

SuperKEKB用 高安定度電磁石電源

大木 俊征、中村 衆、安達 利一 (KEK)

2016/8/9
第13回日本加速器学会年会

SuperKEKBを構成する電磁石電源（ダンピングリングを除く）

- 常伝導電磁石電源：主リング電磁石用

定格出力	新規製作	再利用 (#オーバーホール済)	
0.95 MW	2	0	主偏向
0.4-1 MW	9	0	ウィグラー
0.1-0.5 MW	0	18 [#]	主四極
2-105 kW	92	335 [#]	二極・四極・六極
0.3-2.4 kW	138	1681	ステアリング・補正

- 超伝導電磁石電源：衝突点最終収束系用 (*製作中)

2kA, 15V	2+6 [*]	0	超伝導主四極
<500 A, 20 V	3 [*]	0	超伝導ソレノイド
±70A, ±10V	45	0	超伝導補正

- 新旧の電源で構成されていて、多くの電源を新規に製作した。
- 今日は、特に仕様が厳しい、
超伝導主四極／超伝導補正／主偏向電磁石電源の製作について話します。

衝突点用超伝導電磁石電源プロトタイプ的目標仕様と開発項目

目標仕様

定格出力	2 kA, 10 V (片極性)
電流設定分解能	0.1 ppm 以下
電流安定度	2 ppm/8 時間 以下
電流リップル(< 10kHz)	1 ppm (rms)以下
(> 10kHz)	10 ppm (0-peak) 以下

開発項目

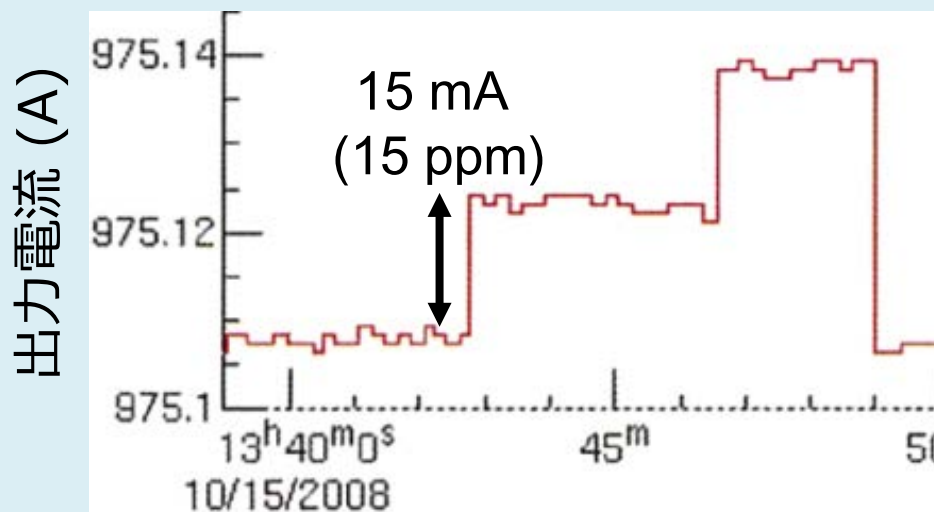
-
1. 高分解能
 2. 高安定度
 3. 低リップル
-



開発項目その1. – 高分解能 –

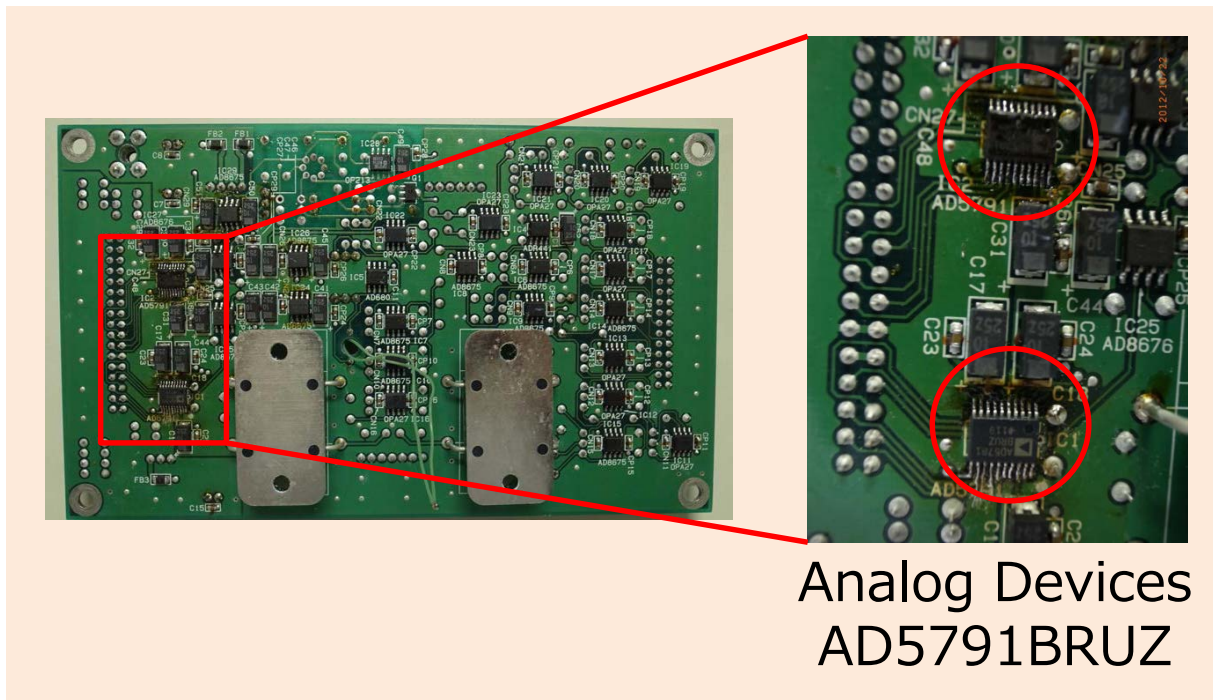
- KEKBでは16ビット（一部改造して、18ビットのも）

KEKB BW1OLP_48電源（1000 A, 700 V, 16ビット制御）
指令値を1ビット（ ~ 15 mA）変えた時の出力電流の応答



- 目標安定度の2 ppm/8時間には、0.1 ppmの制御分解能が必要
- 2つの20ビットDACを組み合わせ、**24ビットを目指した**
 - AD5791（2010年7月発売）：単調性のある20ビットDAC
 - Spring8で16ビットDACを2個→18ビットの改造(2005年)

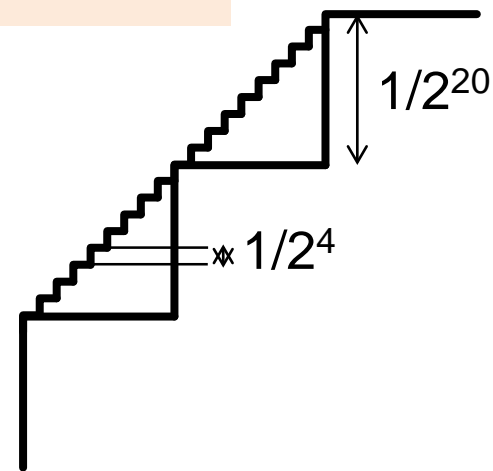
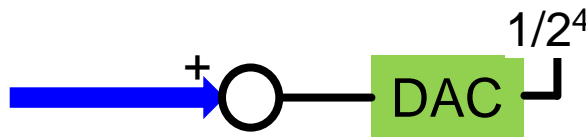
開発項目その1. – 高分解能（開発した24ビット基板）



