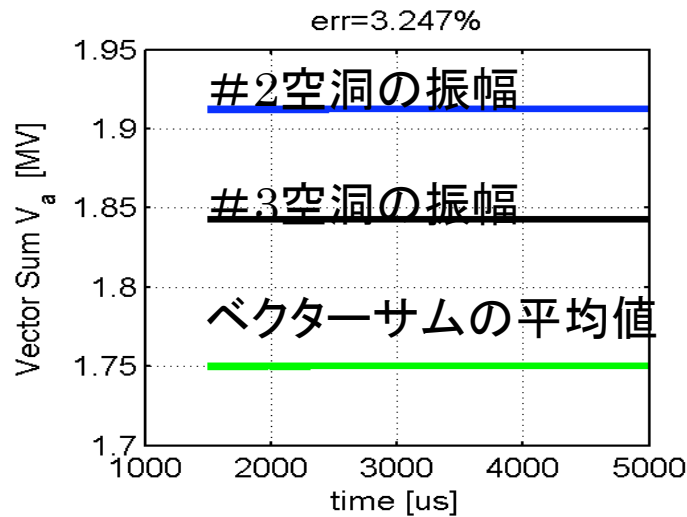
ベクターサム

- 入射部空洞#2, #3はベクターサム運転を行うが, 特にビーム位相を変える必要がある場合は, 移相器を追加する必要がある.
- ただし, ベクターサム一定なので 必ずしもビーム位相が移相器分だけずれるわけではない.
- ビームローディングが異なる分若干の違いが出てくる.



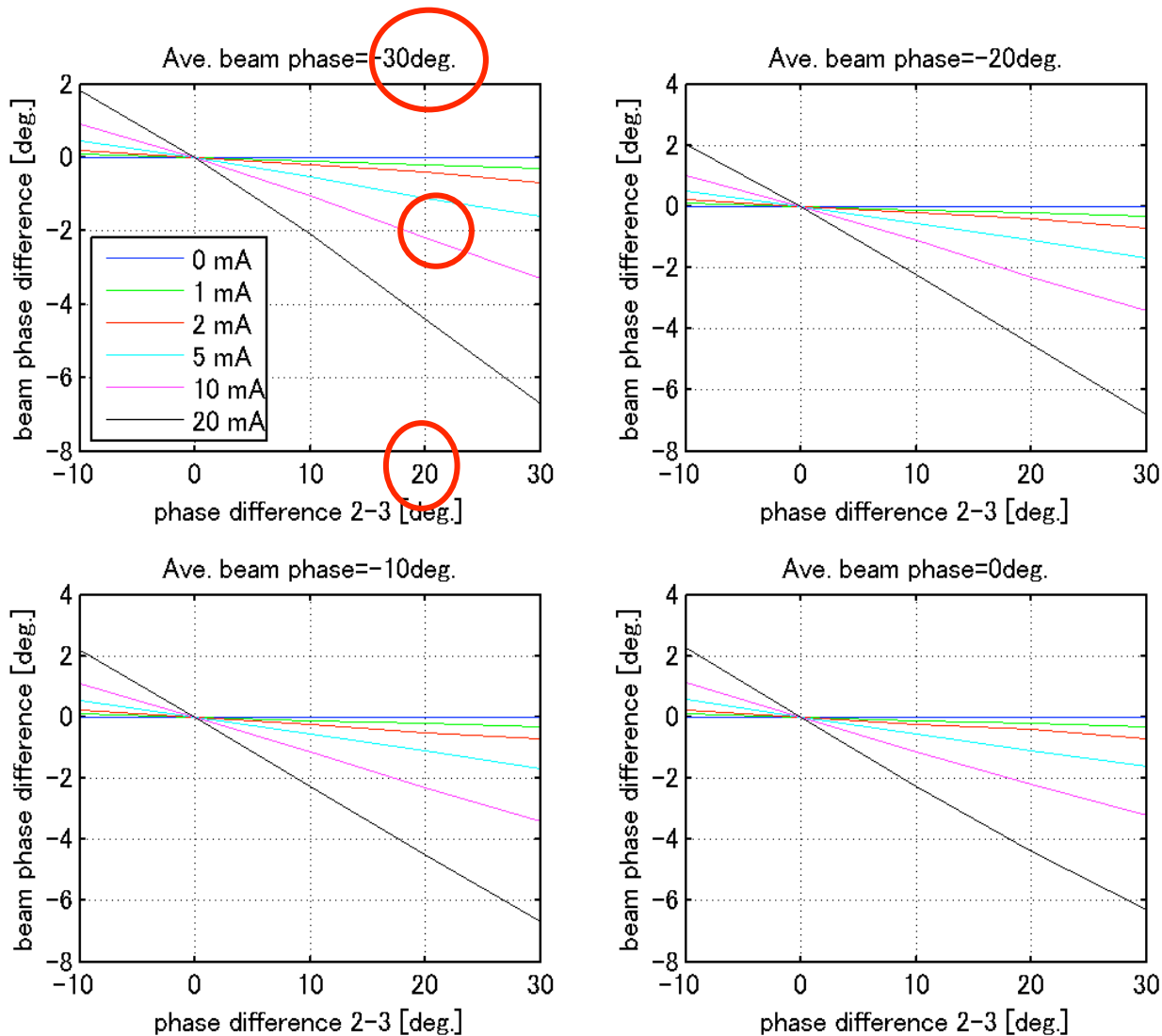
ベクターサムでの計算例

- 空洞間の位相差を30度で与えた場合の例.



