
cERL用高周波源

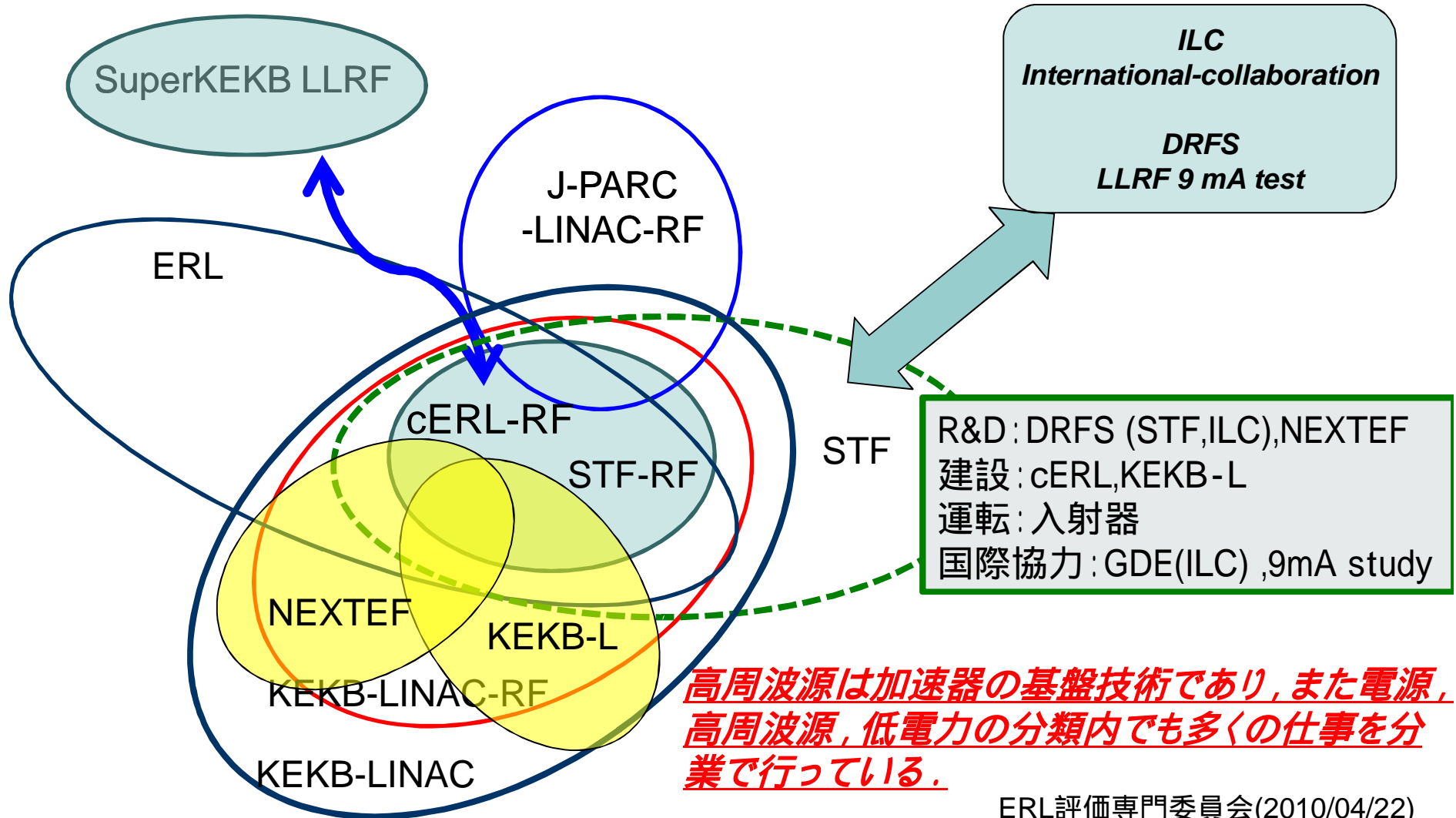
道園真一郎

- 構成メンバー
- cERLの高周波仕様
- cERLの高周波システム
- HLRF/電源
- HLRF/高周波源(クライストロン, IOT)
- HLRF/導波管系
- LLRFシステム
- LLRF/アナログ系・安全インターロック系
- LLRF/モニター系
- LLRF/デジタルフィードバック系
- マンパワー

メンバーリスト

HLRF: 福田茂樹, 明本光生, 設楽 哲夫, 竹中 たてる, 中尾克巳,
 中島啓光, 本間博幸, 松下英樹, 松本修二, 吉田 光宏

LLRF: 道園真一郎, 荒川大, 片桐広明, 松本利広, 三浦孝子, 矢野 喜治



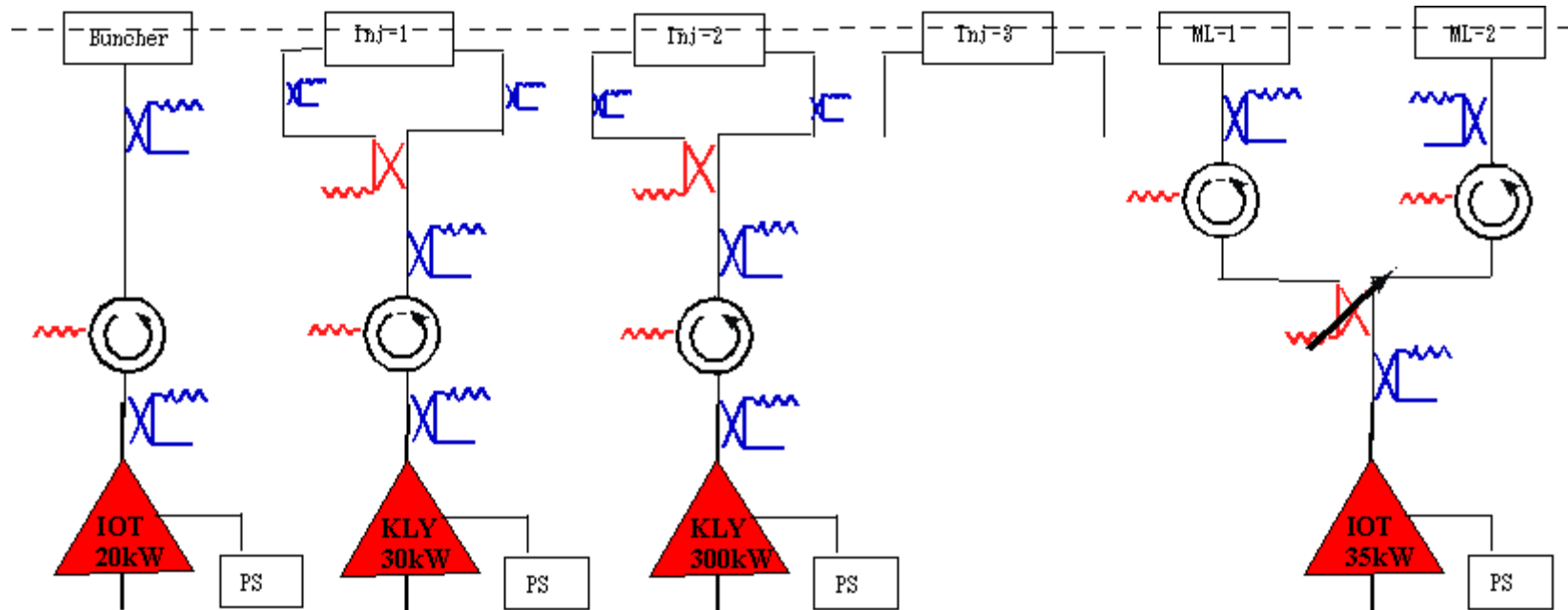
ERL評価専門委員会(2010/04/22)

c ERLの高周波仕様

- 外乱はフィードバックのゲイン分だけ抑えられる。
- フィードバックゲイン100, 目標仕様が0.1%, 0.1度の場合, 各外乱はその1/3程度と
なることが望ましい。(→ 0.03%×ゲイン100 = 3%, 3度)
- ビーム電流も3%程度の安定度が必要。

