

# 新BPMC試作機の前段信号減衰器における発熱試験

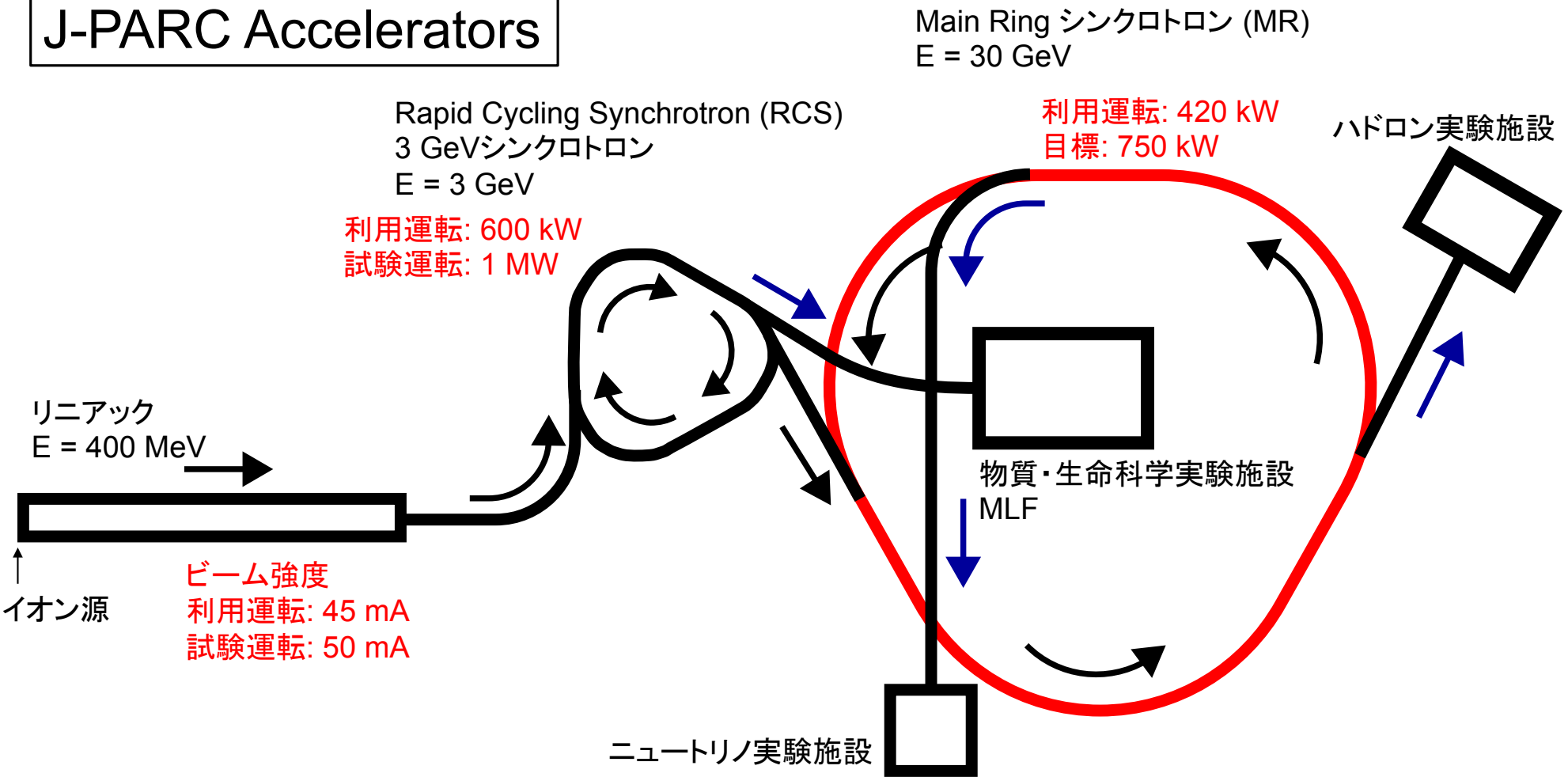
久保木浩功

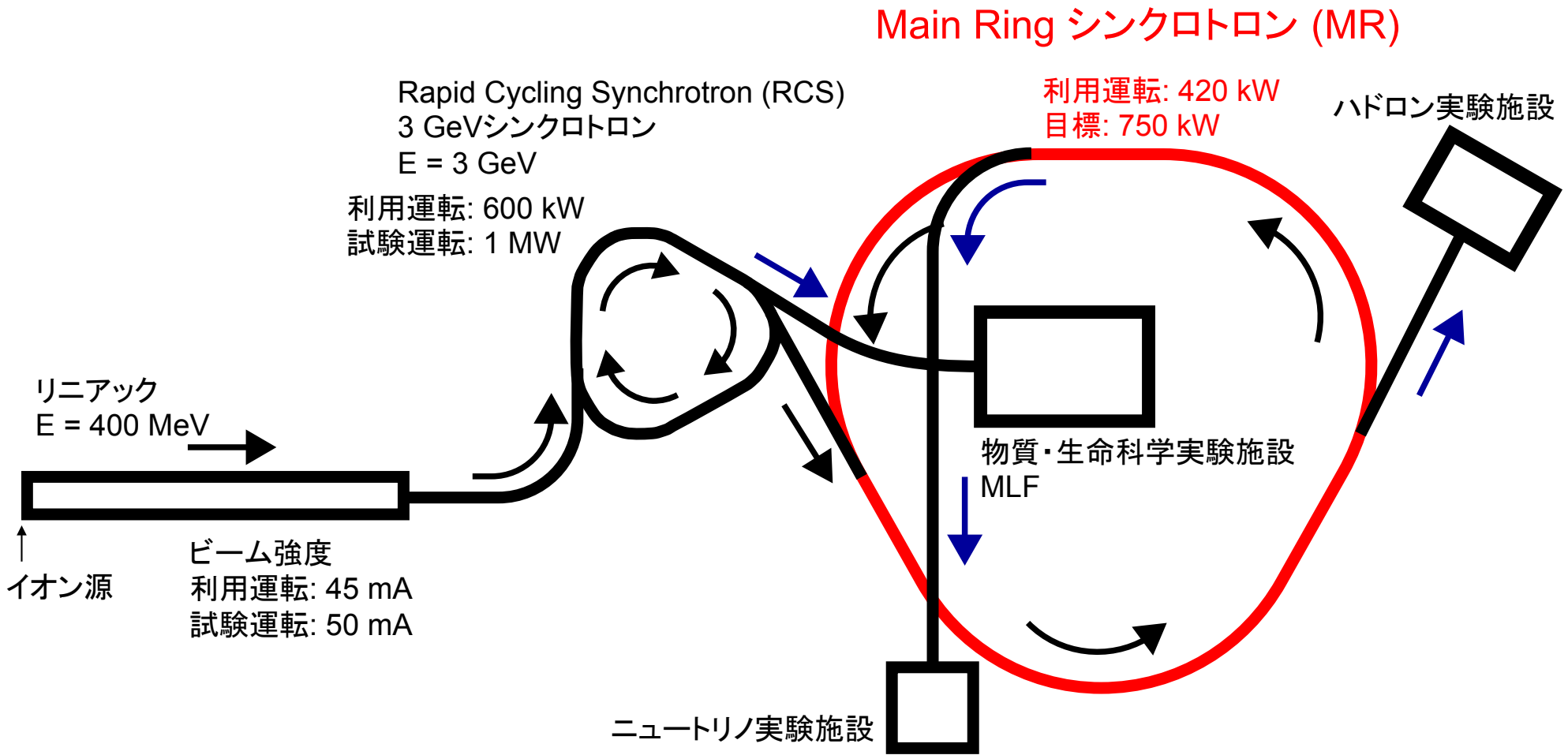
外山毅、佐藤健一郎、久保木浩功  
MR モニタGr., KEK, J-PARC