電流設定値
20ビット（粗調）



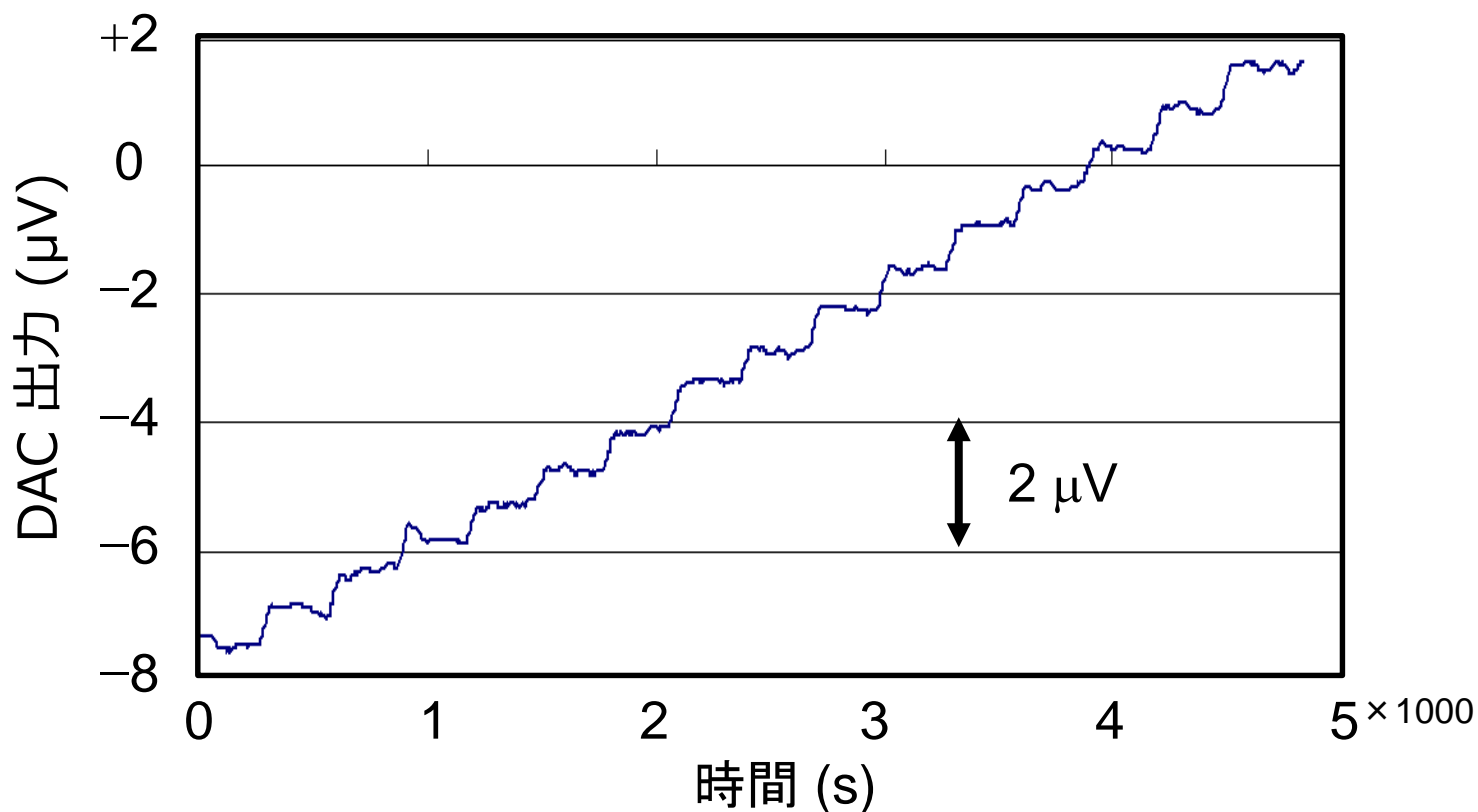
電流設定値
4ビット（微調）



開発項目その1. – 高分解能（試験結果）

入力デジタル値を約5分毎に1ビットずつ増やした時の出力アナログ値の応答

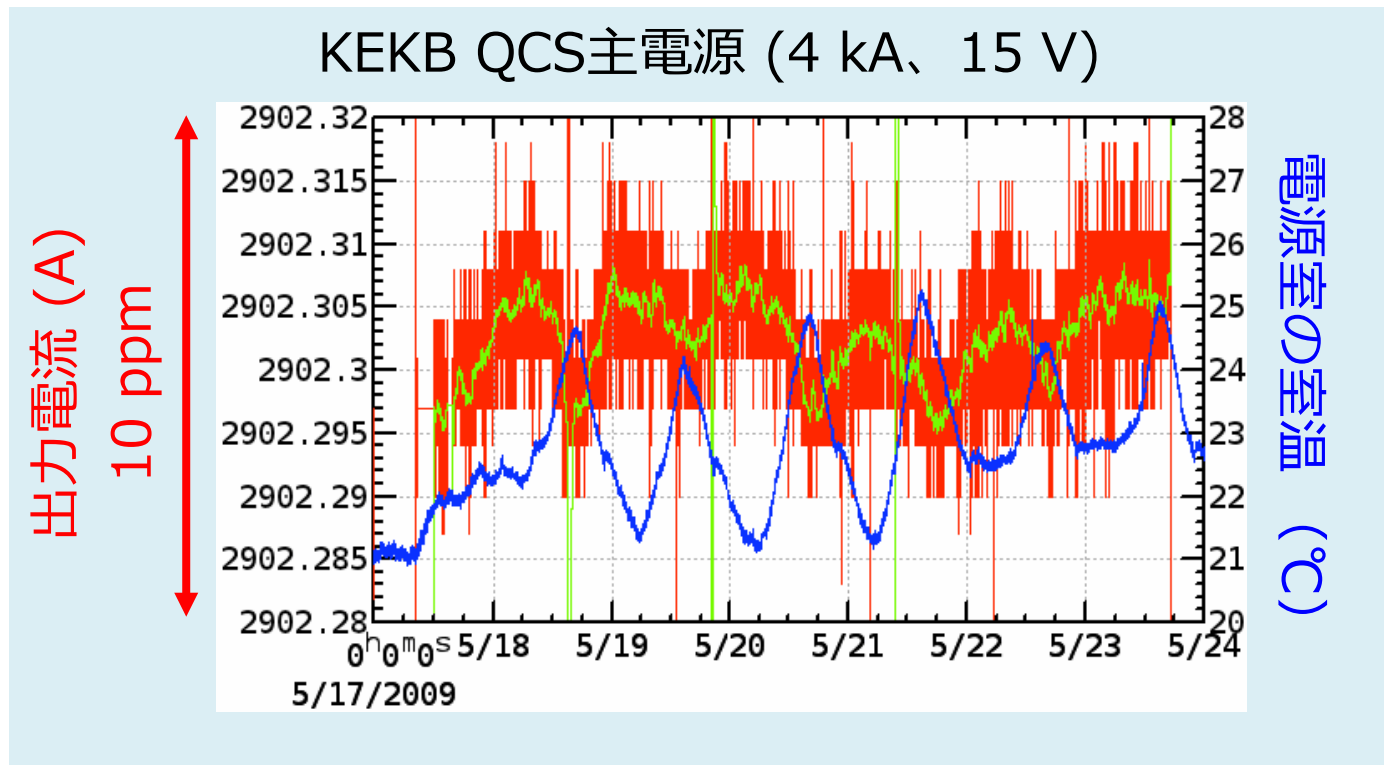
KEITHLEY 2002（2 Vレンジ、50 PLC、10項移動平均）で測定



単調性のある1ビット（0.6 μV）の階段が見えた

開発項目その2. – 高安定度 –