	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)	
f1/2 [Hz]	---	~650	32.5
Microphonics (~3deg.) [Hz]	---	40	2
feedback	PI control	P control	P control
Proportional gain	10	100	100

cERLの高周波システム

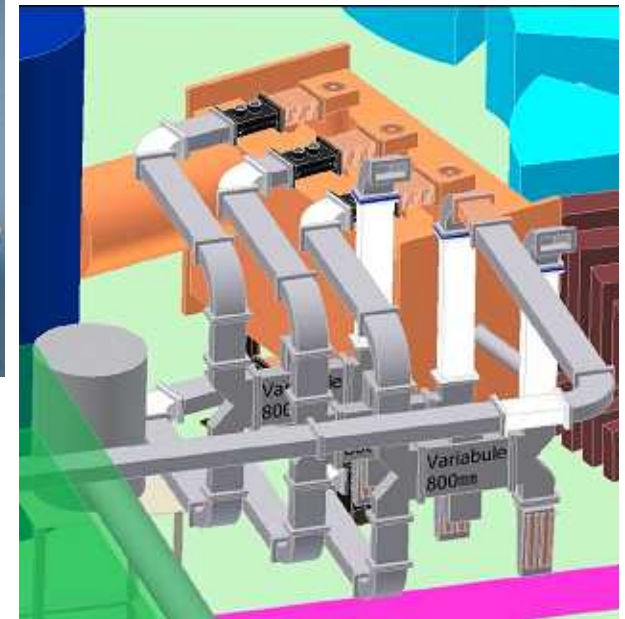
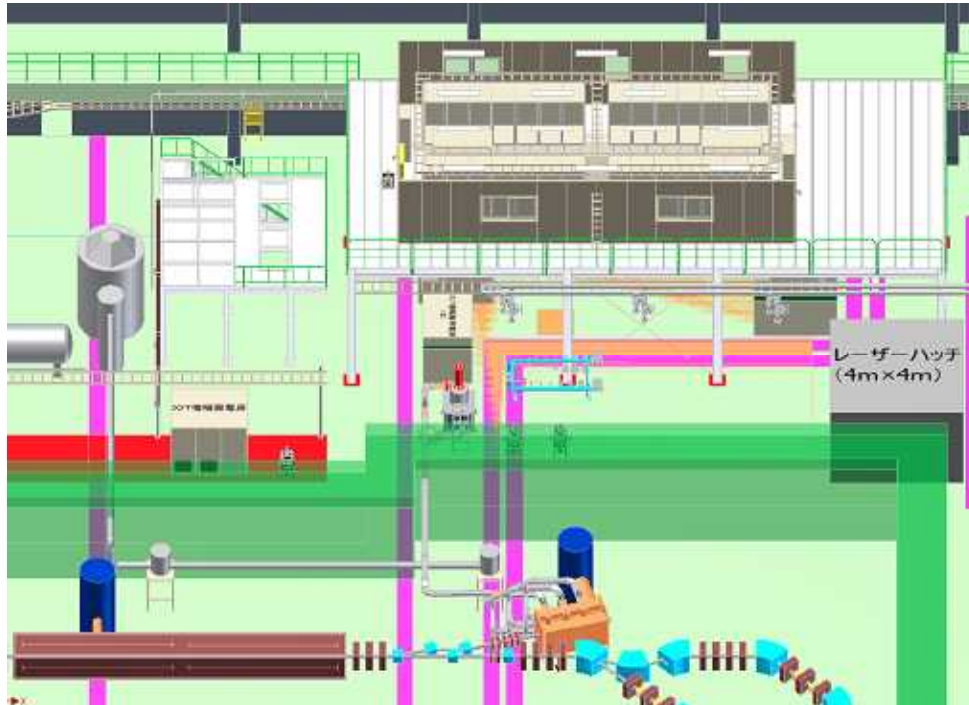
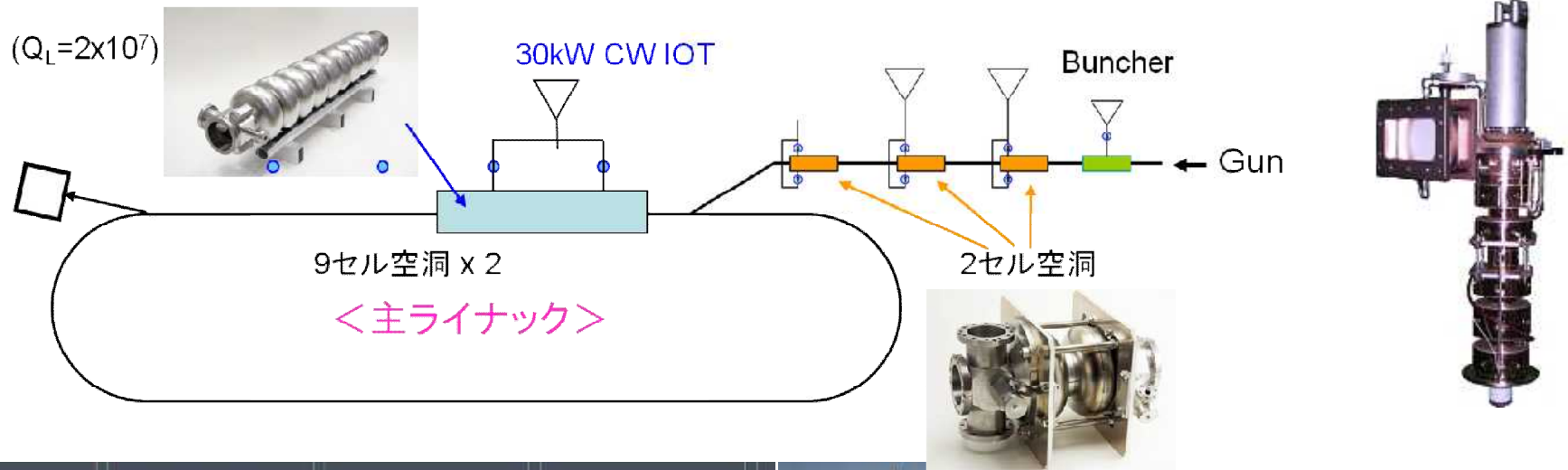