脇田俊昭  
(有) 啓

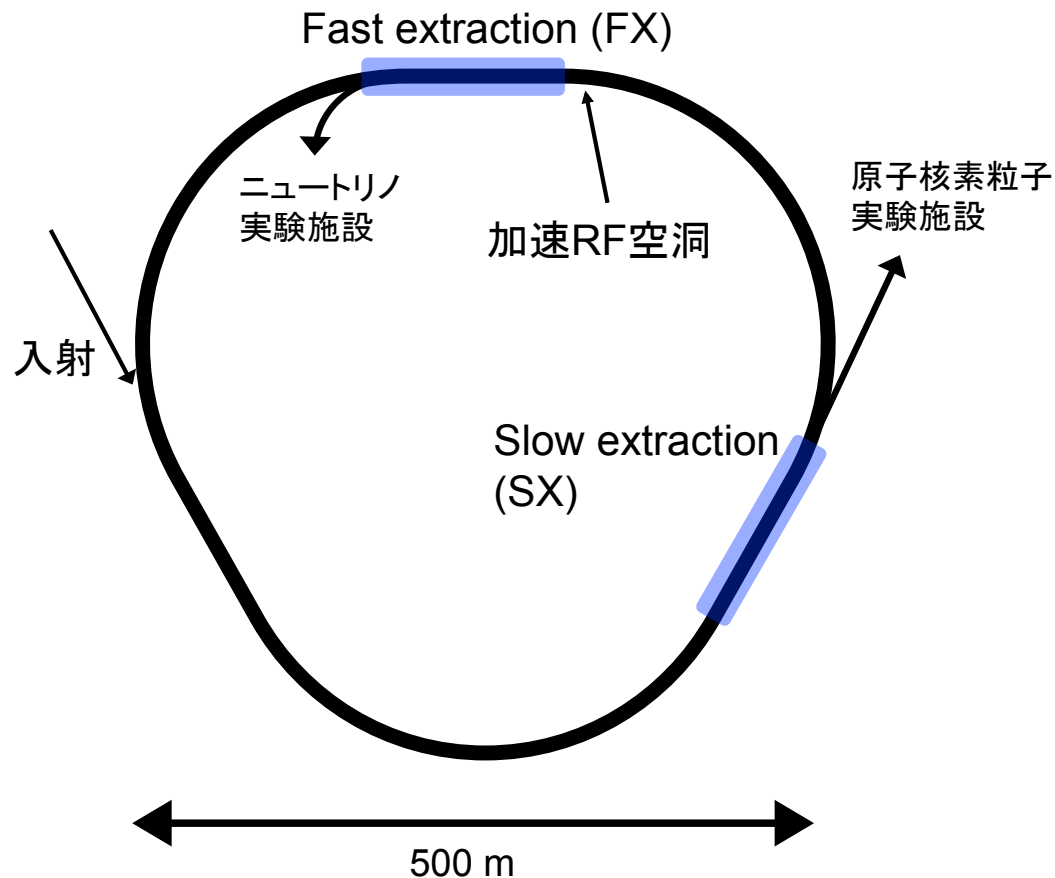
森野貴行  
(有) 森野テクニカルサービス

# J-PARC Accelerators





MR

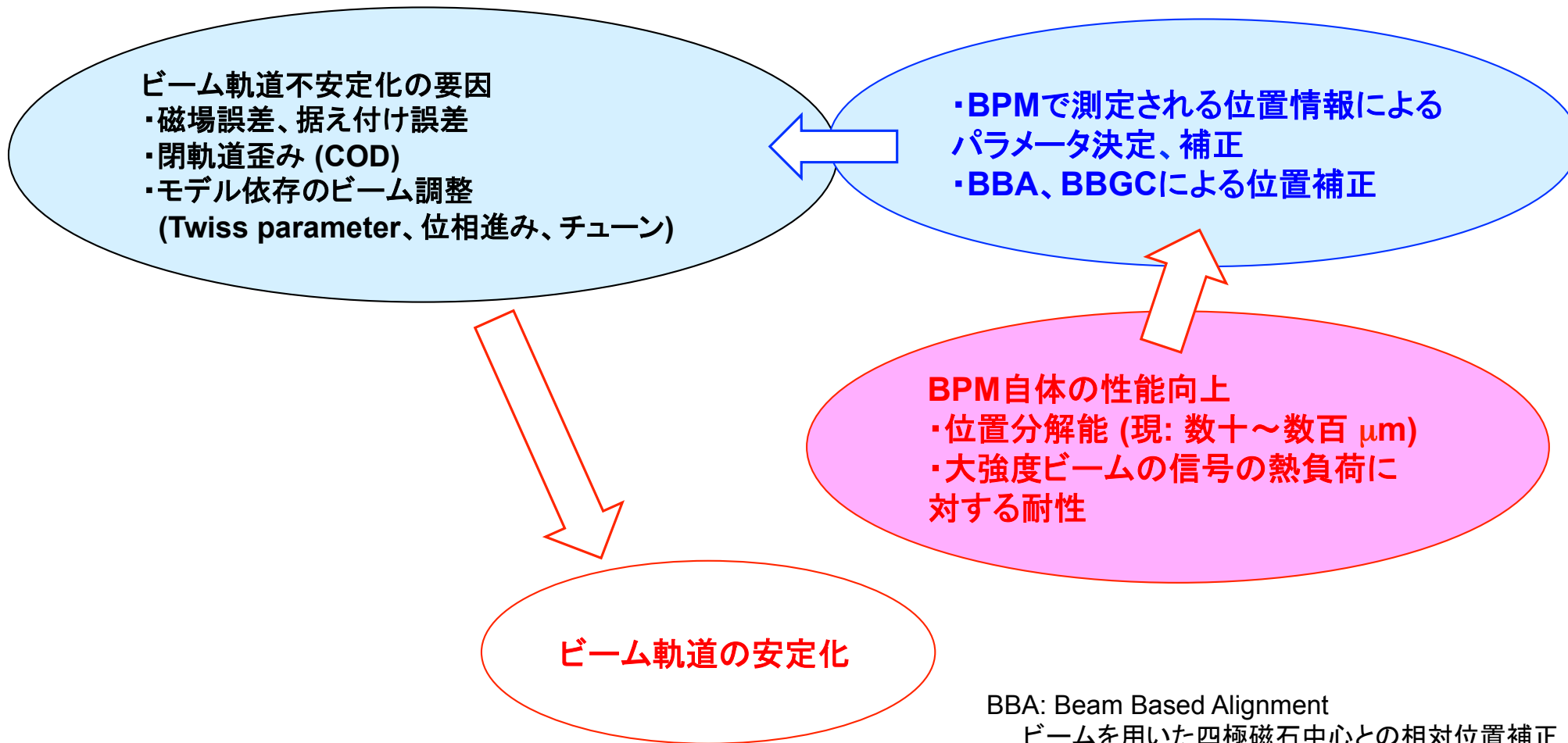


周長 (m)	1567.5	
エネルギー (GeV)	3	30
$\beta$	0.9712	0.9995
Lorentz $\gamma$	4.20	32.97
ハーモニック数	9	
バンチ数	8	
周回周期 ( $\mu\text{sec}$ )	5.38	5.23
RF周波数 (MHz)	1.67	1.72
バンチ長(時間) (nsec)	200	70
バンチ長(空間長) (m)	60	20
チューン	FX: $\nu_x=22.40, \nu_y=20.75$ SX: $\nu_x=22.30, \nu_y=20.78$	
ビーム位置モニタ Beam Position Monitor (BPM)	186台 (1台/7-10 m)	

大強度化⇒ビームロスの軽減



安定したビーム中心軌道が必要



BBA: Beam Based Alignment  