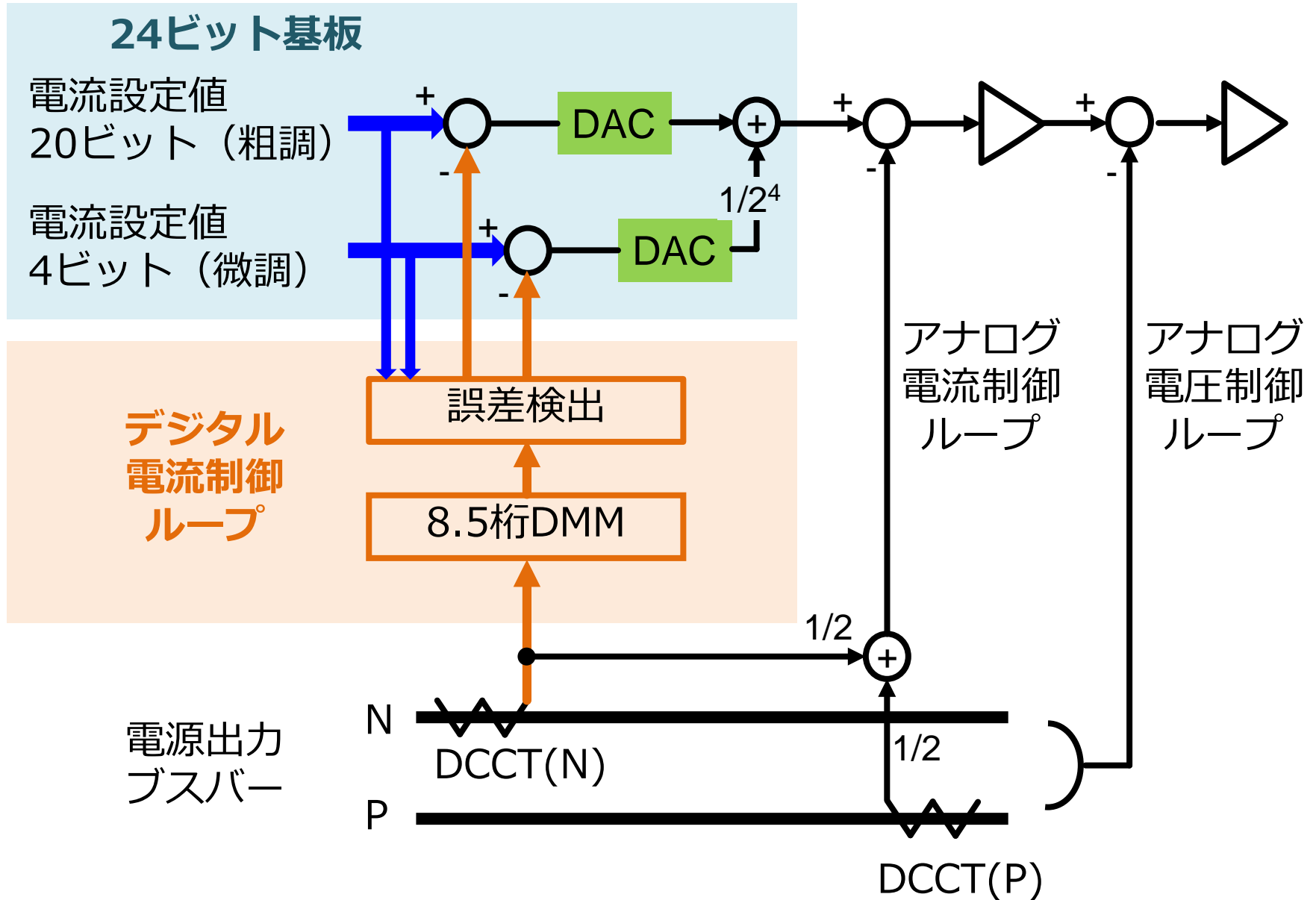
- KEKBでの安定度の例



- 出力電流の変動幅：10 ppm(p-p)/週 程度
- 温度係数の小さい素子と恒温槽を使用：それでも2 ppm /5 °C程度ある
(高精度抵抗、オペアンプ、基準電圧IC等)
- こうした変動を抑え、目標の安定度を目指すために…

デジタル帰還制御

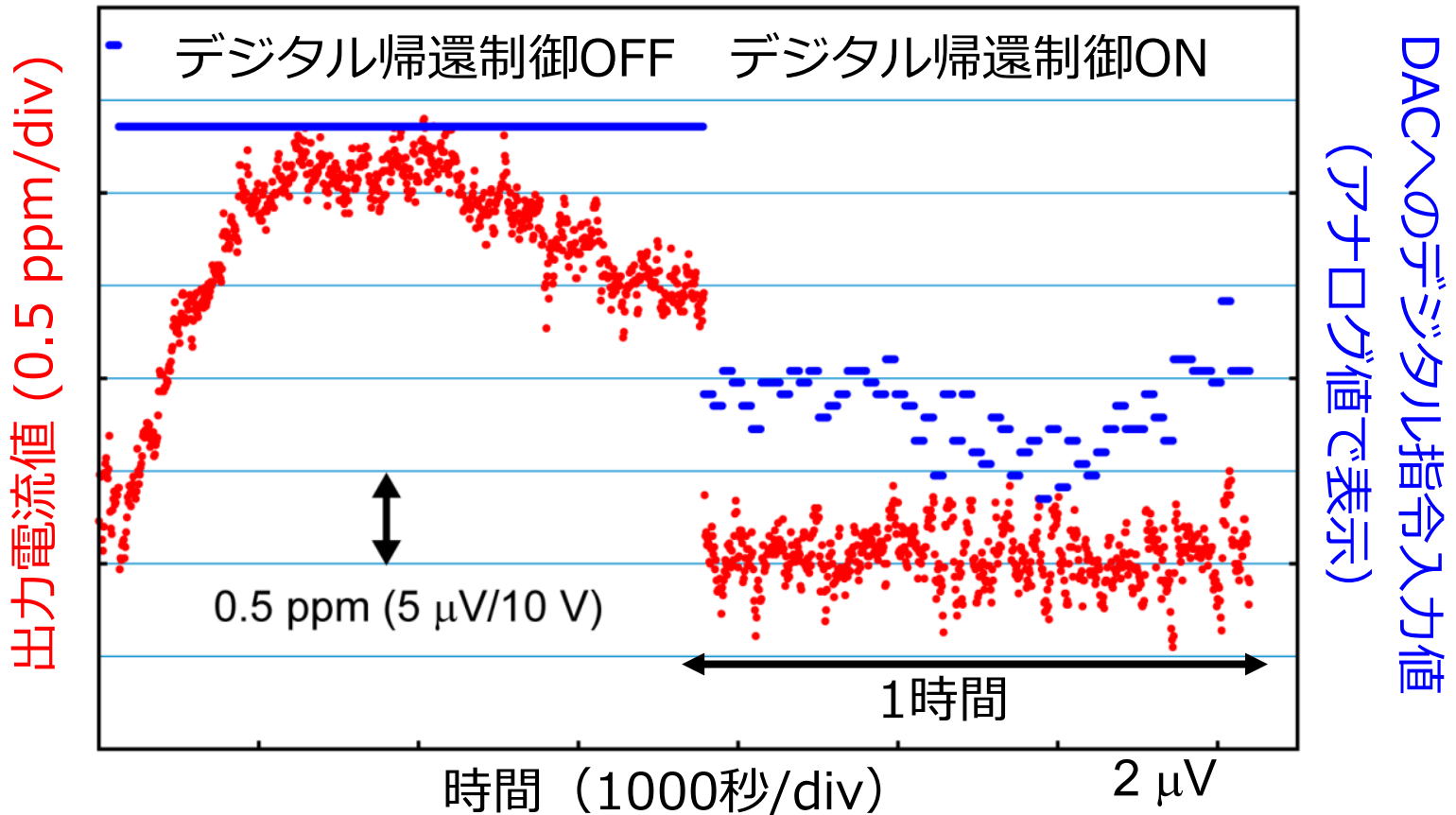
開発項目その2. - 高安定度 (デジタル帰還制御の方法)



