

SACLA高速振り分け電磁石用の 大電力・高精度パターン電源の開発

理研放射光センター：近藤 力, 原 徹, 福井 達, 稲垣 隆宏, 大竹 雄次, 田中 均

JASRI：深見 健司



スプリング8サービス：中澤 伸侯

ニチコン草津：川口 祐介, 川口 秀章

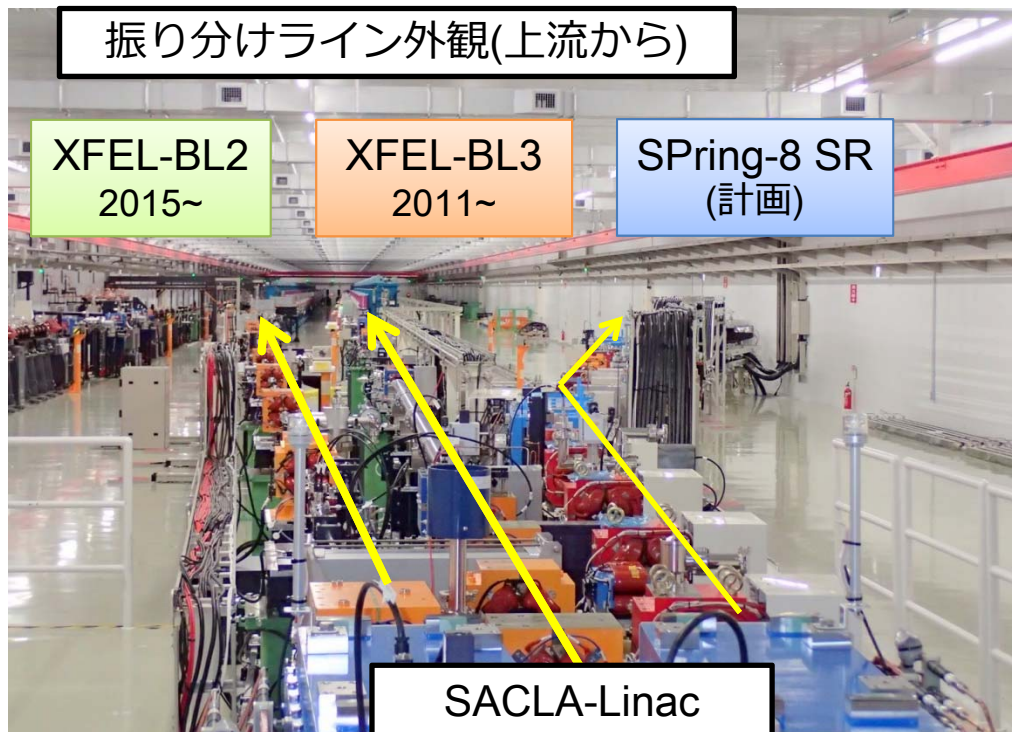
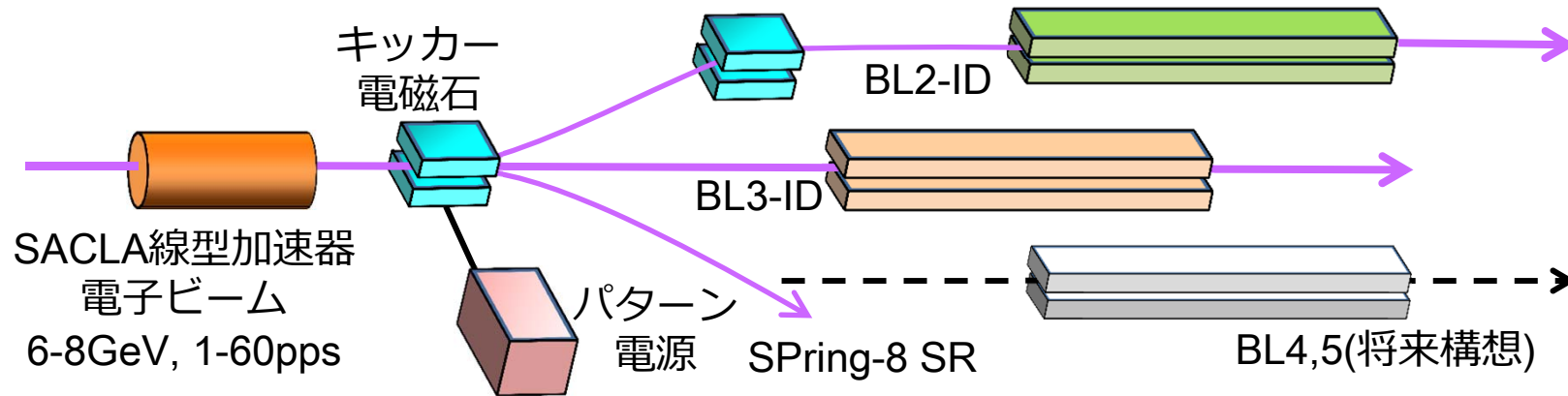