ビームを用いた四極磁石中心との相対位置補正

BBGC: Beam Based Gain Calibration  
ビームを用いたBPMのゲイン補正

# J-PARC MR のBPM

対角線カット型電極  
Electrode shape:  
"diagonal cut"

Horizontal  
**Electrode L**

Beam

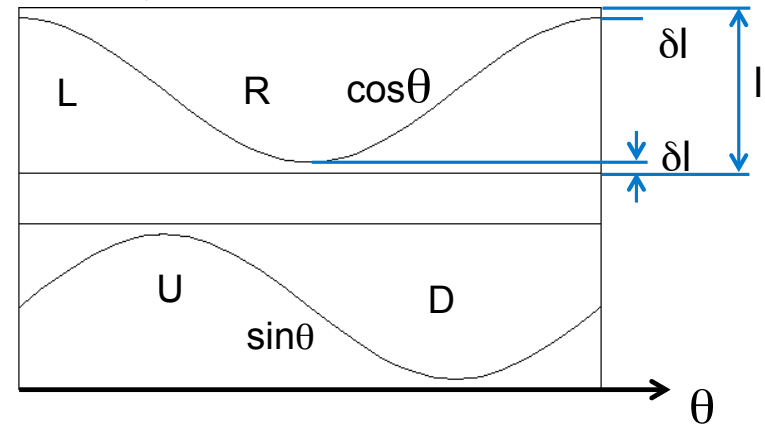
Vertical

**U**

**D**

**R**

### 電極の展開図



Courtesy of T. Toyama

$v_U$

$v_D$

cable

$v_R$

$v_L$

cable

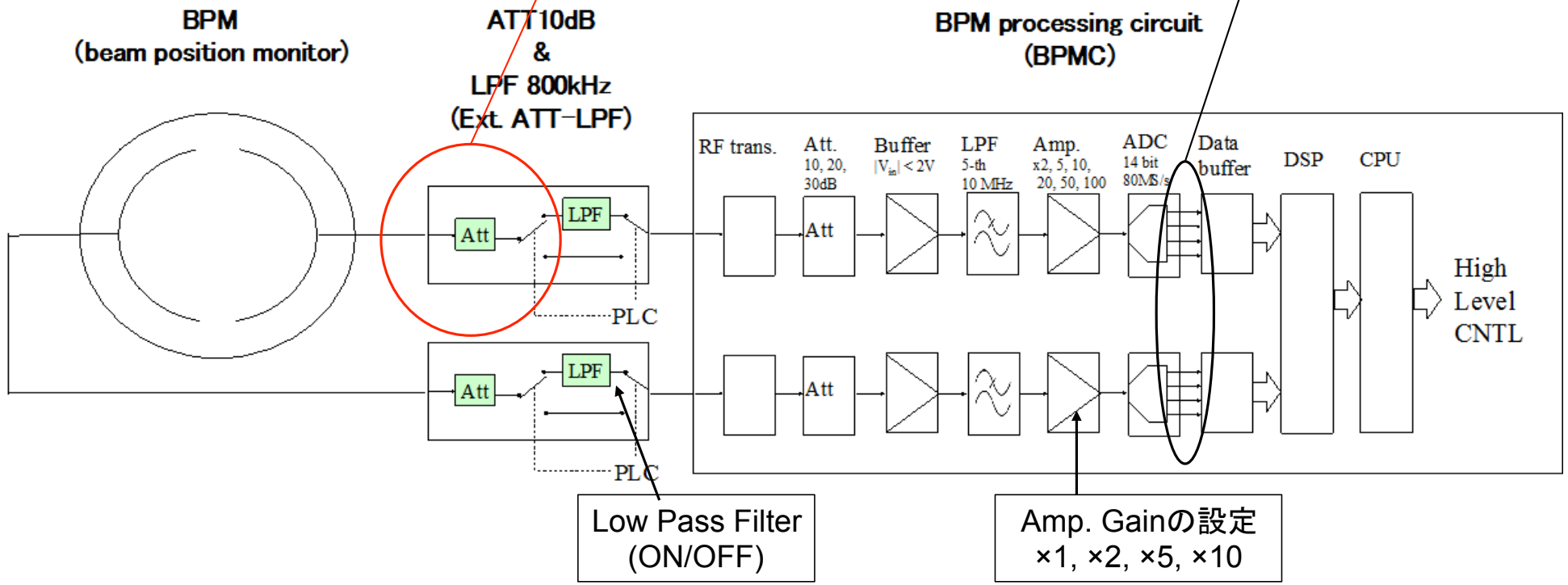
BPM processing circuit (BPMC)

**$V_L, V_R, V_U, V_D$**

**BPM データ取得システム**

**前段減衰器  
(Attenuator)**

$V_L, V_R, V_U, V_D$ : デジタル化信号  
(ADC out)

