



第7回ILCを学び考える会 「高周波源について考える」

加速器第5研究系
道園 真一郎

高周波源とは

Accelerator

性能要求

横断化要請

- 入射器 (2.856GHz, 常伝導, 4usパルス)
- STF (1.3GHz, 超伝導, 1.5msパルス)
- cERL (1.3GHz, 超伝導, CW)

要求実現
性能・安定運転

HPRF

LLRF



- クライストロン
- クライストロン電源
- 立体回路(電力分配系)

- デジタルLLRF
- 低電力分配系





目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

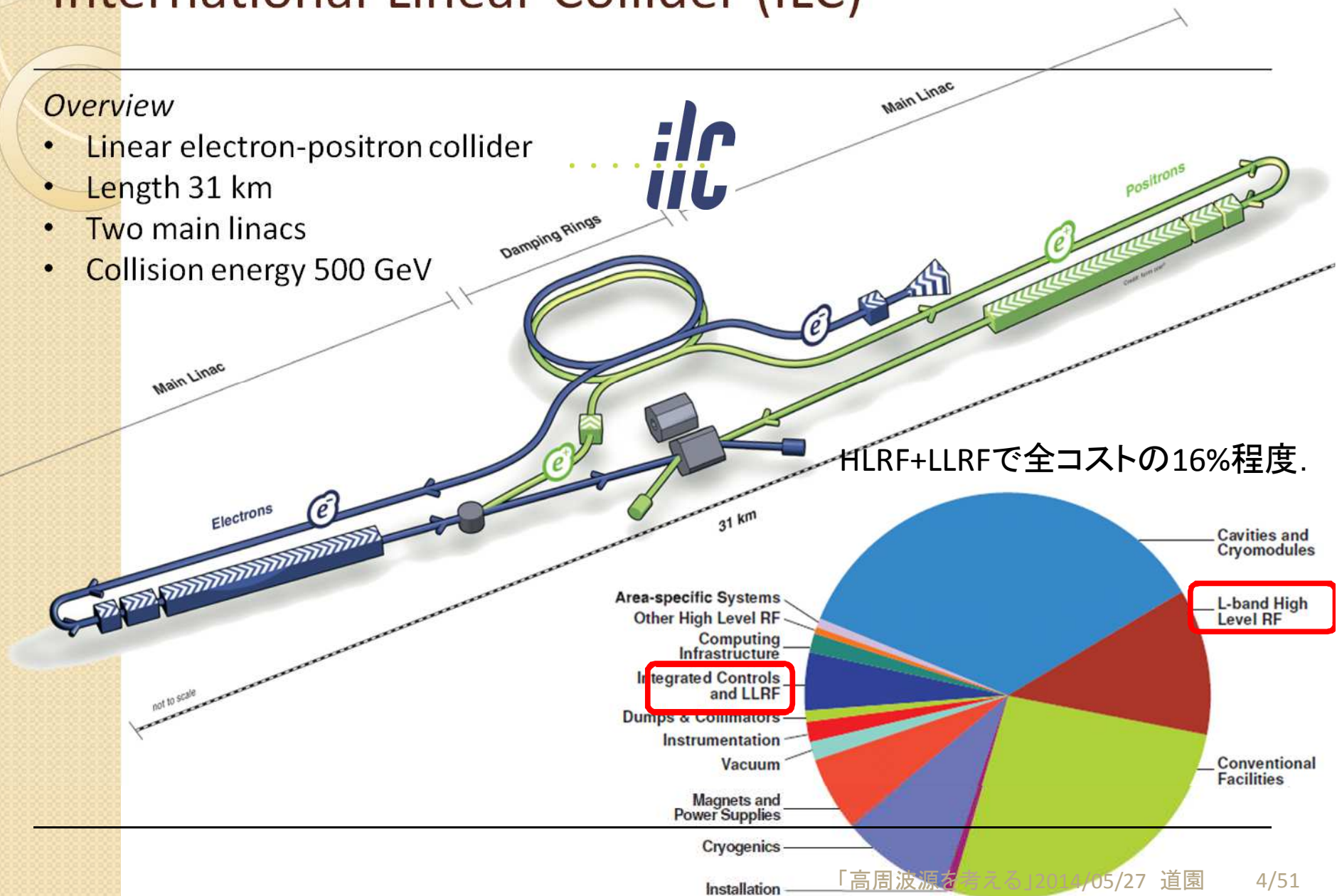
- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

International Linear Collider (ILC)

Overview

- Linear electron-positron collider
- Length 31 km
- Two main linacs
- Collision energy 500 GeV



Comparisons with other facilities

Parameter	ILC	FLASH	Euro XFEL	KEKB inj.	SLAC-SLC
Energy	250 GeV*2	1.2 GeV	17.5 GeV	8 GeV	50 GeV
Length	31 km	200 m	1500 m	600 m	5000 m
Cavity type	9-cell TESLA-type SSCs			NC	
Resonance frequency	1300 MHz			2856 MHz	
Cavity gradient (MV/m)	31.5±20%	20	23.6	40	
Loaded Q	3e6 ~ 10e6	~3e6	~3e6		
Number of cavities (e-,e+,RTML,ML)	15,814	42	928	240	
Cavities per klystron	39	16	32	4	
Number of klystrons	378	5	29	60	245
Beam pulse length	727 us	650 us	650 us		
Beam current	5.8 mA	3 mA	5.0 mA		

Comparisons with other facilities (2)

Parameter	ILC	FLASH	Euro XFEL	KEKB inj.	SLAC-SLC
Number of klystrons	378	5	29	60	245
Klystron power	10 MW			50 MW	67 MW
Efficiency	65%			45%	45%
RF width	1650 us	1300 us	1400 us	4 us	3.5 us
Repetition rate	5Hz	5 Hz	10 Hz	50 Hz	180 Hz
Average rf power	83 kW	65 kW	140 kW	10 kW	42 kW
Modulator peak	17 MW (120 KV*140A)				
Modulator average	140 kW	100 kW	240kW	33 kW	150 kW

空洞数は多いが、クライストロンの本数はSLAC-SLCの1.5倍程度。
1クライストロン用の電源の規模は、ほぼ5045のものと同一。(～150kW)

KEKおよび他の試験施設(1)

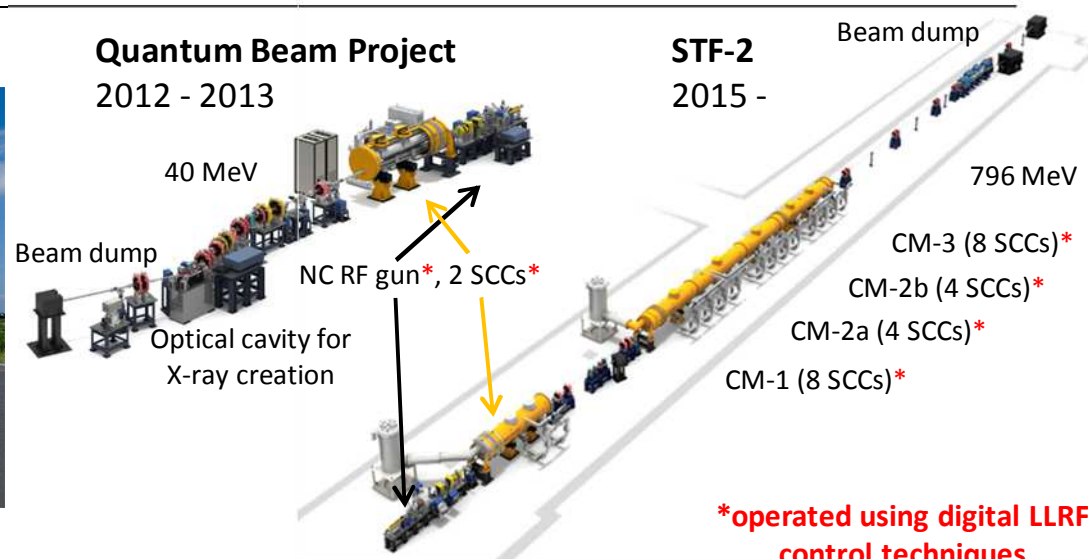
KEK Superconducting RF Test Facility (STF)



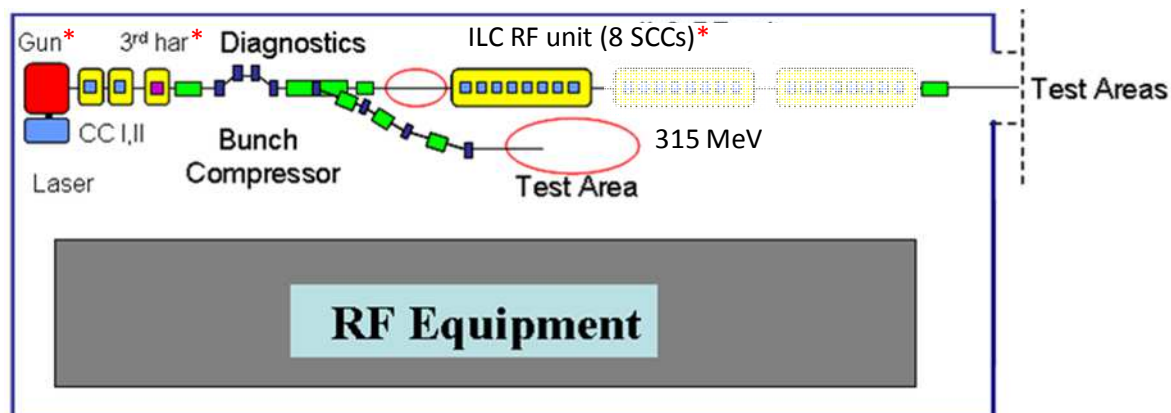
FNAL New Muon Lab (NML)



Quantum Beam Project
2012 - 2013



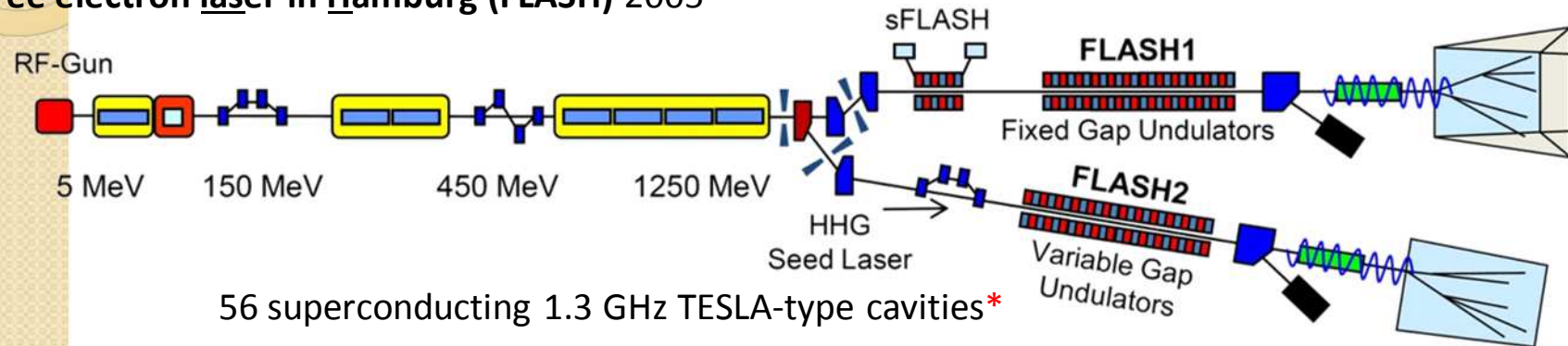
Advanced Superconducting Test Accelerator (ASTA) 2013 -



KEKおよび他の試験施設(2) -DESY

DESY (German electron synchrotron):

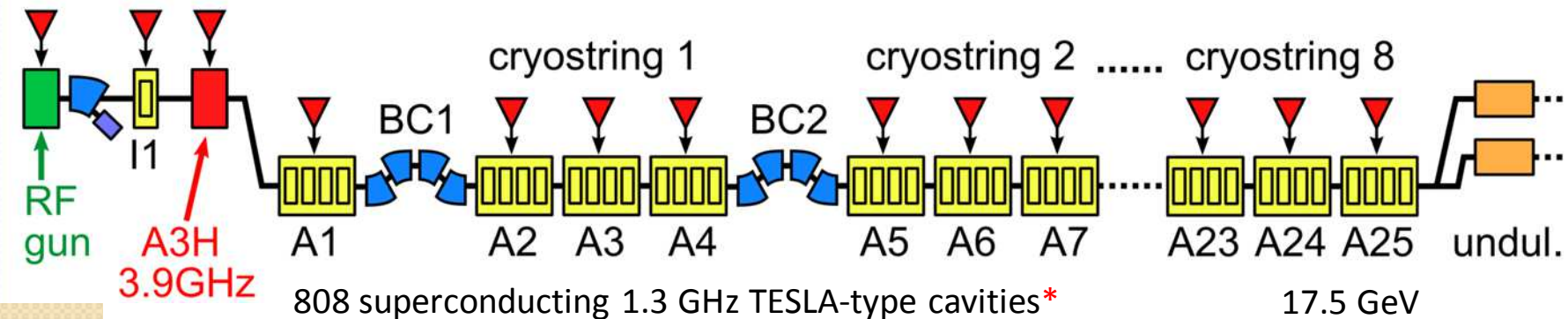
Free electron laser in Hamburg (FLASH) 2005 -



56 superconducting 1.3 GHz TESLA-type cavities*

*operated using digital LLRF control techniques

European X-ray Free Electron Laser (X-FEL) 2015 -



808 superconducting 1.3 GHz TESLA-type cavities*

17.5 GeV

目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設



- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

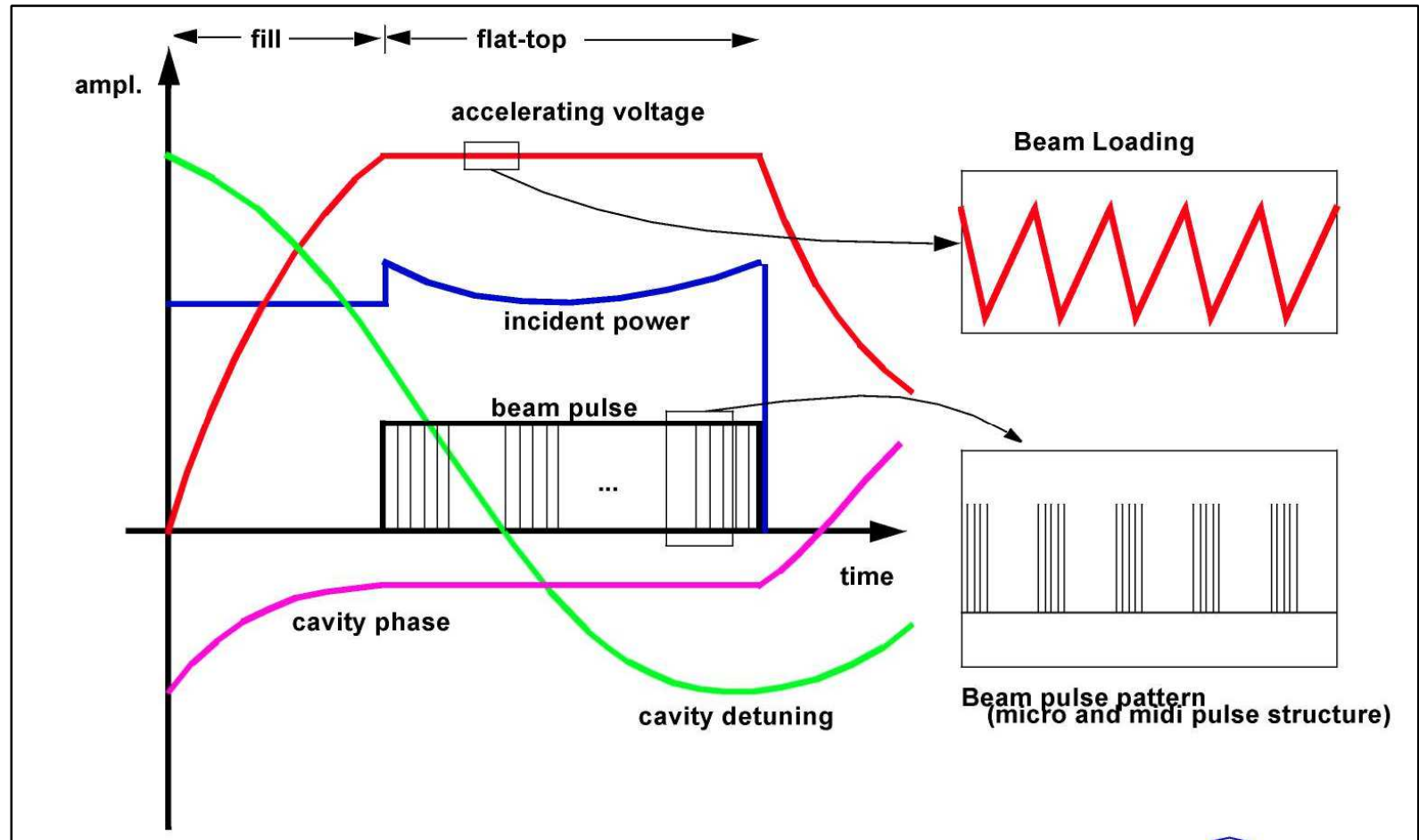
- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

