

# SACLA電子バンチ振り分けの為のキッカー電 磁石用高精度パルス電源の開発と NMRパルス磁場測定

第11回加速器会議  
2014-8-10 @青森

理研: 武部英樹、原 徹、大竹雄次、稲垣隆宏、近藤力、田中均

JASRI: 深見健司

ニチコン草津: 川口秀章、吉本宏

エコー電子: 中島 司

## はじめに

X線自由電子レーザー施設、 SACLA

(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)で  
2015年から複数のビームラインにおいて同時に実験が行  
えるよう、最大60ppsの電子バンチを3つの方向に  
振り分けるシステムを開発している。

そのため、最大電流 $\pm 320\text{A}$ 、最大電圧 $\pm 150\text{V}$ 、最大繰り返し  
60ppsの4象限方式で、16msの台形波パルスを生成する  
キッカー電磁石電源を設計、製作、試験を行ったので、ここ  
で報告する。

## 本日の発表内容

### 1. 高速振り分けシステム概要

### 2. 電源の仕様 (Kicker)

### 3. 電源の設計、構造、製作

### 4. 性能試験

各種試験方法(DCCT, Pickup-Coil, NMR, Hall)

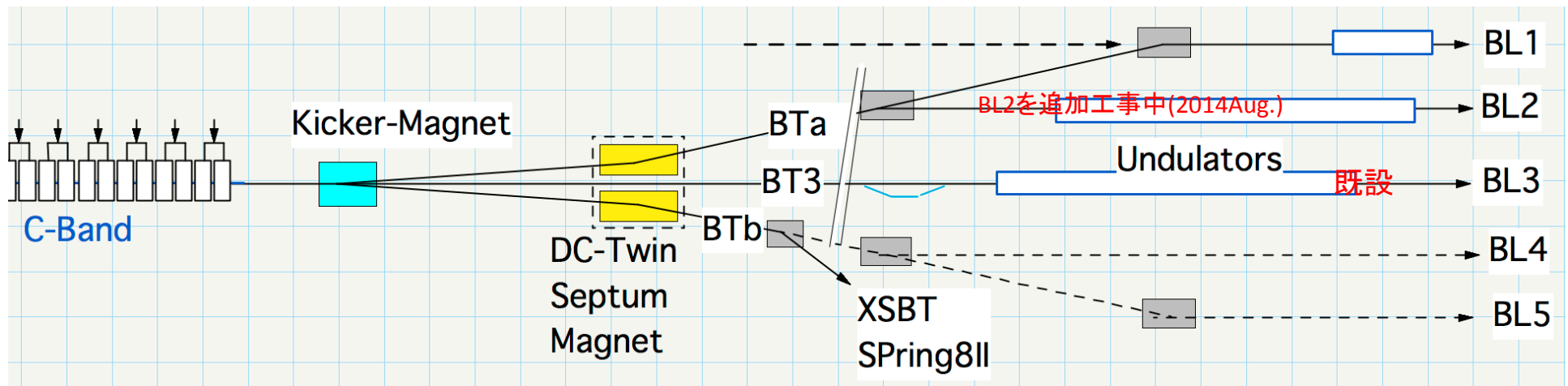
### 5. まとめ

# XFEL Multi-Beamlines Switching systemの概要

2015.1月から予定

最速60ppsでバンチを1~3方向に振り分けて  
複数のビームライン(BL)が「同時」利用する。

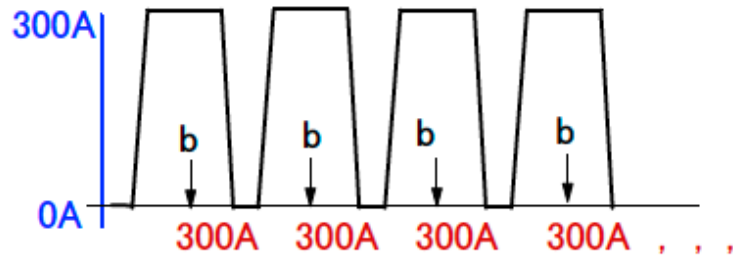
3方向に別々のエネルギーも (原;SAOL02;参照)



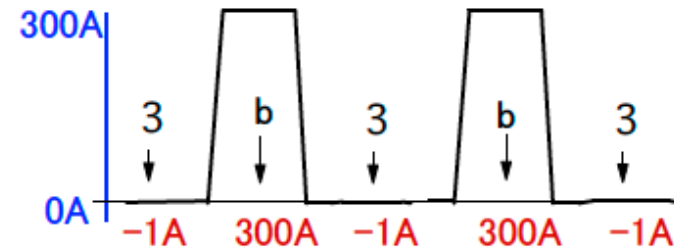
DC-Twin Septum電磁石と電源は製作中(2014.11月搬入予定)

# キッカー電源の振り分けパターン

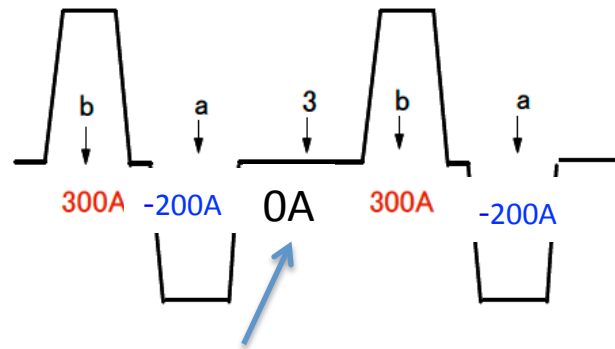
One Direction (BTb)



Two Directions (BTb, BT3)

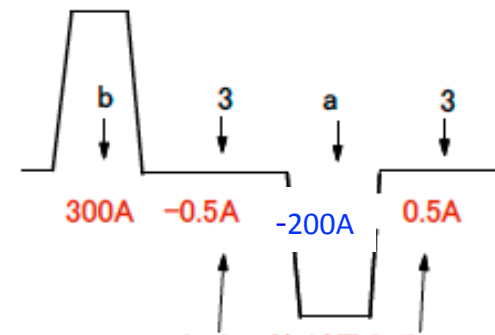


3方向均等振り分け



0A時の残留磁場が小さければ、  
後ろのSteering Magnetで補正可能だが、

3方向不均等振り分け1

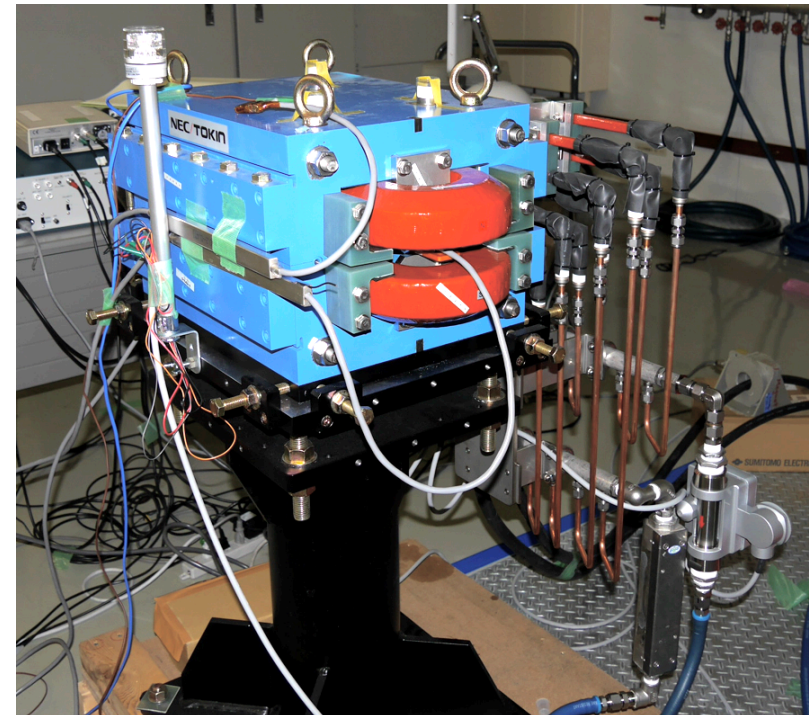


ヒステリシスのために値が異なる

残留磁場が大きければ  
Kicker Magnetの微小電流制御が  
必要になる。

# キッカー電磁石仕様

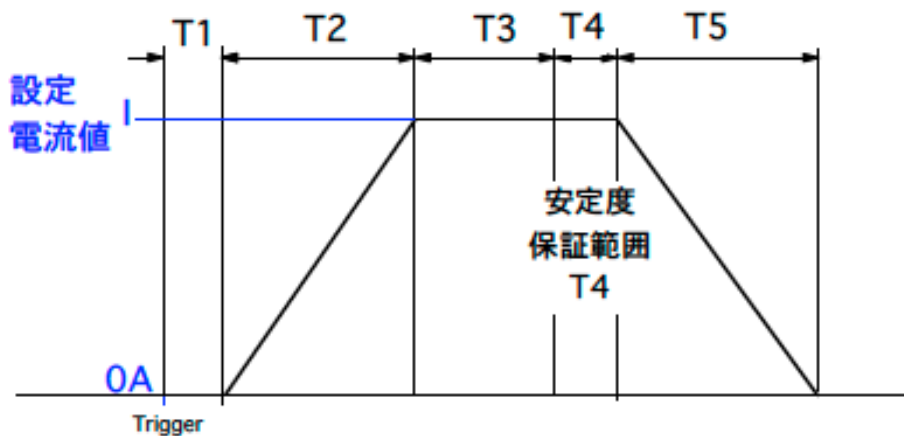
- ヨーク 0.35 mm積層電磁鋼板
- 中心磁場 0.67 Tesla
- 励磁 台形波パルス
- コイル冷却 ホロコン、水冷
- 磁極長 400 mm
- 磁極間ギャップ 20 mm
- 磁極幅 40 mm
- 定格起磁力 5310 A・Turn/Pole
- ターン数 18 Turn/Pole x 2 poles
- 最大電流 320 A
- 最大電圧 150V
- 抵抗 4.4 mΩ
- インダクタンス 2.6 mH
- ケーブル LMFC 250sqmm, 往復20m長, 2mΩ