2017/8/1
第14回加速器学会年会
TUMO3



nichicon

背景:SACLAの高速ビーム振り分け



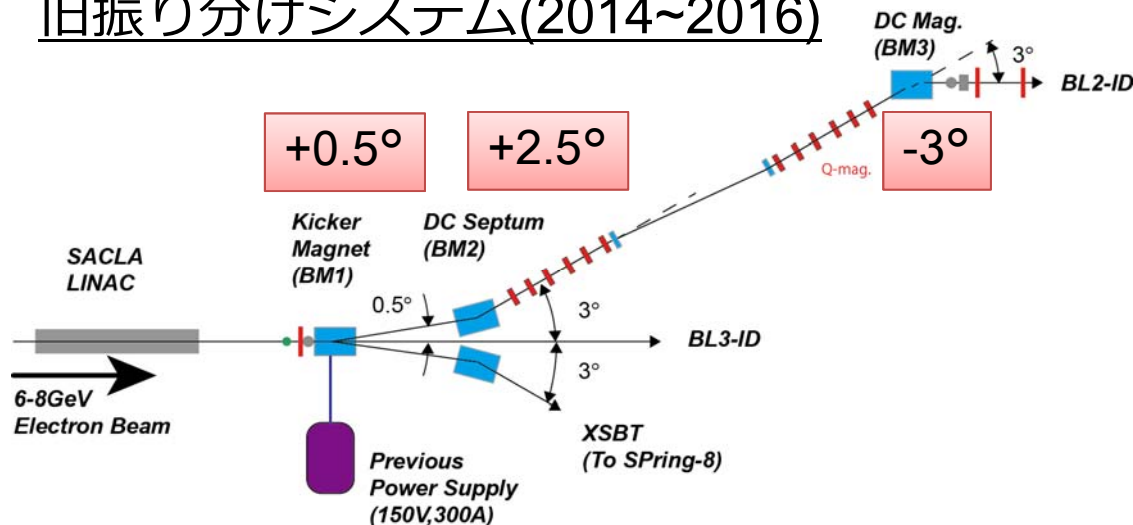
概要：

- より多くのXFEL実験に対応するため、BL2とBL3の同時XFEL供用運転が計画されている。
- 2015年のBL2の振り分け試験では、XFEL強度が不十分
- 2017年にBL2用の振り分けビームラインを改造
- 新しいビームラインに合わせ、キッカー電磁石用のパターン電源を開発した。

振り分けシステム



旧振り分けシステム(2014~2016)