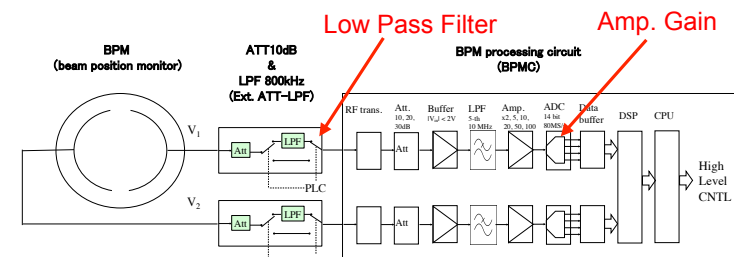


Courtesy of T. Toyama

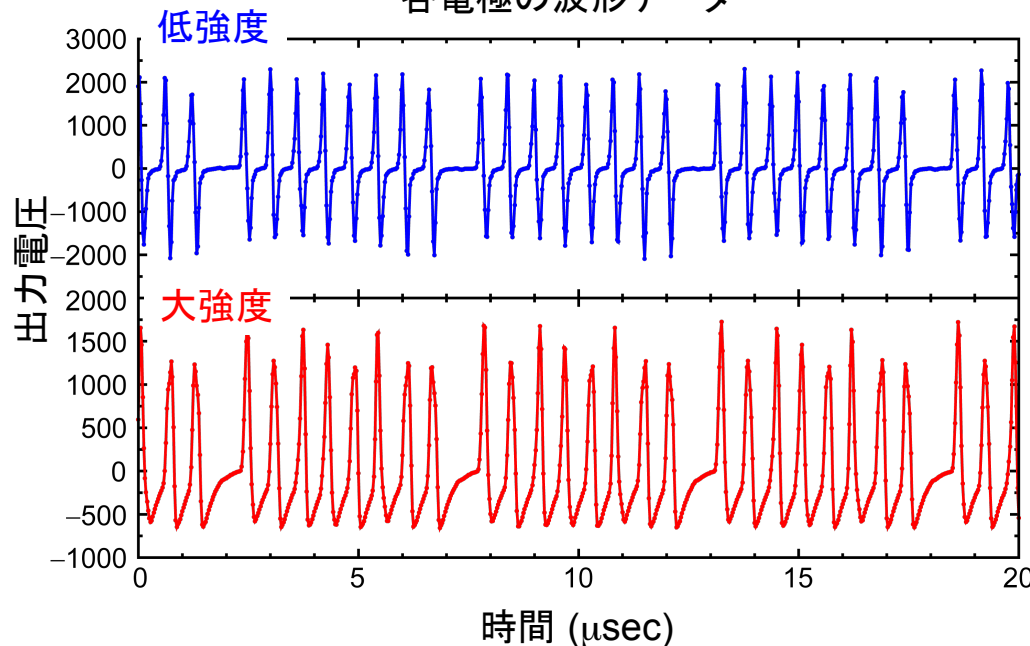
# BPM信号処理

● 処理回路設定は強度によって異なる

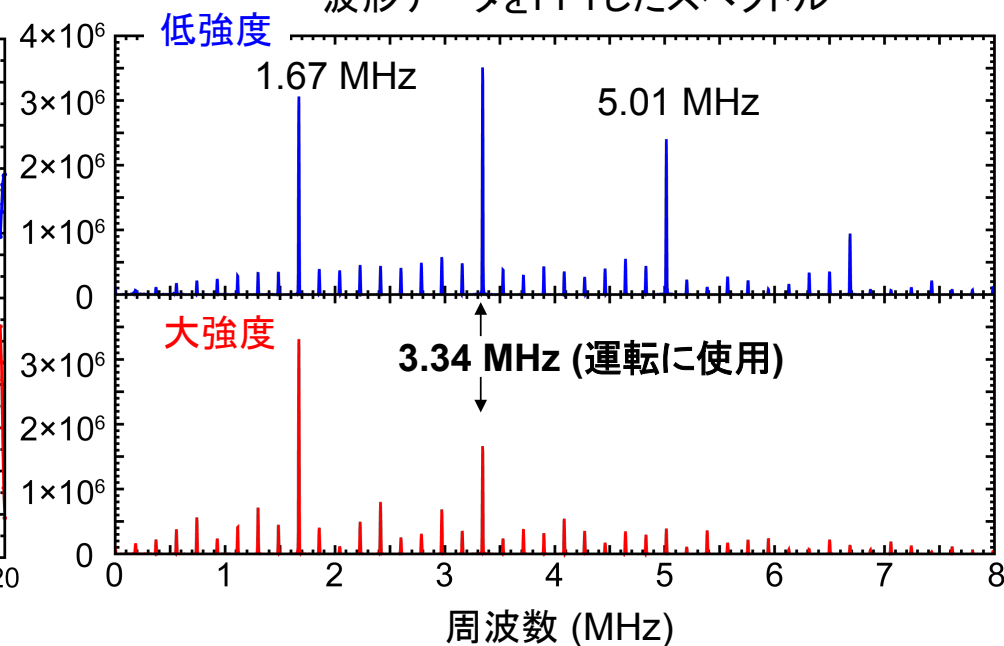
	粒子数 Protons/pulse	Amp. gain	Low Pass Filter
低強度	$2 \times 10^{13}$	$\times 5$	OFF
大強度	$1 \times 10^{14}$	$\times 2$	ON



各電極の波形データ



波形データをFFTしたスペクトル





- 位置分解能の1桁の改善

S/Nの改善

- ・信号に対する定在波比 (VSWR)の減少→インピーダンス整合の改善 <  $\pm 0.1\%$
- ・ADCの性能: 14 bit、80 MS/s → 16 bit、250 MS/s

- 大強度ビームからの信号に対する熱負荷への耐性

陽子数/bunch	MR繰り返し (sec)	ビームパワー (kW)	BPMC入力パワー (W/ch)	
$2.7 \times 10^{13}$	2.48	420	6.5	現状
$3.5 \times 10^{13}$	2.48	543	8.5	近い将来
$3.5 \times 10^{13}$	1.25	1080	8.5	近い将来
<b><math>4.1 \times 10^{13}</math></b>	<b>1.25</b>	<b>1300</b>	<b>10</b>	<b>将来目標</b>

実現のためには他にも

- ・ゲイン、減衰器変更時のスイッチ: 現状のメカニカルリレーでは不具合→半導体、水銀、リード式?
- ・DAQ  
サンプリングレート、データ長、デジタル処理の場所 (on board / upper level)  
etc.