# キッカー電磁石電源仕様

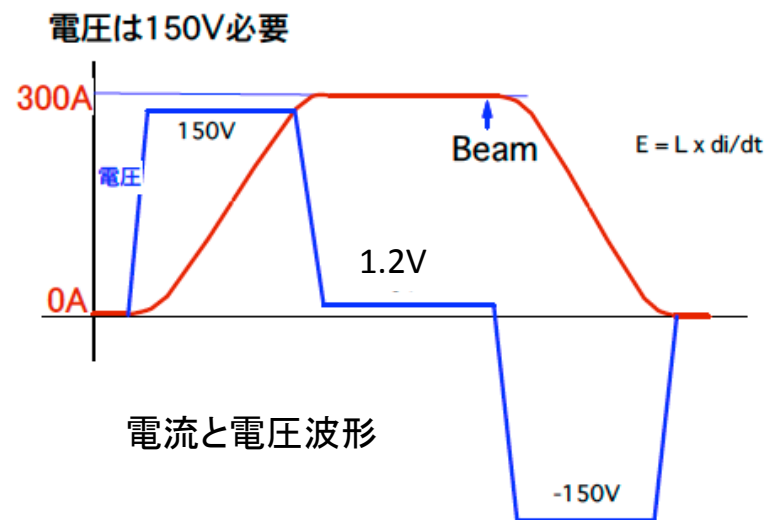
- 最大電流  $\pm 320$  A
- 最大電圧  $\pm 150$  V (99%がLによるもの)
- 必要安定度 (p-p) 30ppm (目標 10ppm) /8H
- リップル (p-p) 30ppm (目標 10ppm) /10kHz以下
- 繰り返し 60pps
- 電流波形 台形波(Flat Top 4ms)
- 最低電流 0.2A (絶対値)

# パルス電流波形と電圧



Top電流                    ±320A  
 繰り返し                    60pps  
 波形                         台形波  
 電圧は負荷のInductanceにより±150V

- 1) 60pps以下の例  
 T1= 0.6ms  
 T2= 5.6ms  
 T3= 4.2ms  
 T4= 0.6ms (電流測定)  
 T5= 5.6ms  
 (T1+T2+T3+T4+T5=16.66ms)



電流と電圧波形



1. 高速振り分けシステム概要
2. 電源の仕様
- 3. 設計、構造、製作**
4. 性能試験
5. まとめ

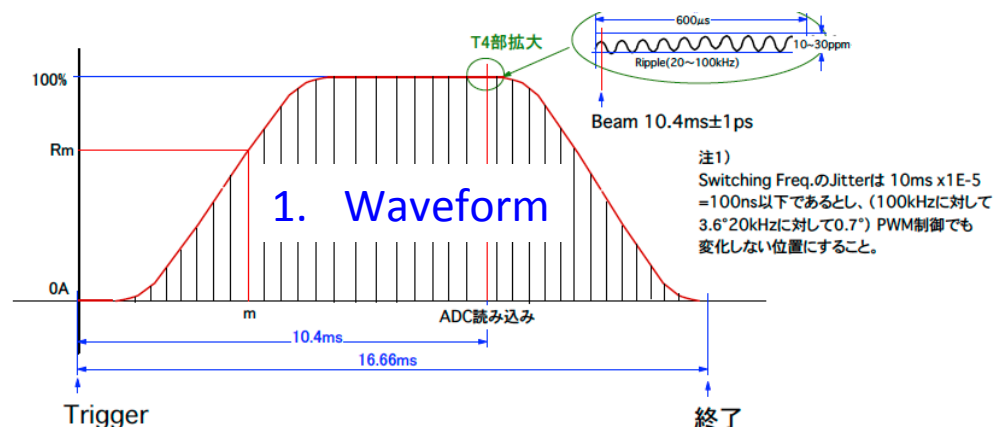
電源の大きさ  
約3m, 1m, 2m



# 波形、運転、タイミング

## 1. Waveform

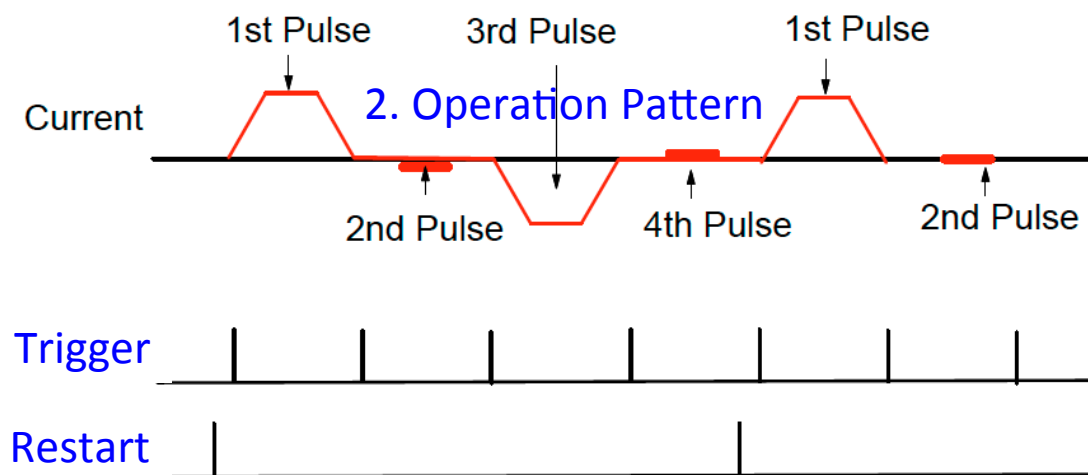
パルス波形は予め電源にメモリしておく(固定)



ビーム時刻の10.4ms前に  
Trigger信号をもらう

## 2. Operation Pattern

4発の電流波高値(運転パターン)  
を上位から伝送しておく。

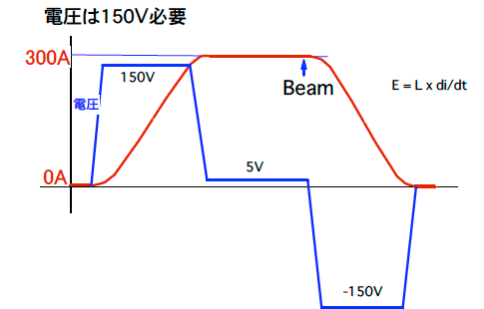
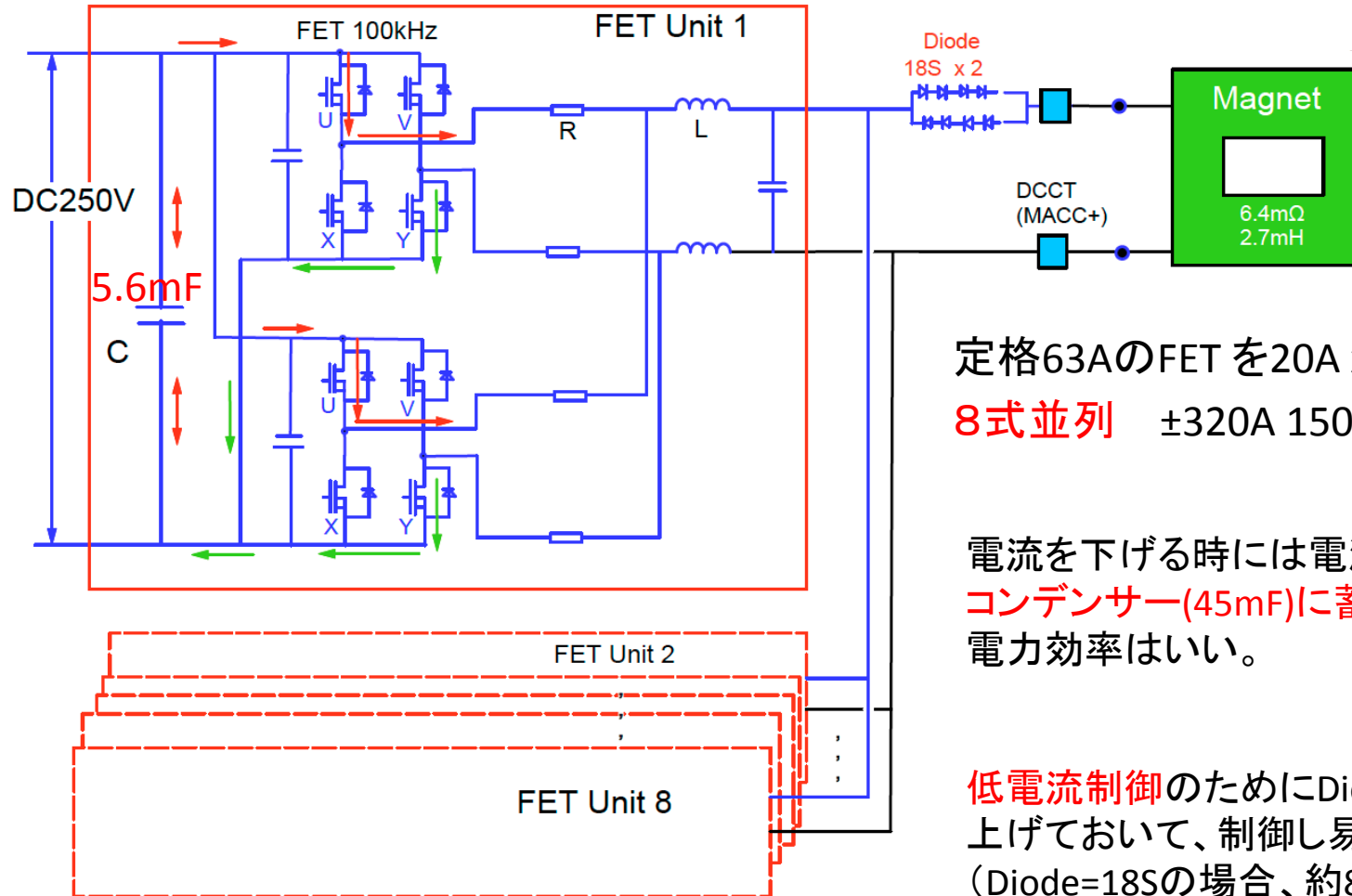