開発項目その2. – 高安定度（デジタル帰還制御の試験結果）

- 主回路にKEKB中型電源（15 V, 500 A）を使用した。

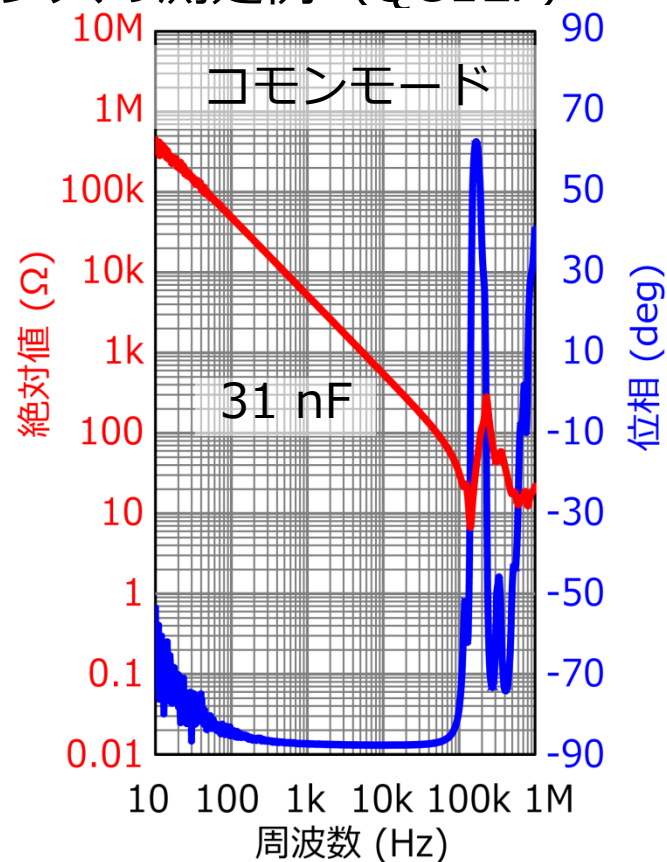
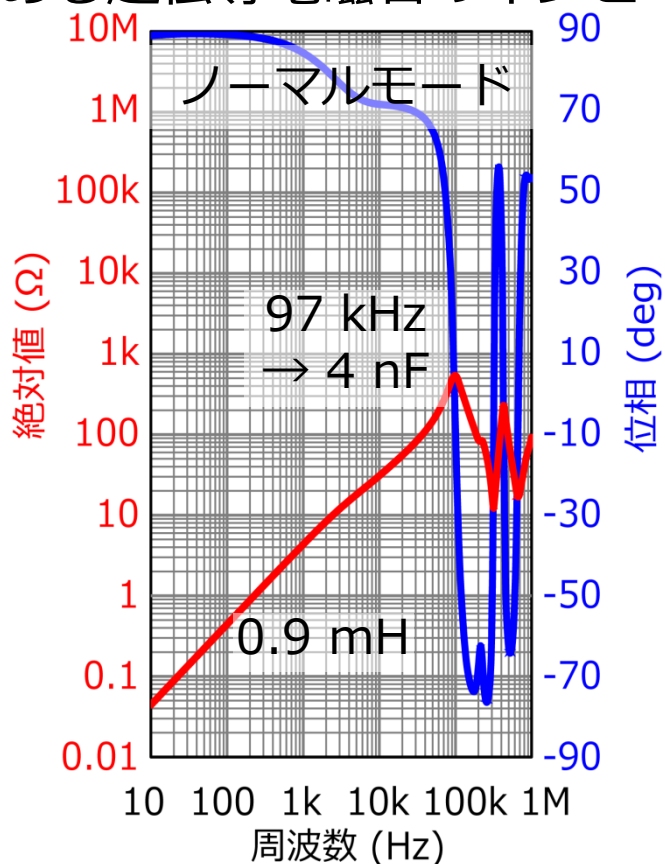
KEITHLEY 2002（20 Vレンジ、50 PLC、10項移動平均）で測定



1 ppm / 時間の安定度を達成 ($\sigma = 0.16$ ppm)

開発項目その3. - 低リップル（低インピーダンスの負荷）

- ・ 負荷である超伝導電磁石のインピーダンスの測定例（QC1LP）

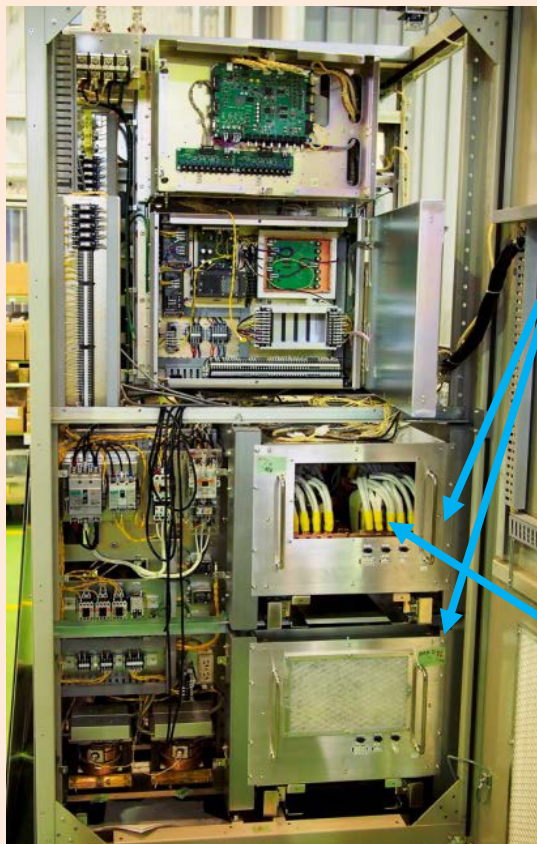


- ・ リップル (<10kHz) : ノーマルモードインピーダンスが小さい。
(KEKB: 36.4 mH → SuperKEKB QC1LP: 0.9 mH)
- ・ ノイズ (>10kHz) : コモンモードインピーダンスが小さい。
インピーダンスが小さいので、低リップル化の工夫が必要