- 位置分解能の1桁の改善

- S/Nの改善

- ・信号に対する定在波比 (VSWR)の減少→インピーダンス整合の改善 <  $\pm 0.1\%$
    - ・ADCの性能: 14 bit、80 MS/s → 16 bit、250 MS/s

- 大強度ビームからの信号に対する熱負荷への耐性

陽子数/bunch	MR繰り返し (sec)	ビームパワー (kW)	BPMC入力パワー (W/ch)	
$2.7 \times 10^{13}$	2.48	420	6.5	現状
$3.5 \times 10^{13}$	2.48	543	8.5	近い将来
$3.5 \times 10^{13}$	1.25	1080	8.5	近い将来
<b><math>4.1 \times 10^{13}</math></b>	<b>1.25</b>	<b>1300</b>	<b>10</b>	<b>将来目標</b>

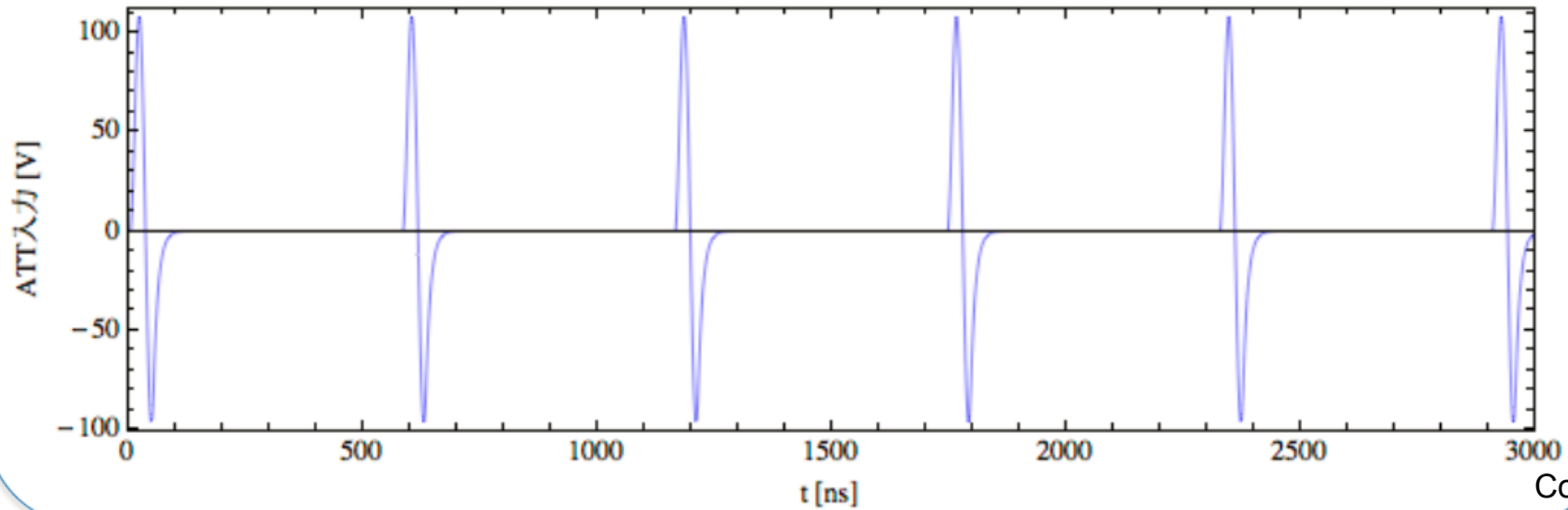
実現のためには他にも

- ・ゲイン、減衰器変更時のスイッチ: 現状のメカニカルリレーでは不具合→半導体、水銀、リード式?
- ・DAQ
  - サンプリングレート、データ長、デジタル処理の場所 (on board / upper level)
  - etc.

将来想定されるBPMCへの入力信号

$V_{\text{peak-peak}}: \pm 100 \text{ V}$

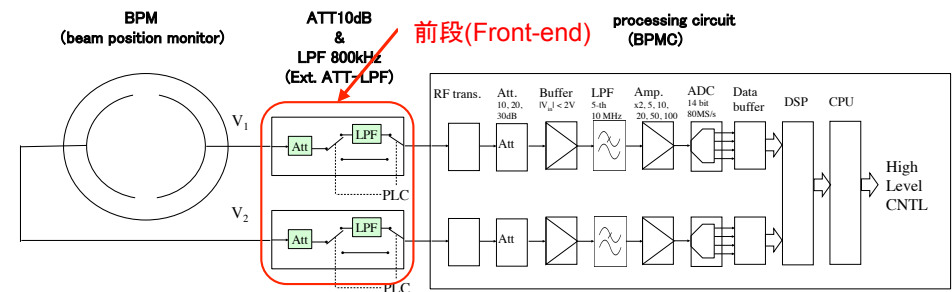
Power: 10 W



Courtesy of T. Toyama

デジタル処理回路に入る前に前段(Front-end)で減衰させる必要

→ 前段減衰器の熱負荷耐性

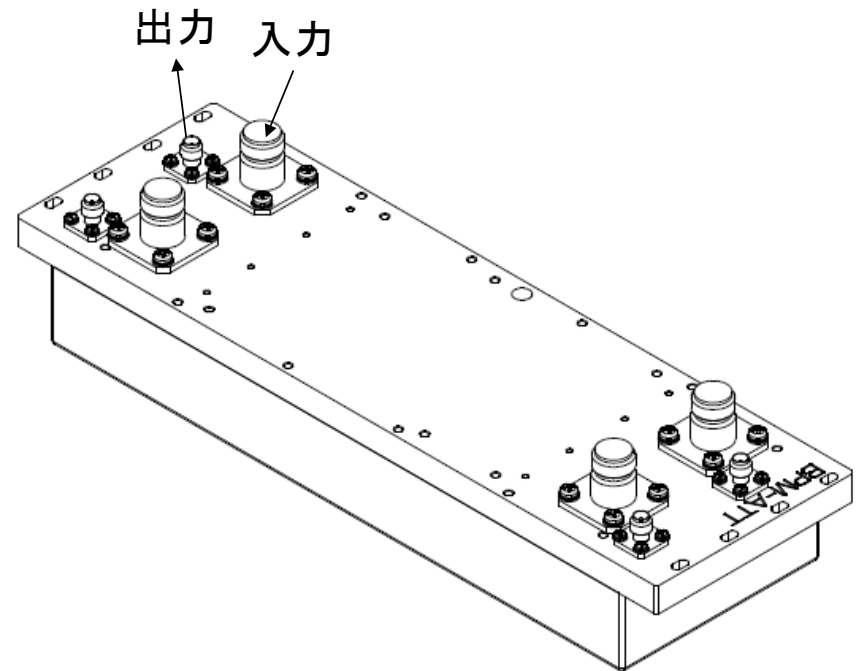
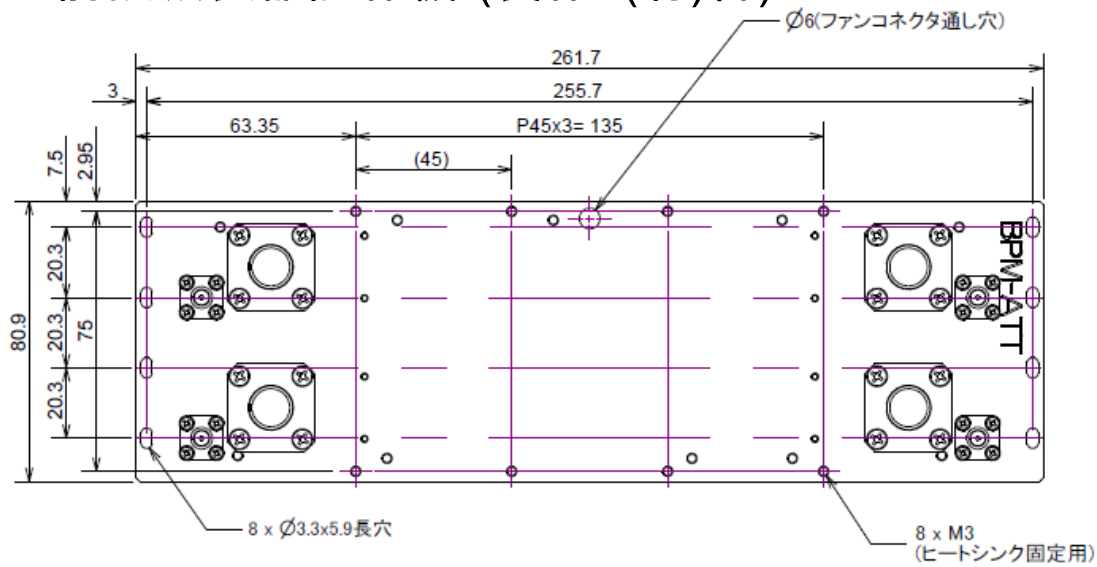