3. 外部からのTrigger信号で  
4発の電流値を順番に打つ。

4. Restart信号でその4発を  
繰り返す。

# 電流波形制御方法

100kHz FET PWM 4象限電源とする

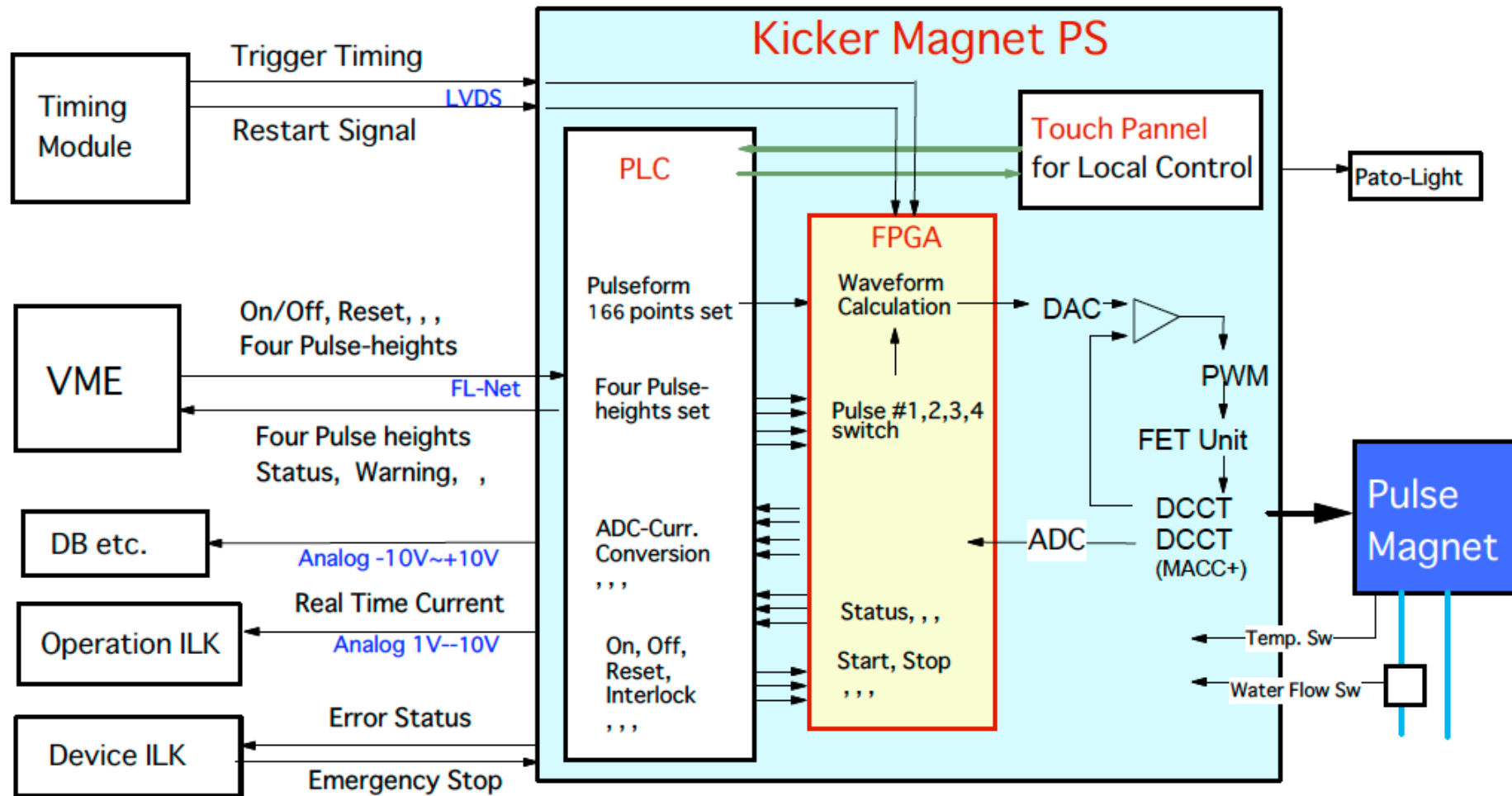


定格63AのFETを20A x 2paraのUnit  
8式並列 ±320A 150Vを出力

電流を下げる時には電流を  
コンデンサー(45mF)に蓄積するので、  
電力効率がいい。

低電流制御のためにDiodeの順方向電圧で  
上げておいて、制御し易くする。  
(Diode=18Sの場合、約8V)

# 電流パターン制御方法



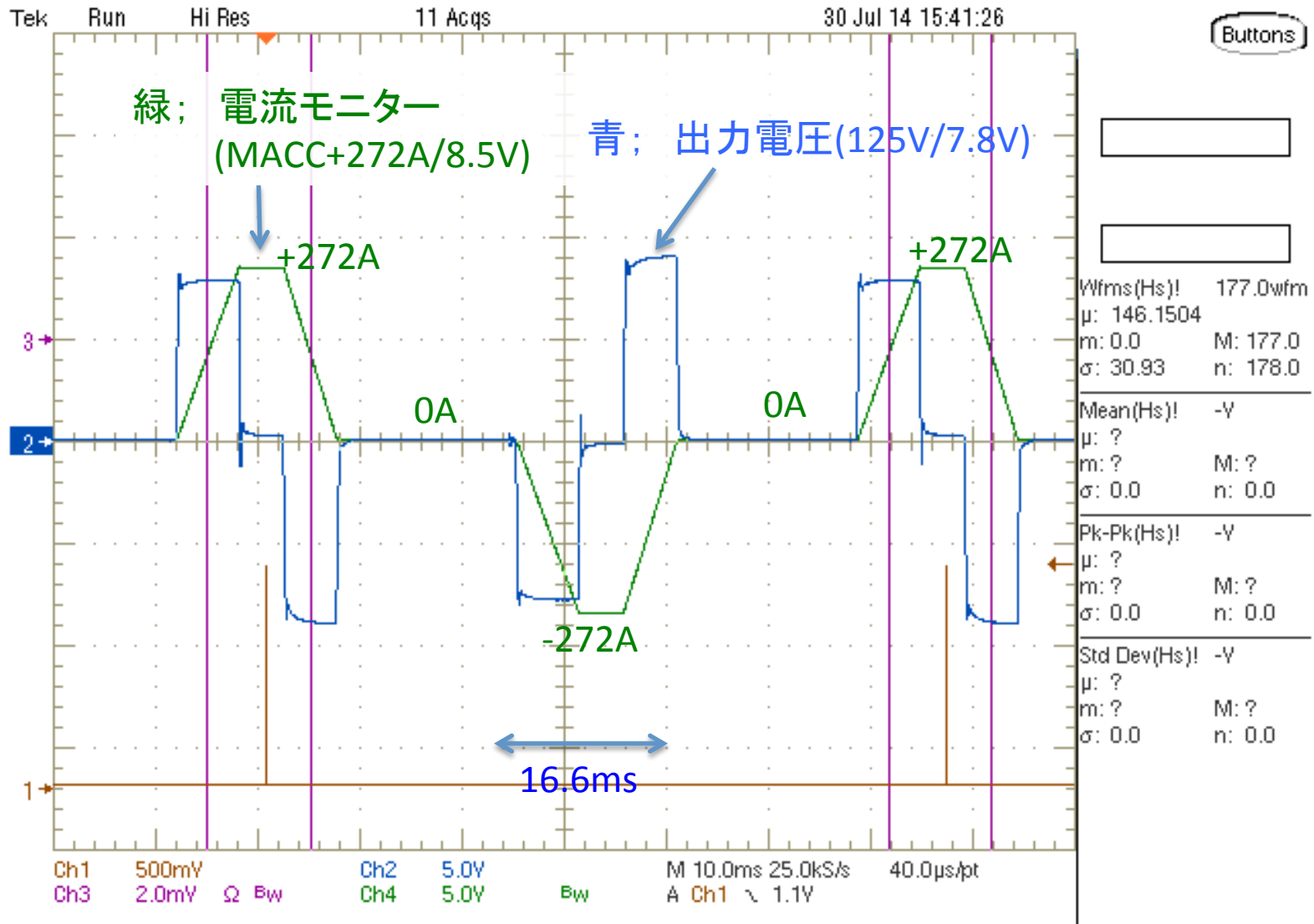
1. 高速振り分けシステム概要
2. 電源の仕様
3. 電源の設計、構造、製作

## 4. 性能試験

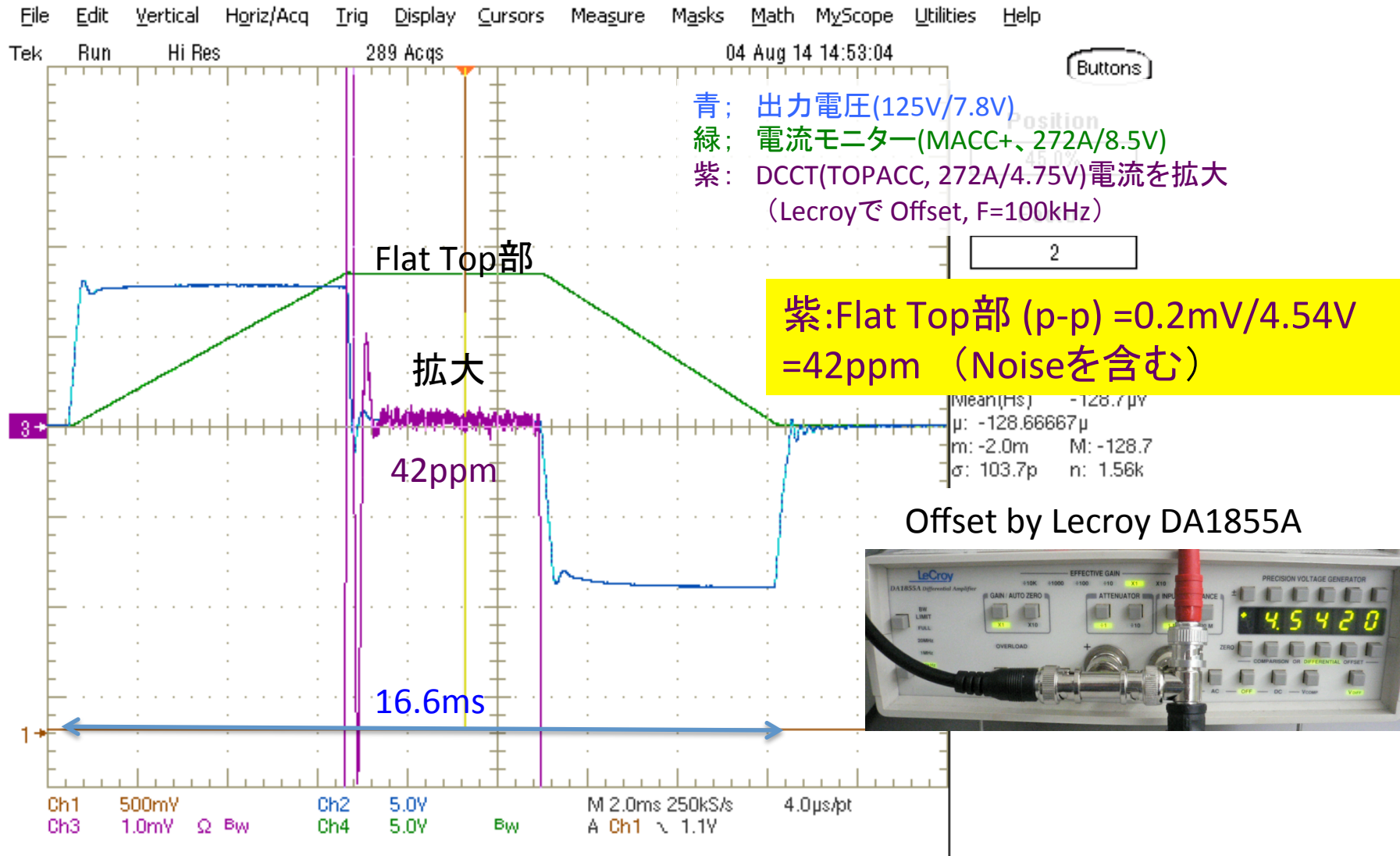
- 4-1. DCCTによる電流測定 (  $\sim 10\text{kHz}$  )
- 4-2. Pickup Coilによるリップル測定 ( 数MHz  $\sim 10\text{kHz}$  )
- 4-3. NMRによる磁場測定 (  $< 60\text{Hz}$  )
- 4-4. Hallによる残留磁場測定と打ち消し試験