開発項目その3. - 低リップル（低減する工夫）

・工夫した3点

1. ノーマルモード／コモンモードを区別して電流検出
2. 主回路を接地に対して対称化
3. 高周波トランスのシールド化（1次－2次間浮遊容量を低減）

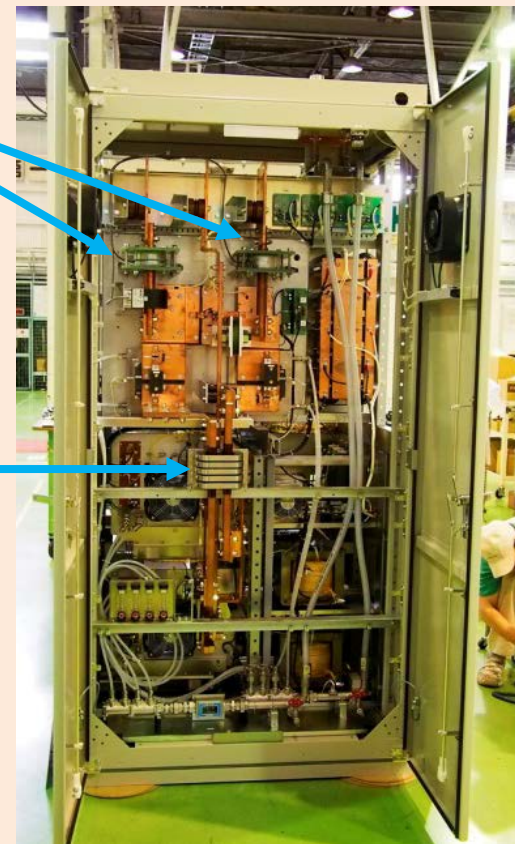


P/NにそれぞれDCCT

中点对称の単位電源を
2並列（2多重）

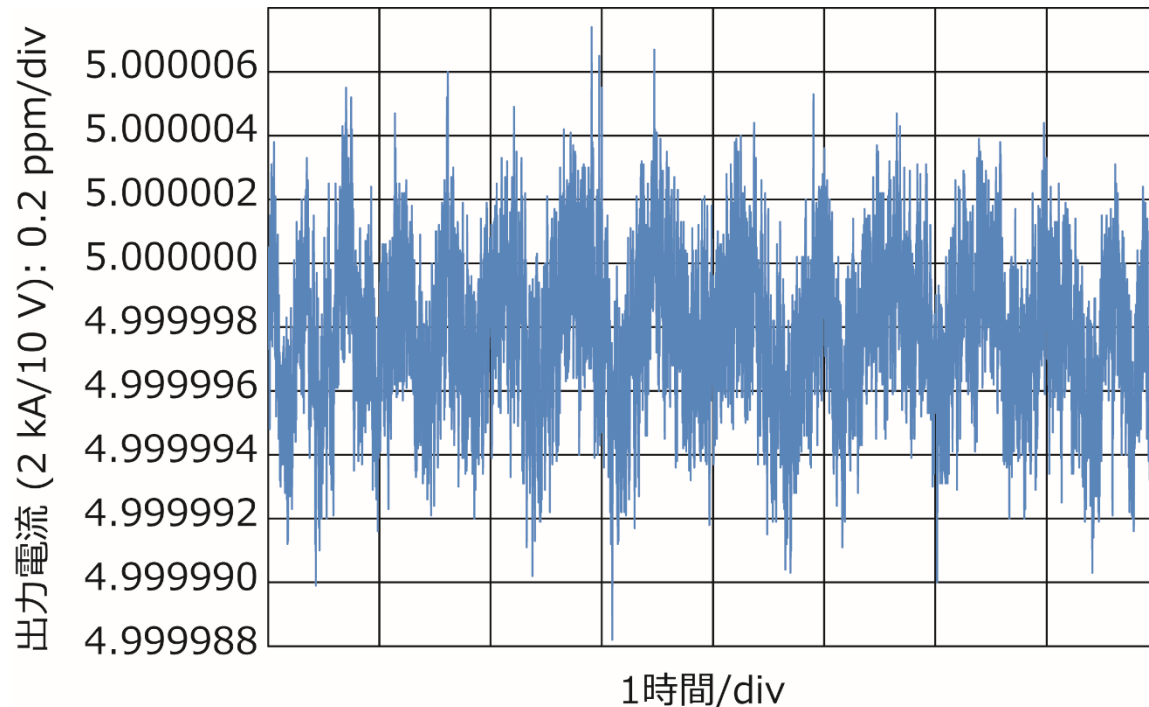
接地に対して対称にフィルタ

シールド付高周波トランス