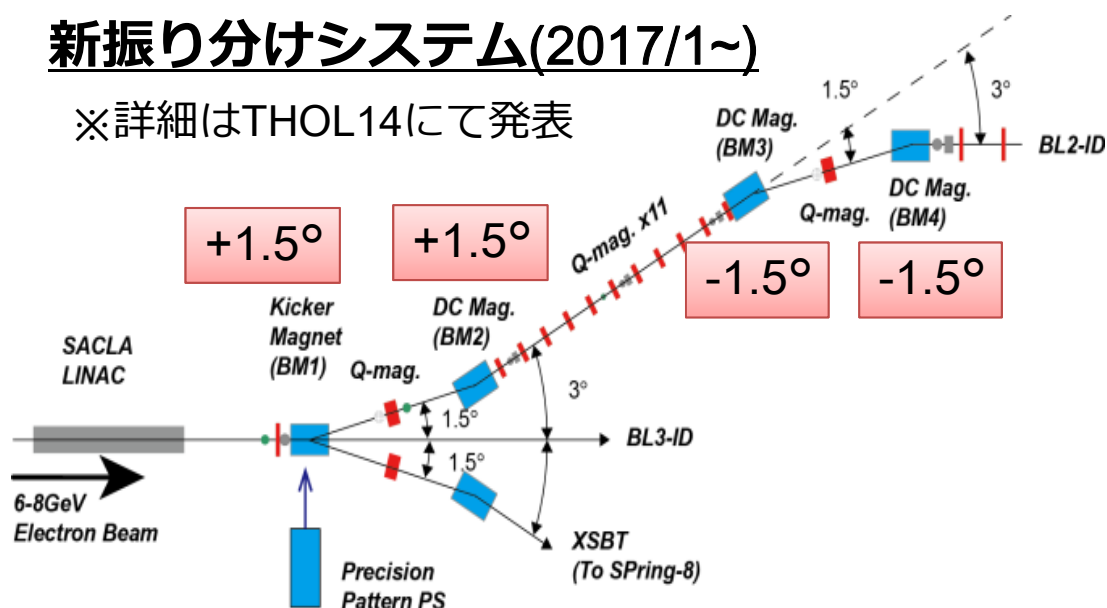


- キッカー電源の負荷を減らすため、非対称な光学系
- BL2のXFEL強度は、BL3での半分以下しか得られず。
- CSRによるエミッタンスの悪化を防ぐ必要があった。

Ref. 原, 加速器学会2016, WEOM13
武部, 加速器学会2014, SUOL03

新振り分けシステム(2017/1~)

※詳細はTHOL14にて発表



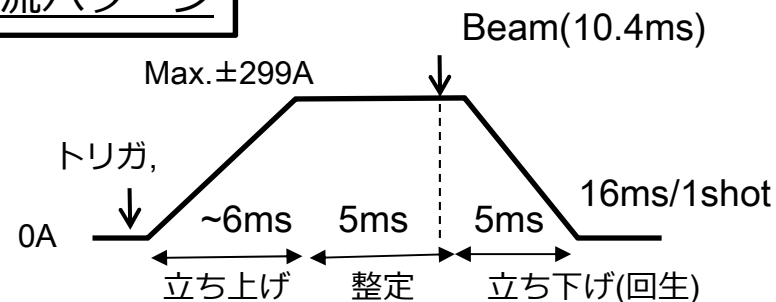
- 4台の偏向磁石で、互いのCSRの影響を打ち消し合う、対称なビーム光学系
- 初段のキッカー電磁石は、従来の約3倍の偏向角
- 新しい電磁石のインダクタンスは、15mH(旧電磁石の6倍)
- **大電力のパターン電源が必要**