5. まとめ

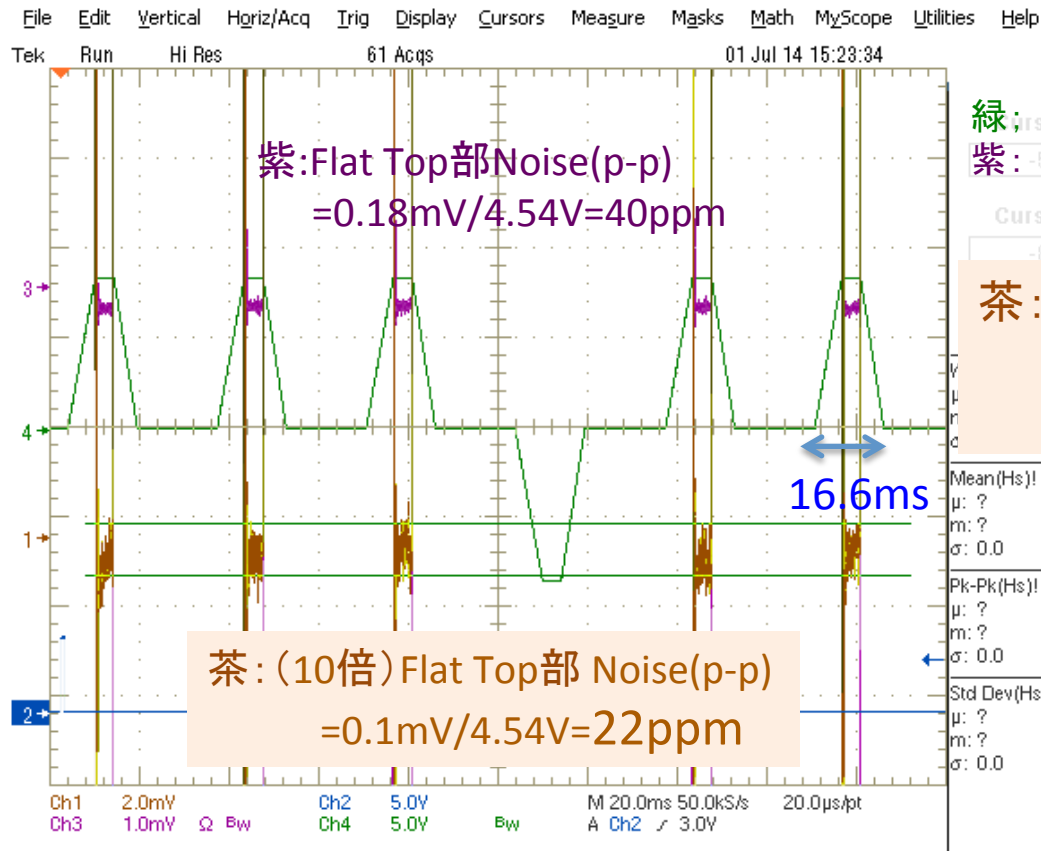
# パルス電流波形測定値



# 4.1 外部DCCTによる電流安定度測定



# Flat Top部電流安定度測定



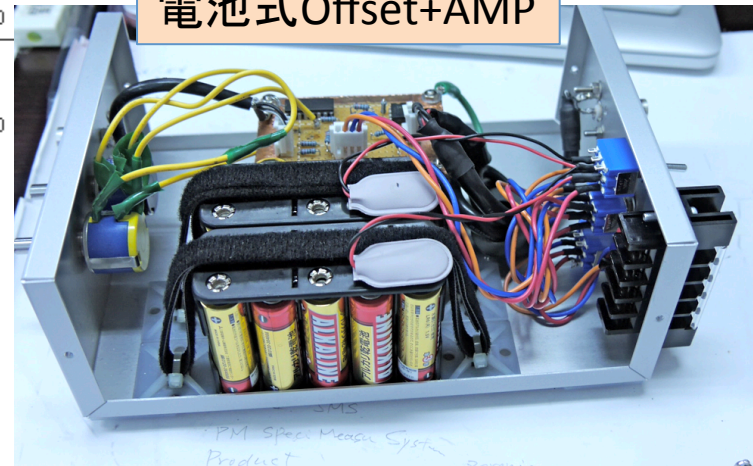
Buttons

緑: 電流モニター(MACC+272A/8.5V)  
 紫: DCCT(TOPACC, 272A/4.75V)電流を  
 (Lecroy Offset, F=100kHz) 拡大

茶: DCCT(TOPACC, 272A/4.75V)電流を  
 電池式Offset+AMPで10倍に拡大  
 (AMP後に100kHzのFilterあり)

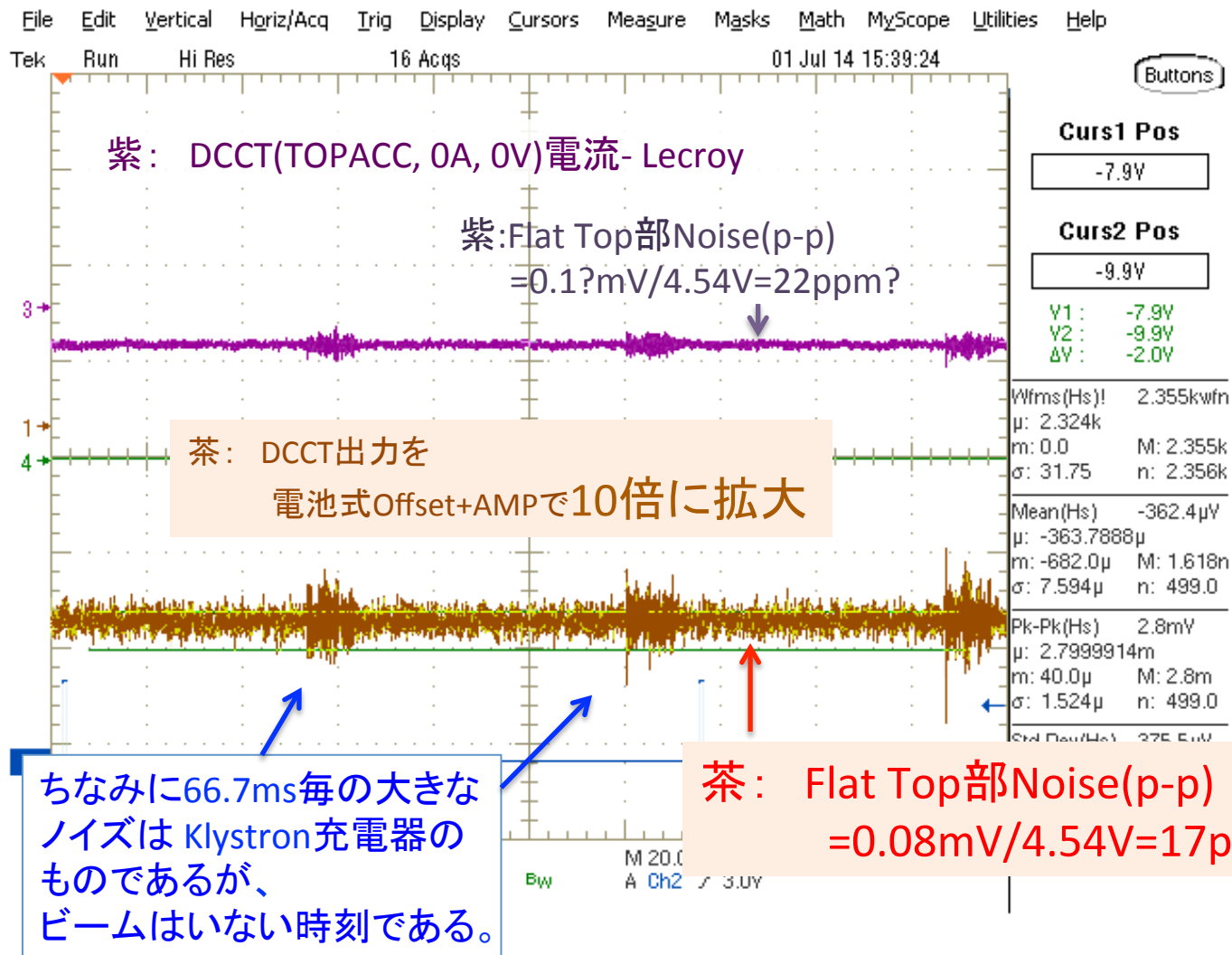
Mean(Hs)!	-V
μ: ?	
m: ?	M: ?
σ: 0.0	n: 0.0
Pk-Pk(Hs)!	-V
μ: ?	
m: ?	M: ?
σ: 0.0	n: 0.0
Std Dev(Hs)!	-V
μ: ?	
m: ?	M: ?
σ: 0.0	n: 0.0

電池式Offset+AMP





# 電源OFF時のノイズの測定



# 電流リップル測定と環境ノイズ

電流リップルの測定値  $V$  には測定系のノイズ  $V_n$  が含まれており、以下の計算式でノイズを差し引いた計算をする

$$V^2 = V_r^2 + V_n^2$$

(ただし環境ノイズがガウス分布である場合)