工場での模擬負荷による試験結果その1. - 安定度

1.9 ppm/8時間



受電電圧

12 V

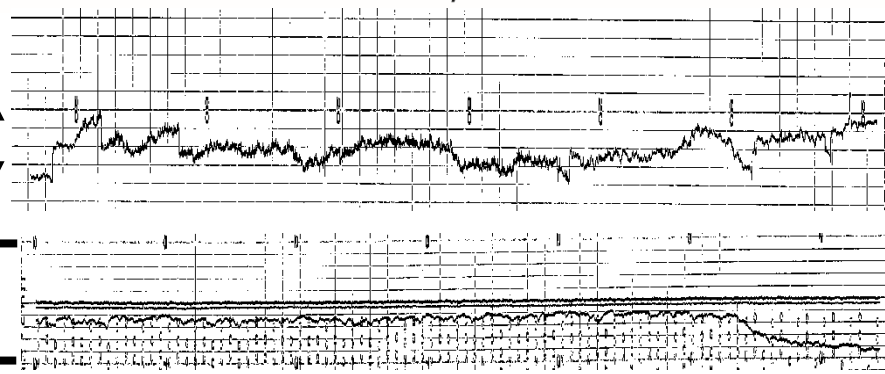
恒温槽温度

30°C

恒温ユニット温度

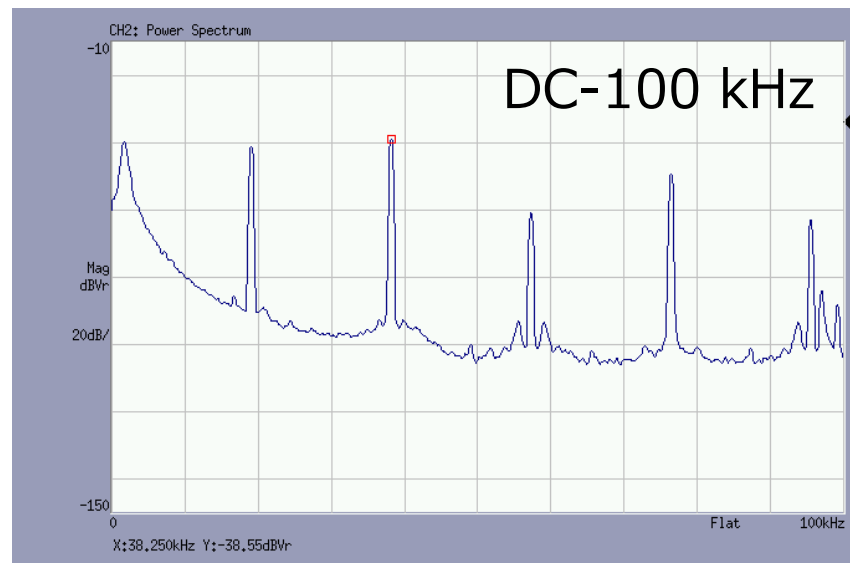
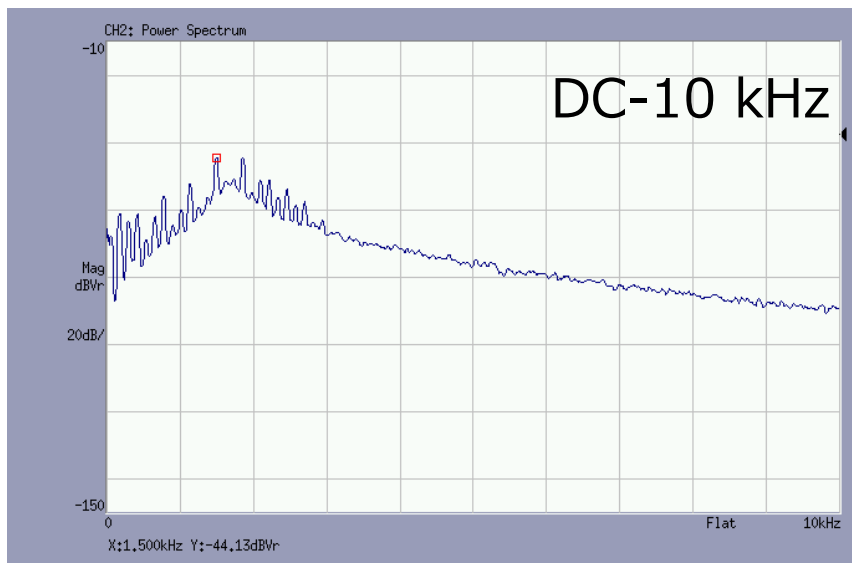
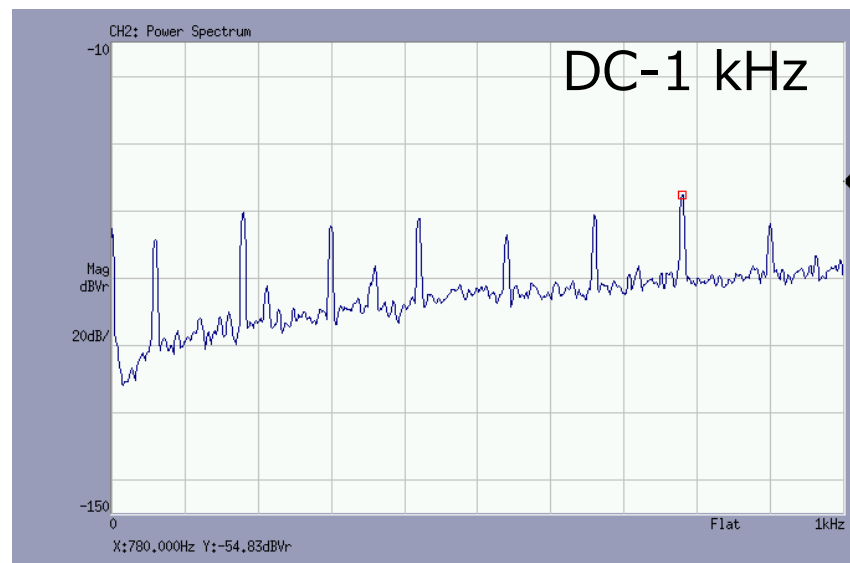
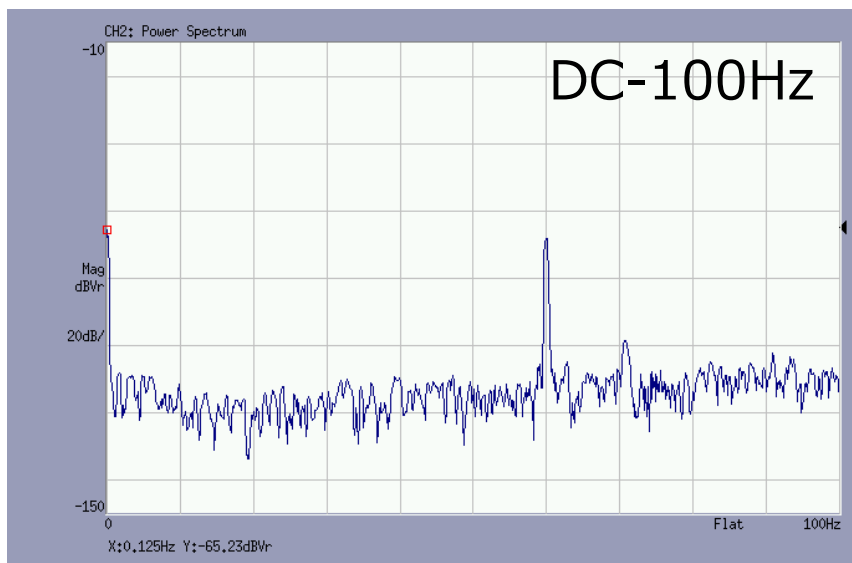
周囲温度