	Buncher	Inj-1	Inj-2	Inj-3	ML-1	ML-2
structure	NC	SC	SC	SC	SC	SC
Gradient	140 kV	1.5 MV	3.5 MV		15 MV	15 MV
QI		7.7e5	1.8e6	detuned	2e7	2e7
beam phase	-90deg.	-15 -30deg.	-10 0deg.		0deg.	0deg.
required rf*	4.5 kW	20 kW	55 kW		11 kW	11 kW
rf output**	6.2 kW	27 kW	76 kW		30 kW	
rf source	IOT	klystron	klystron		IOT	
available power	20 kW	30 kW	300 kW		35 kW	
power supply	JAEA	KEK	KEK		JAEA	

*50Hzマイクロフォニクスが含まれる場合 **7%RFロス + 20%フィードバックマーヅンを含む 評価専門委員会(2010/04/22)

cERLの高周波配置

<入射ライナック>

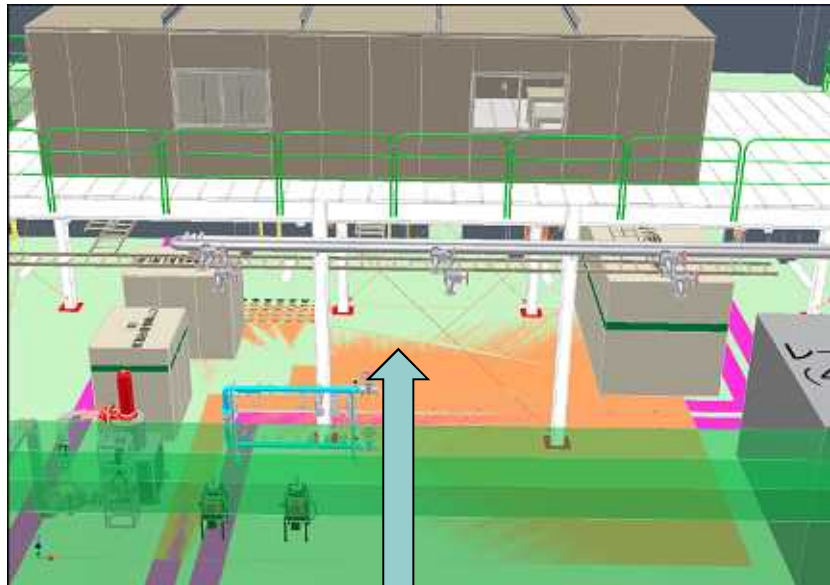
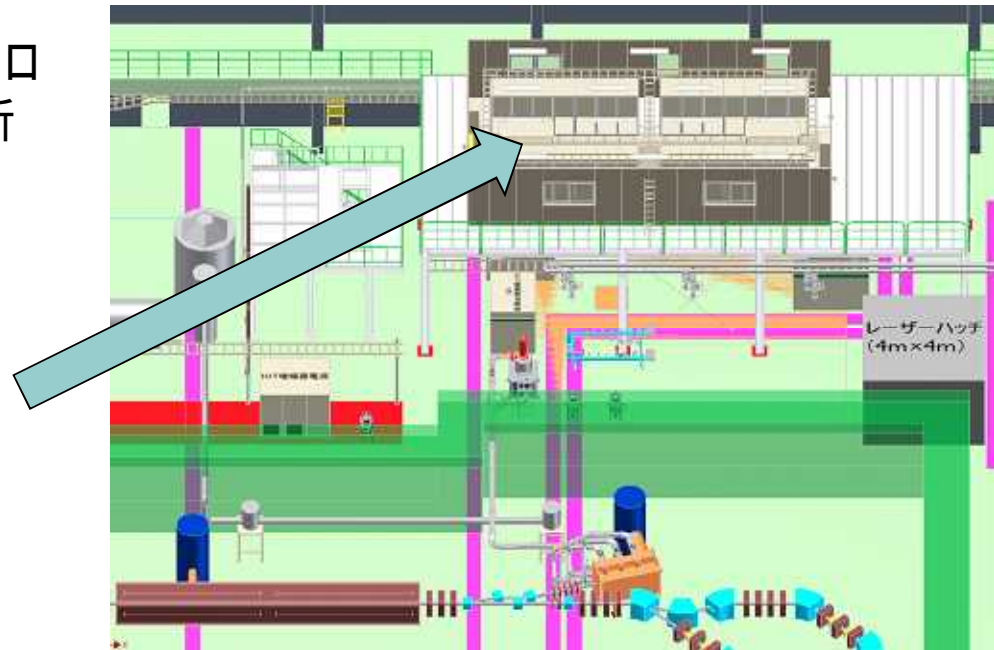


ERL評価専門委員会(2010/04/22)

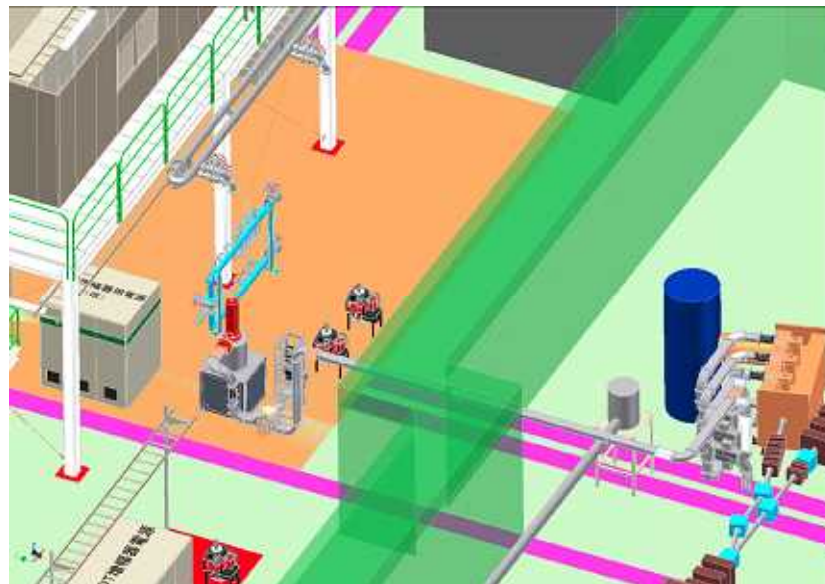
c ERLの高周波配置

- 4台の電源, 高周波源 (IOT, クライストロン) は中二階下, もしくは隣接した場所に設置 (空調なし)

中二階のパネルハウス (空調あり)
全LLRFを設置



カプラーテストスタンド
(IOTおよびクライストロン)

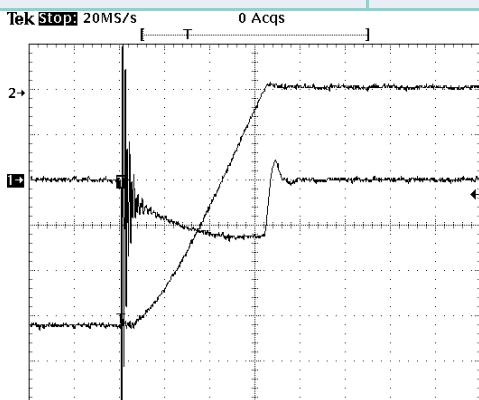


ERL評価専門委員会(2010/04/22)