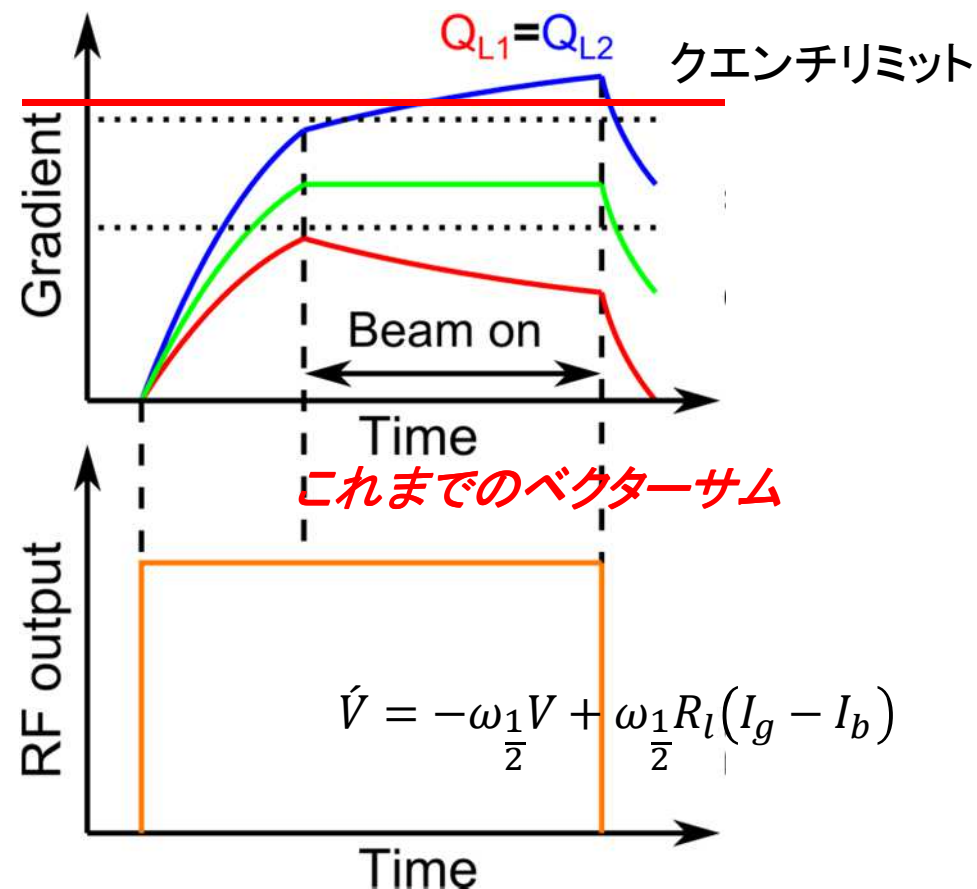
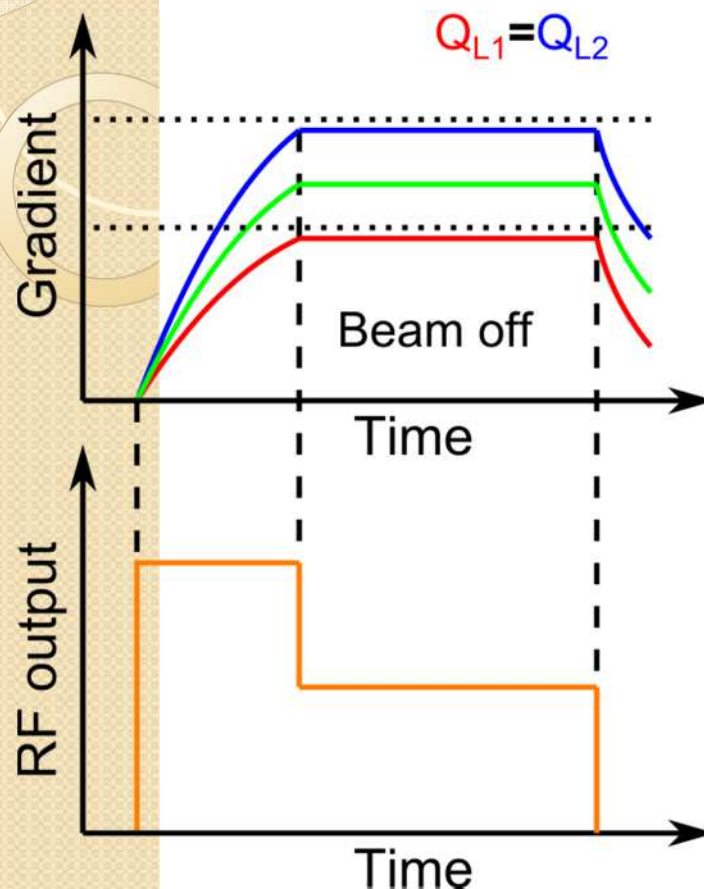
- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

パルス超伝導空洞の運転模式図



高周波波形 vector-sum制御



- 39空洞の加速電位の和が一定になるような制御(ベクターサム)
- 空洞をクエンチリミット付近(-5%)で使用する.
- ビーム安定化のためにも各空洞の電界はできるだけ一定としたい.

→**PkQI制御**で, ビーム電流毎に空洞入力電力・QIを変えてベクターサムをしながら各空洞の電界も一樣になるようにする.

ILCのRF安定度要求とデジタル高周波系

Table 3.19

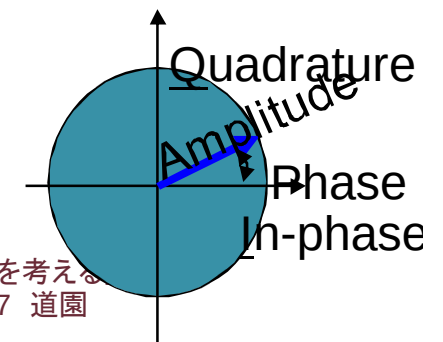
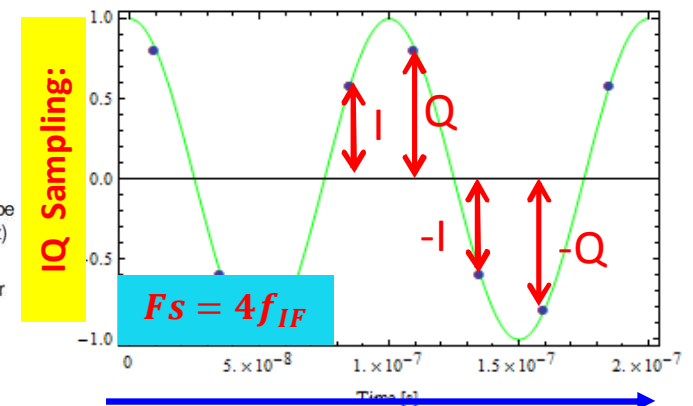
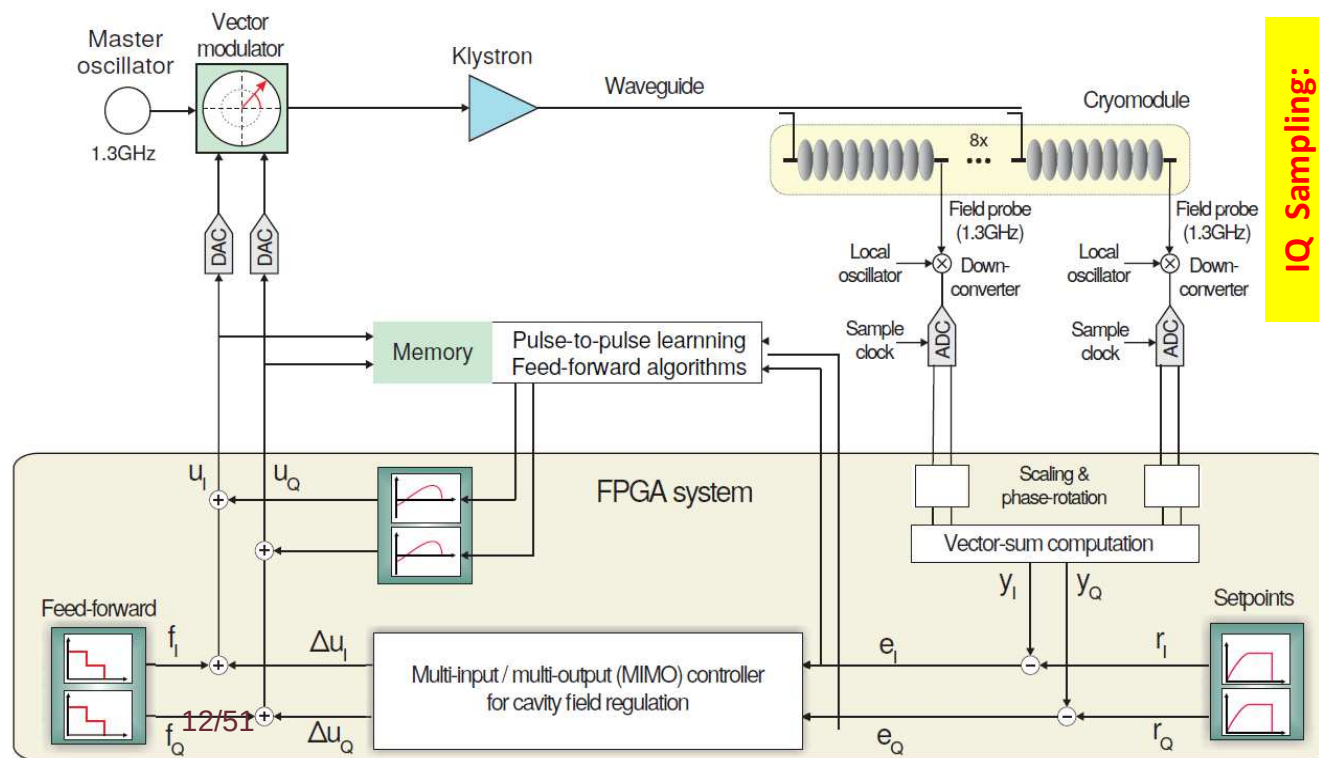
Bunch Compressor RF dynamic errors, which induce 2 % luminosity loss.

Error	RMS amplitude	RMS phase
All klystron correlated change	0.5 %	0.32°
Klystron to klystron uncorrelated change	1.6 %	0.60°

Table 3.20

ML RF dynamic errors, which induce 0.07 % beam energy change.

Error	RMS amplitude	RMS phase
All klystron correlated change	0.07 %	0.35°
Klystron to klystron uncorrelated change	1.05 %	5.6°



「高周波源を考える」
2014/05/27 道園

RF系の運転条件

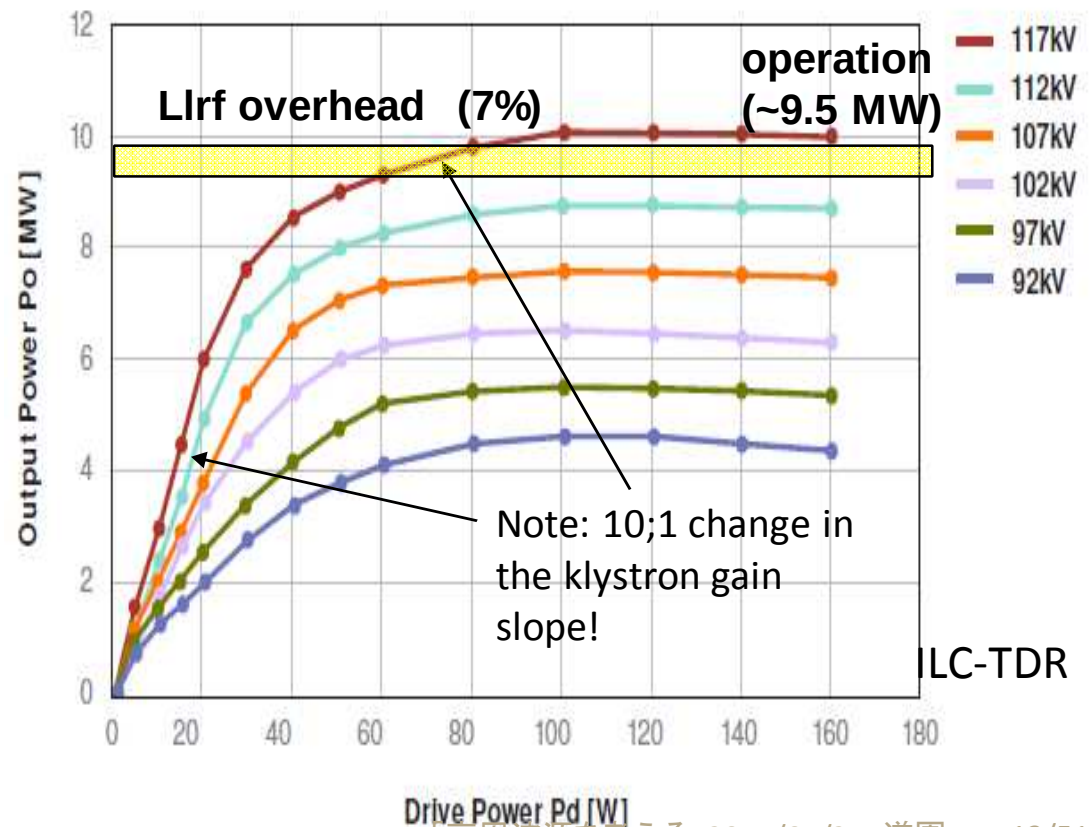
- As in TDR, llrf tuning overhead is 7% in power.
- LLRF overhead covers such as
(dynamic) microphonics, fluctuation of HV (klystron), beam current, ...
(static) Pk and QI tolerance, HV ripple, ...

飽和点付近でフィードバック運転した施設はない.