将来想定されるBPMCへの入力信号

$V_{\text{peak-peak}}$ :  $\pm 100$  V

Power: 10 W

### 前段減衰器試作機 (製作: (有)啓)

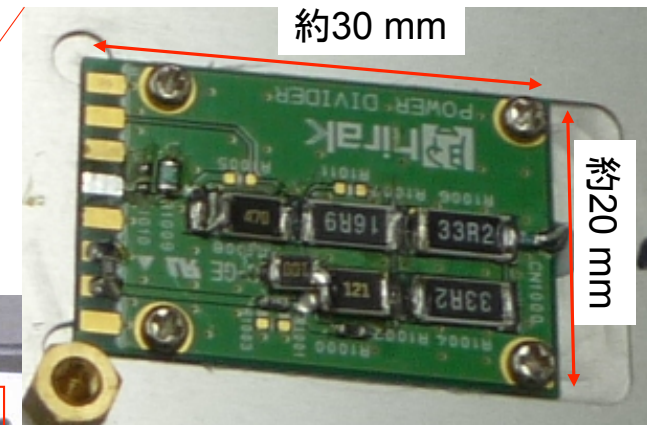
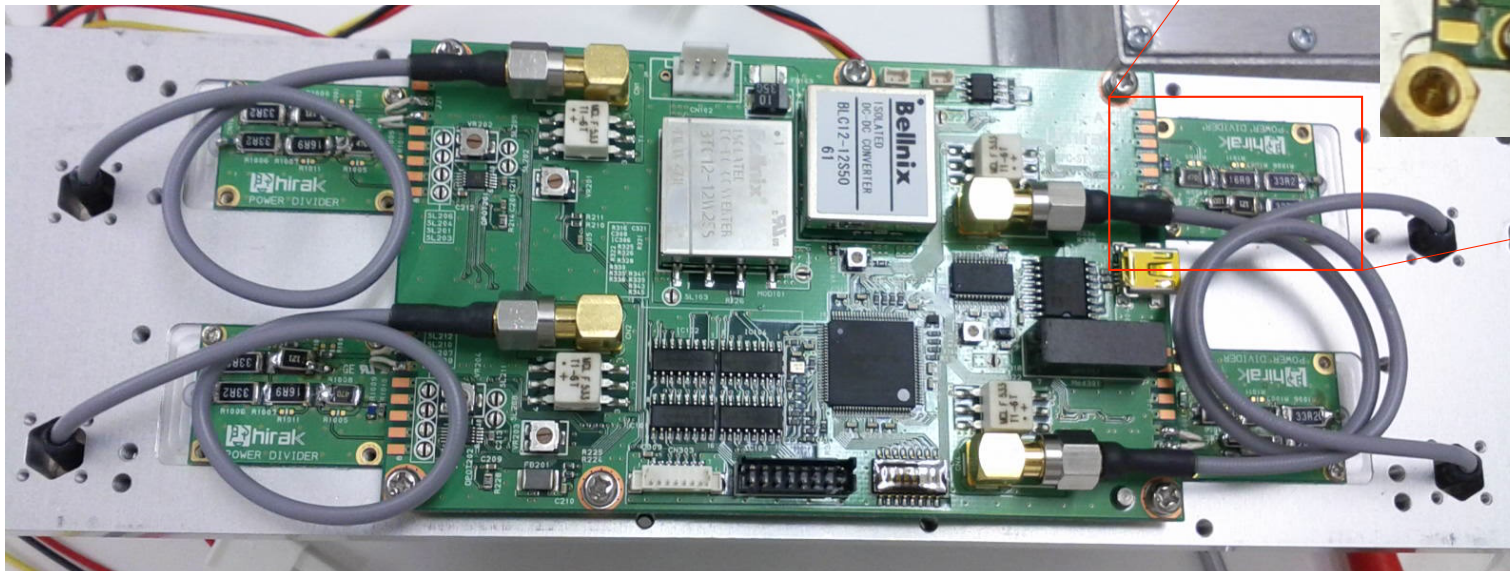


将来想定されるBPMCへの入力信号

$V_{\text{peak-peak}}$ :  $\pm 100$  V

Power: 10 W

前段減衰器試作機 (製作: (有)啓)