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

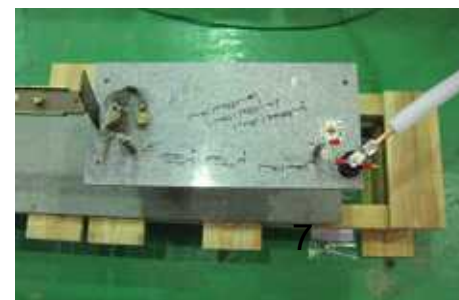
最大出力電圧	- 52 kV
最大出力電流	11 A
出力電圧リップル	0.5 %(P-P)以下
出力電圧安定度	0.5 %(P-P)以下
入力電源	AC 6.6 kV, 3φ, 50 Hz
冷却方式	水冷
筐体寸法	4.6mW x 2.5mD x 2.6mH



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

ERL評価専門委員会(2010/04/22)



cERLの高周波源

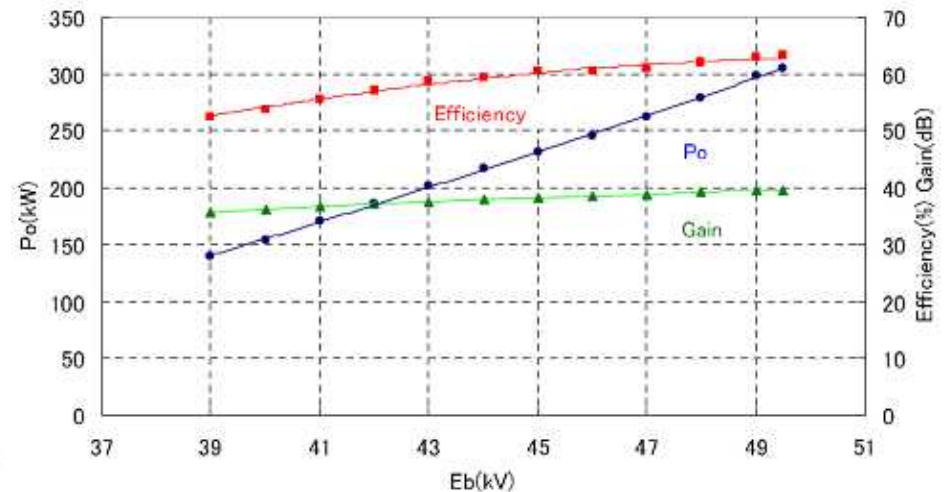
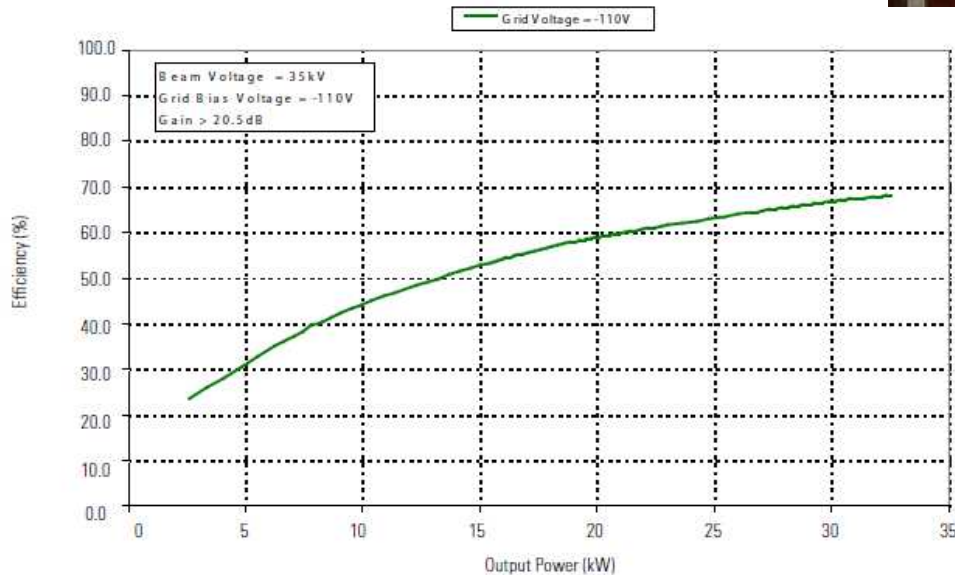
CPI社 VKL-9130 IOT



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 μ P
Efficiency	63.2%
Gain	39.5 dB

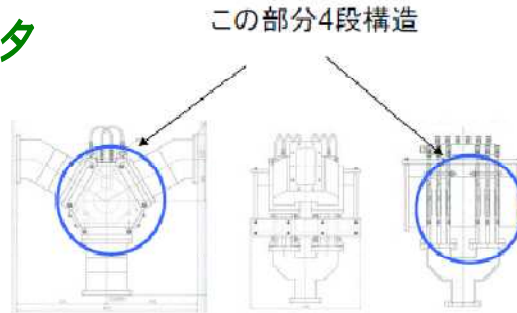


導波管系

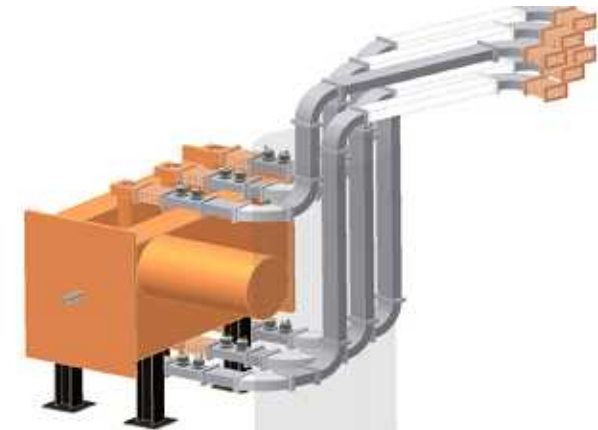
導波管系では、特に大電力のサーキュレーターの開発が必要であった。
 その他の高周波導波管系についてもCW試験を実施している。

150kWサーキュレータ

- 仕様
- 周波数範囲 1300±5MHz
- 許容電力 150kW CW
- 導波管 WR-650
- フランジ CPR650相当
- VSWR 1.2以下
- 挿入損失 0.3dB以下
- アイソレーション 20dB以上
- 冷却 水冷
- 負荷条件 全反射
- 外部磁界 永久磁石
- 構成 Y型