新パターン電源の設計方針



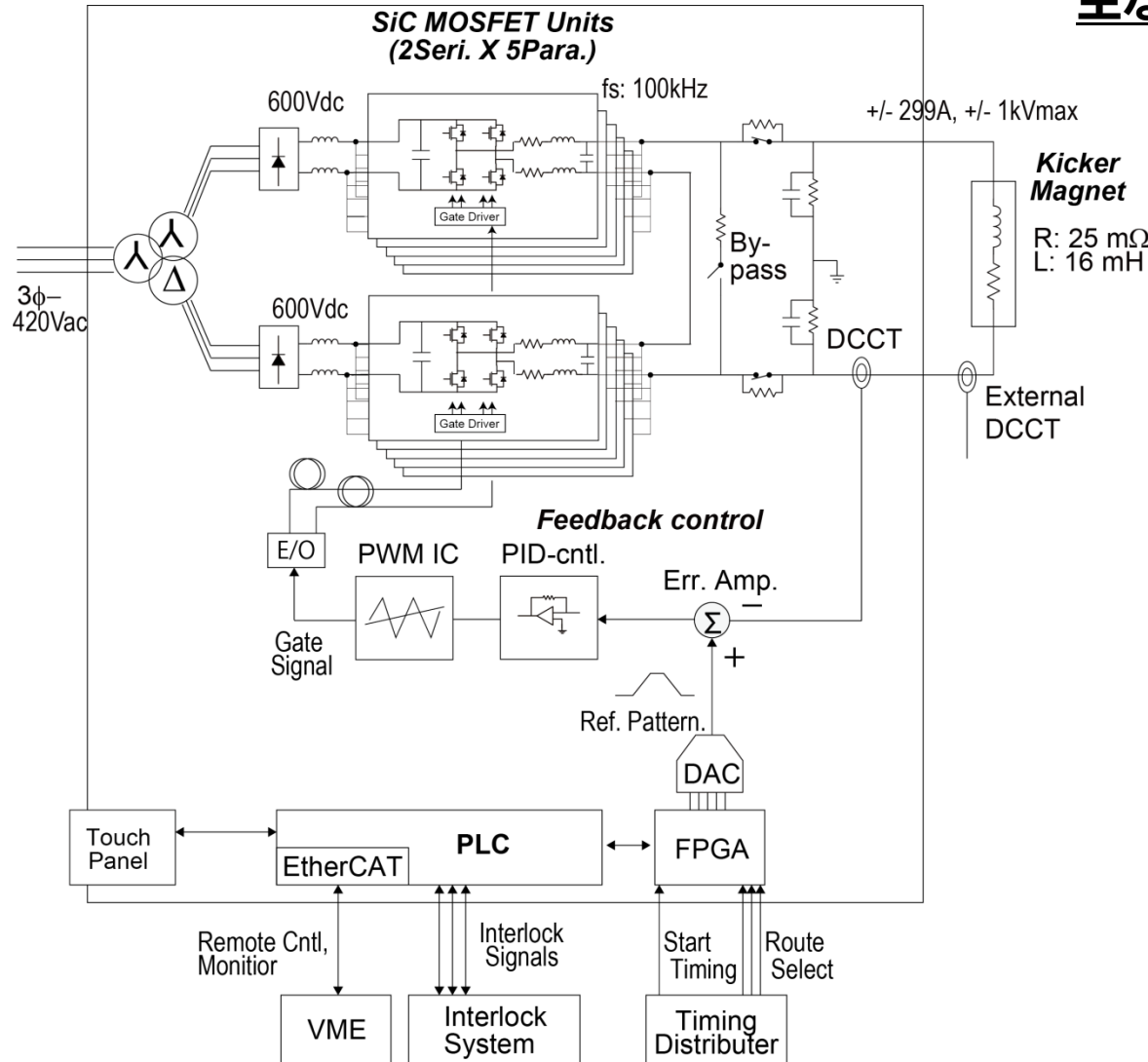
- 大電流、高精度、高速なパターン出力電源 ($\pm 299\text{A}$, 10ppm(pk-pk), 60 Hz)
- 基本構成・出力動作は旧電源を踏襲
 - 台形状の電流パターン
 - フィードバック制御による電流安定化
cf.ビーム固有の角度広がり; $1\mu\text{rad}/1.5^\circ \rightarrow 38\text{ppm}$
- 任意のビーム振り分けに対応
- 約6倍の大電力化
 - 電源サイズは1.5倍まで
→電力回路の小型化
- 小電流制御
 - BL3入射時の残留磁場の補償
 - 0.3A(0.1%出力)にも、3mAの安定度が必要
- 保守管理の向上など

電流パターン



仕様定格

	キッカー電磁石	
	新規	旧
最大磁場強度	0.89 T (@ 299A)	0.67 T (@ 320A)
インダクタンス	16 mH	2.6 mH
抵抗成分	25 mΩ	4.4 mΩ
	パターン電源	
	新規	旧
出力電流	±299A	±320A
電流パターン	台形状	
電流安定度	10 ppm pk-pk (3 mA)	
出力電圧	± 1000 V	± 150 V
繰り返し	60 Hz max.	
筐体サイズ (W×D×H)	3m×1m×2.4m	2.2m×1m×2.2m



主な導入技術

1. 高精度フィードバック制御

- PID+PWM制御 (旧電源を踏襲)
- 100kHzの高周波スイッチング
 - ・ 上下アーム間での位相差スイッチ
- タイミング同期(BeamとPWM)
- ノイズ対策
 - ・ ゲート信号のファイバー伝送
 - ・ GNDの分離...