20°C



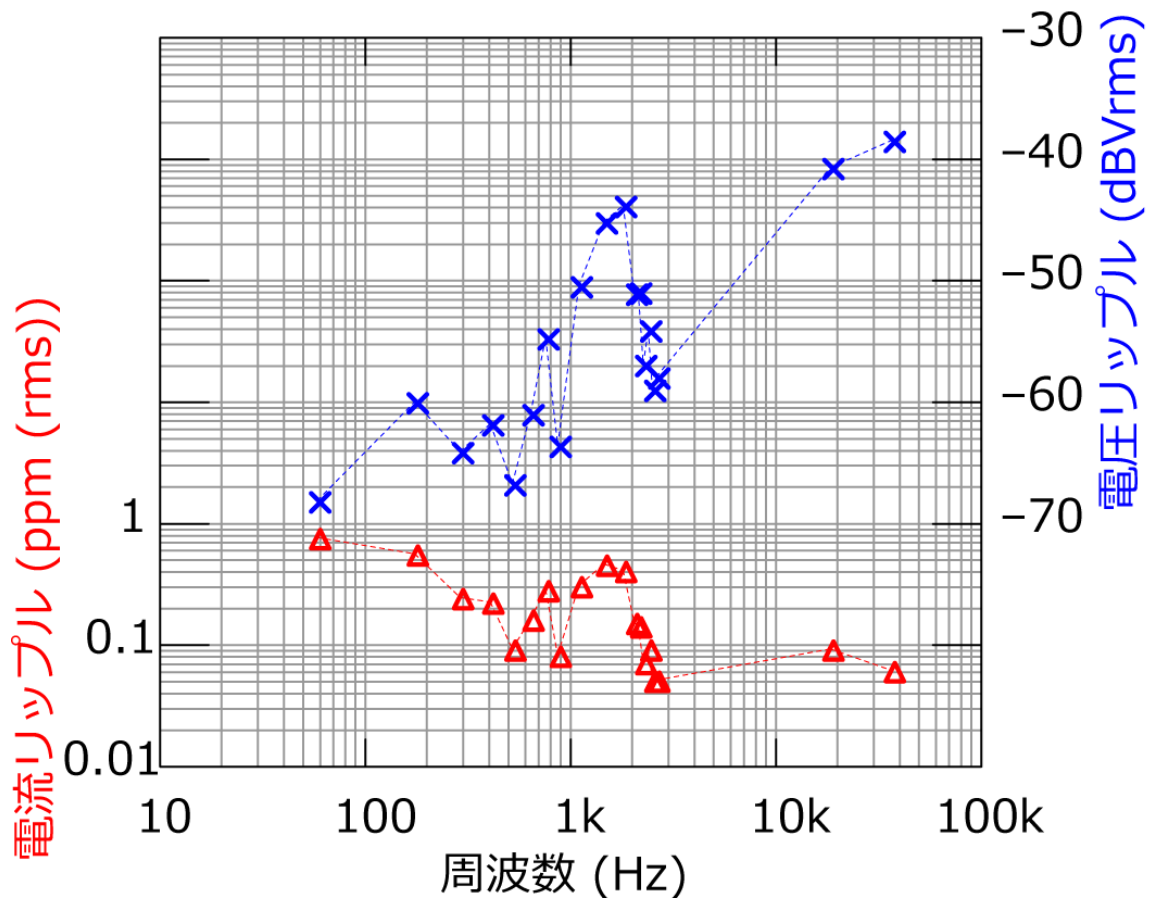
工場での模擬負荷による試験結果その2. - リップル

・ PN間電圧リップル



試験結果その2. (続き) 電流リップルへの換算結果

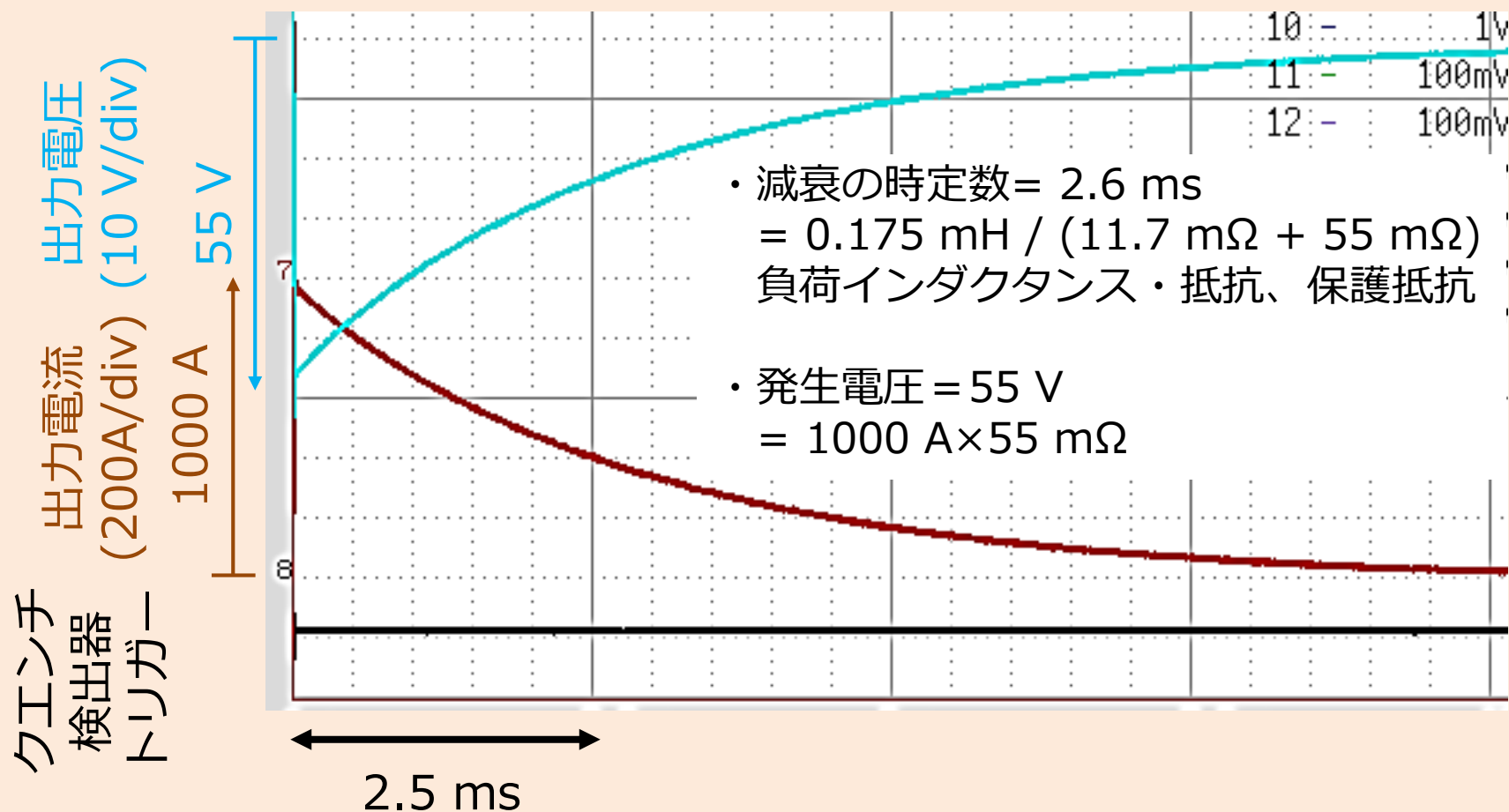
電圧の測定値をQC1LEインピーダンスで割って電流リップルを得た。



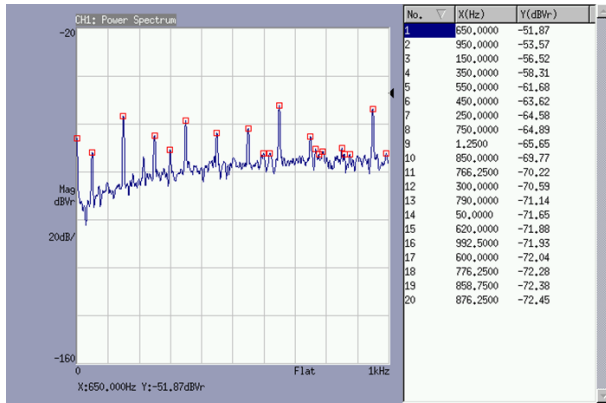
- 1.27 ppm (<10 kHzでの自乗平均)
- 0.1 ppm (スイッチング19 kHz成分)
- コモンモードはすべての成分で0.1 ppm以下

工場での模擬負荷による試験結果その3. - クエンチ保護試験

- 工場模擬負荷(0.175 mH, 11.7 mΩ)での試験結果
 - 遮断動作の許容遅延時間：50 ms以下
 - 遮断時発生電圧：P-N間200 V以下、P-E/N-E間100 V以下



プロトタイプ超伝導電磁石での試験結果



周波数 (Hz)	電圧リップル (dBVr)	プロトタイプ Zpn (Ω)	電流リップル (ppm(rms))	自乗和の平方根
50	-71.65	0.2	0.82	
150	-56.52	0.5	1.55	
250	-64.58	0.8	0.37	
300	-70.59	1	0.15	
350	-58.31	1.1	0.54	
450	-63.62	1.5	0.23	
550	-61.68	1.8	0.23	
600	-72.04	2	0.06	
650	-51.87	2.2	0.59	
750	-64.89	2.6	0.11	
950	-53.57	3.4	0.31	
1150	-59.89	4.5	0.11	
1250	-54.92	5.1	0.18	
1850	-56.24	4.5	0.17	
2000	-61.65	2.7	0.15	
2150	-55.09	2.6	0.34	
2350	-57.62	3.2	0.21	
2450	-53.67	3.5	0.3	
2650	-57.27	4.1	0.17	
2750	-55.51	4.4	0.19	
19000	-31	31.7	0.14	-
38000	-32	61.5	0.06	-

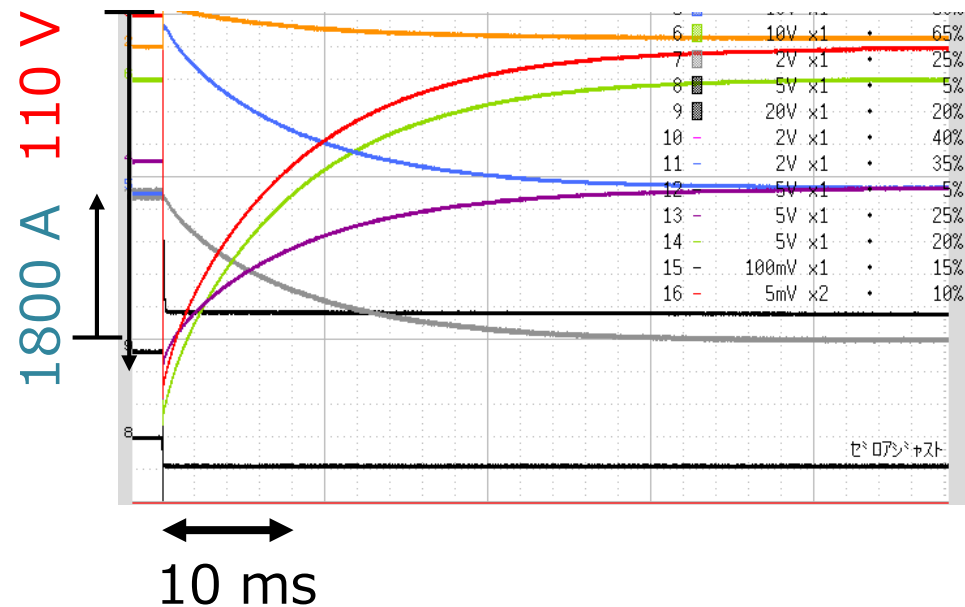
2.14 ppm (rms)

プロトタイプ: 0.5 mH

< QC1LP: 0.9 mH

→ $2.14 \times 0.5 / 0.9 = 1.19$ ppm (rms)

減衰の時定数 = 8.3 ms
0.5 mH / (5 mΩ + 55 mΩ)