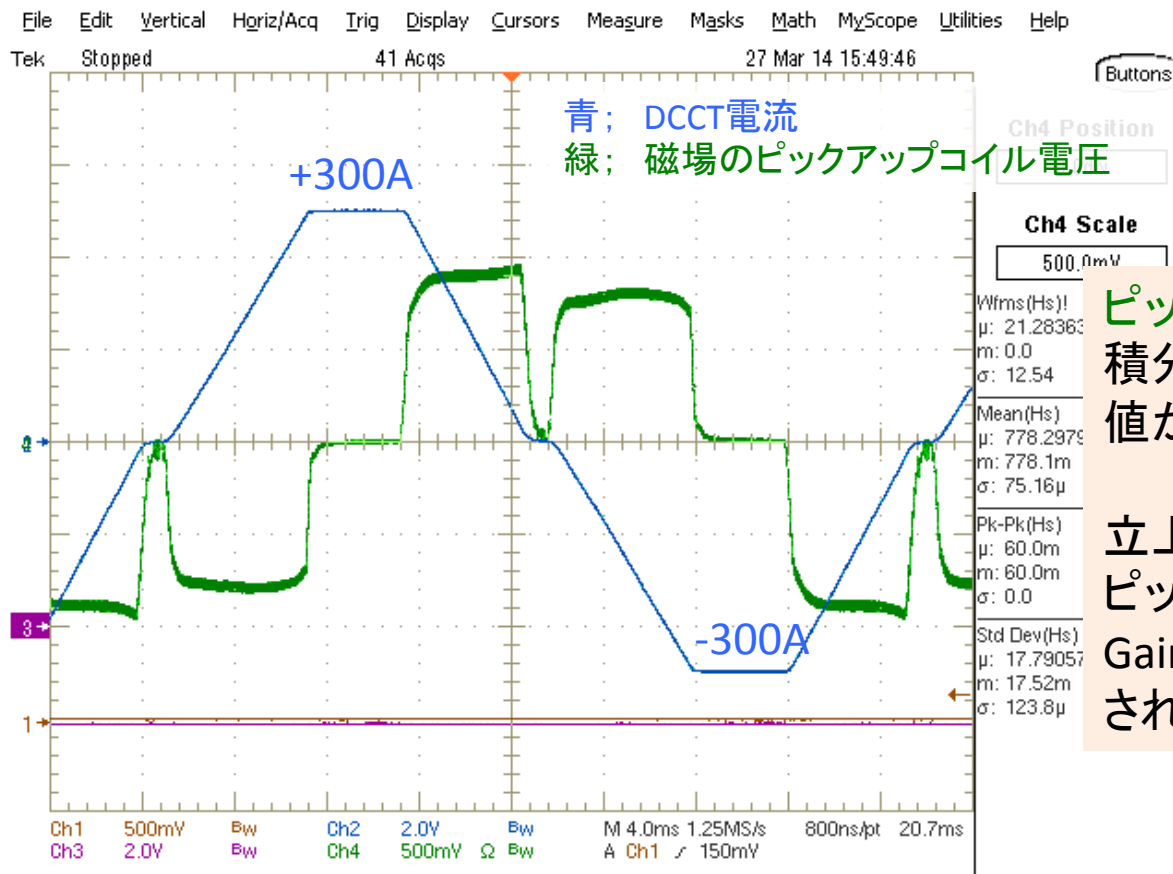
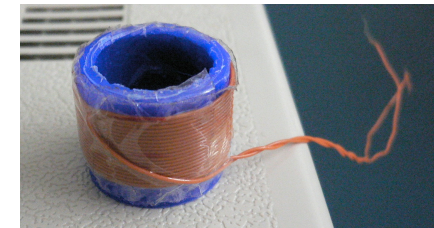
代表的な測定例では真の信号  $V_r$  は

$$\begin{array}{l} V = 0.1\text{mV} \\ V_n = 0.08\text{mV} \end{array} \quad \text{から} \quad \begin{array}{l} V_r = 0.06\text{mV} \text{ となり} \\ \text{Ratio} = 0.06\text{mV}/4.54\text{V} = 13\text{ppm} \end{array}$$

その他の測定例からでも 電流リップルは  
定格電流の320A(5.33V)に対しては 11 ~ 13ppmになる。

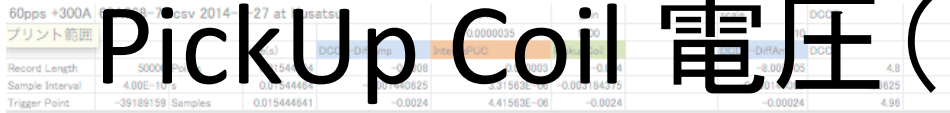
## 4.2 Pick-Up CoilでdB/dtの測定

高い周波数成分の電流リップルは磁石で減衰する。  
そのため、GAP中にピックアップコイル(21mm径、20ターン)を挿入して  
その電圧を測定し、磁場のリップルを計算する。

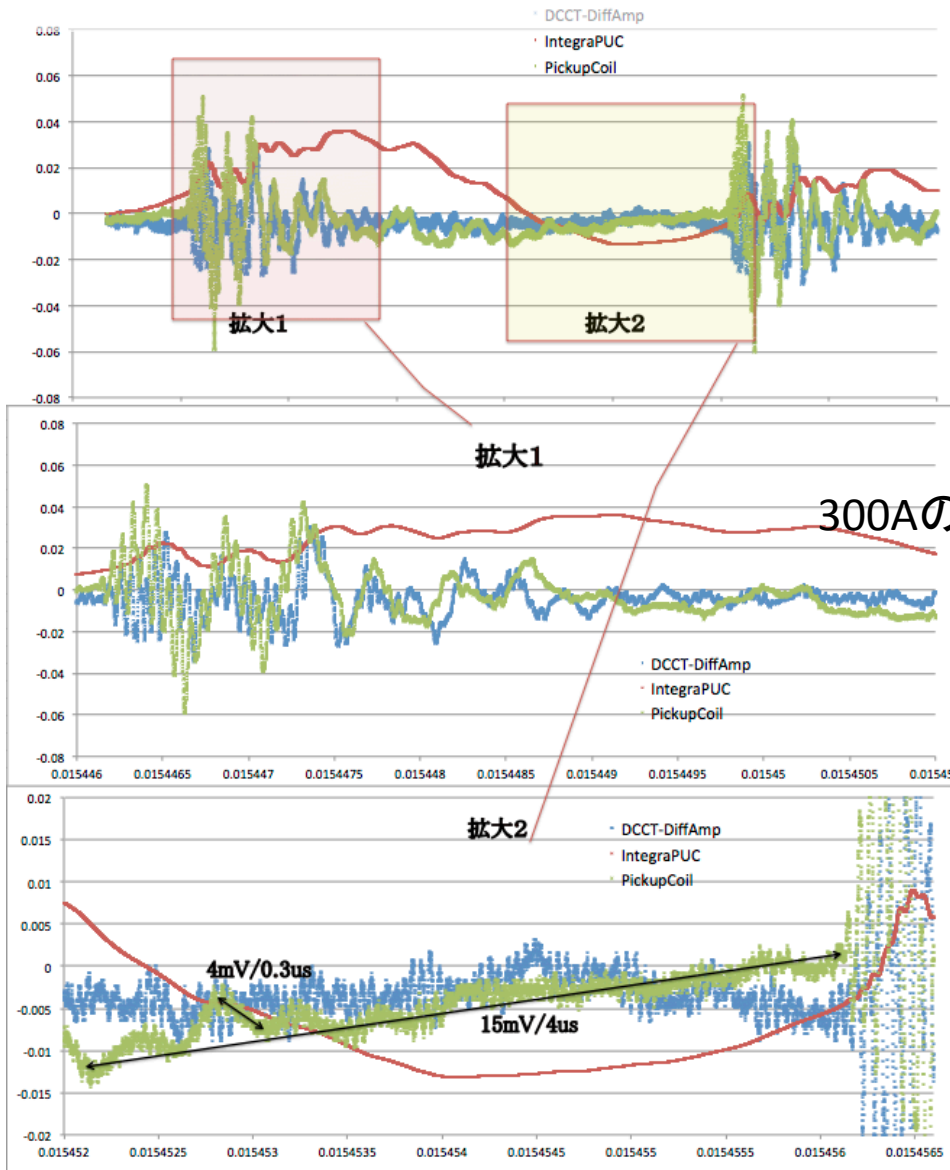


ピックアップコイル電圧を  
積分すると磁場に比例した  
値が得られる。

立上がり、立下がり部から  
ピックアップコイルの  
Gainは 1350kG/s/Vと算出  
された。



# PickUp Coil 電圧 (Flat Top部拡大)



電流のFlat Top部(300A)をPickup Coilで見る。

青; DCCT-Diff.Amp  
 緑: Pickup Coil電圧  
 茶: Pickup Coil電圧を積分

コイル電圧を積分する際、オシロのOffsetがあるため0.35uVのOffsetを足して計算した。

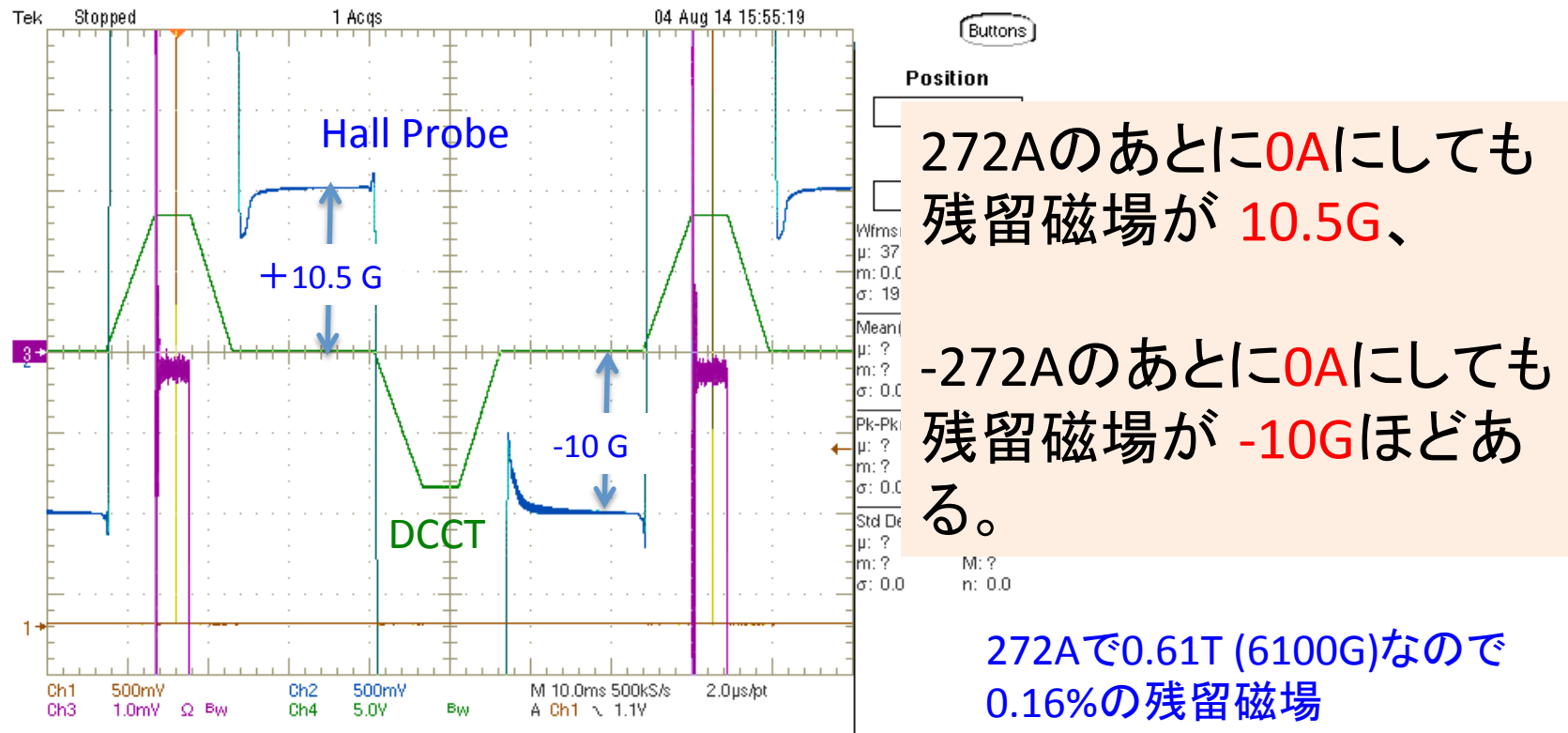
Flat部後半の4 $\mu$ sでのPickupCoilの電圧=15mV  
 Coil Gain=1350kG/s/Vから dBは  
 $8.1 \times 10^{-2}$  Gauss/ 4 $\mu$ s  
 (0.3 $\mu$ sでは4mV  $\rightarrow$   $1.6 \times 10^{-2}$  Gauss)  
 と計算され  
 7.2kGに対しては 11ppmとなる。