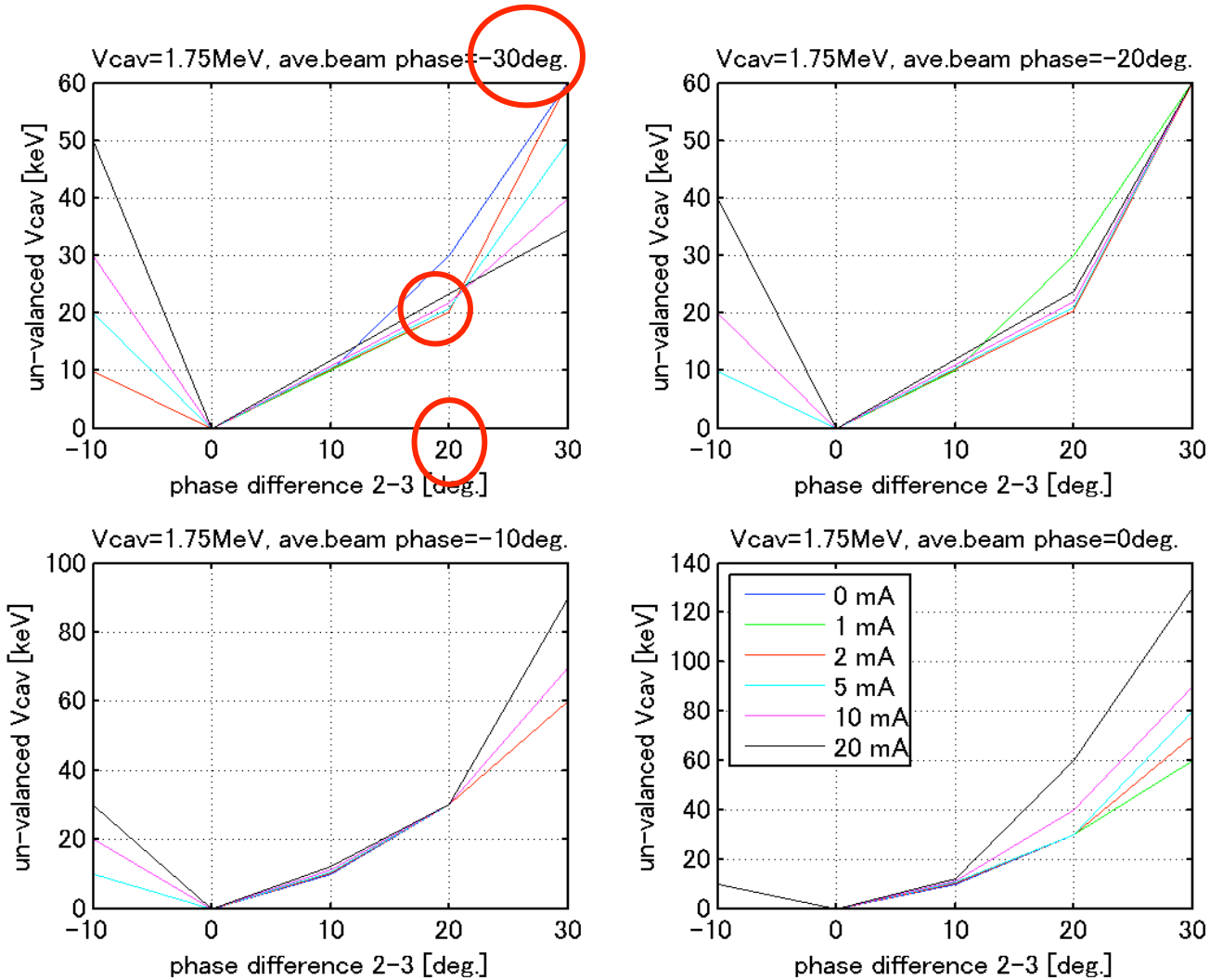
空洞間位相差 v.s. ビーム位相のずれ

- 平均ビーム位相を-30度とした場合、10mAのビーム負荷で空洞間位相差を20度とすると、それより2度程度ビーム位相が異なる。



空洞間位相差 v.s. 空洞電界のずれ

- たとえば、10mAでビームの平均位相を30度、空洞位相差を20度とした場合は、2空洞間に20keV程度の空洞電圧の差が生じる。



ERLにおけるRF安定度の評価

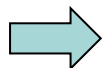
道園真一郎

(イントロダクション)