-> 飽和点付近での安定度評価

フィードバックの効きが悪くなる

-> 線形化アルゴリズムの追加が必要



Drive Power Pd [W]

目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

➡ 2.大電力高周波系 (HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系 (LLRF)

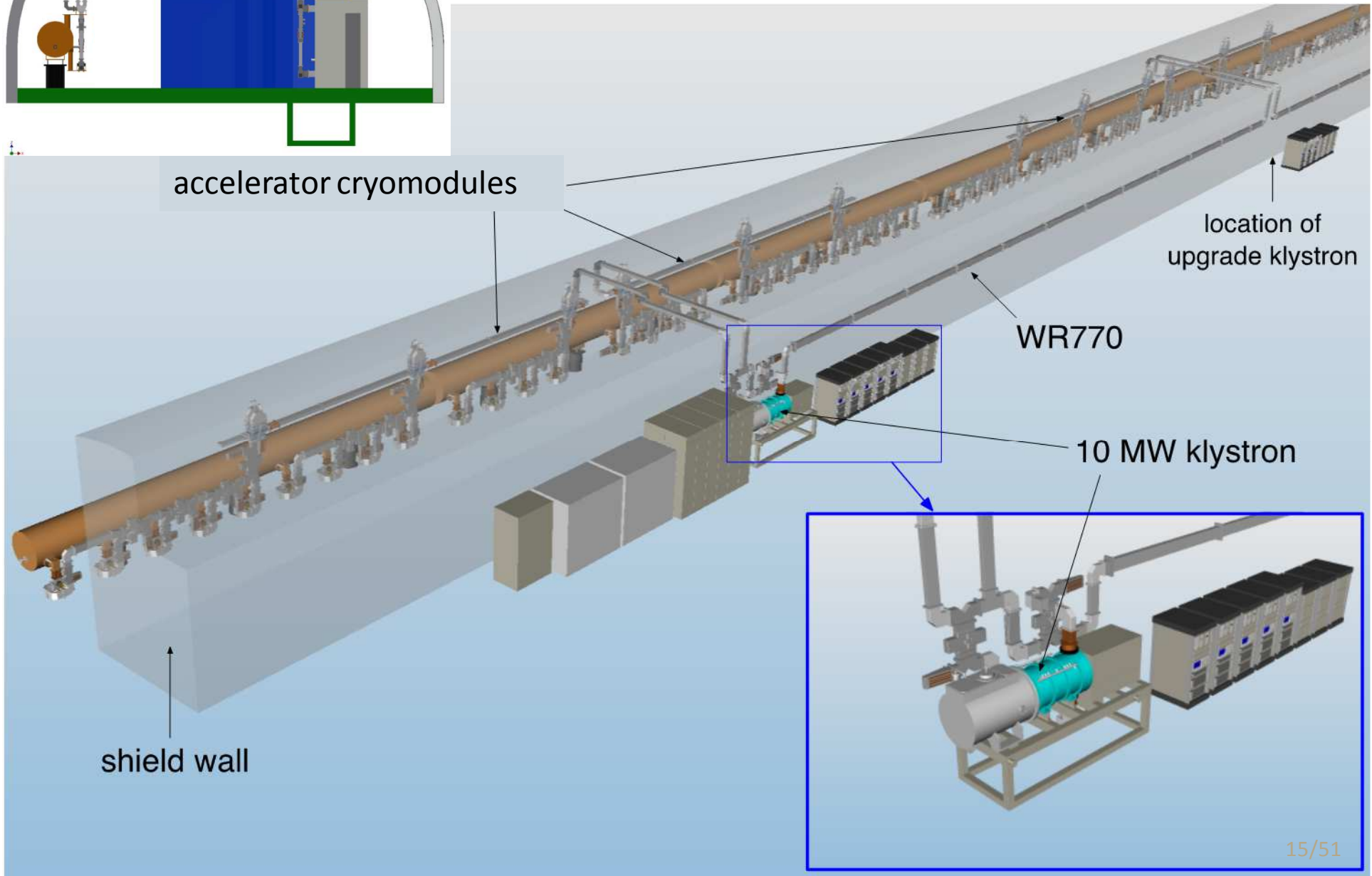
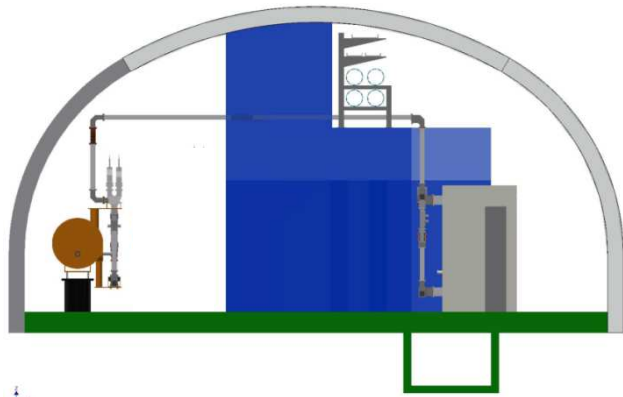
- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験 (9mA試験)

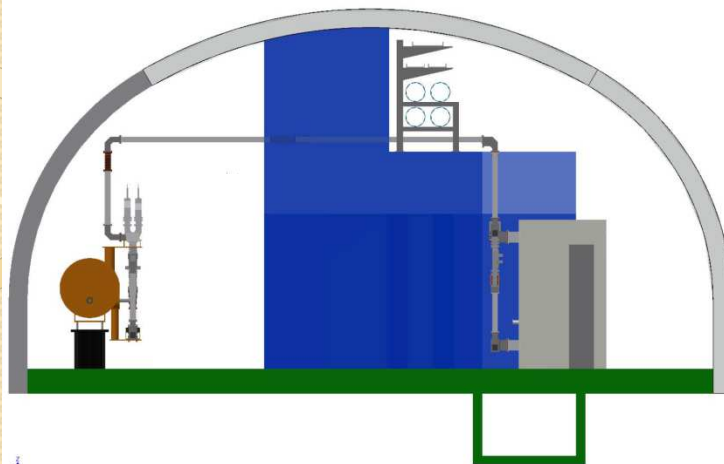
- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

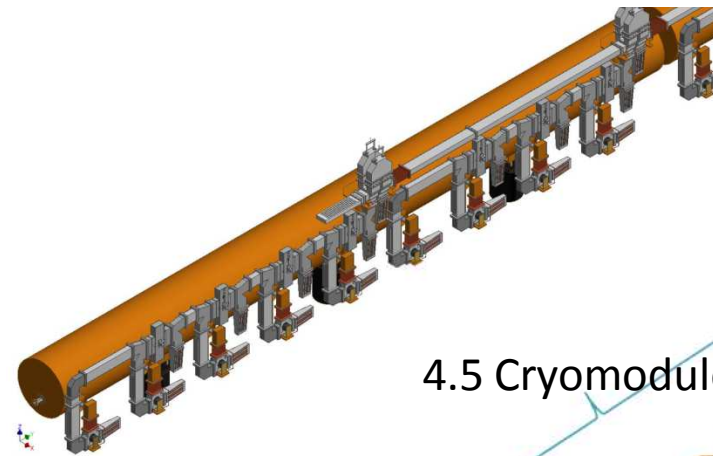
Layout



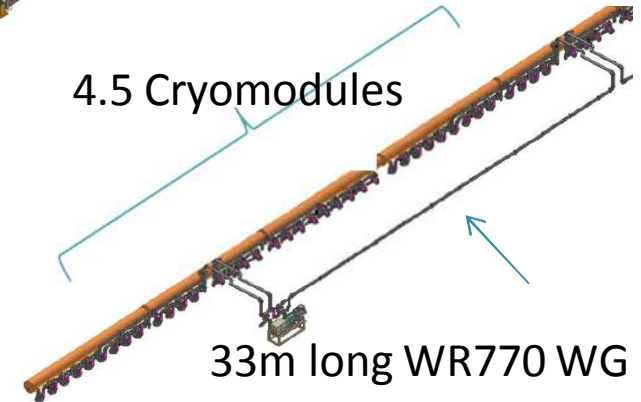
Layout of Recent DKS



Layout of Kamaboko Tunnel

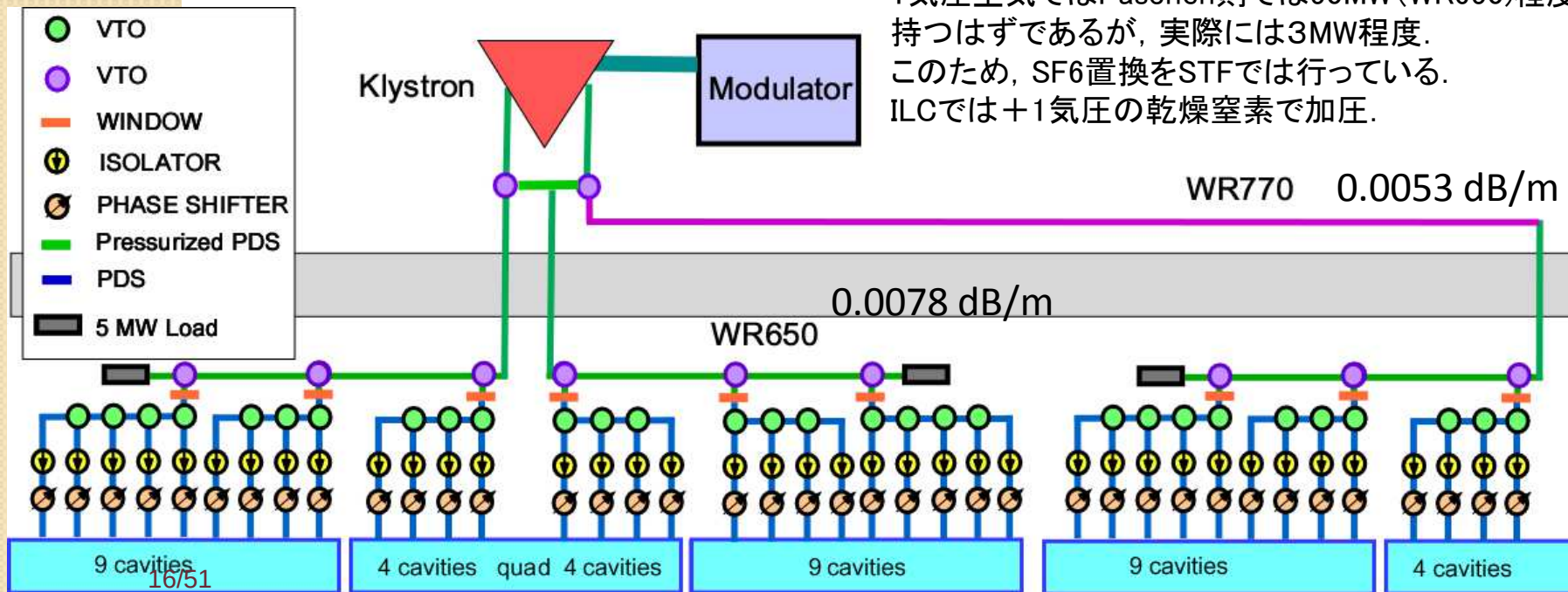


4.5 Cryomodules



33m long WR770 WG

1気圧空気ではPaschen則では50MW (WR650)程度持つはずであるが、実際には3MW程度.
このため、SF6置換をSTFでは行っている.
ILCでは+1気圧の乾燥窒素で加圧.