(ただし、コイル以降の配線からのノイズも含んでいるので、GAPの外とも比較が必要。)

# 4.3 Hallによる残留磁場測定

BL3にビームを通す場合に重要

Hall-Gaussmeter: Lakeshore 460の  
アナログモニター出力 30G/3V をオシロで観測

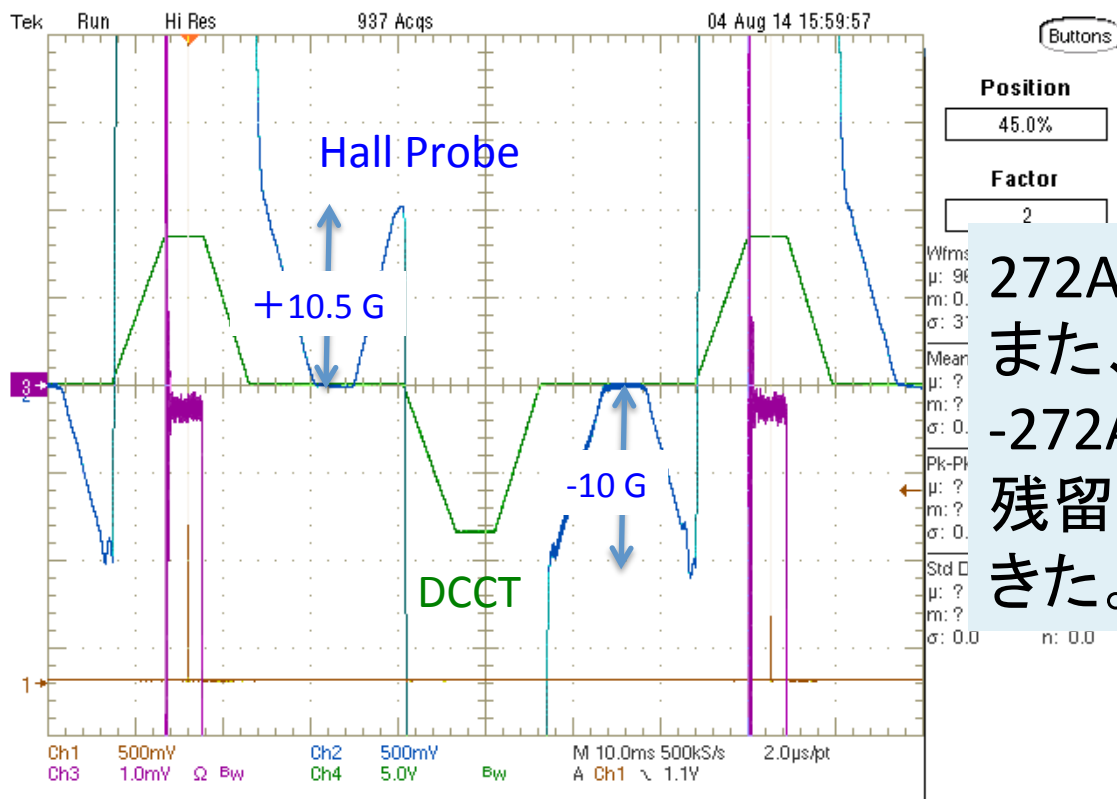


なおHallモニター波形遅れは0.1ms程度である。

# 0A時の残留磁場の打ち消し

BL3にビームを通す場合に重要

Hall-Gaussmeter: Lakeshore 460の  
アナログモニター出力 30G/3V をオシロで観測

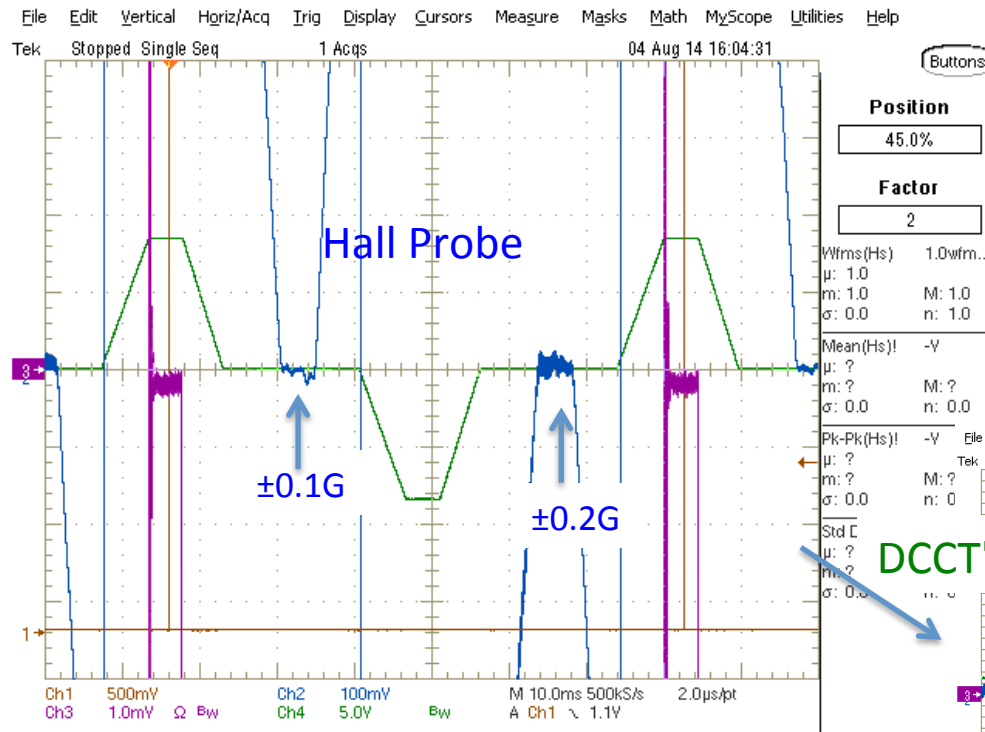


Buttons  
Position 45.0%  
Factor 2  
Wfms  
μ: 96  
m: 0.  
σ: 3.  
Mean  
μ: ?  
m: ?  
σ: 0.  
Pk-Pk  
μ: ?  
m: ?  
σ: 0.  
Std D  
μ: ?  
m: ?  
σ: 0.0  
n: 0.0

272Aのあとに-0.51Aにして  
また、  
-272Aのあとに+0.44Aにして  
残留磁場を±0.2G以下にで  
きた。

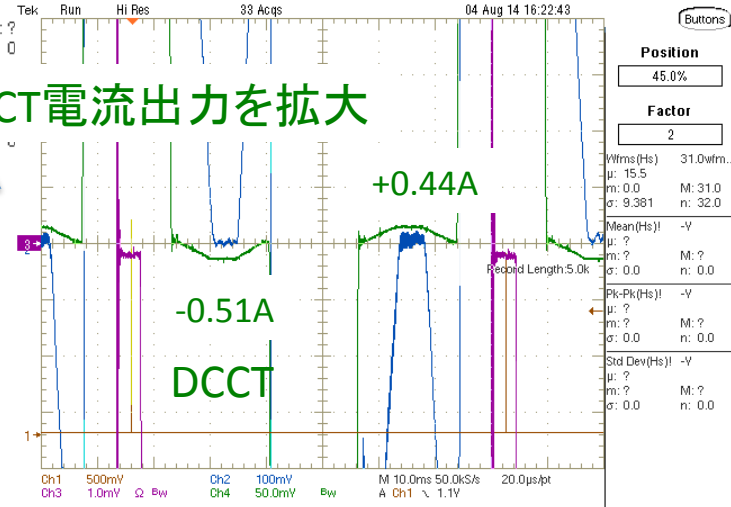
# 0A時の残留磁場の打ち消し

(Hall出力を拡大して見ると $\pm 0.2\text{G}$ 程度以下に出来る)