提案されている外形寸法



30kWサーキュレータ

Technical Specification of the IsolatorWFHI3-2, 5MW
 Order RT-791

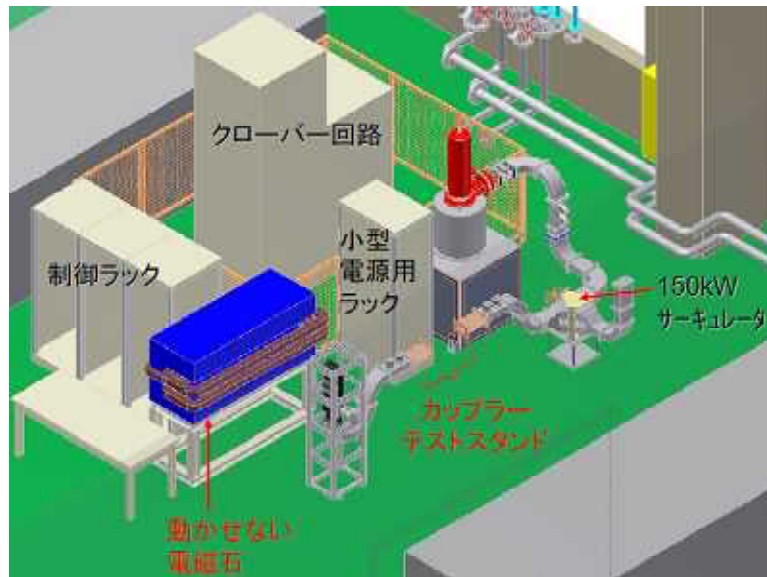
Frequency	1.3GHz±5MHz
Max. Pulse Power (forward)	5MW;
Max. Pulse Power (reflected)	5MW any phase;
Max. Average Power	85kW;
Pulse duration	<1.7ms;
Repetition Rate	<10Hz;
Insertion Loss	<0.15dB at 1.3GHz; <0.2dB at bandwidth;
Isolation	>30dB;
VSWR	<1.10 with full reflection at any phase;
Case	gas tight up to 3 bar, leakage <5ml/hour;
Gas	SF6 up to 1.5 bar;
Cooling	demineralized water, pressure <6 bar, test pressure 12 bar, flow rate <10 l/min for the circulator flow rate <60 l/min for the load
Magnet system	permanent magnets;



クライストロンおよび空洞カプラーテストスタンド

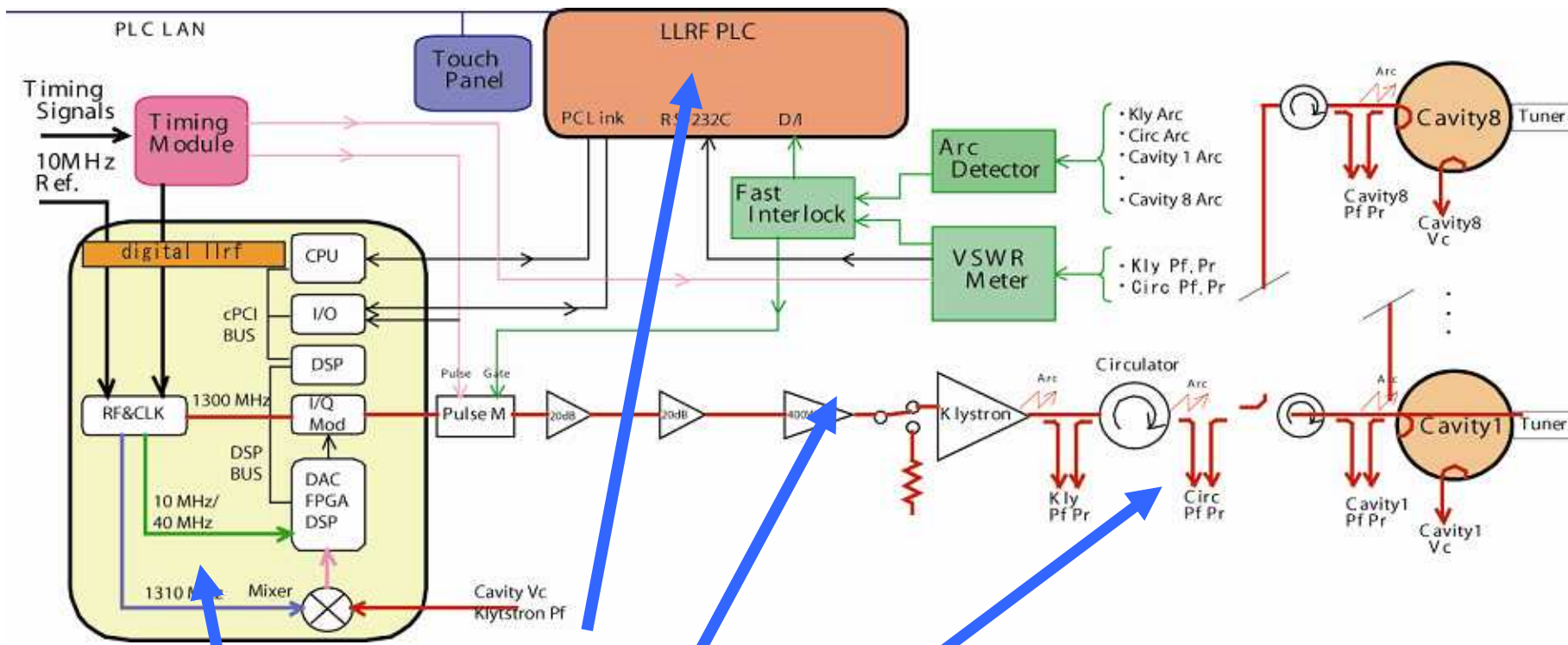
クライストロン試験及び導波管系の試験をPF電源棟で行った。
超伝導空洞カプラーの試験用スタンドともなっている。

カプラーの評価後にクライストロン, 冷却水, 導波管系は東カウン
ターホールに移動予定。



評価専門委員会(2010/04/22)

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

機器安全系・アナログ高周波系

- ファーストインターロックモジュール
→ J-PARC MR用に開発されたのものを転用
- アーク検出器: J-PARC linac, STFのものを転用
→ フォトセンサーを使った高感度なもの. カプラー等の放電の際にRFを遮断
- RFインターロック: J-PARC linac, STFのものをCW用に改造
→ RF出力・反射・VSWRが設定を超えた場合にRFを遮断



ERL評価専門委員会(2010/04/22)

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	30m	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	1ppm	20ppm
振幅変化	3e-5 / /m	?
温度変化	10度(空調なし)	3 (空調あり)
位相変化	0.52度	0.2度
振幅変化	0.89%	?

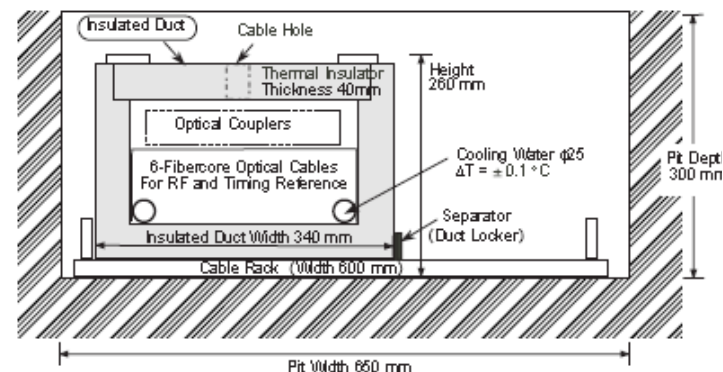


Figure 2: Cross section of the insulated duct set in t under-floor cable trench.

J-PARC linacでの光ケーブル温度安定化
0.1度の冷却水でケーブルを0.5度程度の安定化を図っている (From 2003~)

0.5 なら, 30mの位相安定化ケーブルで,
0.04%, 0.026度程度の安定度が期待できる.