- 高周波系の構成
- フィードバック系 -フィードバックがかかる部分とかからない部分
- 外乱の諸要素
- 超伝導空洞でのビームローディング

結果その1

- 入射部空洞のベクターサム運転 -2空洞に異なるビーム位相で加速

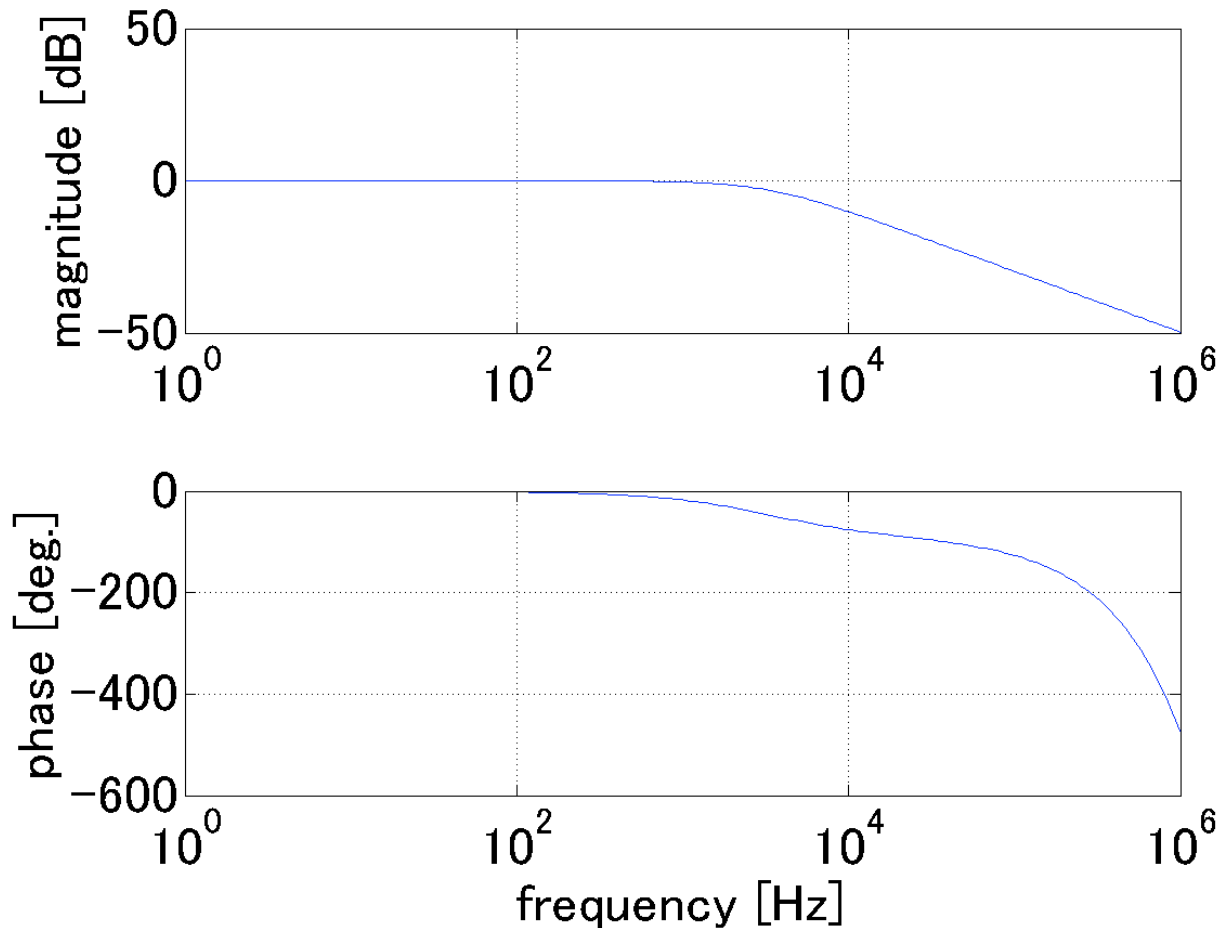


結果その2

- フィードバック特性 -入射部とML部分の比較
 - マイクフォロニクス
 - 高圧変動
 - ビーム変動

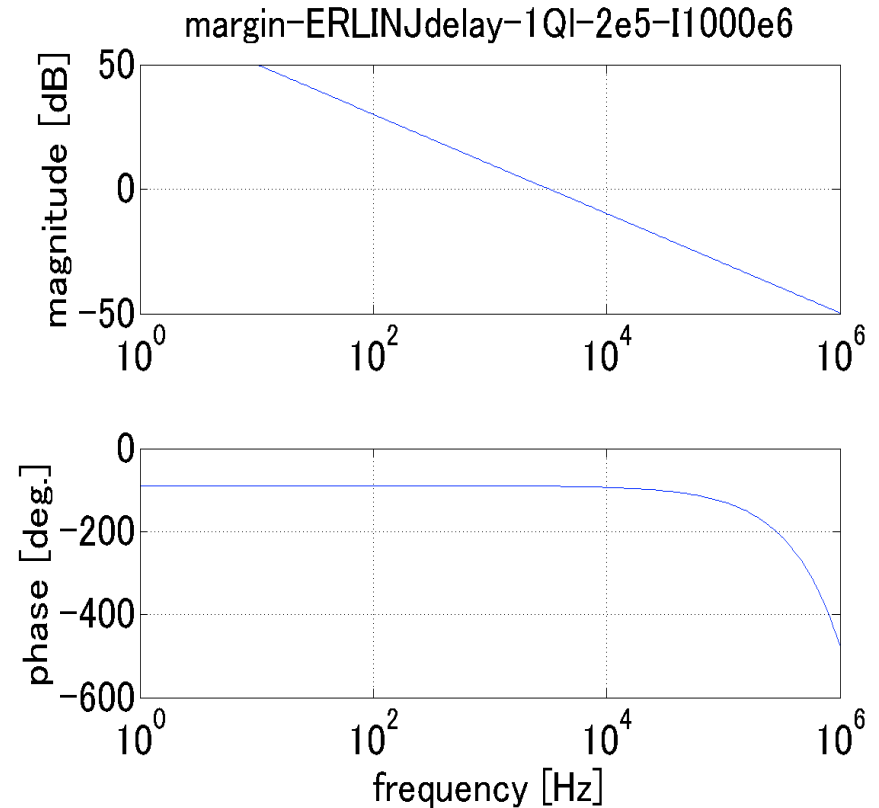
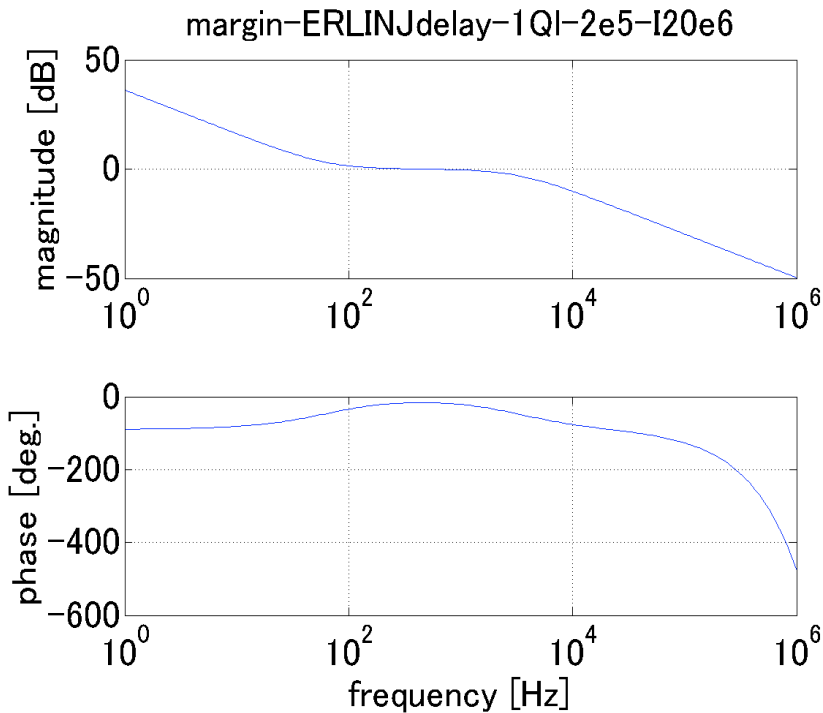
入射部空洞の周波数特性

- $QI=2e5$ の空洞の周波数特性. (ボーデ線図)
- ループ遅れは 1μ 秒としている.
- 位相が 180 度回ったときのゲインをゲインマージンと呼ぶ.
- フィードバックをかけない場合は帯域は 1kHz 程度 →フィードバックが必要.



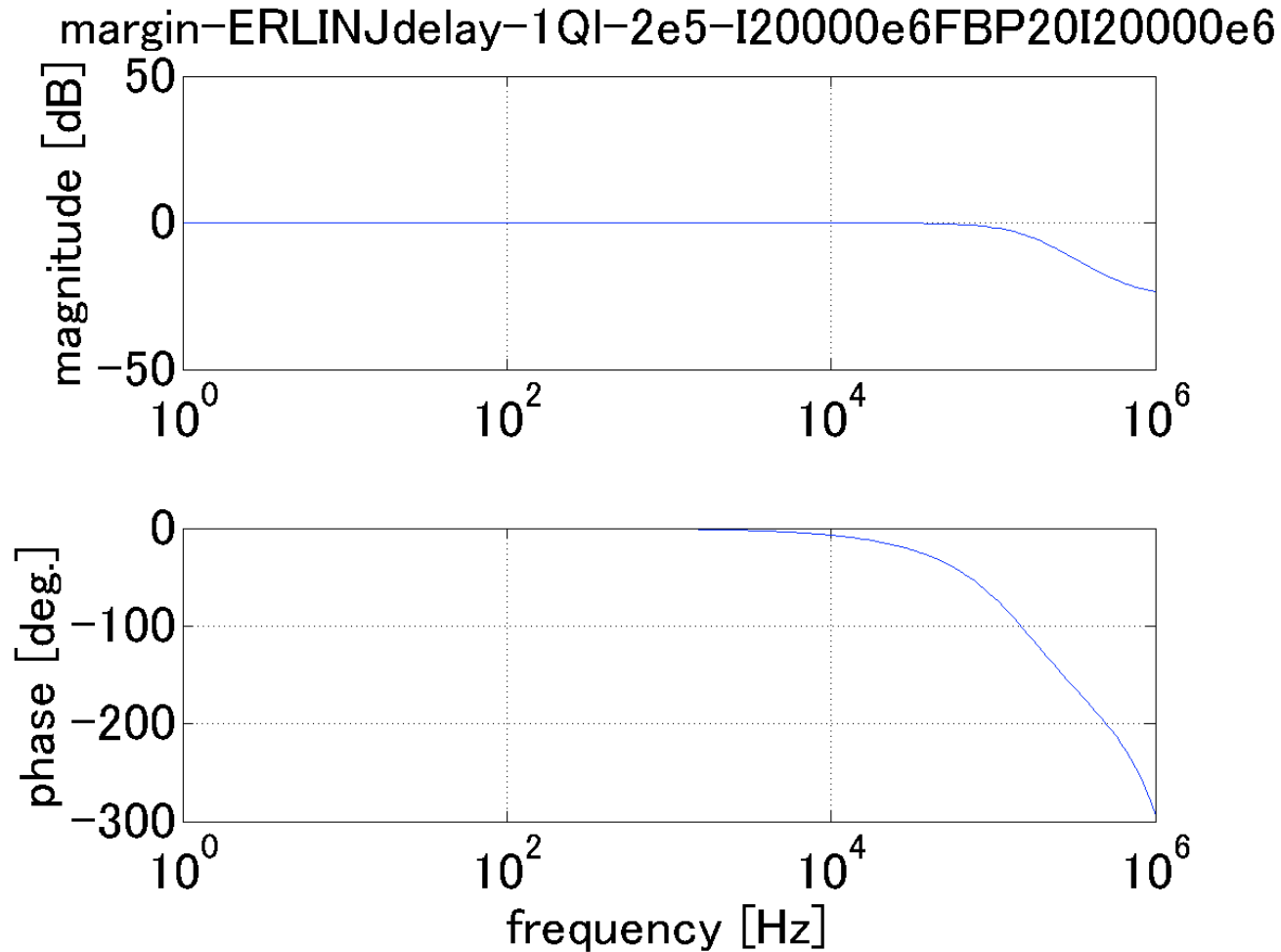
比例積分制御

- 比例積分 (PI) 制御を行えば, ゆっくりした変動に対しては高いゲインが得られる.
- 積分ゲイン $20e-6$ および $1e-3$ の場合の結果を示す.