Installation Model in XFEL

Layout of Cryomodule with PDS in XFEL



クライオモジュールに導波管系を組み込み、そのまま設置する。
Euro-XFELでも採用されている方法。

valery.katalev@desy.de

Workshop on high power RF 06.05.2010

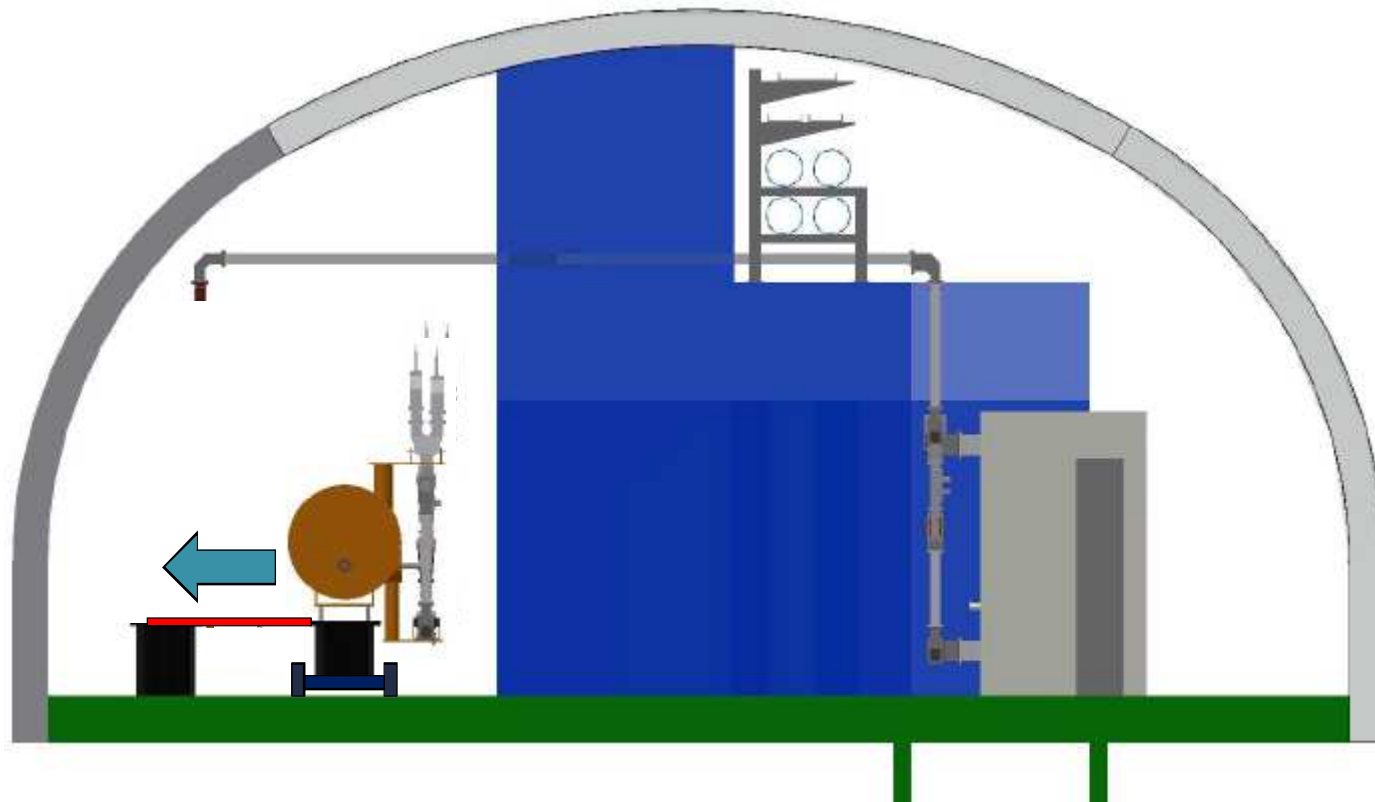


valery.katalev@desy.de

Workshop on high power RF 06.05.2010

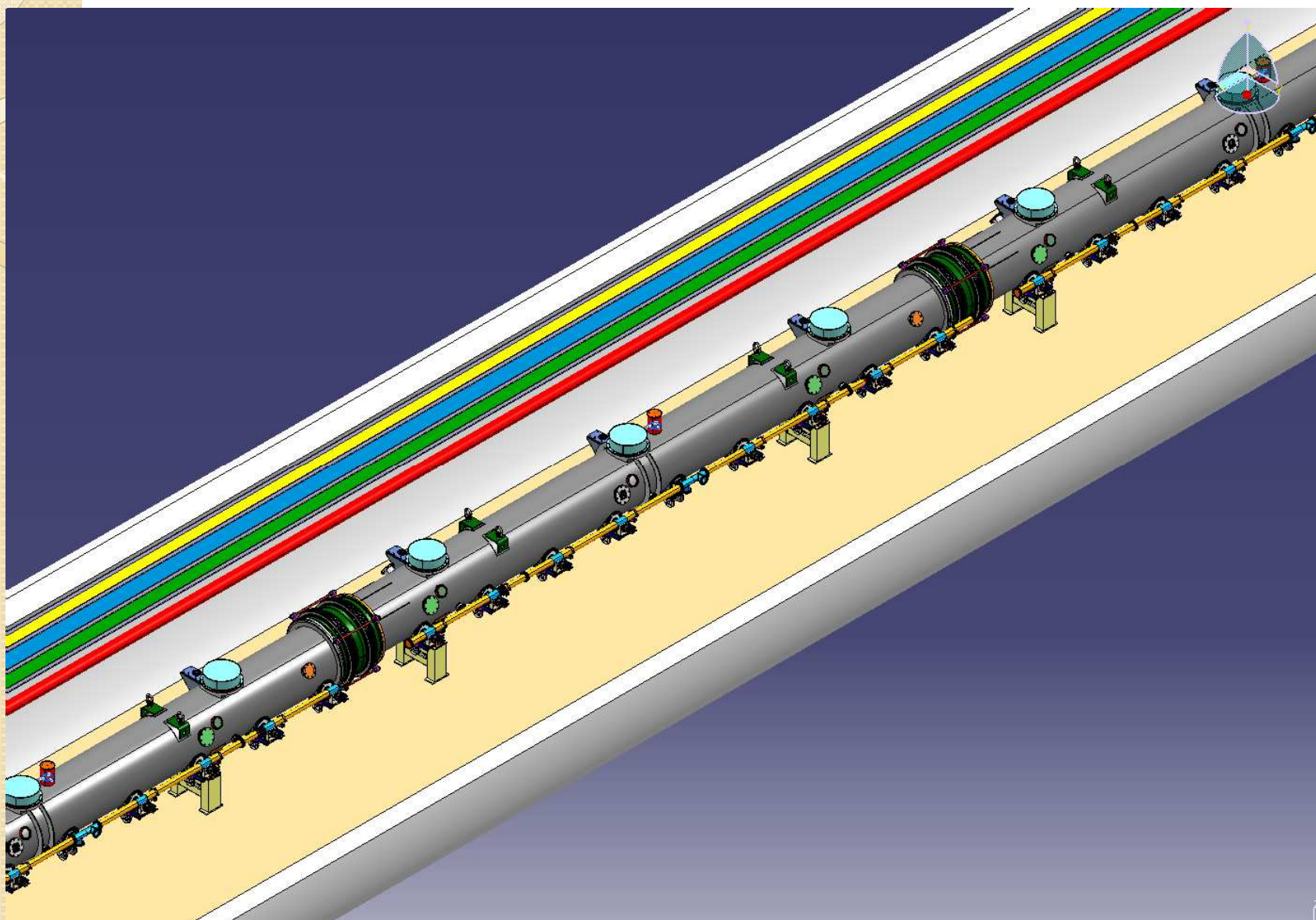


Installation of the Cryo-PDS



2~3 ideas for transportation of cryomodule-PDS Assembly

- For two girders case, assembly on the carrier girder is carried by vehicle and shifted to locally fixed girder
- Assembly on the girder system is carried by roller system



RDRでのクライオモジュールのインストール案

Keith Kershaw, CERN

ILC CFS Baseline Technical Review - Handling and Installation, 23

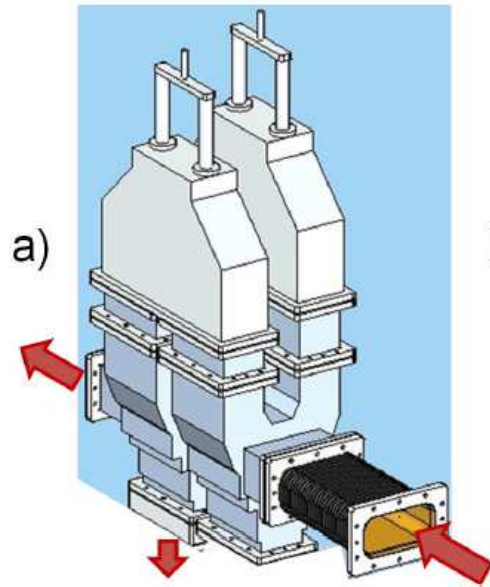
March 2012

「高周波源を考える」2014/05/27 道園

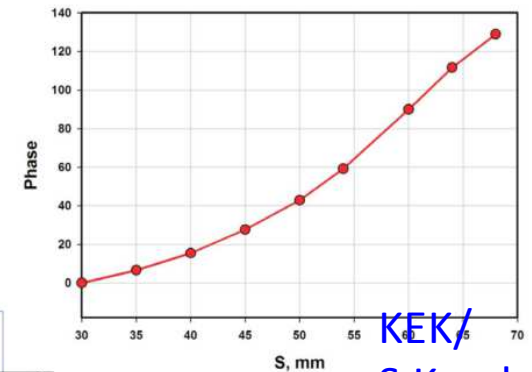
19/51

大電力分配器, 移相器

SLAC C. Nantista
From ILC TDR



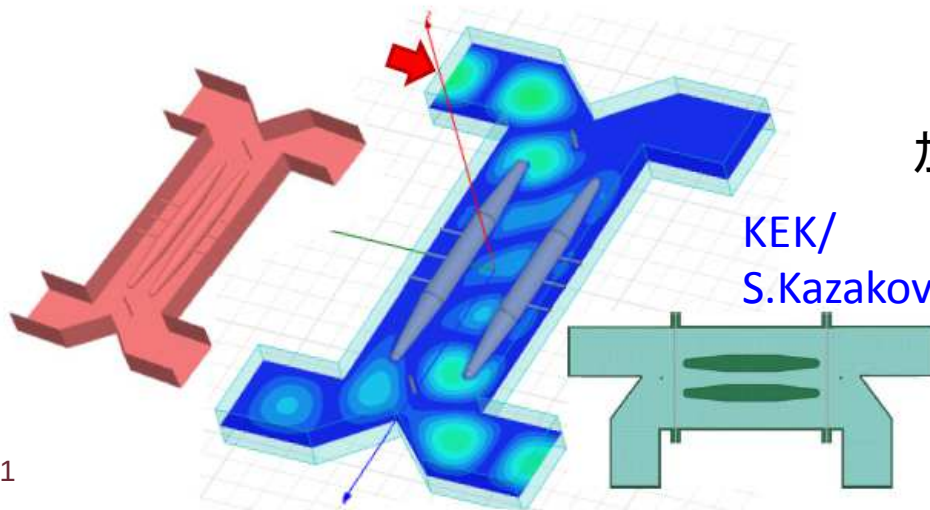
MagicT+移相器+MagicT
加圧可能



KEK/
S.Kazakov

Phase shifter,
S11 for different displacement S

加圧対応ではないか構造がシンプル



KEK/
S.Kazakov

「高周
2014」

目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系



- クライストロン

- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

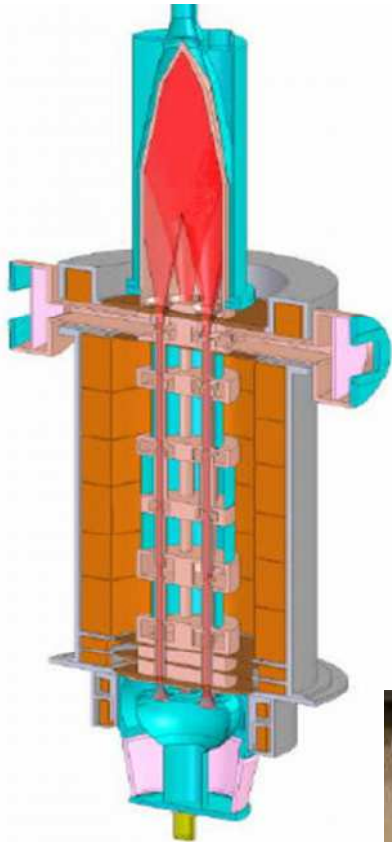
- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

マルチビームクライストロン



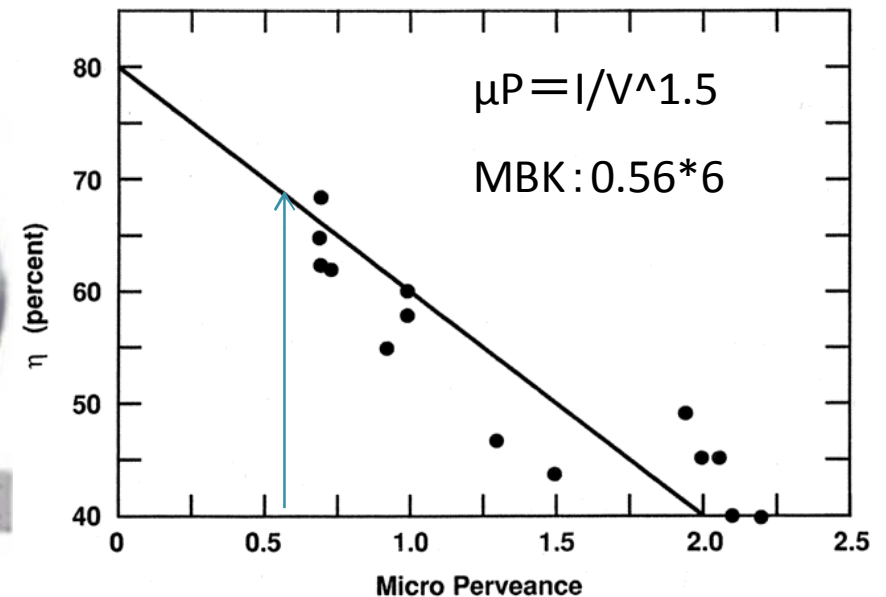
Parameter	Specification
Frequency	1.3 GHz
Peak power output	10 MW
RF pulse width	1.65 ms
Repetition rate	5.0 (10) Hz
Average power output (5 Hz)	82.5 kW
Efficiency	65 %
Saturated gain	> 47 dB

Euro-XFELと同じもの. 東芝, Thalesが供給している.

James Benford, John Swegle, Chapter 10 in High-power microwaves, Artech House, Boston, 1992.



東芝WEBより引用



電力収支

Cavity and Local Power Distribution		DKS
<i>Mean beam power per cavity</i>		(kW)
		189.18
Extra beam power for $\pm 20\%$ gradient spread	5.30 %	199.21
s.s. reflection for $\pm 20\%$ gradient spread	6.00 %	211.16
Required LLRF overhead	7.00%	225.95
Local PDS average losses	8.00 %	245.59
Multiply by number of cavities fed as a unit	39	9578.1
<i>Required local PDS RF input power</i>		9578.1
Power Combining & Transport (DKS)		(MW)
<i>RF power to local PDS</i>		9.578
Combining/splitting and shielding penetrations	1.10 %	9.6847
WR770 run loss/3	1.40 %	9.8222
<i>Required power from klystron (DKS)</i>		9.822

目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン



- 電源

3.低電力高周波系

- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

電源仕様

Parameter	Unit	Specification
Output voltage	kV	120
Output current	A	140
Pulse width	ms	1.65
Pulse repetition frequency	Hz	5 (10)
Max. average power	kW	139
Output pulse flat-top	%	± 0.5
Pulse-to-pulse voltage fluctuation	%	± 0.5
Energy deposited into klystron during a gun spark	J	< 20



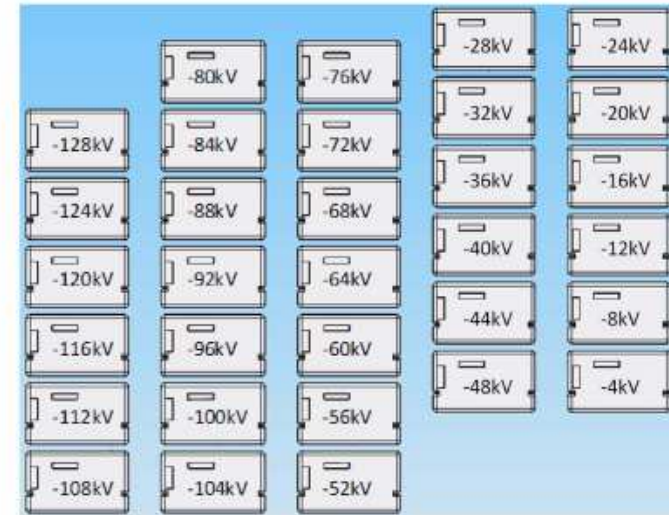
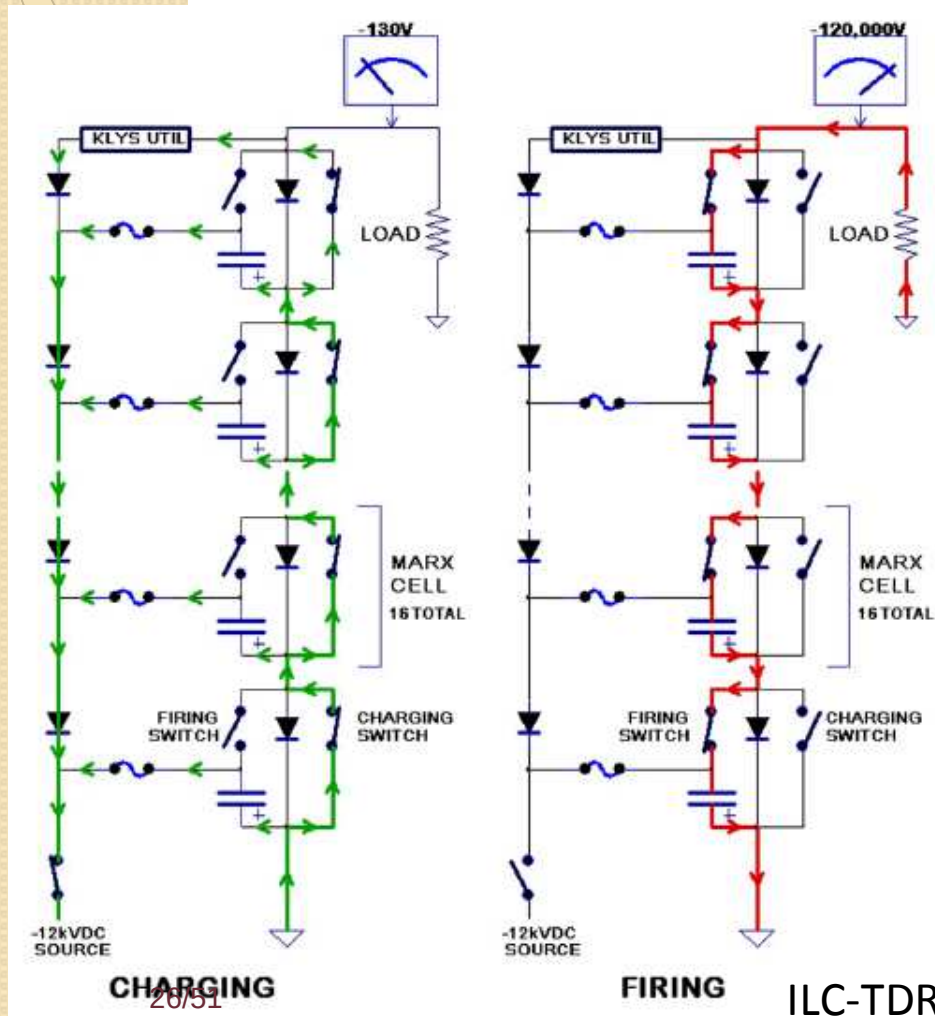
ILC-TDR