ビームを模擬した信号を入力し、抵抗の温度上昇と波形を確認  
(1)FR4基板、(2) セラミック基板  
で試験

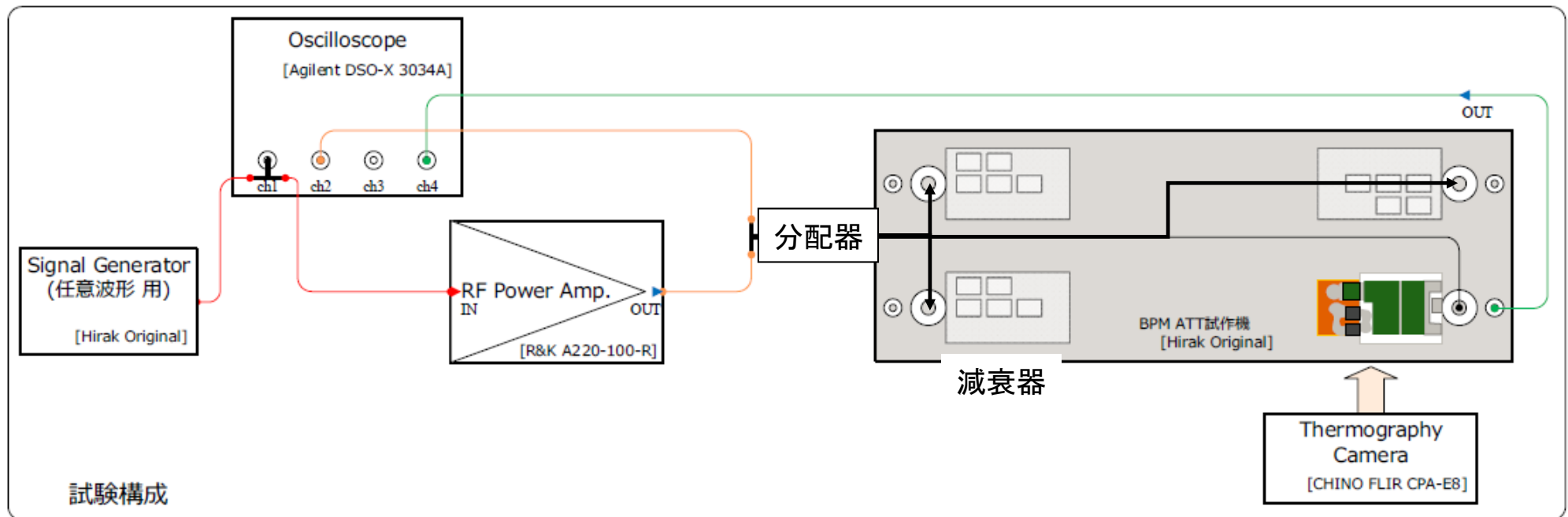
試験 16/06/24

FR4基板での試験

目的: 抵抗の温度がどこまで上がるか?ファンの冷却効果の確認

温度上昇上限: 当初+40°C (60°C)と設定していたが、自然空冷で放熱できるのは4 W程度

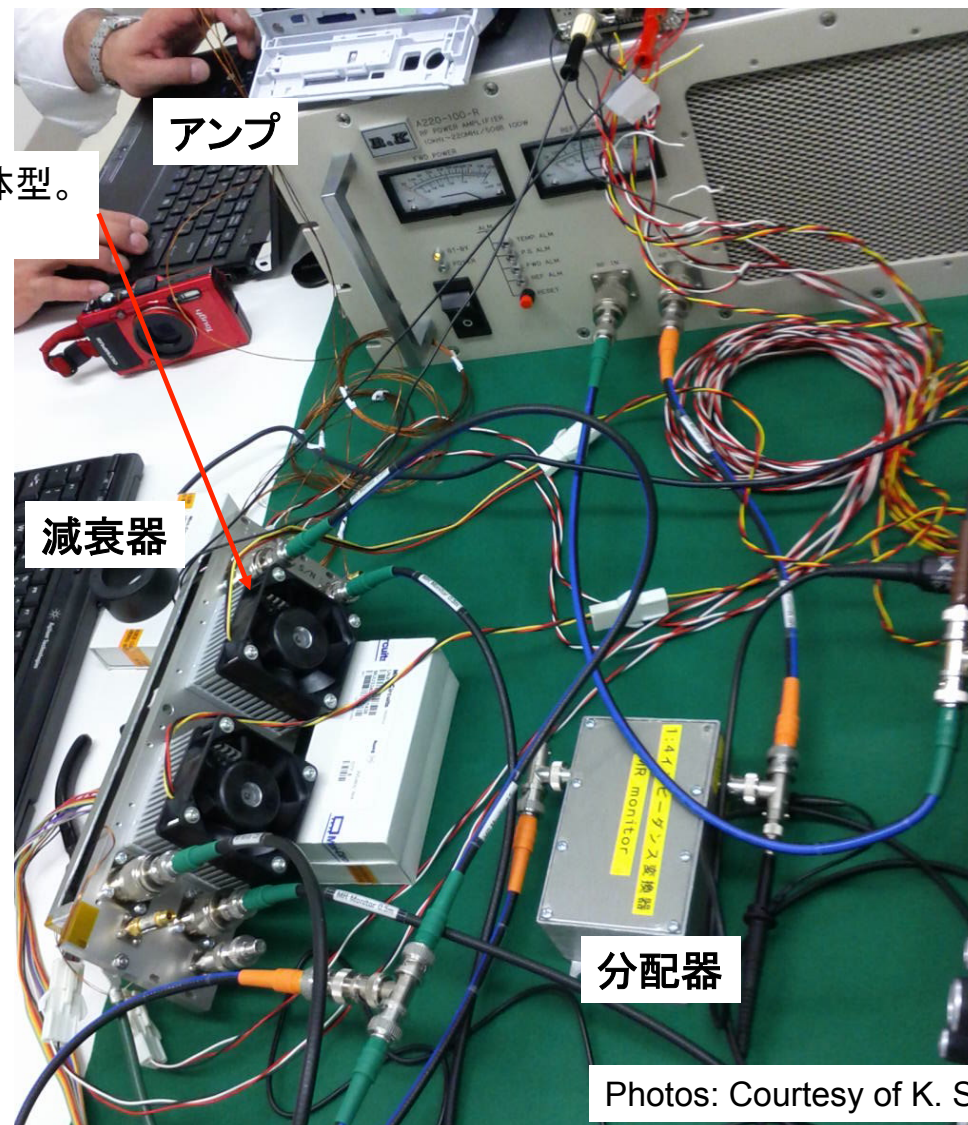
→厳しいのでファン(内部、外部)で強制空冷



Courtesy of T. Morino

## 試験セットアップ

外部ファンはヒートシンカー体型。  
熱伝導性粘着シートで接着。



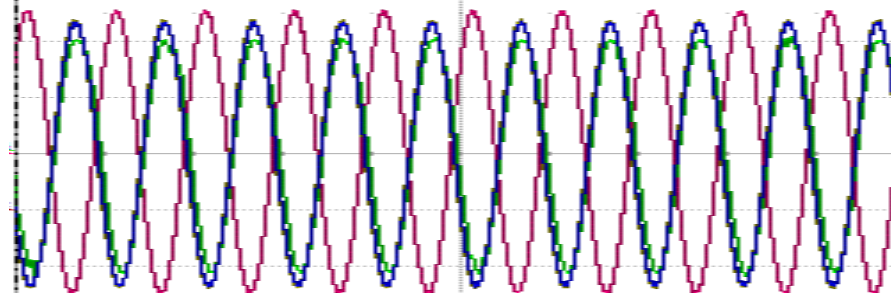
Photos: Courtesy of K. Sato

## 試験セットアップ

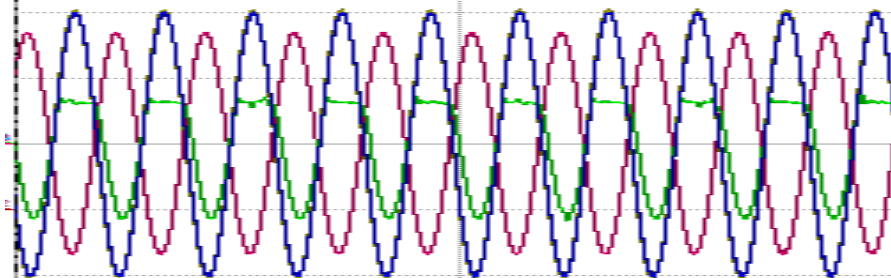


アンプ入力  
アンプ出力  
減衰器出力

入力 1.4 W/ch



入力 4.1 W/ch

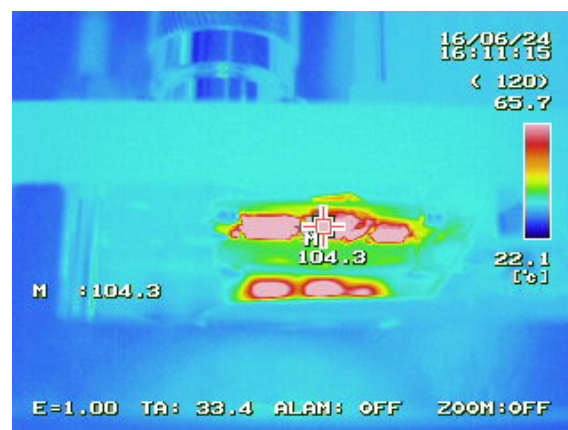


アナログ回路のスイッチに問題があり歪みが生じた  
アンプ出力自体も $\pm 100$  V出そうとするとピークが飽和してくる



## 温度上昇

入力 (W/ch)	ファン		抵抗表面温度(°C)	基板温度 (°C)
	内部	外部		
1.4	OFF	OFF	53	28.2
4.1	OFF	OFF	105	35.4
4.1	ON	OFF	94	36.7
4.1	ON	ON	95	30.6



最高温度に到達するまでにかかる時間は数秒  
(1 Hzにすると温度変化の周期が確認できる)

試験16/07/21

セラミック基板での試験

目的: 熱伝導がよいセラミックにすることで、放熱効果の改善を期待



	セラミック (アルミナ)	FR4
熱伝導率 (W/(m・K))	32	0.4

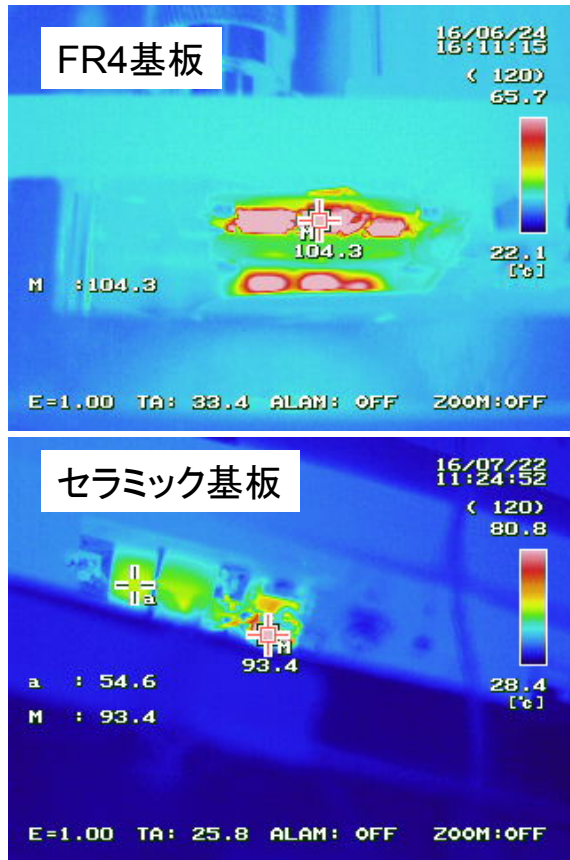
入力 (W/ch)	ファン		抵抗表面温度(°C)	基板温度 (°C)
	内部	外部		
3.0	OFF	OFF	46.2	42.7
10.5	OFF	OFF	68.4	54.3
10.5	OFF	ON	54.3	39.5
10.5	ON	ON	54.0	39.2