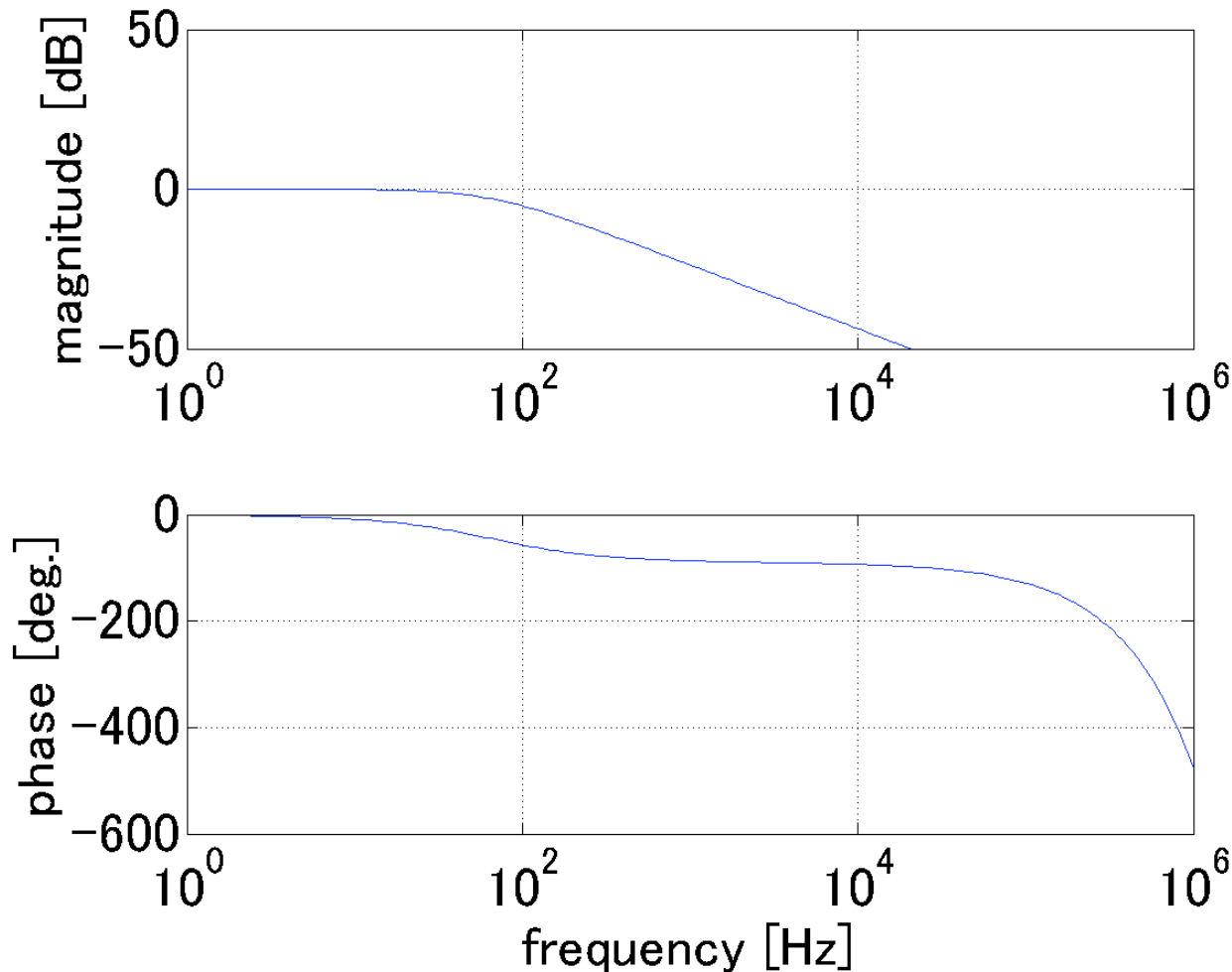
入射部空洞のフィードバック

- 安定な運転はゲインマージンの1/2~1/3のゲインと言われている.
- 比例ゲイン20, 積分ゲイン4e5でフィードバックをかけた場合のボーデ線図.
- 帯域(-3dB)は130kHz程度まで増加.



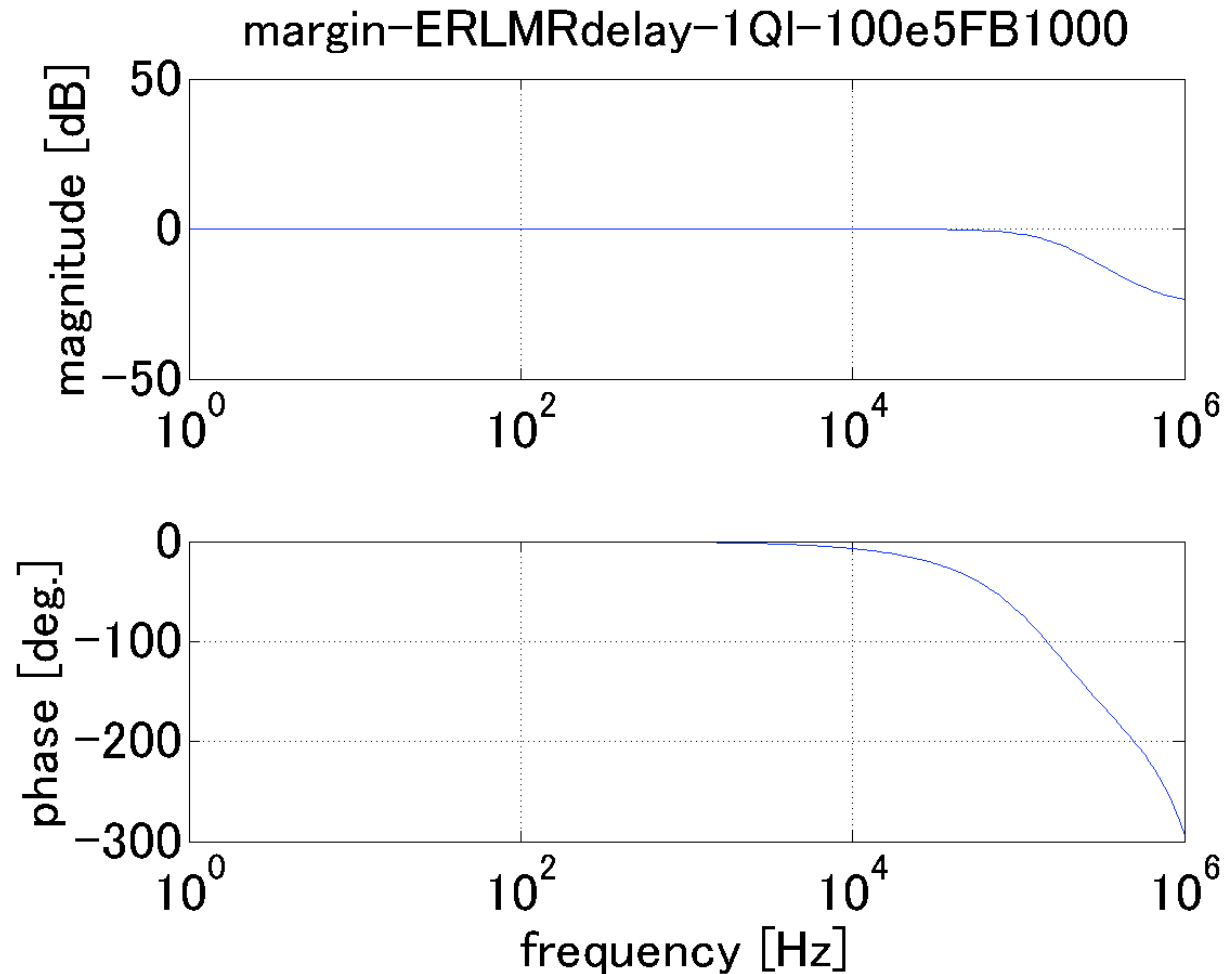
(参考)主リニアック空洞の周波数特性

- $QI=1e7$ の空洞の周波数特性. (ボーデ線図)
- ループ遅れは 1μ 秒としている.
- 位相が 180 度回ったときのゲインをゲインマージンと呼ぶ. ($\sim 3,600$)
- フィードバックをかけない場合は帯域は 100Hz 程度 →フィードバックが必要.