ILC-TDR

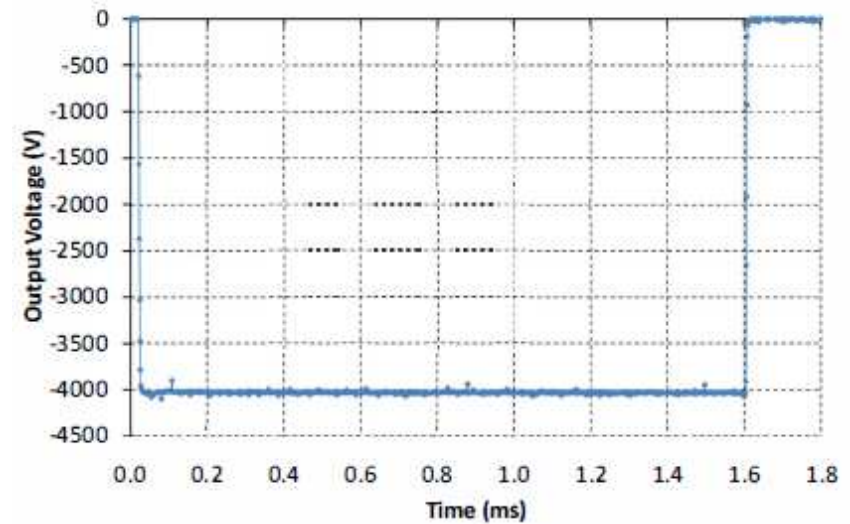
Parameter	Unit	Specification
SLAC P2 Marx DC to pulse flattop efficiency	%	95 ± 1
Assumed charging supply AC to DC efficiency	%	95
Usable power delivered to klystron	kW	138.6
Power delivered to collector during pulse rise and fall	kW	0.5
Power dissipated to air inside of modulator enclosure	kW	7.1
Power dissipated in the DC chargers	kW	7.4

Marx電源

基本原理は、コンデンサへの並列充電、直列放電。
タイミングを制御することで、フラット出力へ。



M.A.Kemp, SLAC-PUB-14537



「高周波源を考える」
2014/05/27 道園

目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

➡ 3.低電力高周波系(LLRF)

- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

デジタルLLRFシステム

アナログFB(~100ns): ~1%
高速だが, 柔軟性や複雑な処理に劣る

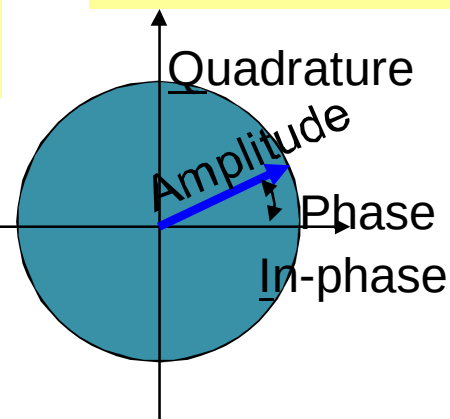
↓
DSP(~数μ秒): ~0.1%
超伝導空洞には良いが, 常伝導には長すぎる

↓
FPGA(Field Programmable Gate Array、~数100ns): <0.1%
(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)

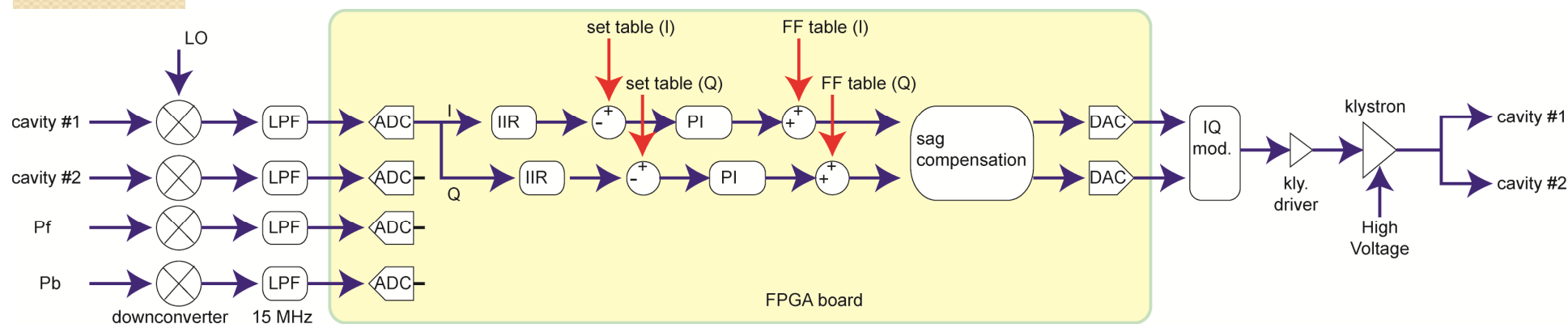
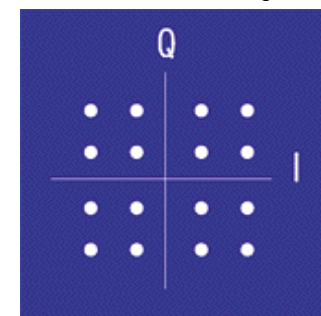
	種類	振幅安定度	位相安定度
J-PARC,SNS	プロトン	±1%	±1度
ILC	電子	0.1%	0.1度
ERL/Euro-XFEL	電子	0.01%	0.01度

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.

デジタル通信よりはるかに高精度のシステムが必要



3,600,000点⇔16QAM



ILCでのLLRF構成

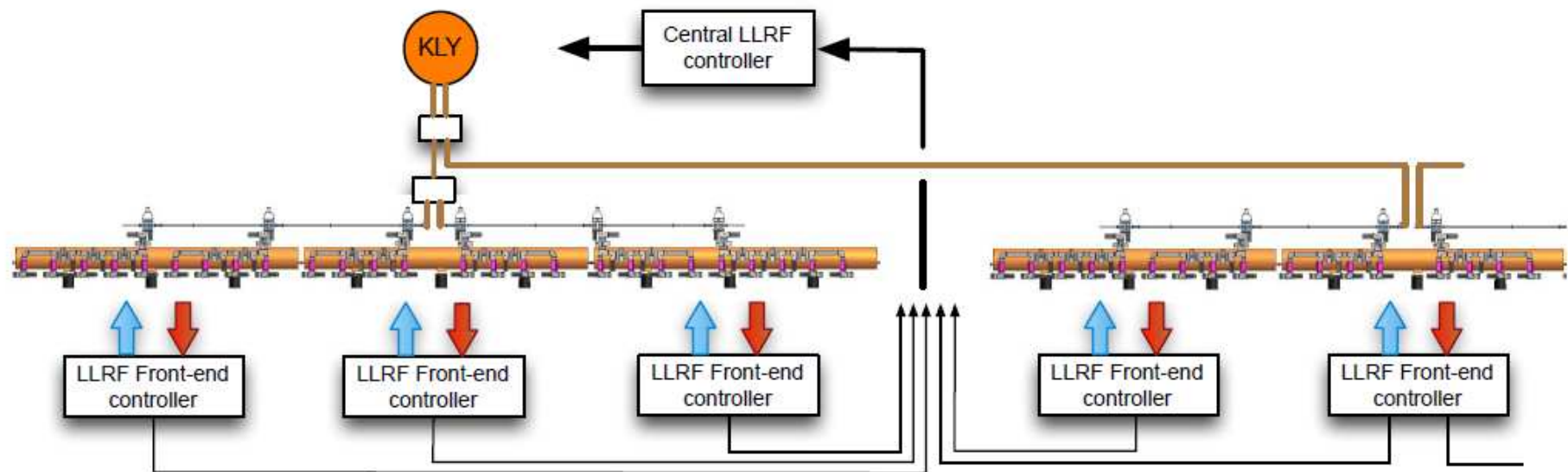


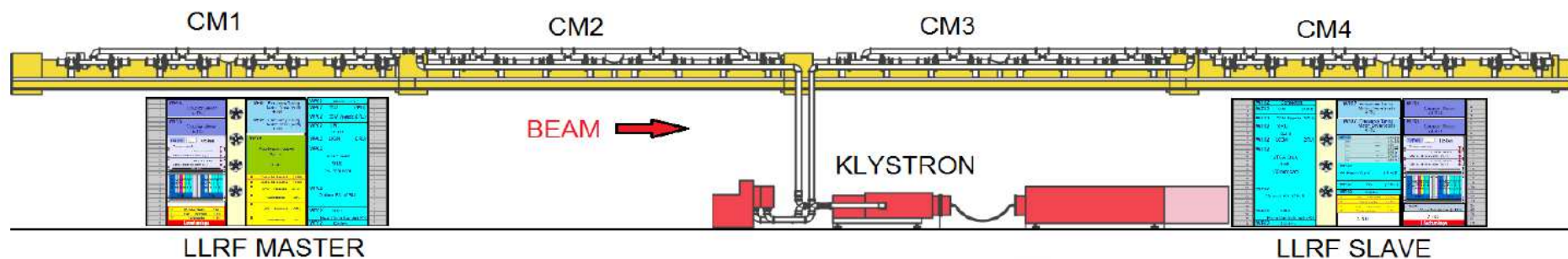
Figure 3.43. Implementation block diagram for the DKS LLRF system



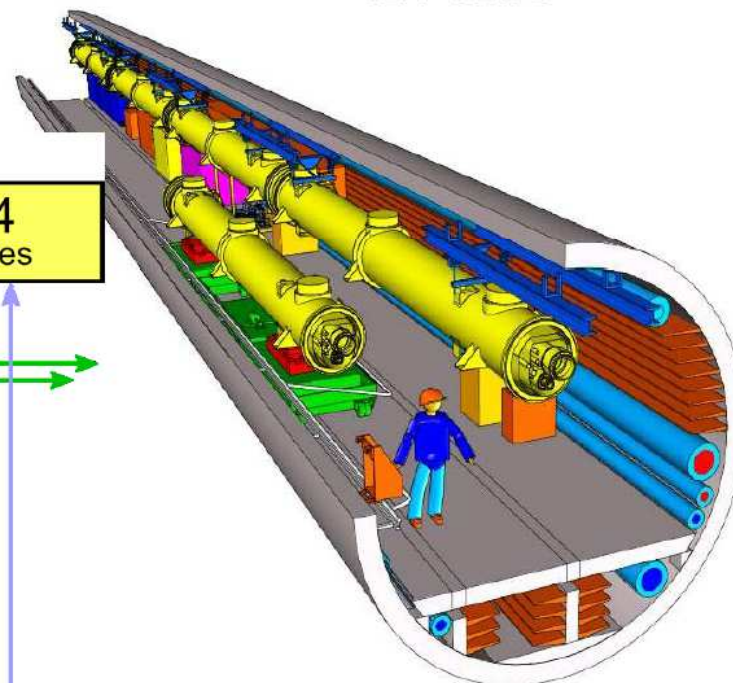
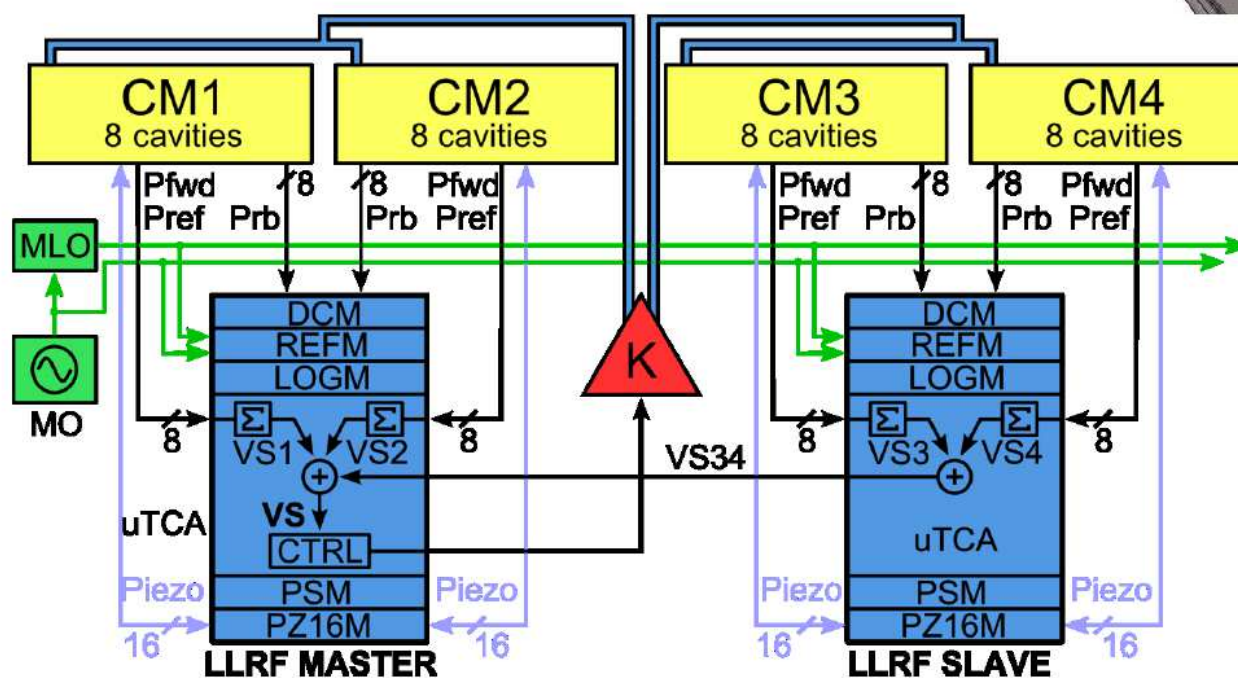
多チャンネルのADCを持つボードを複数配置し、Master/Slave間を光通信で結び、ベクターサム制御を行う。

EuroXFELで採用されている方法。

LLRF System Description



RF station: semi-distributed LLRF system



目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

- システム
- - ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

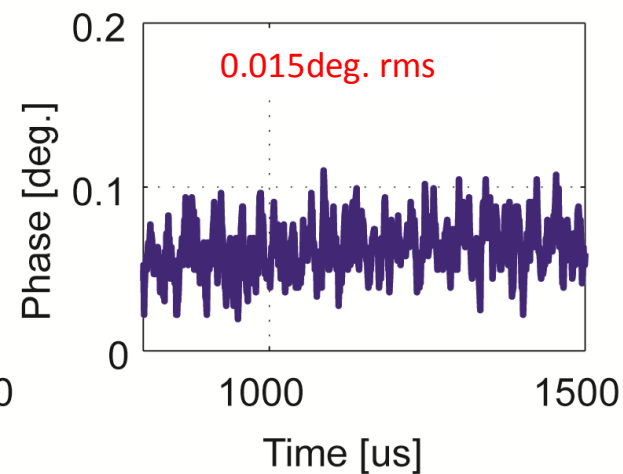
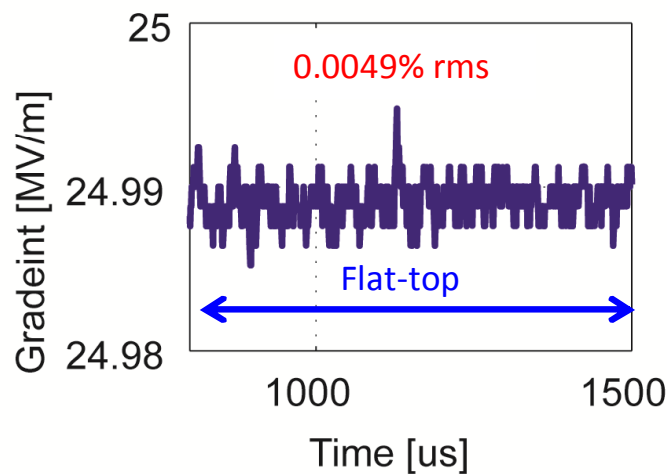
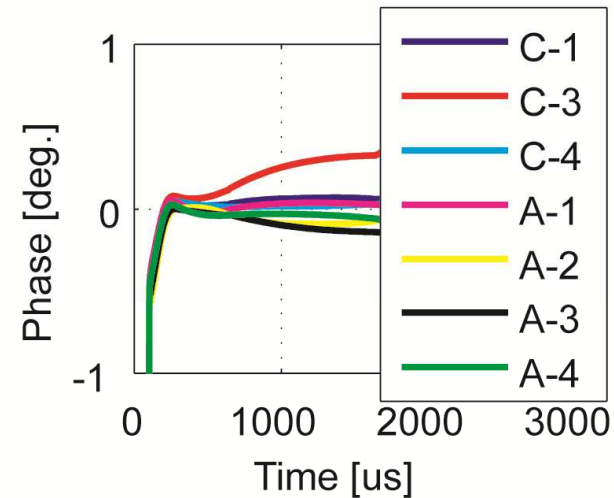
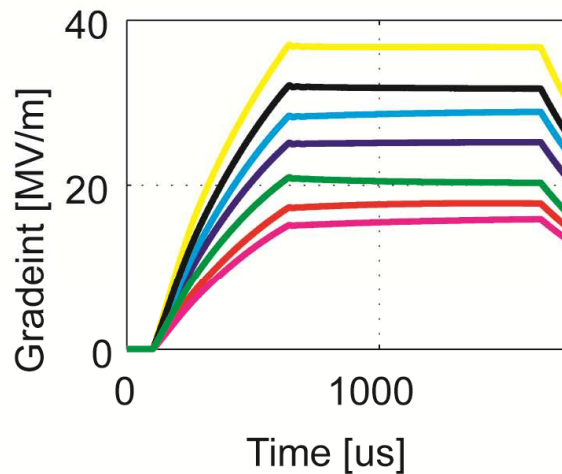
4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

Result of vector sum operation

Average acceleration field=25 MV/m



These results satisfy the requirement of ILC, 0.07% and 0.32°.