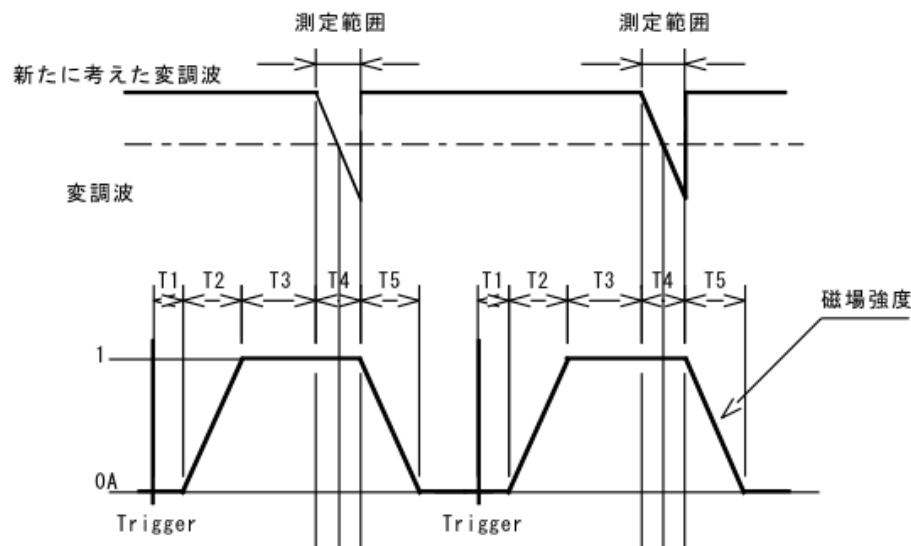


Lakeshore のモニターレンジ  
3V=30G (3mT)  
1V=10G  
 $\pm 10\text{mV}=\pm 100\text{mG}$

DCCT電流出力を拡大



# 4.4 Flat Top部の磁場を 高精度で測定するためのNMR(新型)



外部トリガーから10.4ms後を  
0.6msでsearchする新方式

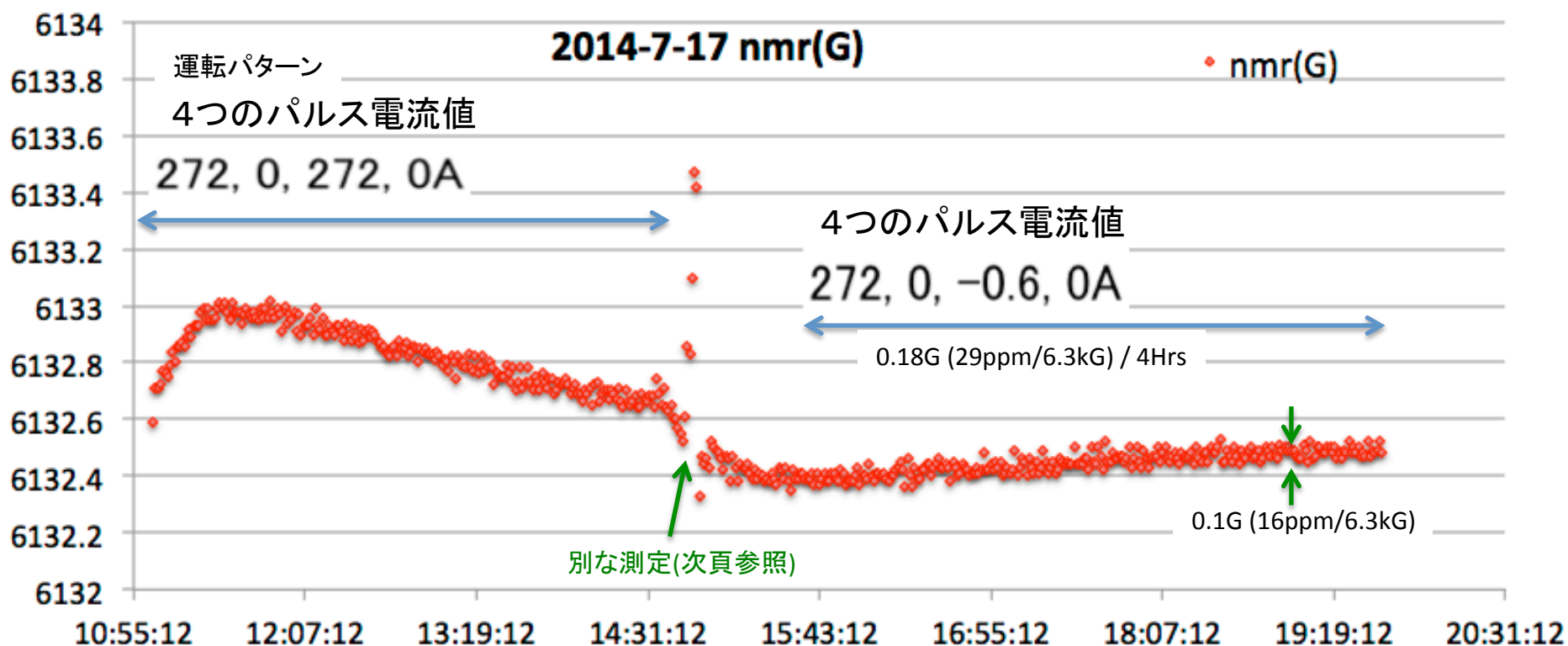


probe Headを60Hzパルス用に改造試作成功(2014.4.18)