2. ショットごとの振り分け設定

- FPGAにより、上位指令から即時にパターン生成

3. 主回路の大電力化、小型化

- SiC MOSFETによるユニット数削減
- 水冷抵抗によるサイズダウン

4. 小電流の安定制御

- バイパス切換方式
- 出力回路の駆動数変更

大電力化に向け：SiC MOSFET



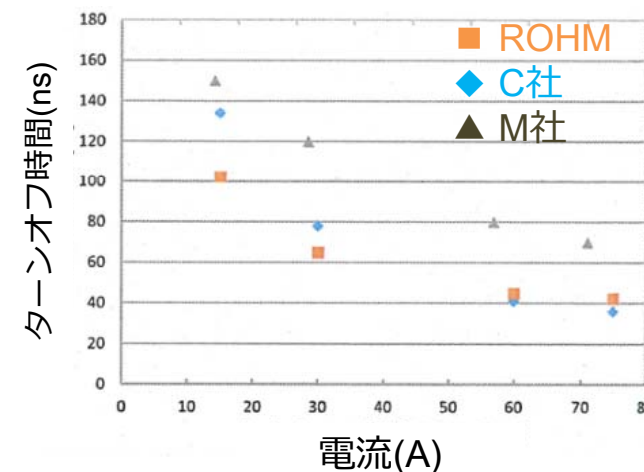
- スイッチング素子の大電力化
 - 従来のSi MOSFETでは、ユニット数が多くなり(16P→5S16P)小型化は困難
 - 次世代半導体SiC MOSFETを用いて、ユニット数を削減する。
 - SiC半導体：高耐圧かつ高速スイッチングが可能
 - 3種類のSiCモジュールを単体試験し、スイッチング速度や損失を評価。
 - 性能面からROHM製のSiC MOSFETモジュールを採用した。
 - 2直列5並列で構成：使用電圧、電流は定格の半分以下



ROHM; BSM120D12P2C005
 定格：1.2kV, 120A, tr~50ns

	Si MOSFET	Si IGBT	SiC MOSFET
耐電圧	×	○	◎
低損失	△	◎	○
スイッチング速度	◎	△	◎

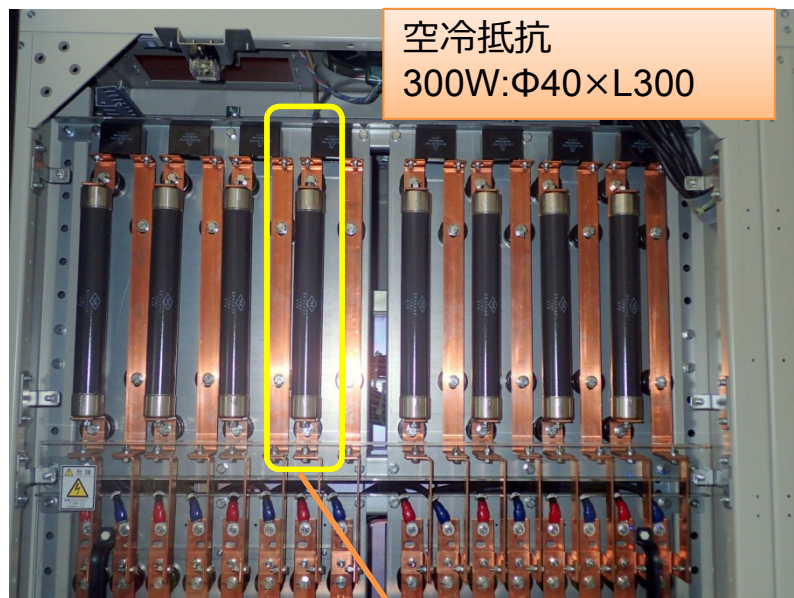
特性評価例(ターンオフ時間)



大電力化に向け:抵抗の水冷化



旧電源の出力フィルタ



空冷抵抗
300W:Φ40×L300

- 水冷抵抗によるサイズダウン
 - 旧電源では、空冷の大型抵抗を多数使用。
 - 水冷の小型抵抗を用いることで、サイズダウン
 - 抵抗などは電力ユニット内に収納