ケーブルの部分で仕様の0.1%, 0.1度を超えている。
本来は, ケーブル部分は0.03%, 0.03度程度に抑えるべき。
(そのためには, 空洞-ラック間のケーブルを温度安定化し,
ラック内のケーブルも慎重に選択する必要がある。)
→ 特にラック内ケーブルについて早急に検討が必要。

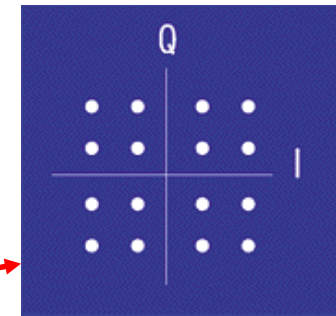
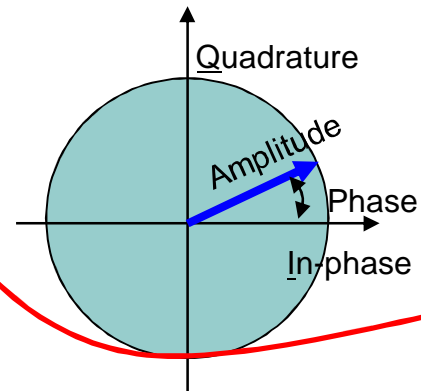
- リモートアッテネータ → STF用開発済
- パワーメータなど



ERL評価専門委員会(2010/04/22)

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 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
650μs 50Hz
2 cav. vector sum

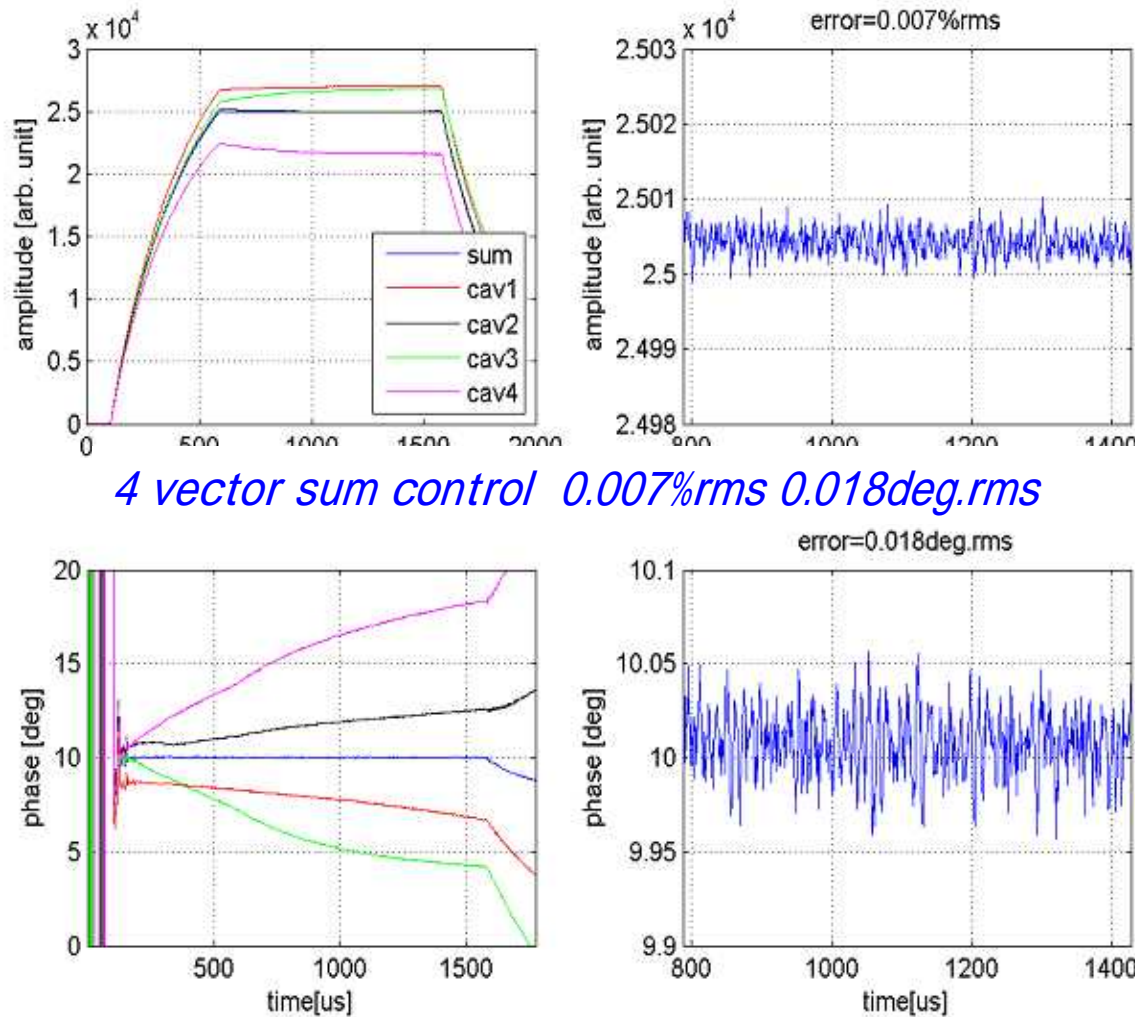
(2005~)
STF 1.3GHz Superconducting
1500μs 5Hz
4 cav. Vector sum