目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

- システム
- ベクターサム性能



- *PkQI*

- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

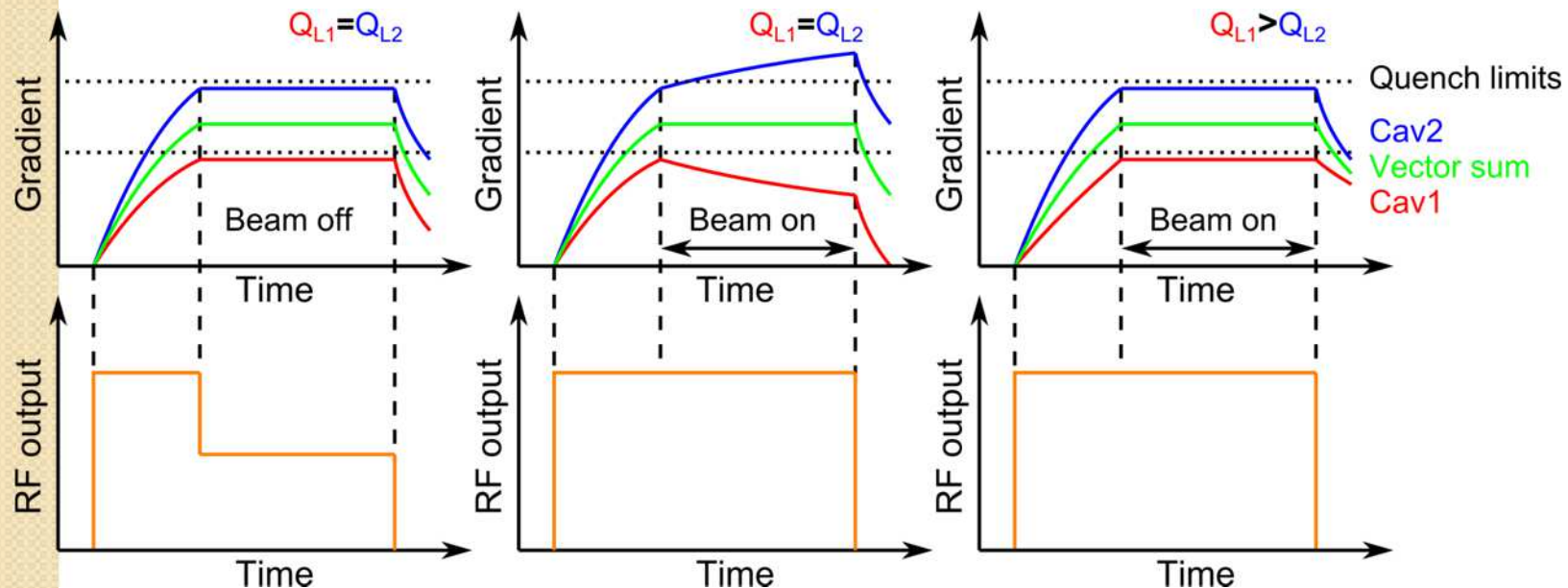
- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

Why PkQL Operation?

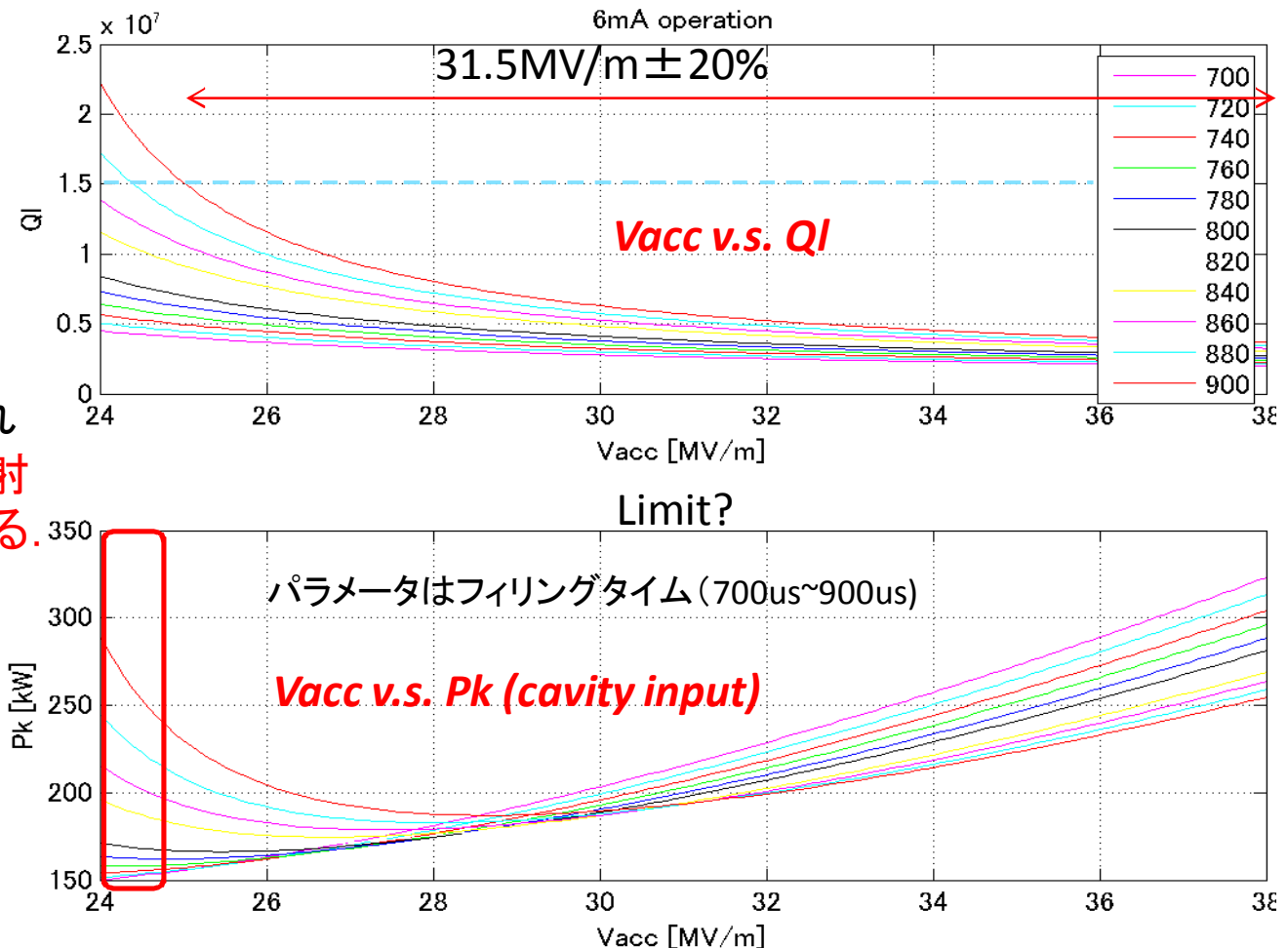


- At ILC multiple cavities are driven by a single klystron
 - Cavities have different individual quench limits
 - Goal is operation with flat gradients 5% below individual quench limits over whole flattop
 - “Effect of Cavity Tilt and RF Fluctuations to Transverse Beam Orbit Change in ILC Main Linac”, [K. Kubo, Jan. 2010]
 - Individual gradients due to individual driving powers (P_k s)
 - Operation with single klystron and beam loading lead to gradient tilts
- PkQL Control (individual control of cavity driving powers (P_k s) and loaded Q values (Q_L s))

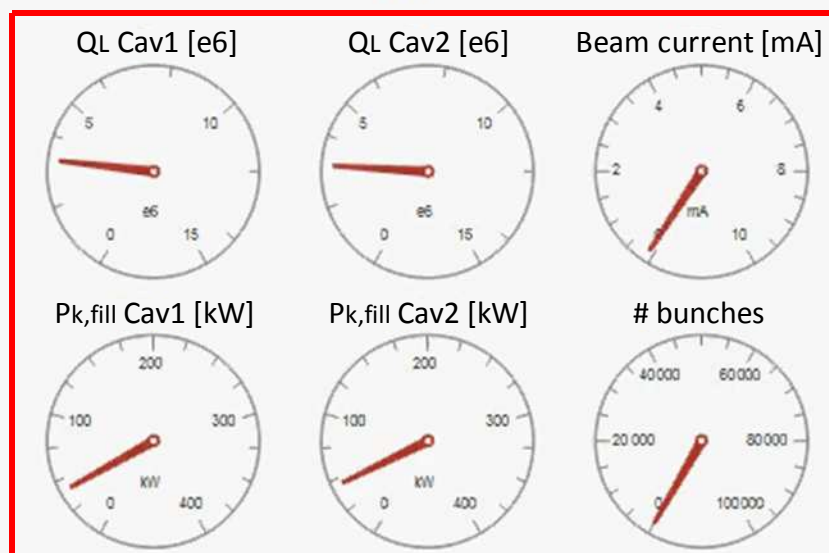
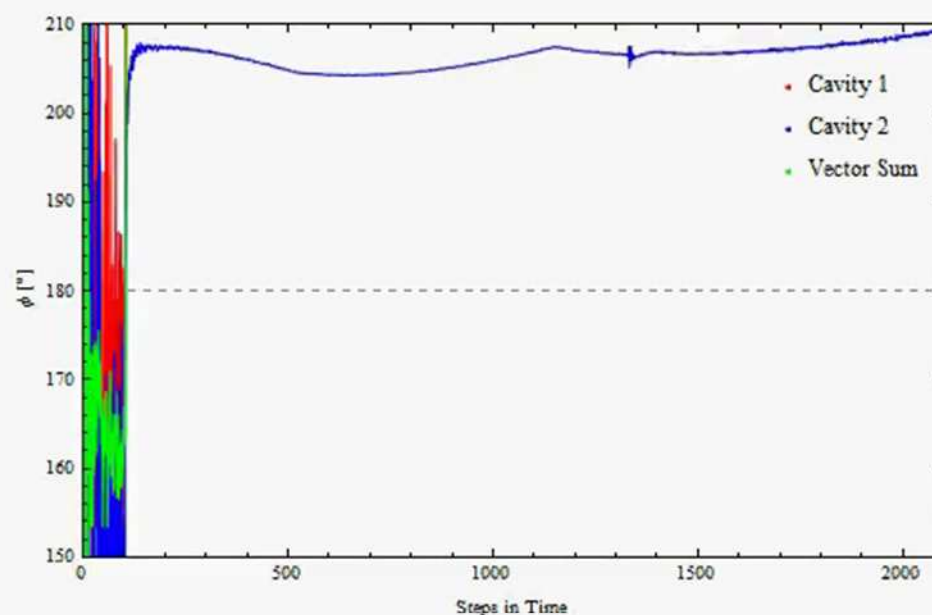
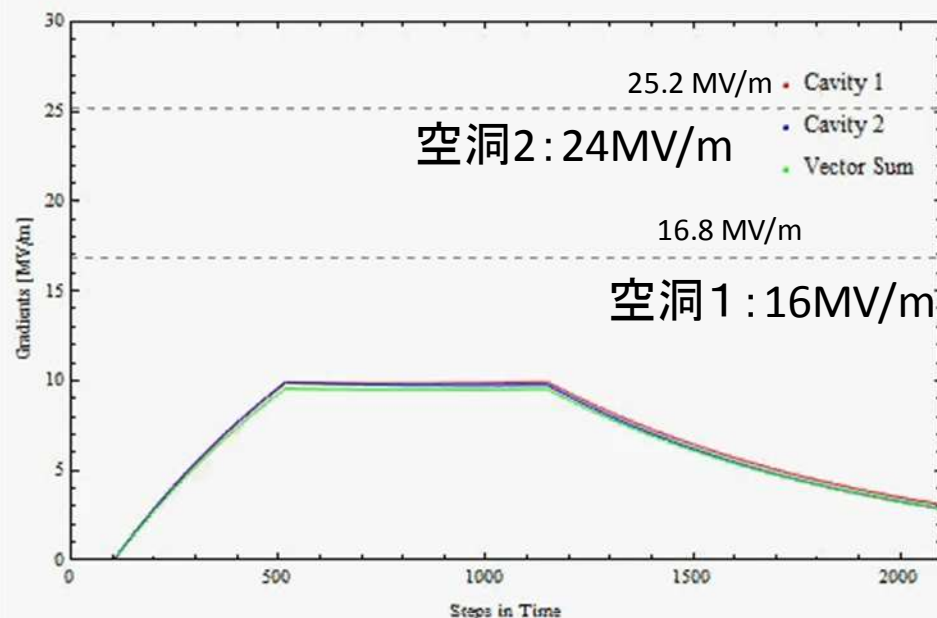


PkQI制御

PkQIでは、投入高周波は
ビーム加速にすべて使われ
るわけではなく、一部は反射
電力となり、電力効率は劣る。
(平均すれば～6%程度)



- QIの平均値は6e6程度
 - QIが高くなるとマイクロフォニックスなどの影響で離調が変わった時に不安が残る.
 - ピエゾを使ったローレンツ力補正も厳しくなる.
- QI=2e7 $\leftrightarrow$ f1/2=33Hz. この程度で離調が45度となる.
- 高電界の空洞はQI~3e6, 低電界側の空洞は1.5e7程度.