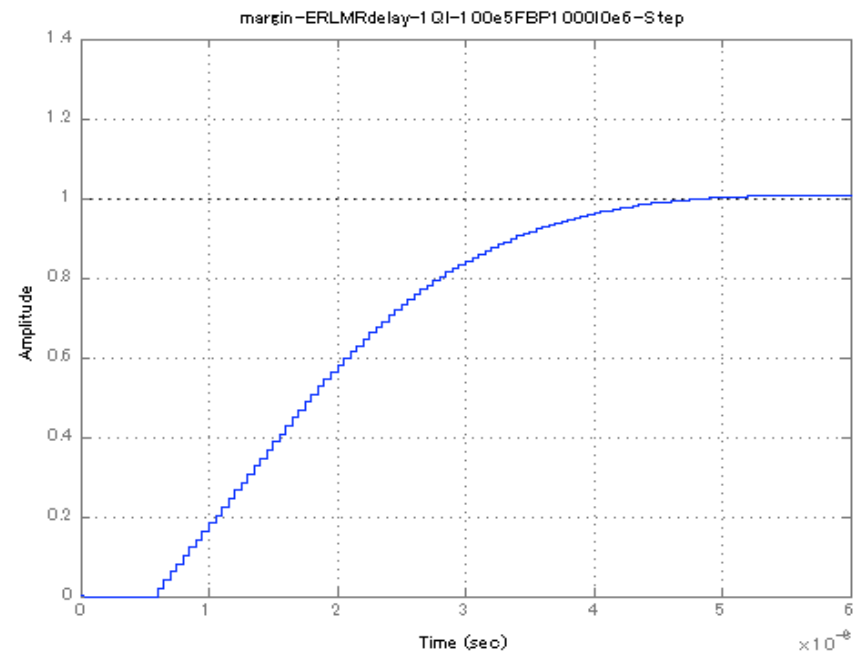
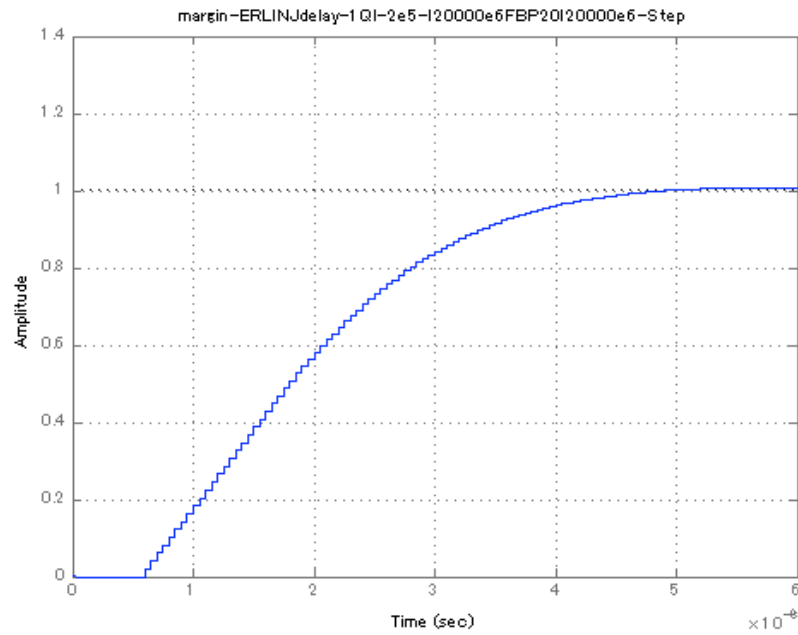
主リニアックのフィードバック

- 安定な運転はゲインマージンの1/2~1/3のゲインと言われている.
- ゲイン1000でフィードバックをかけた場合のボーデ線図.
- 帯域は130kHz程度まで増加.



ステップ応答

- ステップ応答は入射部もML空洞もほぼ同様となる.



ERLにおけるRF安定度の評価

道園真一郎

(イントロダクション)

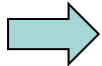
- 高周波系の構成
- フィードバック系 -フィードバックがかかる部分とかからない部分
- 外乱の諸要素
- 超伝導空洞でのビームローディング

結果その1

- 入射部空洞のベクターサム運転 -2空洞に異なるビーム位相で加速

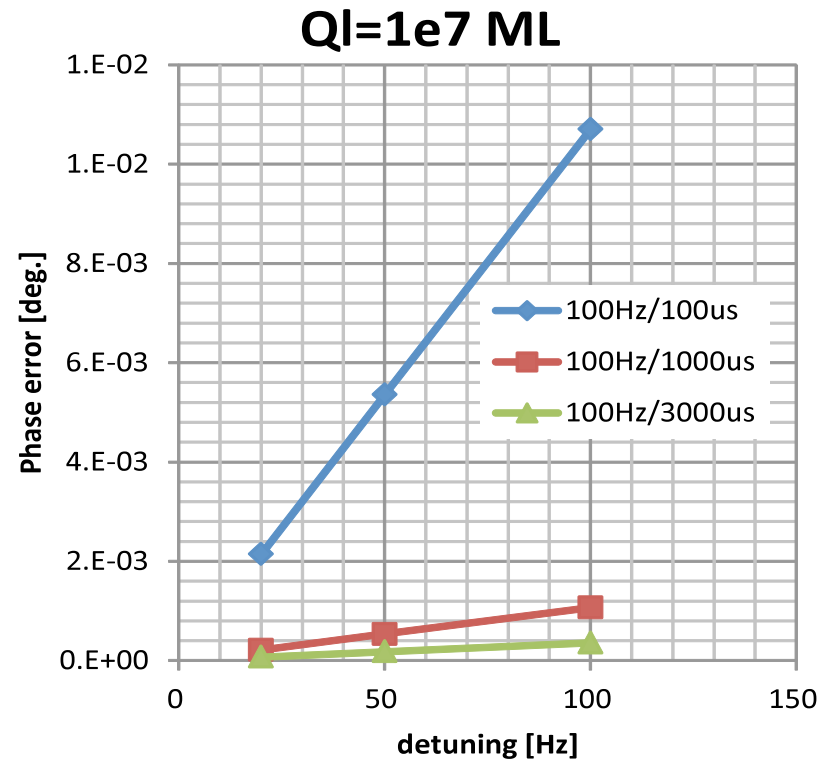
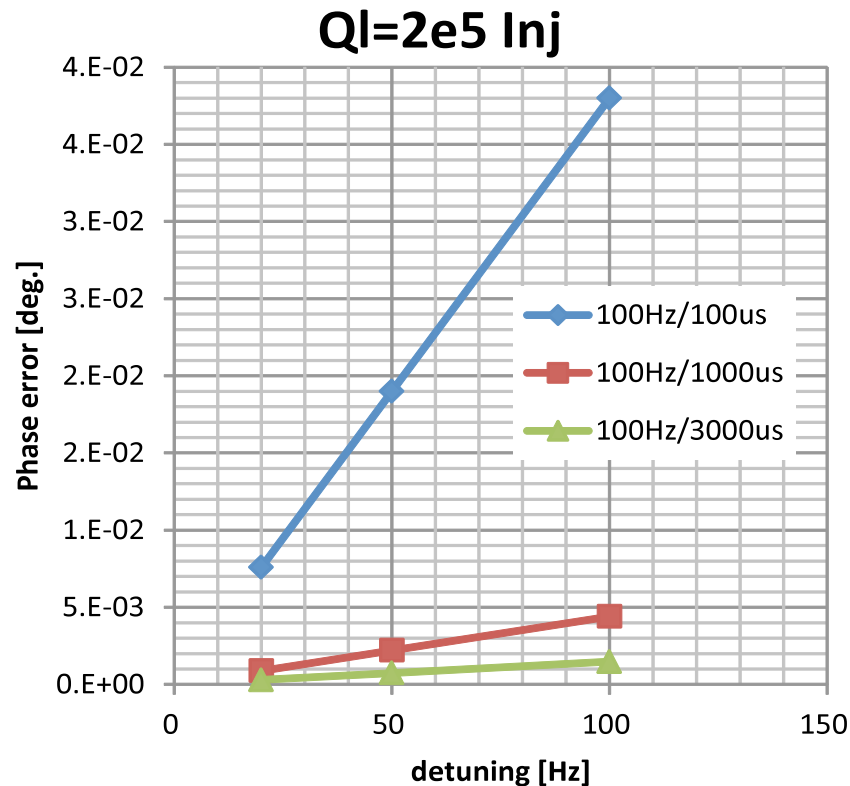
結果その2