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

RF Stability @KEK-STF



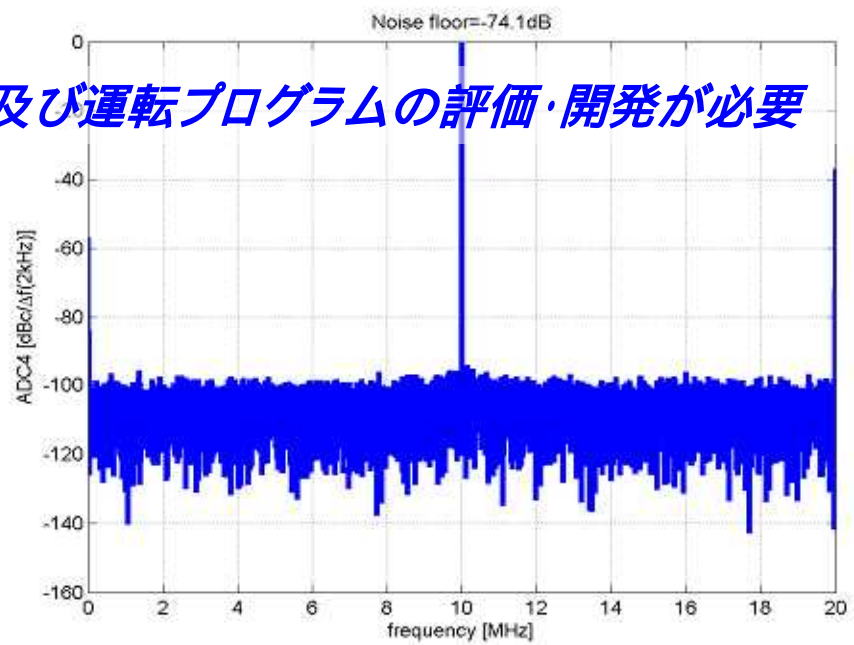
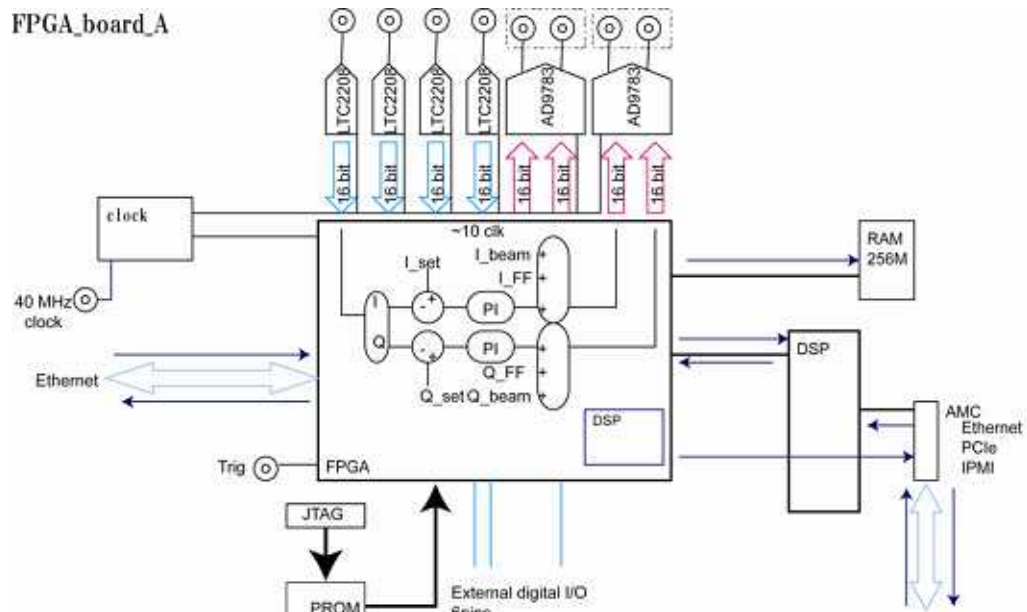
4 vector sum control 0.007%rms 0.018deg.rms

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。

デジタル系



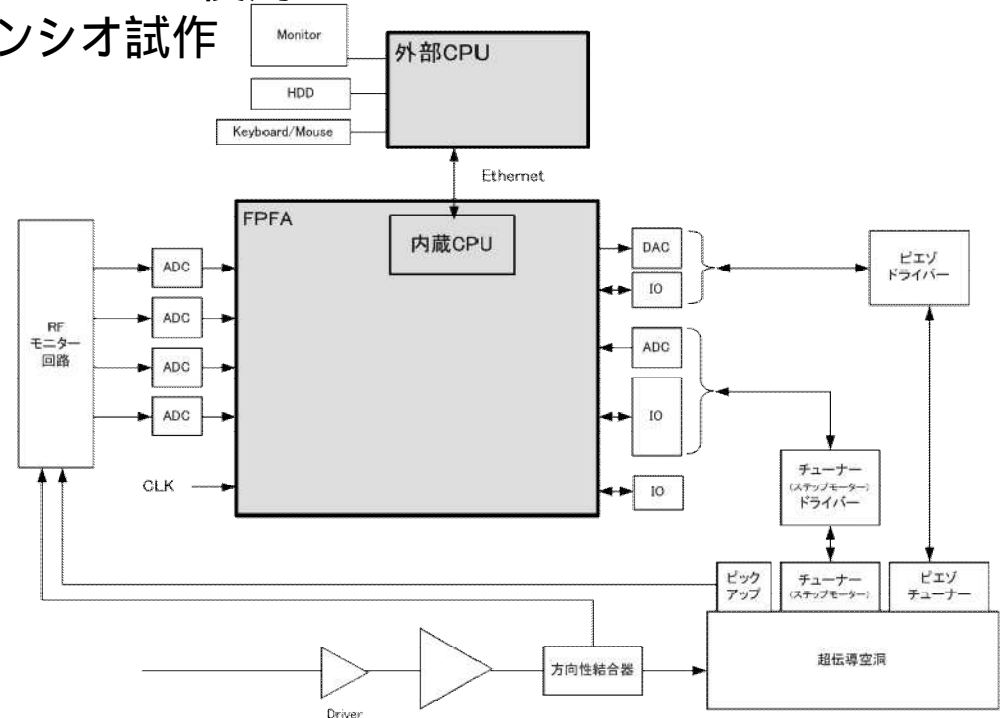
今後はビーム運転に向けたフィードバック及び運転プログラムの評価・開発が必要



チューナー制御など

- 実績のあるKEKBのチューナー制御のアルゴリズムを利用
- デジタルフィードバック用に開発したFPGAボードを使用
- チューナー用のモータードライバー・ポテンシオ試作
- 模擬的なモーターコントローラを作成

→ 動作検証を2010年度に行う



ERL評価専門委員会(2010/04/22)

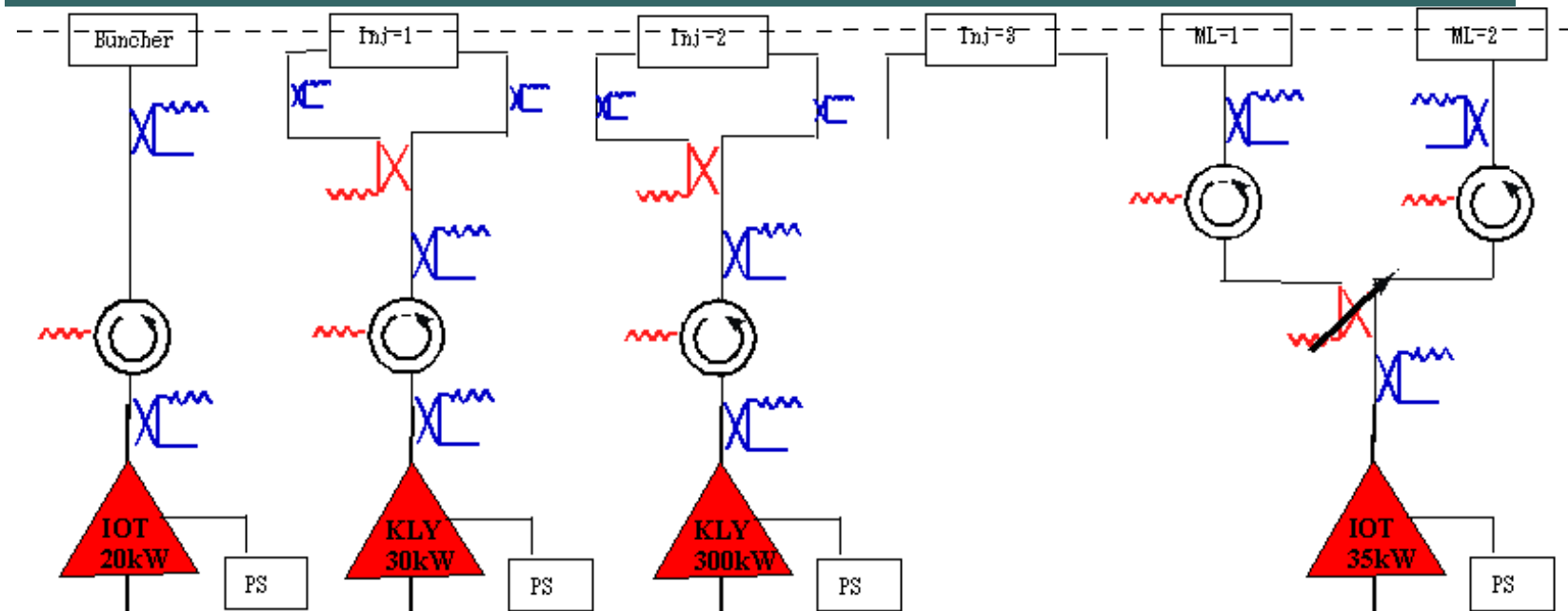
今後のスケジュール(HLRF)