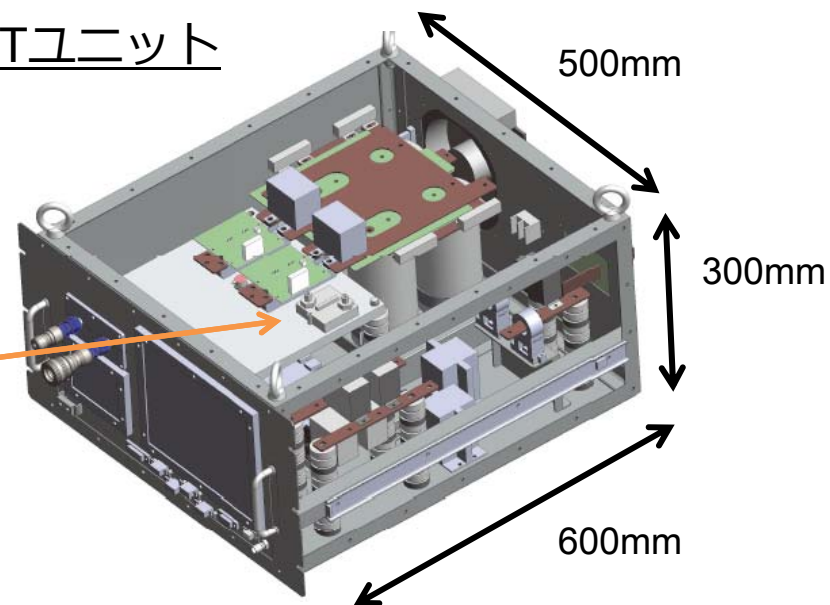
大きさ:~0.4
電力容量:~2.6

新しく導入した 水冷抵抗

水冷式抵抗器
UXP-800 (EBG)
800W:□70×H30
5kV耐圧



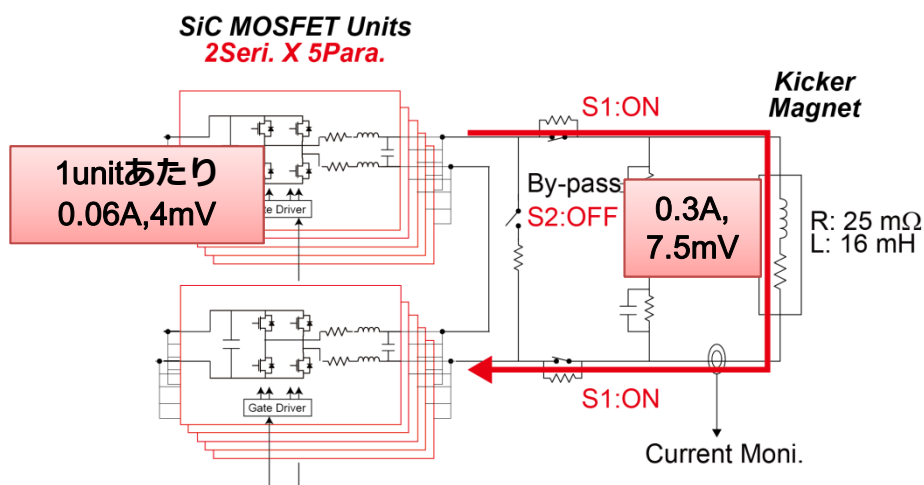
FETユニット



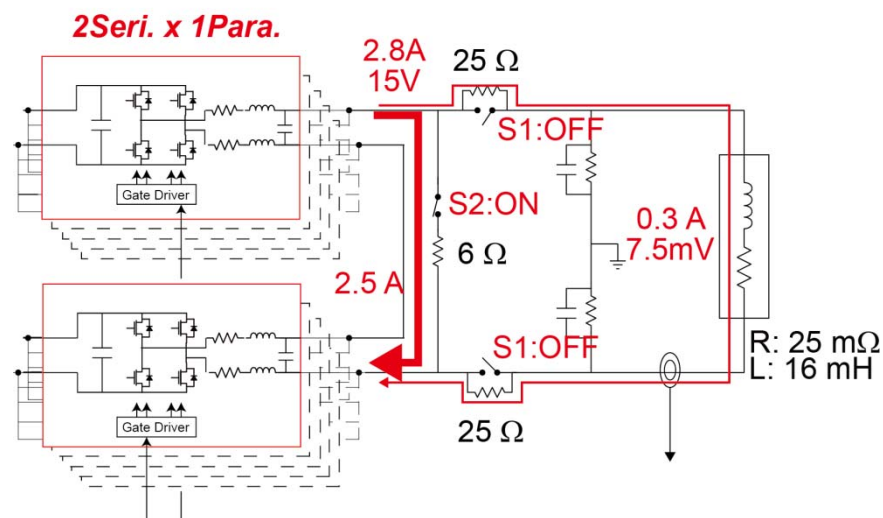
小電流の電流安定化

- 残留磁場の補償に、0.3-0.5A(約0.1%出力)の小電流が必要
 - ビーム安定化のため、電流安定度は3mAが必要
 - 小電流ではSiCモジュールの出力が不安定：安定領域は2A, 5V以上
- バイパス方式の導入
 - スイッチS1をOFFし、電流を抵抗回路に迂回 → 電圧 7V/1ユニット
 - 動作するユニットを5並列→1並列に減らす → 電流 5倍/1ユニット
 - スイッチS2をON。バイパス回路へ電流を迂回させる → 電流 9倍
→ **ユニットあたりの電流は2A以上、電圧は7V以上**