- フィードバック特性 -入射部とML部分の比較
 - マイクフォロニクス
 - 高圧変動
 - ビーム変動



マイクロフォニクス

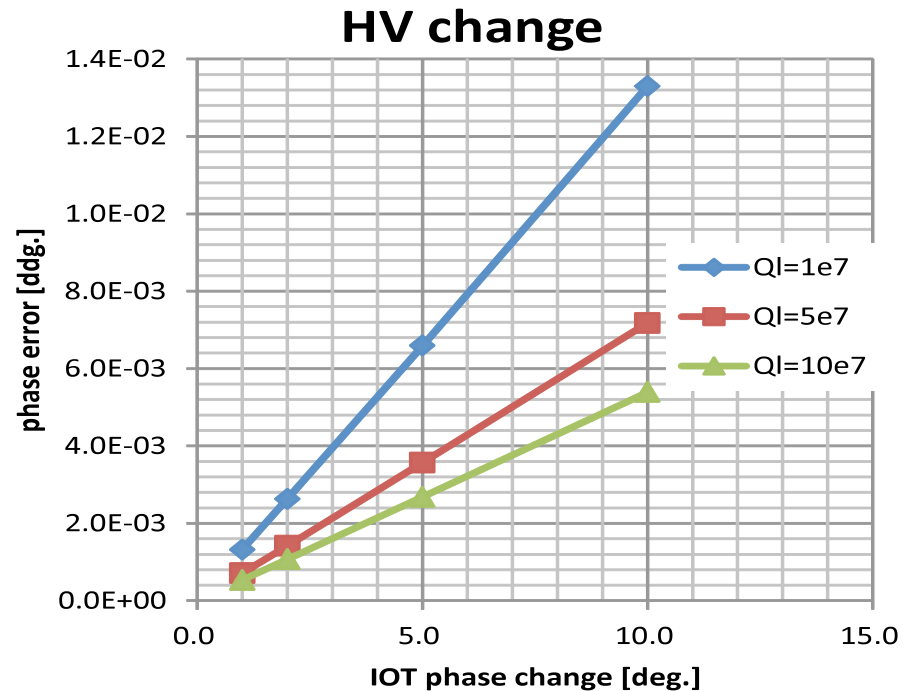
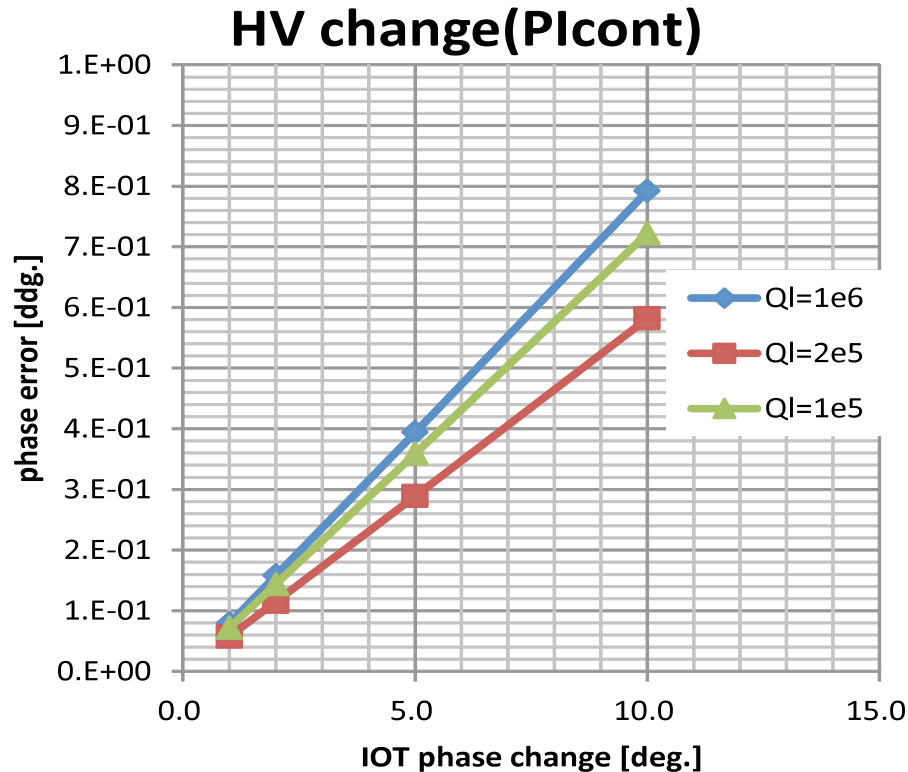
- 離調が変化した場合の空洞位相の変動.
- 変化速度が100Hz/100us, 100Hz/1ms, 100Hz/3msの3つについて計算.
- 入射部空洞: $P=20$; $l=4e5$; $I_{beam}=10mA$
- ML空洞: $P=500$; $l=250$; $I_{beam}=0$



- 1)入射部: QI値が小さいので同じ離調変化 (Hz) でもML空洞と比較して位相変化は1/50となる.
 - 2)入射部: フィードバックの不感時間(1μ秒)に変化する離調量が50倍大きい.
- 2条件が相殺して, 5倍程度の差となった.

高圧の変動

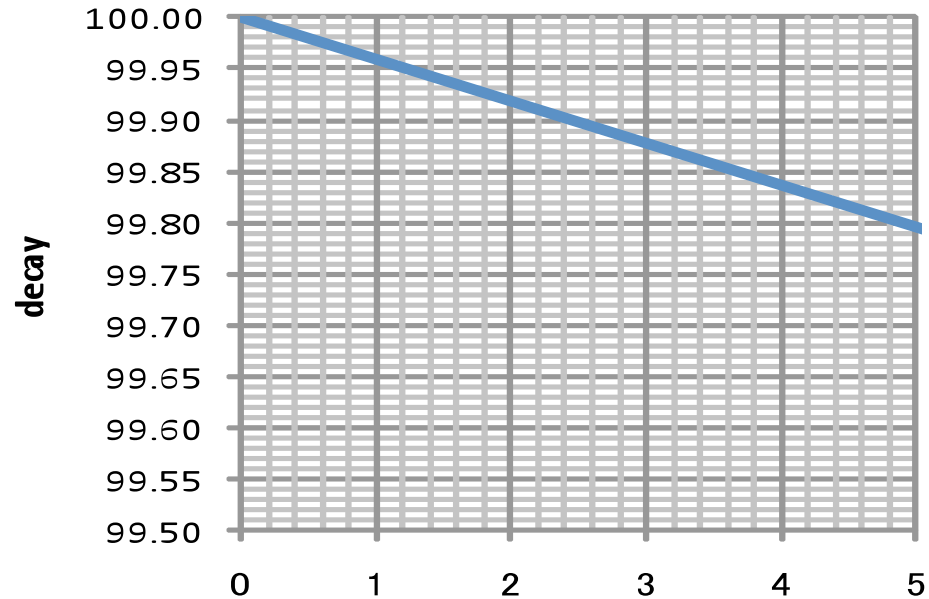
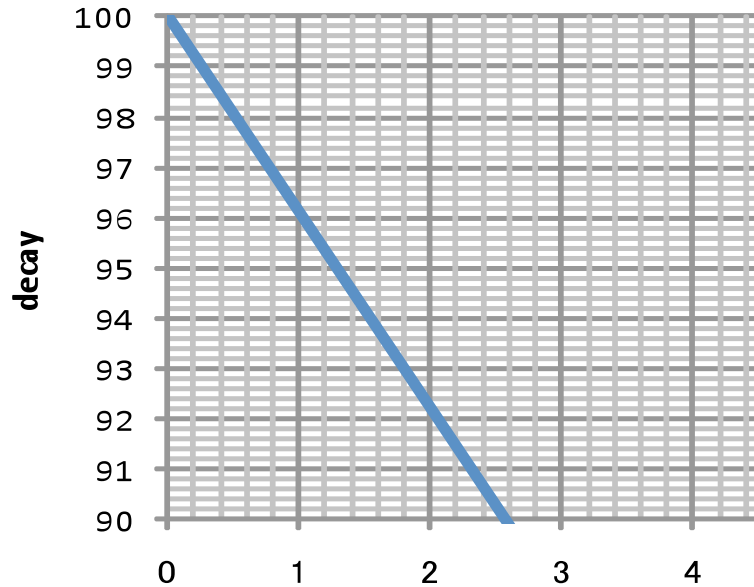
- 高電圧高周波源では、印加電圧の変化によりビーム走行時間が変わるため出力位相が変わっていく(たとえば5度/%程度.).
- 電圧変化により出力位相が1度, 5度, 10度変わった場合の出力の変化を調べた.
-