- 2010年度：
 - クライストロン, IOT, 電源の運転評価
 - 導波管系機器の評価
 - カプラテストスタンド立ち上げ
- 2011年度：
 - 入射部空洞への導波管系設置
 - 入射部空洞テスト用RFシステム運転
 - 全高周波源(電源, IOT, クライストロン)の設置, 運転評価
 - 全導波管コンポーネント発注
- 2012年度：
 - 全導波管系組み立て

今後のスケジュール(LLRF)

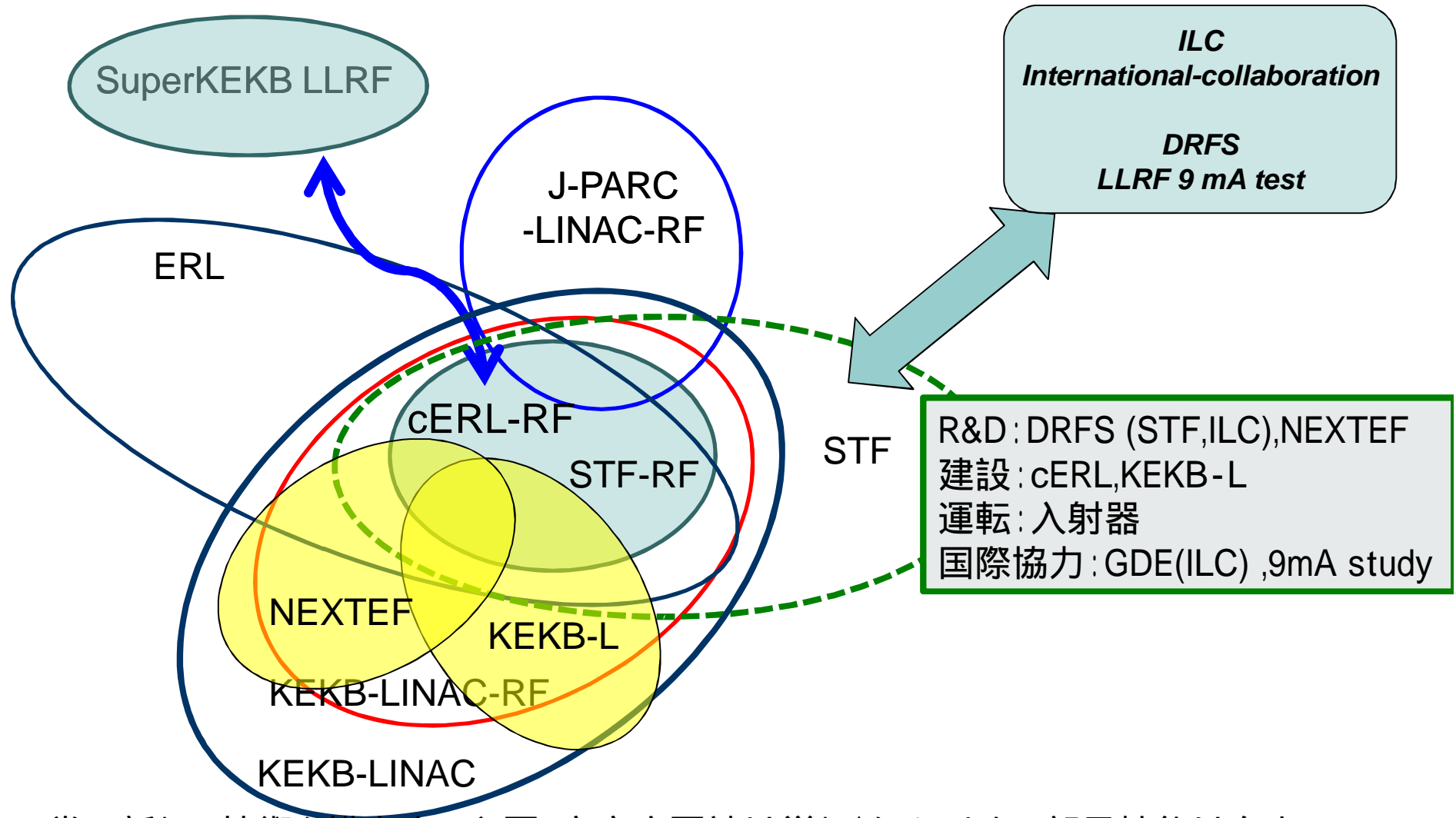
- 2010年度
 - 東カウンターホールの中二階整備
 - ケーブルの温度特性評価
 - チューナー制御系, デジタルフィードバック系の評価
 - バーストモード用ソフトウェア開発
 - 上位ソフトウェア開発
- 2011年度
 - ケーブルラックの設置
 - 入射部空洞からのモニターケーブル配線
 - 入射部空洞試験設備立ち上げ
 - LLRF系の全発注
- 2012年度
 - モニターケーブル配線

機器の準備状況



	Buncher	Inj-1	Inj-2	Inj-3	ML-1	ML-2
電源	JAEA	KEK	KEK		JAEA	
高周波源	無	klystron	klystron		IOT	
導波管系	無	無	無		無	
機器安全系	無	無	有		無	
アナログ高周波	無	無	有		無	
モニター系	無	無	有		無	
デジタル系	無	無	有		無	
チューナー制御系	無	無	無		無	無

施設とのかかわり



● 常に新しい技術を模索する必要: 安定度要請は厳しくなり、また、部品性能は向上。

● 複数のプロジェクトにかかわる際に、その個々の施設における期待は高くなりがち。
 ->各プロジェクトで各人が100%働いていないため。

ERL評価専門委員会(2010/04/22)

まとめ

- HLRFの現状：
 - 電源はJAEAからの移管品を有効活用することで全数終了
 - 主要なハードウェアのR&Dは終了
- LLRFの現状：
 - J-PARCリニアックやSTFにおける実績を生かし、SuperKEKBとも連携し開発を進める。
 - 主要なハードウェアのR&Dは終了
 - ソフトウェアの評価が必要
 - ケーブルの選定が必要
 - バーストモード、チューナー制御についても要対応
- スケジュール
 - 2011年度にHLRF/LLRF1式を完成させ入射部空洞に対応
 - 2011年度に全数を購入する
 - 2012年度に全数設置
- マンパワー
 - RFグループではほとんどすべてのプロジェクトにかかわっている