- 4 W/chで100°C近かった抵抗表面温度が、10 W/chでも50°C強まで改善。  
→セラミックの熱伝導率が高いことによりアルミ板への熱流束が増え外部ファンの効果が増大した。
- 各基板を個別に冷却するための内部ファンの効果は低い  
→外部ファンのみで十分 (実装の際にファンの個数を減らせる)

試験16/07/21

セラミック基板での試験

目的: 熱伝導がよいセラミックにすることで、放熱効果の改善を期待



	セラミック (アルミナ)	FR4
熱伝導率 (W/(m・K))	32	0.4

入力 (W/ch)	ファン		抵抗表面温度(°C)	基板温度 (°C)
	内部	外部		
3.0	OFF	OFF	46.2	42.7
10.5	OFF	OFF	68.4	54.3
10.5	OFF	ON	54.3	39.5
10.5	ON	ON	54.0	39.2

- 4 W/chで100°C近かった抵抗表面温度が、10 W/chでも50°C強まで改善。  
→セラミックの熱伝導率が高いことによりアルミ板への熱流束が増え外部ファンの効果が増大した。
- 各基板を個別に冷却するための内部ファンの効果は低い  
→外部ファンのみで十分 (実装の際にファンの個数を減らせる)

## まとめ

- BPMの位置分解能の1桁改善を目指し、新BPMC開発が進行中  
目標分解能は数 $\mu\text{m}$ ～数十 $\mu\text{m}$  (現状より1桁の改善)
- 将来的に想定されるBPMC入力信号による熱負荷は10 W、電圧ピーク値は $\pm 100\text{ V}$   
→入力信号を直接受ける前段減衰器が必要
- 前段減衰器の熱負荷試験を行った
- 外部ファンによる冷却で、回路素子の性能上問題ない温度上昇(+40°C)に抑えることが可能

## 展望 (放熱に関して)

- 発熱の時間変化、伝達の理解、検討 (計算)
- アルミ板の厚さ等、減衰器筐体構造の最適化
- 集積化による放熱への影響の検討
- 外部ファンの現実的な方法

$$SNR(dB)=6.02N+1.76+10\log_{10} k$$

N: ビット数

k:  $f_{sampling} (MS/sec)/2/\text{信号帯域幅} (MHz)$  , 信号帯域幅: 10 (MHz)

	現状	新BPMC
N	14	16
f <sub>sampling</sub>	80	250
k	4	12.5
SNR	94.9	115.6

115.6-94.9=20.7 (dB) ほぼ10倍の改善