1. 空洞1,2のQIを設定
2. Pkを設定する.
3. パルス幅を短くする
4. 16MV/m, 24MV/mになるよう設定
5. ビーム運転(フィードバック)開始
6. フラットトップを伸ばす

P_kQ_L Operation Stabilities



RF Parameter

$V_{\text{Cav1}} = 16 \text{ MV/m}$

$V_{\text{Cav2}} = 24 \text{ MV/m}$

$Q_{L1} = 9e6$

$Q_{L2} = 3e6$

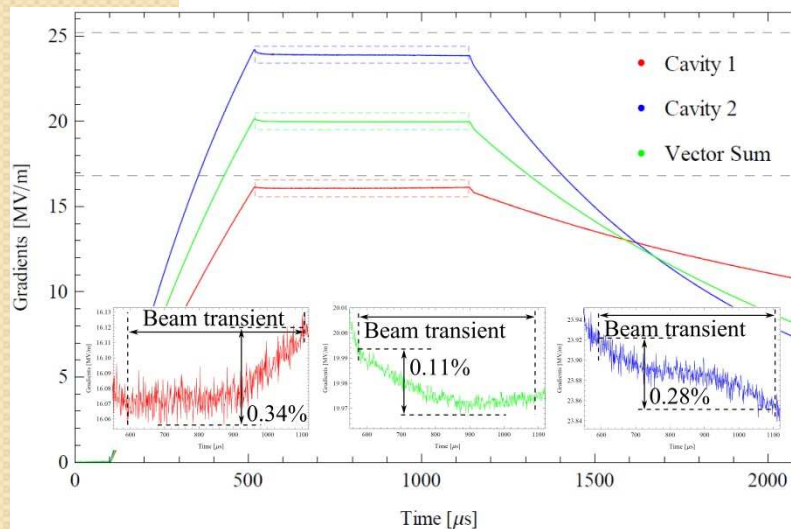
Filling time = 410 μs

*Beam compensation active

Beam Parameter

Pulse Length = 615 μs

Average current = 6.4 mA



	P _k Q _L	QB nominal	
Beam	6.4 mA* (60 mins)	6.6 mA* (60 mins)	Off (20 mins)
$\Delta A/A$ (cav1)	0.041%rms	-	0.042%rms
$\Delta A/A$ (cav2)	0.031%rms	-	0.045%rms
$\Delta A/A$ (vector sum)	0.009%rms	0.009%rms	0.008%rms
$\Delta\phi$ (cav1)	0.042°rms	-	0.027°rms
$\Delta\phi$ (cav2)	0.031°rms	-	0.021°rms
$\Delta\phi$ (vector sum)	0.009°rms	0.009°rms	0.008°rms

All stabilities are estimated for the beam transient time.

- **First actual P_kQ_L operation**
- **Fulfills ILC stability requirements ($\Delta A/A = 0.07\%$, $\Delta\phi = 0.32^\circ$)**
- **Procedure applicable for ILC (39 cavities)**

目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

- システム
- ベクターサム性能
- PkQI



- High QI

- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

High Q_L Operation



RF Parameter

$V_{\text{Cav1}} = 20 \text{ MV/m}$

$V_{\text{Cav2}} = 20 \text{ MV/m}$

$Q_{L1} = 2e7$

$Q_{L2} = 2e7$

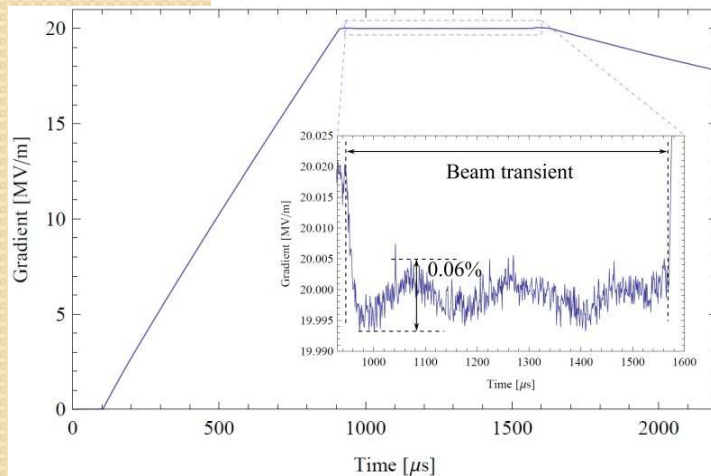
Filling time = 800 μs

*Beam compensation
active

Beam Parameter

Pulse Length = 615 μs

Current = 6.1 mA



	High Q _L		QB Nominal	
Beam	6.1 mA* (60 mins)	Off (20 mins)	6.6 mA* (60 mins)	Off (20 mins)
$\Delta A/A$ (cav1)	0.121%rms	0.030%rms	-	0.042%rms
$\Delta A/A$ (cav2)	0.160%rms	0.032%rms	-	0.045%rms
$\Delta A/A$ (vector sum)	0.011%rms	0.008%rms	0.009%rms	0.008%rms
$\Delta\phi$ (cav1)	0.033°rms	0.027°rms	-	0.027°rms
$\Delta\phi$ (cav2)	0.028°rms	0.027°rms	-	0.017°rms
$\Delta\phi$ (vector sum)	0.015°rms	0.014°rms	0.009°rms	0.008°rms

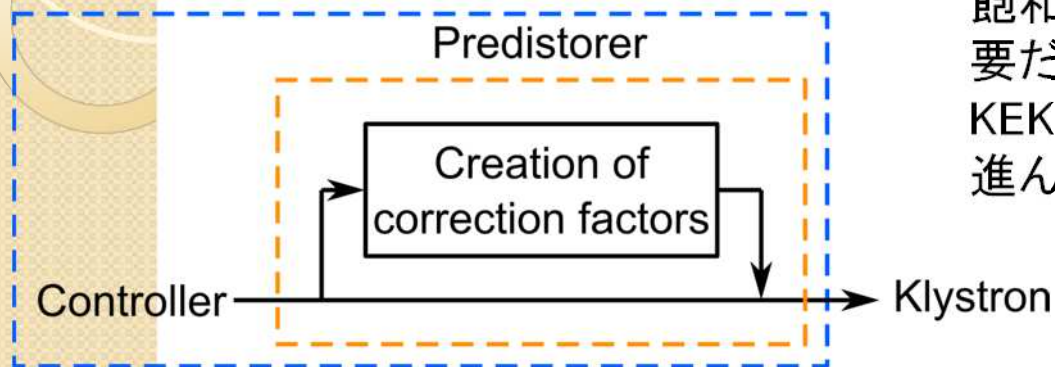
All stabilities are estimated for the beam transient time.

- **Detuning stayed constant during 1h operation**
→ **Microphonics are not severe**
- **Fulfills ILC stability requirements ($\Delta A/A = 0.07\%$, $\Delta\phi = 0.32^\circ$)**

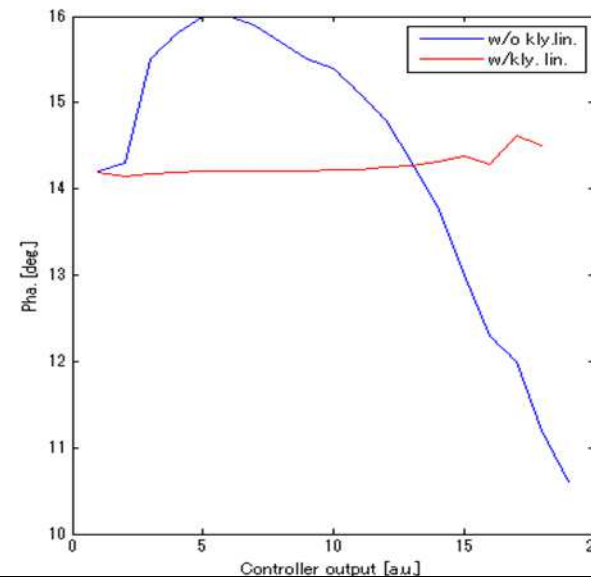
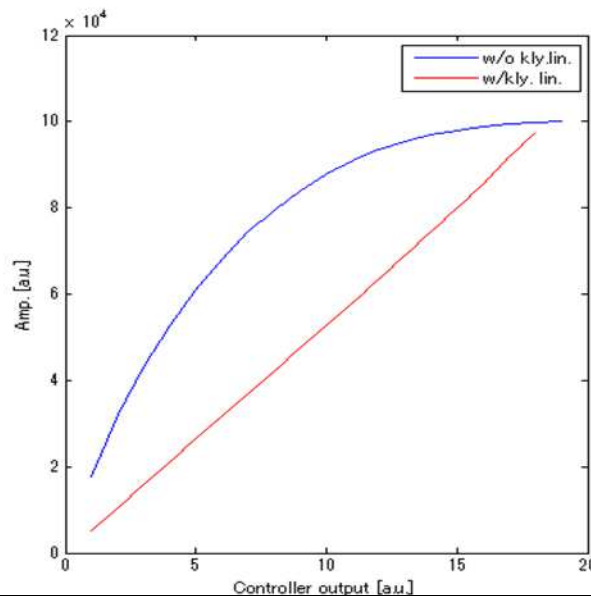
Klystron Linearization Package for μ TCA.4 at DESY



FPGA



飽和点付近で使うため、線形化は必要だが、それについては KEK, DESY, FNAL それぞれで開発が進んでいる。



目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

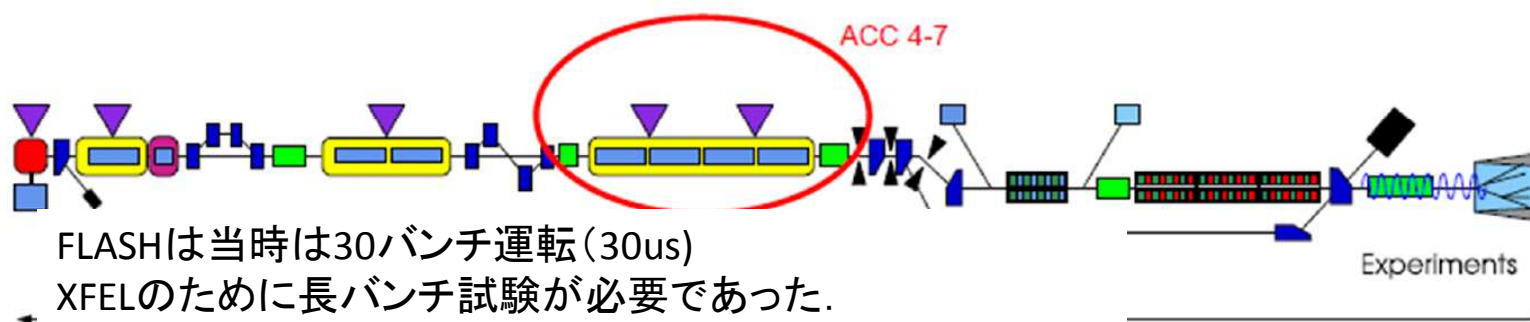
➡ 4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

- ロングバンチ
- Near Saturation

5.将来展望

Motivation: 9mA experiment

TTF2/FLASH: unique worldwide facility



FLASHは当時は30バンチ運転(30us)

XFELのために長バンチ試験が必要であった。

ILCのためには、9mAロングバンチの確認が必要であった。

XFELとILCの両者にメリットのある共同実験

		XFEL X-Ray Free-Electron Laser	ILC	FLASH design	FLASH experiment
Bunch charge	nC	1	3.2	1	3
# bunches		3250*	2625	7200*	2400
Pulse length	μs	650	970	800	800
Current	mA	5	9	9	9

Courtesy: N. Walker

Proposal to operate FLASH
Similar to XFEL (4.5MHz, 4.5mA)

9mA試験@FLASH 国際協力

- 2008年5月 : 最初の試験(準備)
- 2008年9月 : 3nC, 1MHz, 550バンチでビームダンプリーク
- 2009年1月 : クエンチ現象のスタディ
- **TTF/FLASH 9mA Mini-Workshop 2009/1/16, 17**
- 2009年7月 : KEKのデジタル系をFLASHで比較評価
- 2009年9月 : ロングバンチ
- **WORKSHOP ON LINAC OPERATION WITH LONG BUNCH TRAINS 2010/2/22-24**
- 2011年2月 : 疑似PkQI (→ KEKで2012年に初めてPkQI試験)
- **WORKSHOP ON LINAC OPERATION WITH LONG BUNCH TRAINS 2011/6/6-8**
- 2012年9月 : クライストロン線形化, 飽和点近くの運転

隔週の電話会議:
欧州・アメリカ・日本



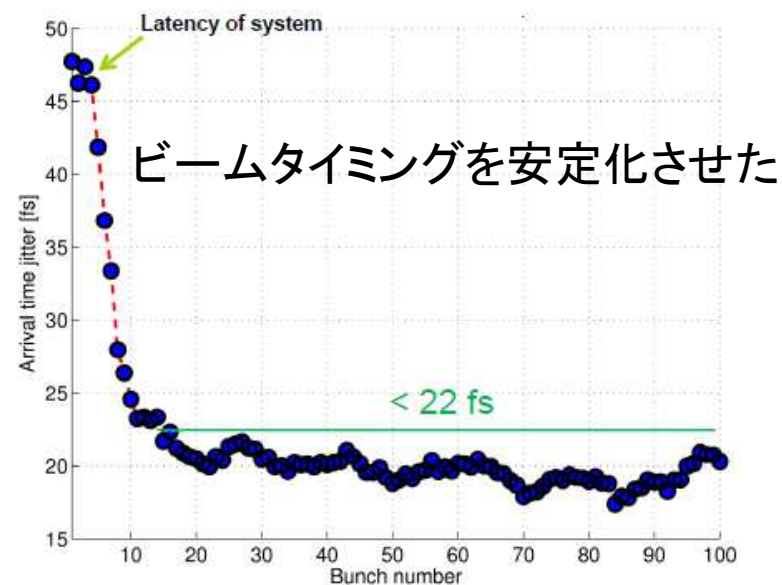
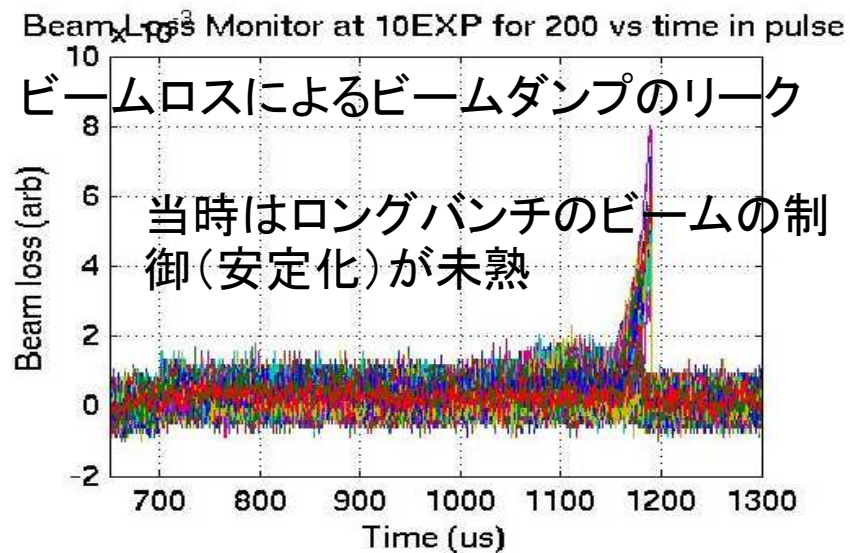
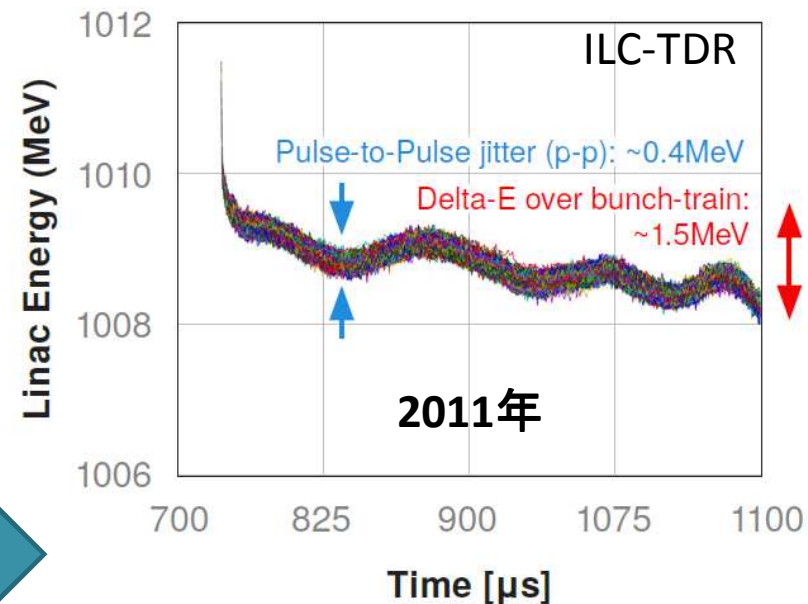
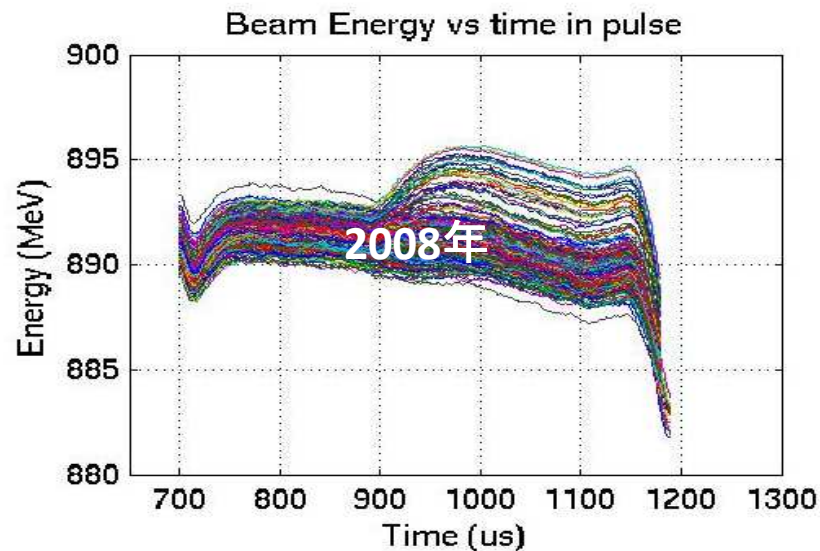
TTF/FLASH 9mA Experiment Recent Machine Studies