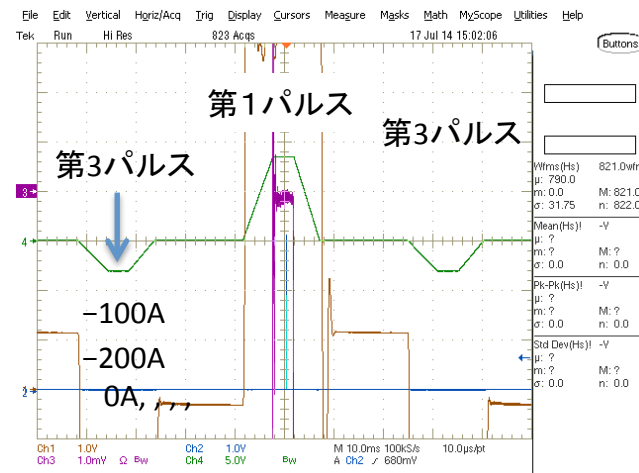


# 4.4 NMRで磁場の長時間安定度測定

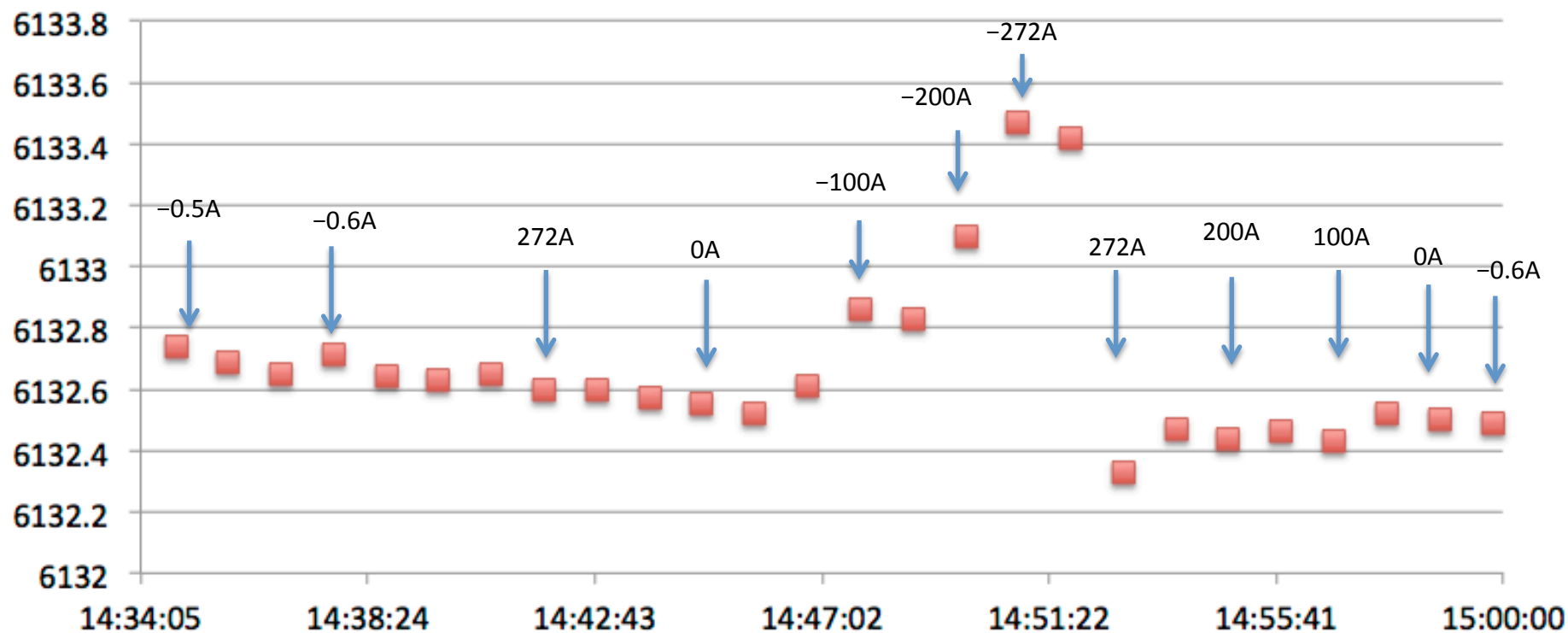
## 第1パルスの磁場をNMRで自動測定



# 第3パルスの電流値を 272A～-272Aで変化させた時の 第1パルスの磁場の変化



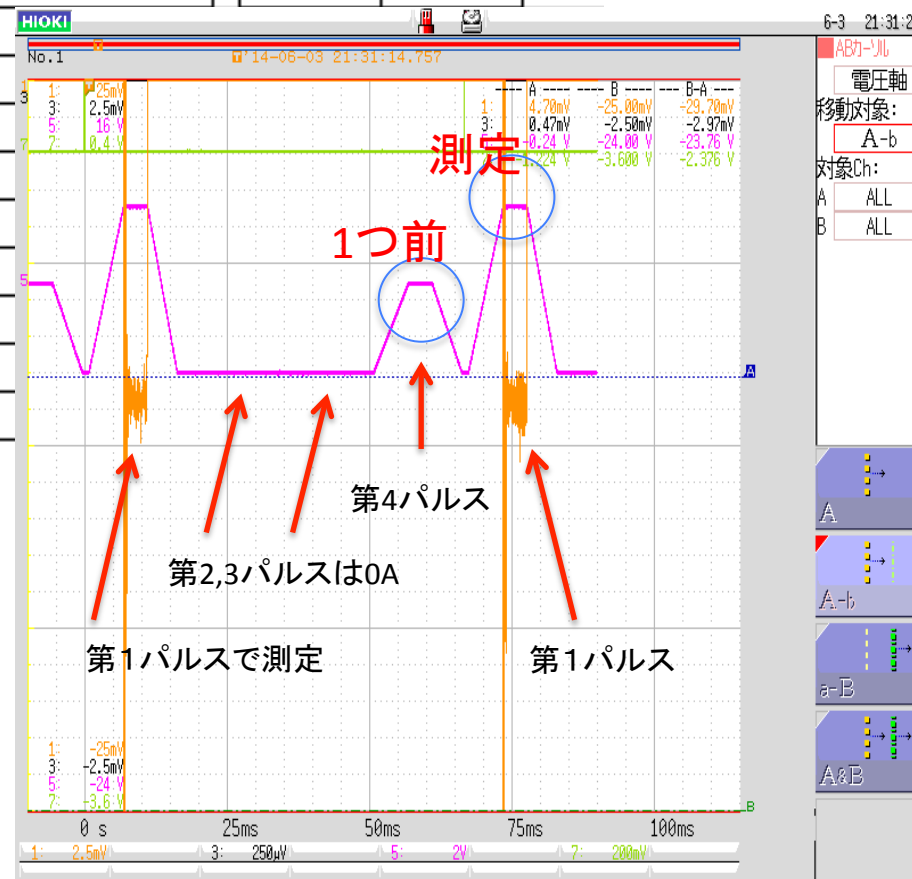
第3パルスの電流値を 272A～-272Aで変化させた時の差



# 運転パターンの違いによる誤差(1)

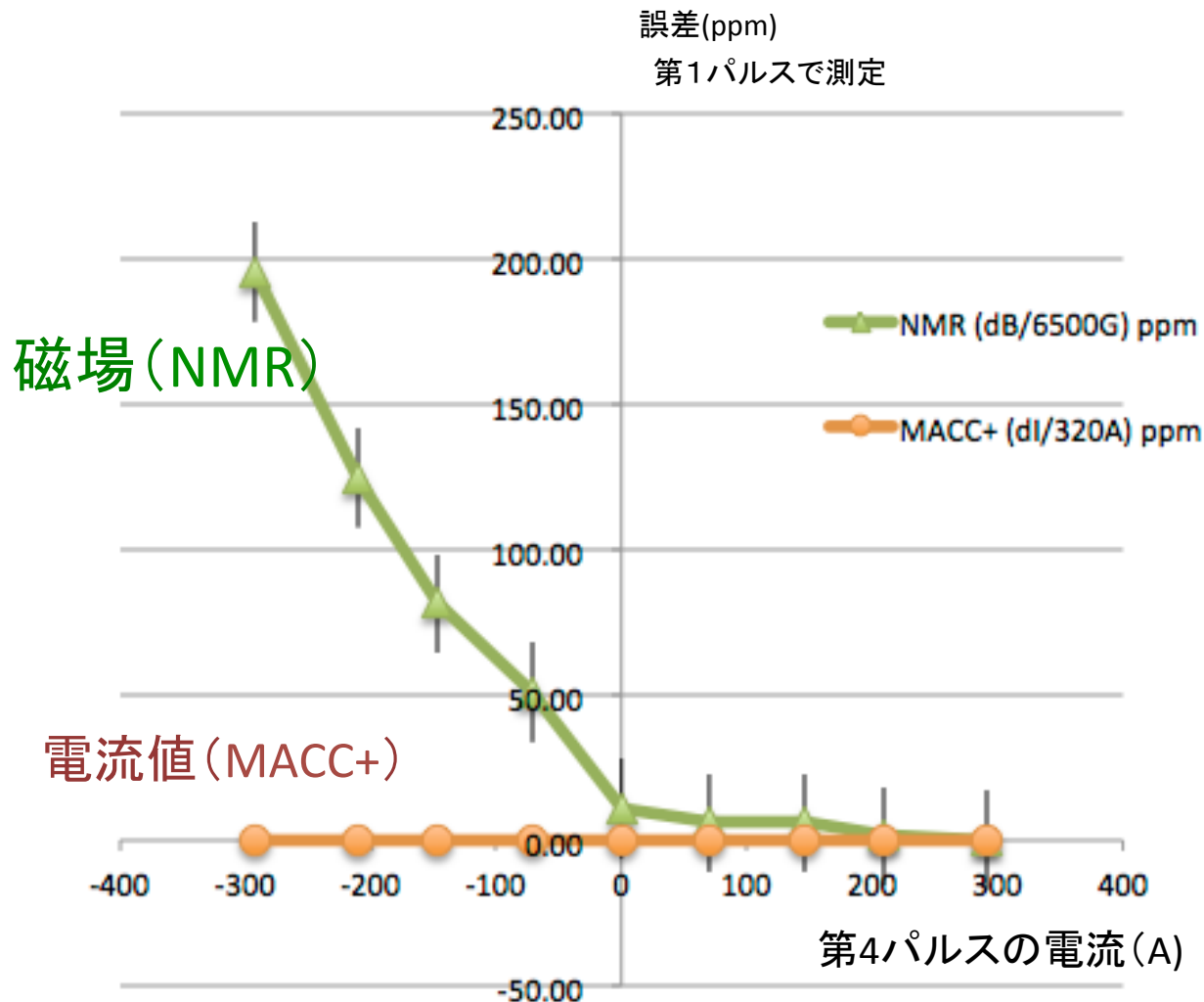
運転履歴として1つ前のパルスの影響の関数にして、第1パルスの磁場を測定

運転	パルス電流(A)				すべて第1パルスで測定		MACC PLUS	
パターンNo	第1	第2	第3	第4	磁場	6591.1	DCCT(A)	(dI/320A) ppm
					NMR(G)	(dB/6500G) ppm	0	0.00
1	292.44	0	0	292.44	0	0.00	0	0.00
2	292.44	0	0	210	0.01			
3	292.44	0	0	146	0.04			
4	292.44	0	0	70	0.04			
5	292.44	0	0	0	0.07			
6	292.44	0	0	-70	0.33			
7	292.44	0	0	-146	0.53			
8	292.44	0	0	-210	0.81			
9	292.44	0	0	-292.44	1.27			
10	292.44	0	0	292.44	0.11			



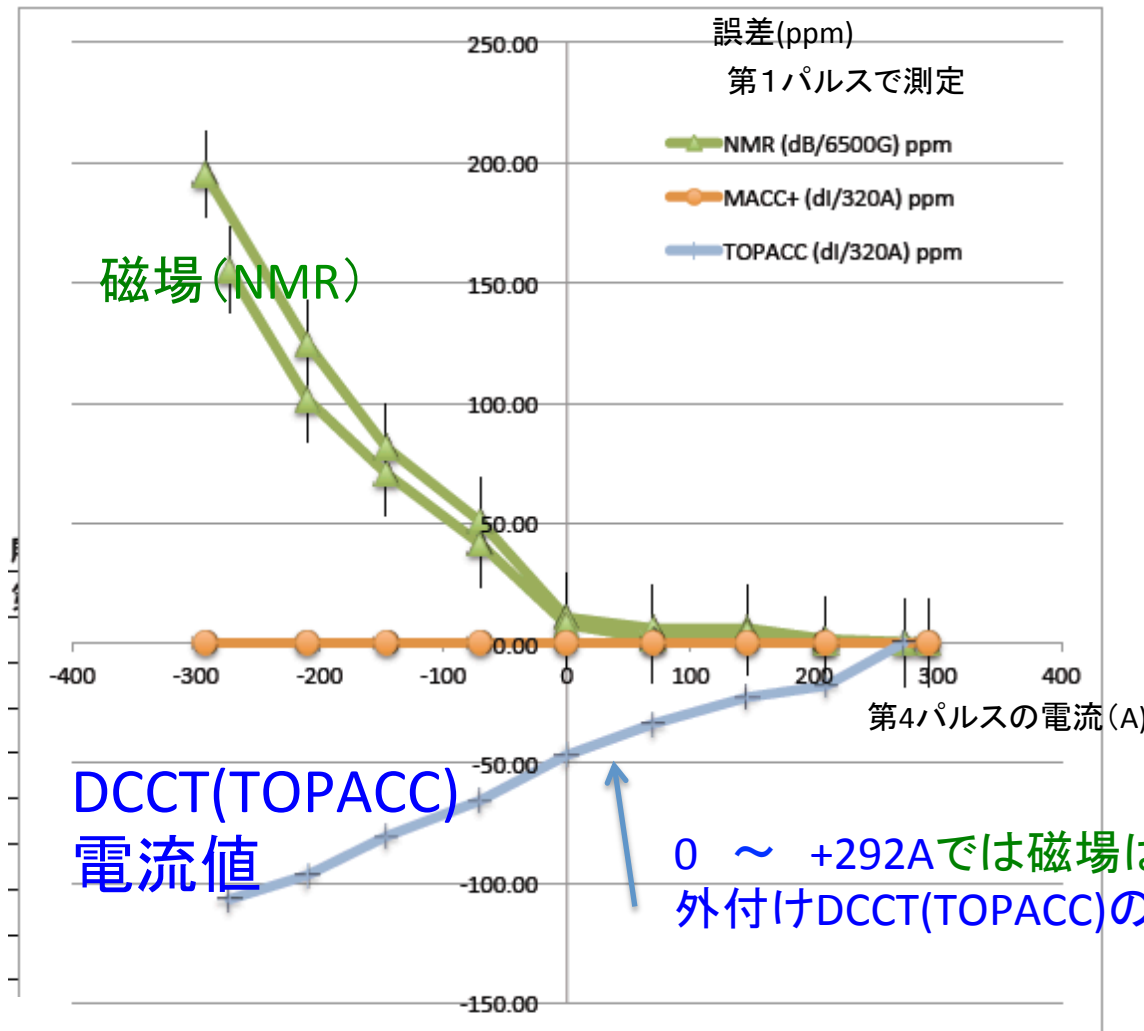
# 運転パターンの違いによる誤差(2)

運転履歴として1つ前のパルスの影響の関数にして磁場をPLOT



# 運転パターンの違いによる誤差(3)

運転履歴として1つ前のパルスの影響の関数にして磁場をPLOT



## まとめ

### 1. DCCT電流での安定度( <100kHz) @Flat Top

Lecroy差動 40ppm

電池式差動(10x) AMP 22ppm

Off時ノイズ差引 13ppm

(DCCTの履歴現象はこれから更に調査)

### 2. PickUp Coilでの磁場ripple(1k~数MHz) 12ppm

0.35mm厚の積層鋼板型でも高周波は減衰している事を確認

### 3. NMRによる測定 10ppm/H

(磁石の初期ドリフト、履歴現象はこれから調査)

### 4. 残留磁場の補正 (0.2G/6130G) 30ppm

## 最後に

1. 残留磁場の打ち消しには 0.2~0.6A程度が必要。  
そのため、FET-PWMの幅を絞りきれなかったために、  
直列ダイオードを入れるオーソドックスな手法を取った。  
20AのFETを16並列にしているので、FPGAのプログラムにより  
その台数を減らした運転をする方法もあった。しかし、  
結果的には直列にダイオード18Sにして、0.2Aまで制御出来  
ている。
2. NMRでの測定条件 (Flat Top 4ms → 1~2msにできるか?)  
→ 立ち上がりをもっとゆっくり出来れば、磁場も高くできる。
3. パルス電流の高精度測定は難しいが、多種の方法で  
SACLAの電子ビーム高速振り分けに使えると確認できた。

# 付録： 2015.1月からの配置(計画)