リップル、クエンチ試験結果
ともに期待通り



量産を開始した

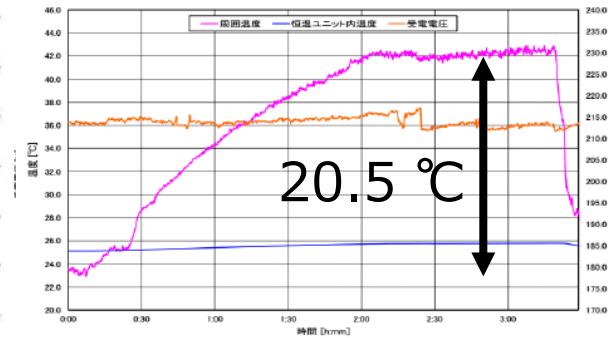
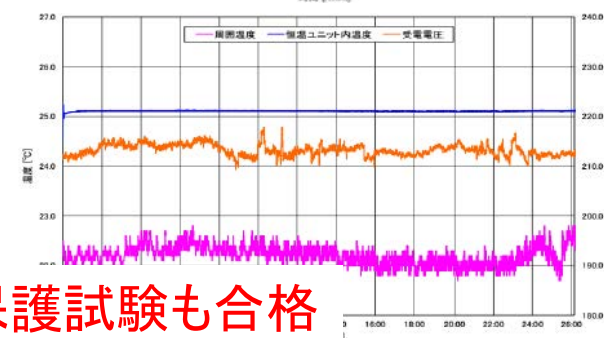
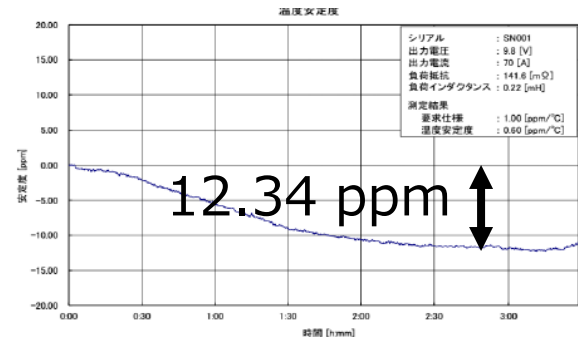
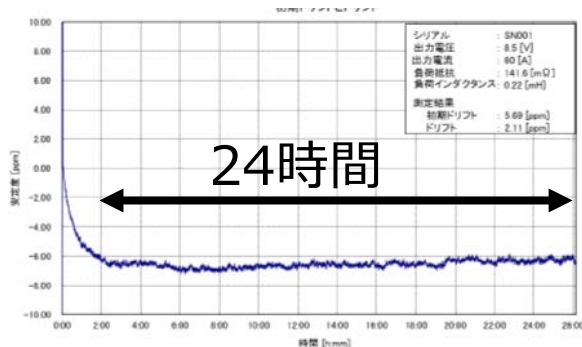
超伝導補正電磁石電源

目標仕様値

定格出力	DC ± 70 A, 10 V
電流設定分解能	< 1 ppm
電流安定度	< 5 ppm/8 時間
電流リップル (< 10kHz)	< 5 ppm (rms)
電流ノイズ (> 10kHz)	< 5 ppm (0-peak)

特に、回路の対称性に注意して設計
(中型電源で実績のある恒温槽も優秀)

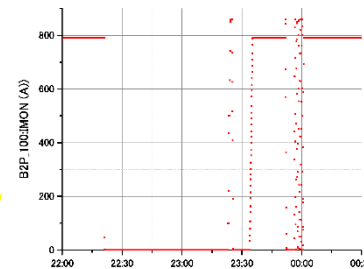
試験結果: 安定度 2.1 ppm/24時間 (温度係数0.6 ppm/°C)



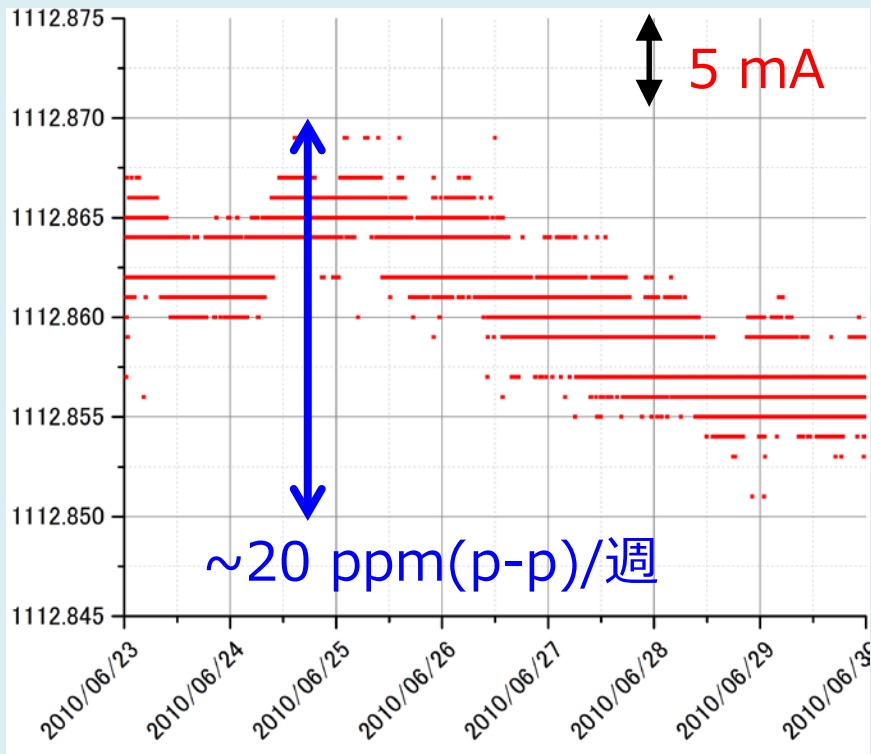
リップル、ノイズ、クエンチ保護試験も合格

偏向電磁石電源

- ・ 超伝導主四極と同様、24ビットデジタル帰還制御の電源
- ・ Phase1運転で得られた電流安定度をKEKBのものと比較

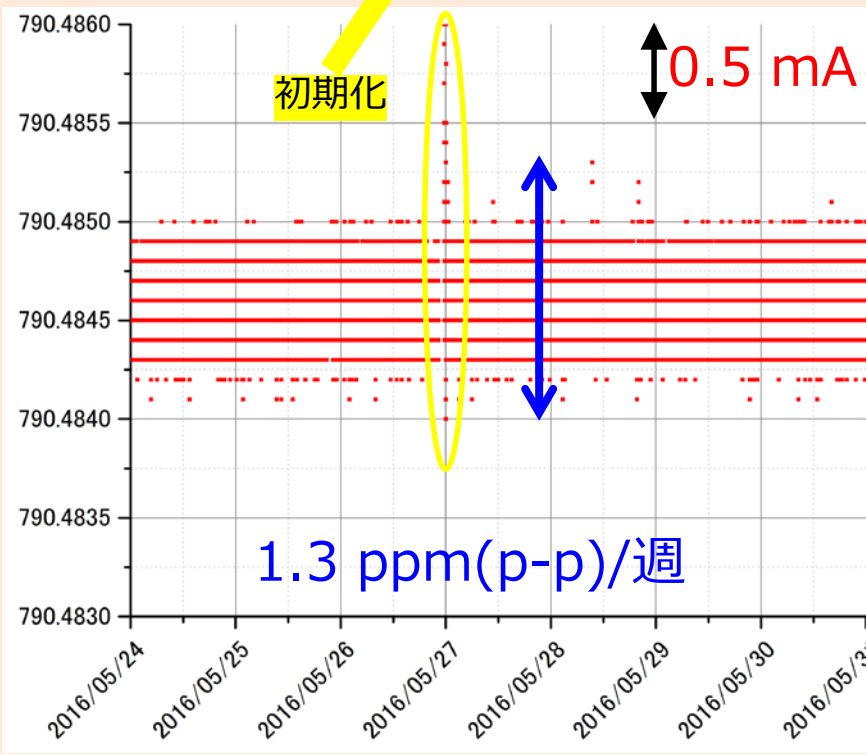


KEKB (1250 A, 770 V)



1 週間

SuperKEKB (860 A, 1100 V)



1 週間

まとめ

■ SuperKEKB電磁石電源の構成

- ・新旧の電源で構成されている。多くの電源を新規に製作した。
- ・今日は、超電導主四極／超電導補正／主偏向電磁石電源について紹介。

■ 超伝導主四極電磁石電源の開発

- ・厳しい仕様を満たすため、3つの項目に注力した。

高分解能／高安定度／低リップル

←アナログ制御の揺らぎが課題であった

- ・試験結果は期待通り。量産を行っている。

■ 超電導補正電磁石電源

- ・回路の対称性と恒温槽のおかげ
- ・安定度 2.1 ppm/24時間 (温度係数0.6 ppm/°C)

■ 主偏向電磁石電源

- ・超伝導主四極と同様、24ビット、デジタル帰還制御
- ・安定度 1.3 ppm/週