例えば10度のステップ的な入力位相変化に対して、入射部空洞は6e-1度, ML空洞は7e-3度の変化となっており、空洞入力が変わった場合の変化は入射部空洞の方が100倍程度大きい。
cERLで位相変化を0.03度に抑えるには入射部の場合、出力変動は0.5度以内に抑える必要があり、これは、0.1%程度の電圧安定度を要求することに対応する。

ループ遅れ時間

- フィードバック系の遅れ時間は, J-PARC, STFでは1 μ 秒程度であった.
- RF源と空洞の距離はいずれも40m程度. CERLでも1 μ 秒程度であろう.
- ループ遅れ時間の間は, 空洞内の信号はフィードバックがかからない. (不感時間)



Time [us]

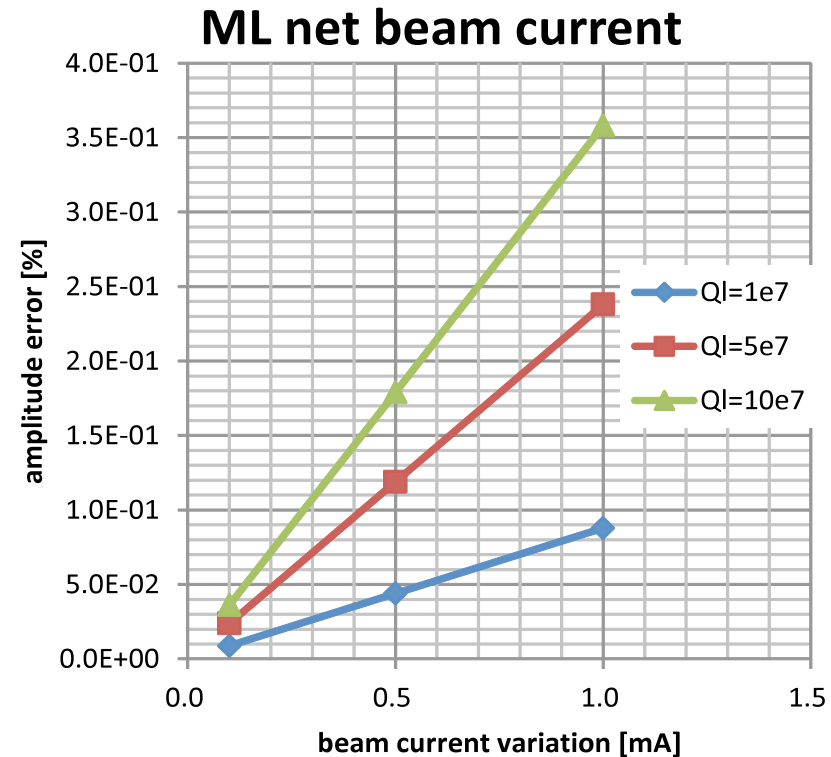
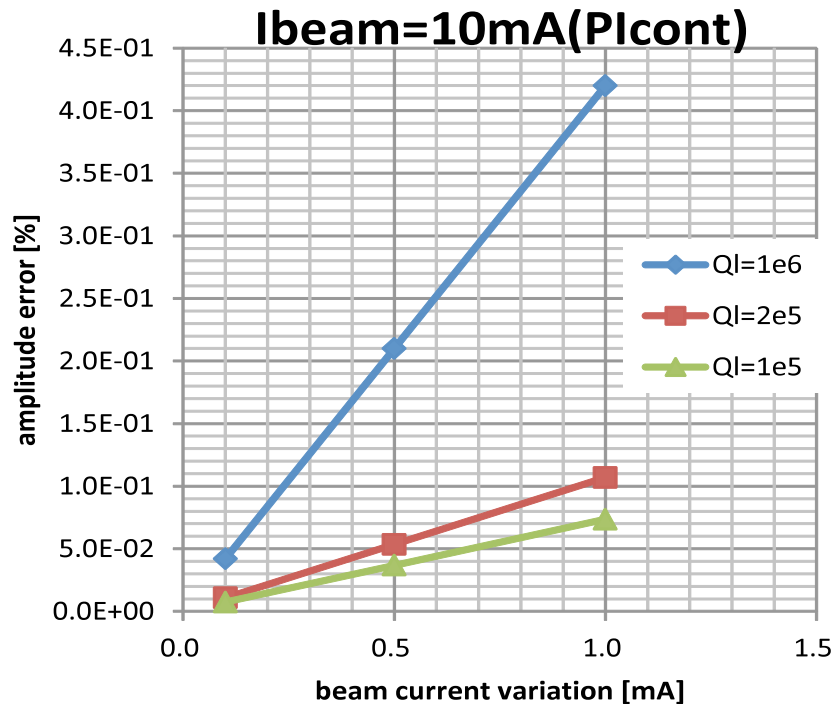
Time [us]

左:ビームローディングがある場合(QI=2e5)の不感時間と変化の関係, 右:ビームローディングがないQI=1e7の不感時間と変化の割合

1 μ 秒の不感時間では, 入射部空洞では変動の4% (=100%-96%), ML空洞では変動の0.05%分だけ変化する. この違いは100倍程度で, 先に得られた結果にあっている.

ビーム電流変動

- 入射部空洞はビーム電流10mA程度であるのに対して、ML空洞は通常は無負荷となる。
- 入射部空洞では電子銃からの電子放出の変動, ML空洞では周回ビームと入射ビームとの位相差の変動によりビーム電流の変動が起こる。



入射部空洞(Ql=2e5)で1mA変動に対し0.1%, ML空洞(Ql=1e7)でも0.1%の変化が現れる. 全体で安定度0.1%を満たすためには, ビーム変動に対しては, その1/3の0.03%程度に抑えることが望ましい. このためには, **入射部, ML空洞ともにビーム変動を0.3mA程度, (10mA電流に対して3%に相当する.)に抑える必要がある.**

まとめ

これまでの結果をまとめて、入射部空洞とML空洞を比較した。

- フィードバックを行うことで帯域を広げることができる。
- 入射部空洞は比例制御のみではゲインを上げることができないが、PI制御を行うことでML空洞と同程度のステップ応答が得られる。
- マイクロフォニクスについては、入射部空洞の方が抑制効果が小さい(5倍程度の差)
- 高周波源のステップ的な位相変化に対しても入射部空洞の方が影響が大きい。これは、主としてフィードバックループの時間(1 μ 秒)が不感時間となっていて、その間の空洞への影響が入射部空洞の方が大きいからである。0.1度の位相安定度を得るには、高電圧部で0.1%程度の安定度が必要。
- ビーム変動に対しては、入射部・MLともに1mAの変動に対し0.1%程度の振幅変化となった。ビーム変動の要因が入射部とML部で異なるため、性能を維持するためには個別の安定化が必要であろう。