Overview
Nick Walker

07.10.2008



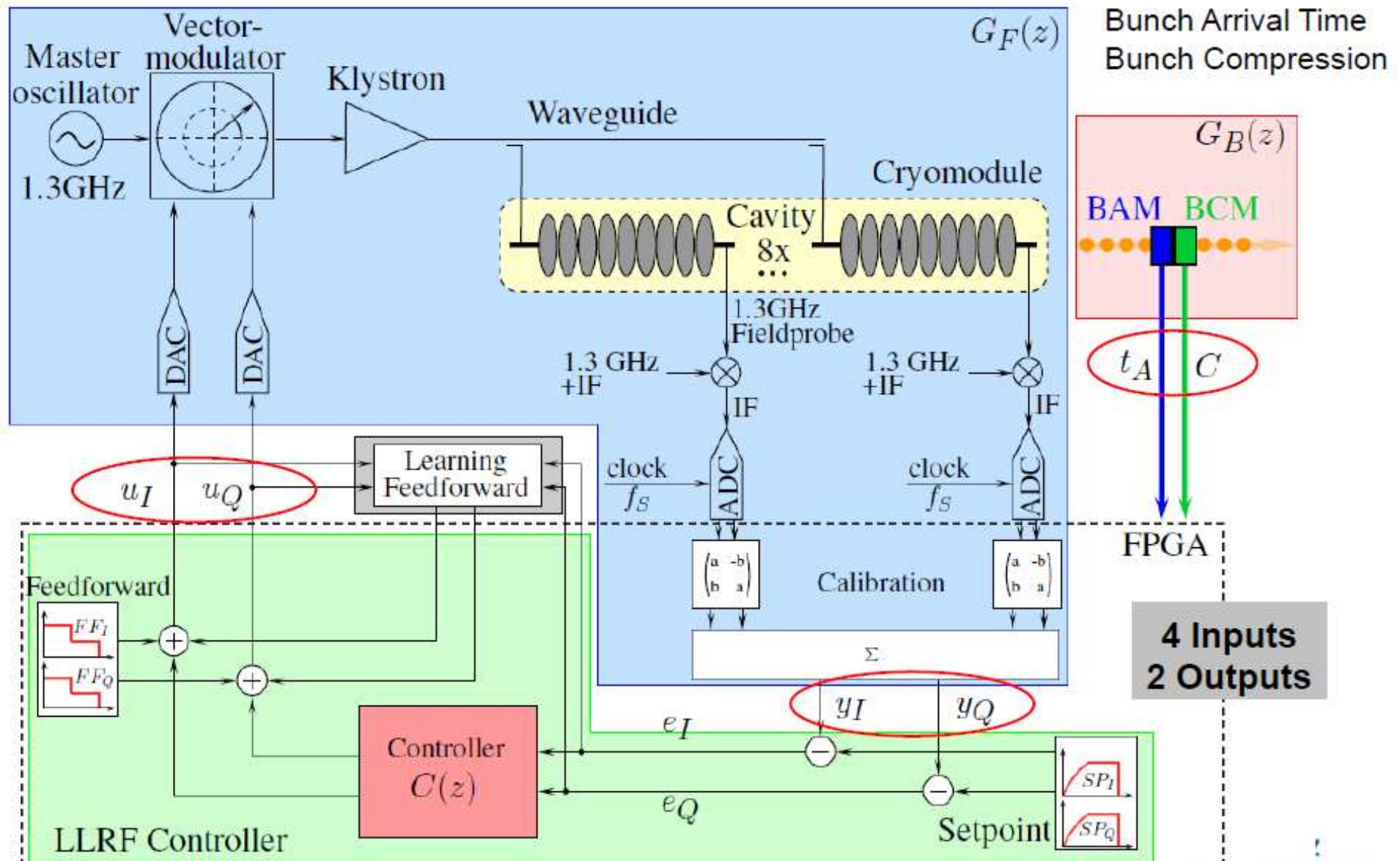
ビームエネルギー安定化



G. Canelo (FNAL)

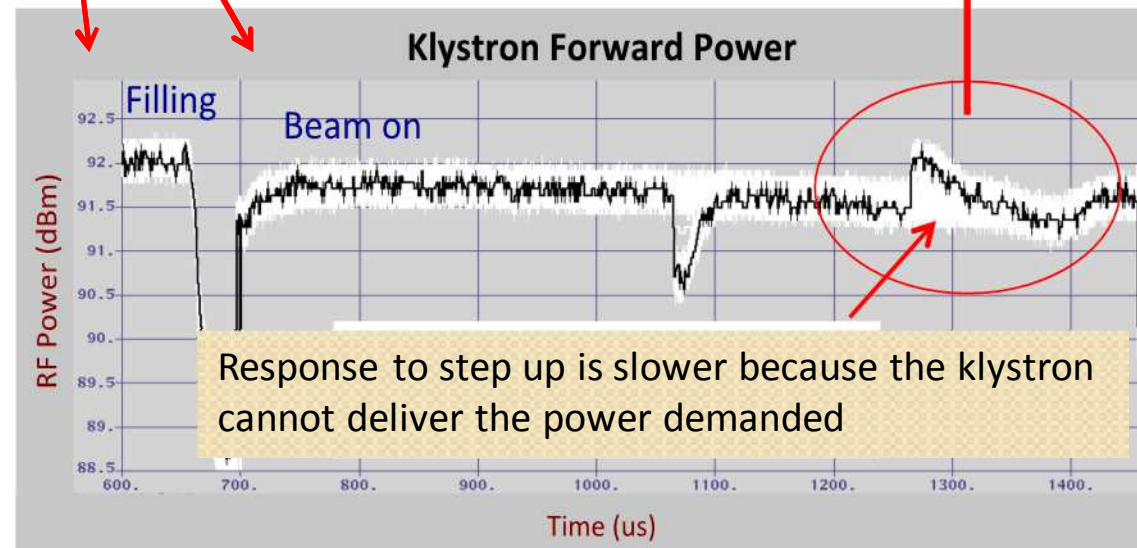
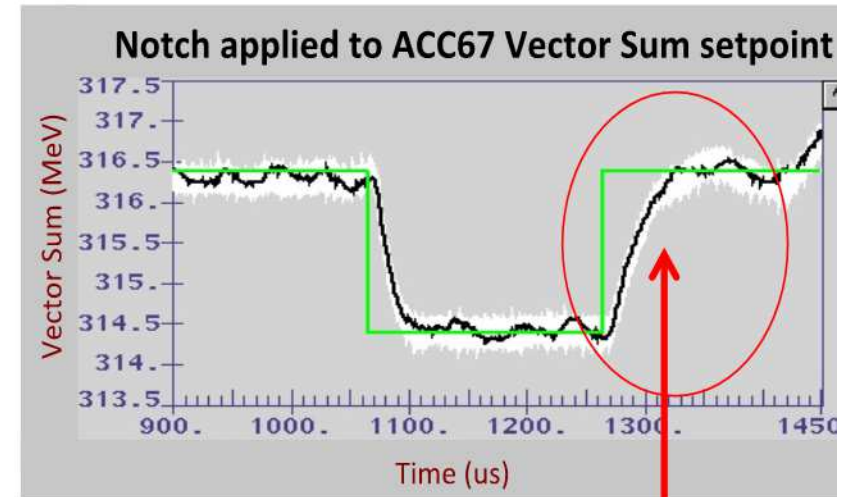
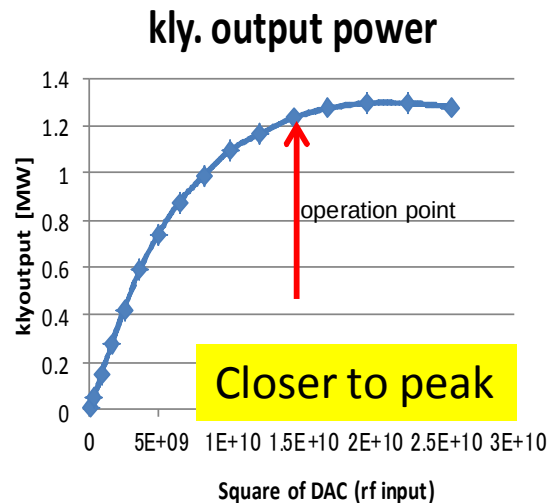
System Overview – FLASH and XFEL

28



9mA Studies: evaluating rf power overhead requirements (4.5mA/800us bunch trains)

- Klystron high voltage was reduced from 108KV to 86.5KV so that the rf output just saturated during the fill
- The required beam-on power ended up being ~7% below saturation



目次

1.TDRの高周波源

- 概略
- 他施設との比較
- ILCテスト施設
- 仕様

2.大電力高周波系(HPRF)

- 電力分配系
- クライストロン
- 電源

3.低電力高周波系(LLRF)

- システム
- ベクターサム性能
- PkQI
- High QI
- Linearization

4.国際協力とビーム試験(9mA試験)

- ロングバンチ
- Near Saturation

➡ 5.将来展望

今後の課題

- HPRF:

- モジュレータ: MARX電源の長時間運転

例: KEKB入射器は年間7000時間運転x60台=42万時間/年 長時間運転での経験蓄積, 稀な故障も経験できる.

- 空洞につながる大規模な立体回路系のインストール方法の確立
(どこで組み立て, 試験し, どのようにインストールするか)
- 窒素加圧での導波管系の長時間運転

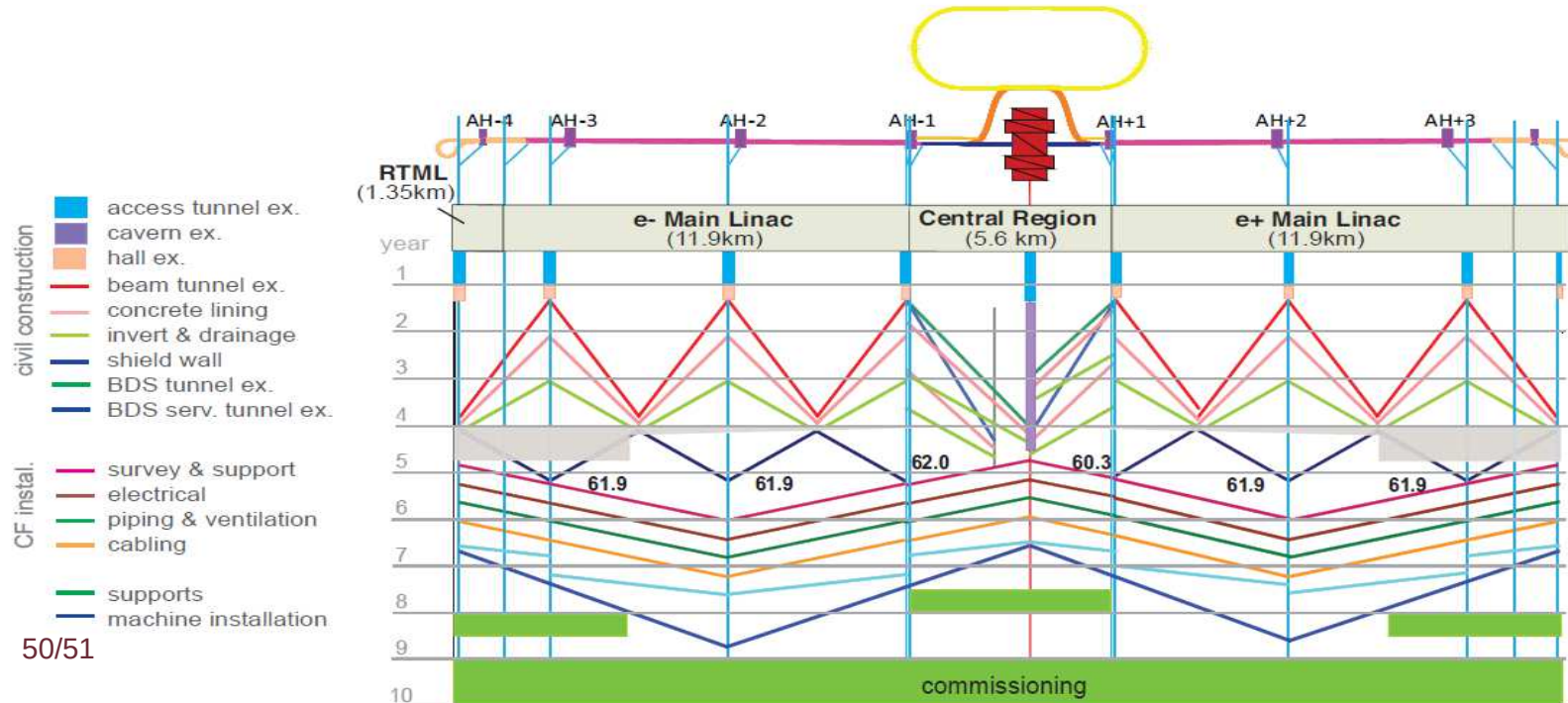
- LLRF:

- 光通信による39空洞のベクターサム
- 多数空洞のPkQI制御
- ビーム安定化のためのフィードバック系の多重化(ビーム負荷補償)
- 飽和点近くの運転性能
- 自動化, 自己診断系ソフトウェア
- その他, 運転に関わるMPS系との連携

KEKの少ないマンパワーで, 何をどこまでやるかを決める必要がある.

将来の展望

- 大電力立体回路系を組み込む手順を確立するための試験施設
 - 長時間運転経験がほしい
- FLASHやLCLS-IIのようなユーザーのいるテスト施設へ. たとえば, 5台のRFソースを年間5000時間運転すれば, 25000時間/年. 4年で10万時間となる.
- 人材の育成は喫緊の課題
- ILCどころではなく, 5年後の将来も危うい. 育成は1年では無理で, 長期にわたり, 運転経験, 開発経験を積んで, 現在の技術を次世代につなぐ必要.
- たとえば, DESYではXFELのLLRFに115名ほどが在籍(学生を含む)





ご清聴ありがとうございました.