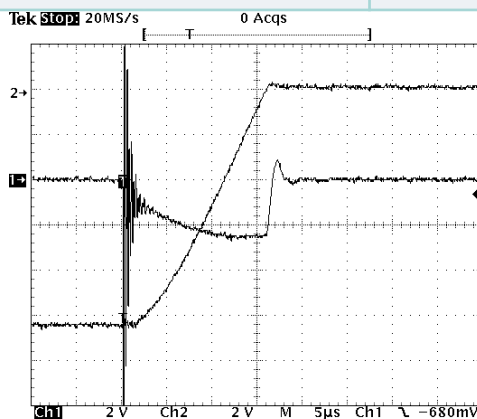
■?? ERLでは入射部、ML部の安定度はどのように考えるべきか。MLの場合は平均値で対応できるとのことなので、台数分の平均化が期待できる。一方、入射部についてはERLにおいてもBuncher+SC3台と思うが、これらの平均値について0.01%、0.01度が必要か？



ERL用300kWクライストロン電源の主な仕様

- 確立した電源技術による低価格化
サイリスタ位相制御による出力電圧制御と安定化
- IGBTスイッチを使用した高速遮断
ガン放電時クライストロンへの注入エネルギーを10J以下

最大出力電圧	- 52 kV
最大出力電流	11 A
出力電圧リップル	0.5 %(P-P)以下
出力電圧安定度	0.5 %(P-P)以下
入力電源	AC 6.6 kV, 3φ, 50 Hz
冷却方式	水冷
筐体寸法	4.6mW x 2.5mD x 2.6mH

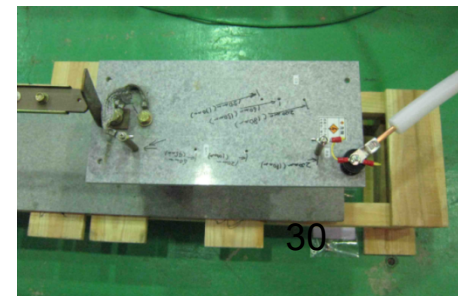


CH1: 出力電流(10A/div) CT 110A使用
CH2: 出力電圧(10kV/div) 5000:1

負荷注入エネルギー10J以下を
確認

第61回ビームダイナミックスWGミーティ
ング(2011/08/31)

15 Apr 2010
13:31:07



cERLの高周波源

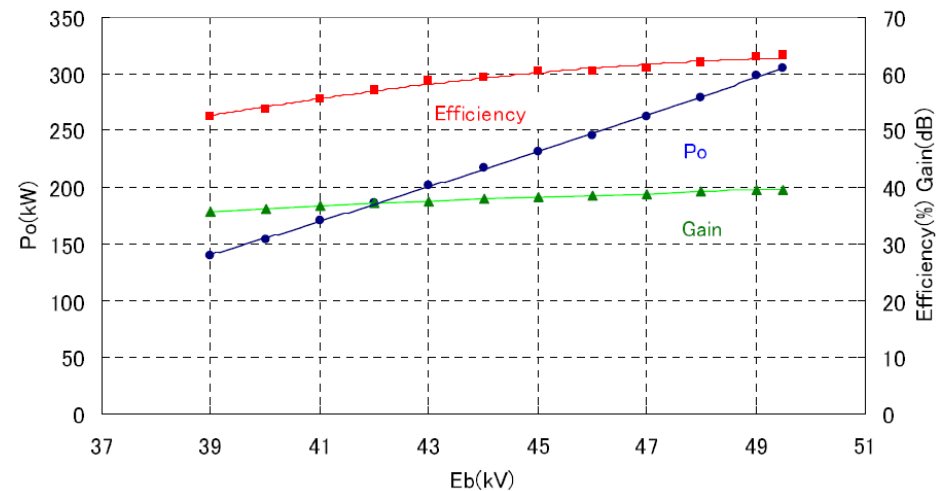
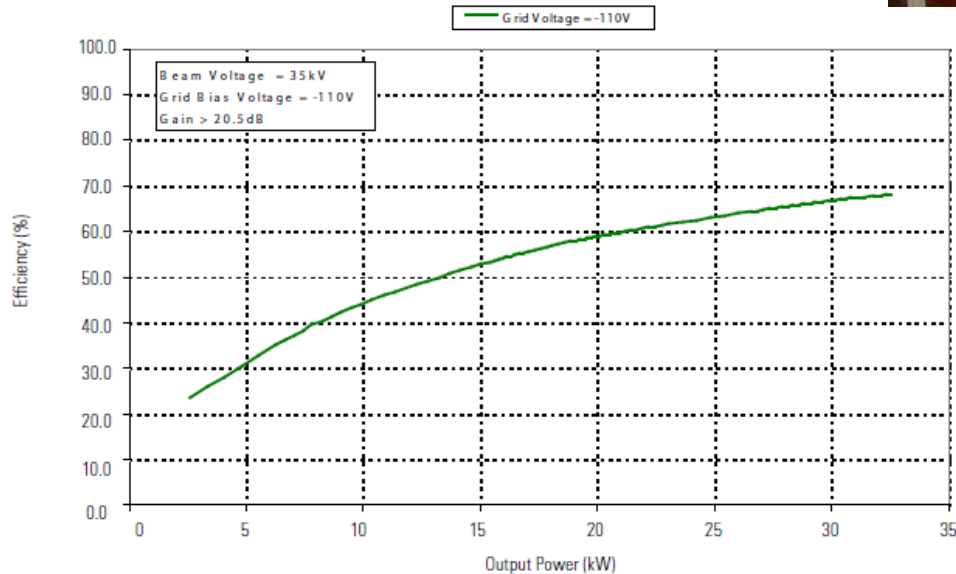
CPI社 VKL-9130 IOT



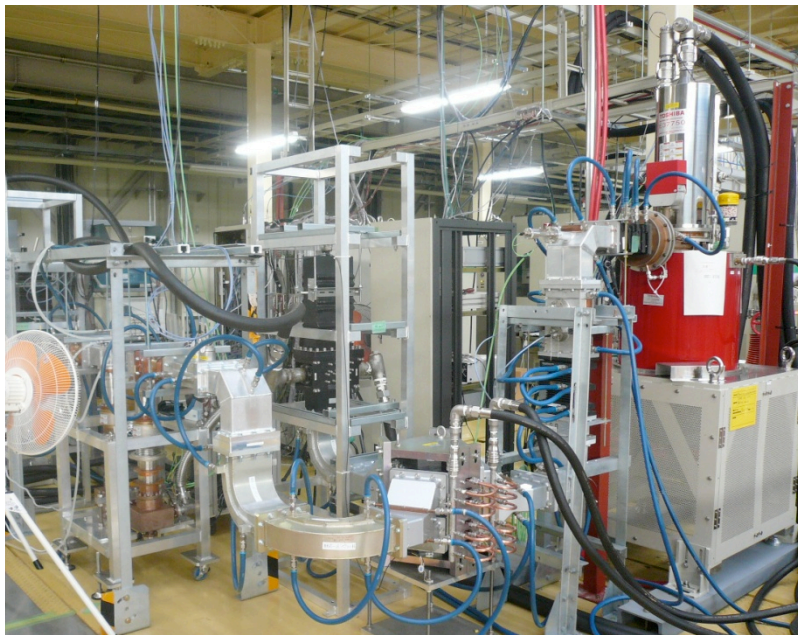
Frequency	1300 MHz
Output Power	30 kWatts
Beam Voltage	35 kV
Beam Current	1.4 A
Drive Power	< 500 Watts
-1dB Bandwidth	> 2 MHz
Gain	> 20 dB
Efficiency	> 60



Frequency	1300 MHz
Heater voltage	10.5 V
Heater current	14.5 A
Beam voltage	49.5 kV
Beam current	9.75 A
Output power	305 kW
Input power (at sat.)	34 W
Beam perveance	0.89 μP
Efficiency	63.2%
Gain	39.5 dB



300kW CW Klystron



30kW CW IOT



30kW CW Klystron