大電流の経路で出力すると



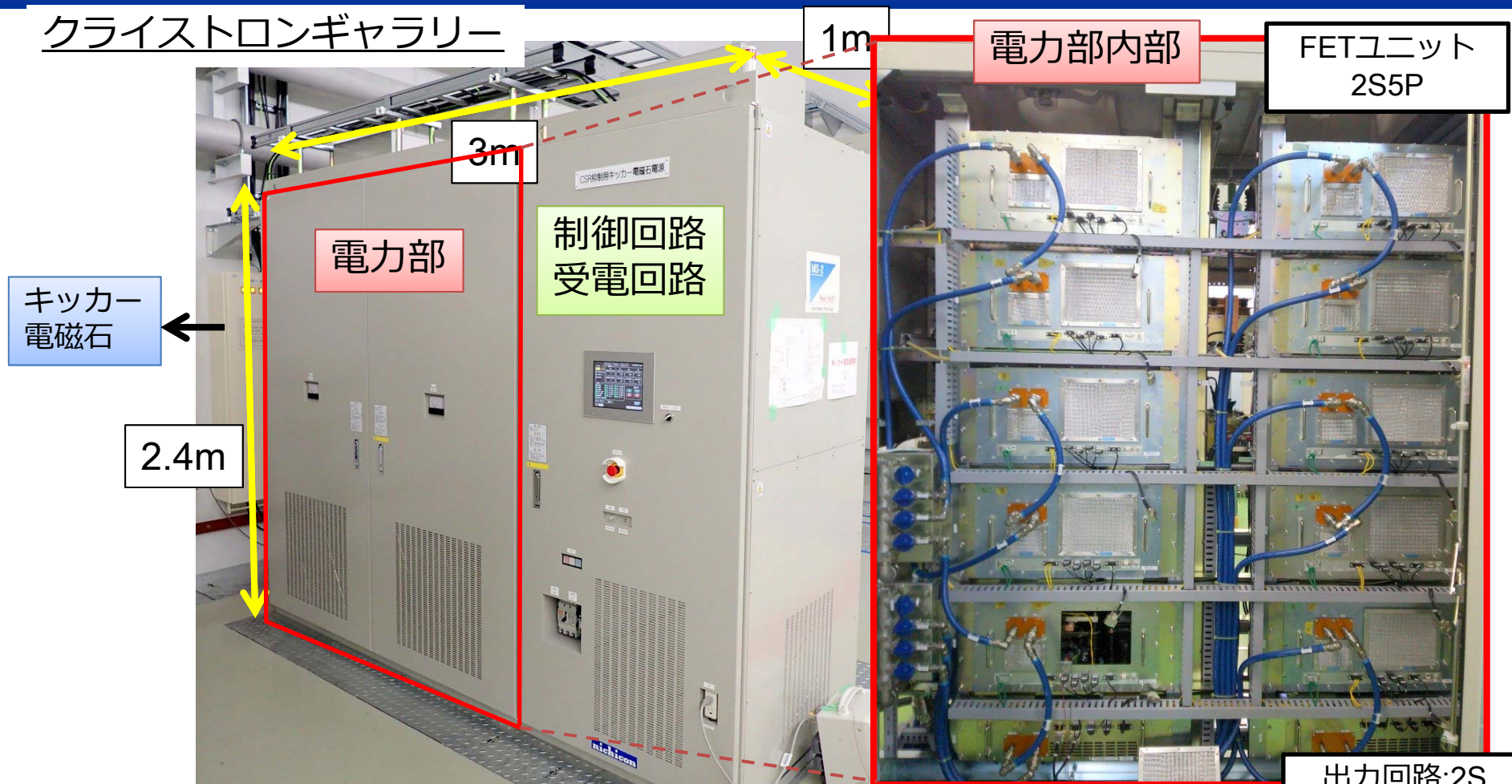
小電流時の電流の流れ



パターン電源の外観



クライストロンギャラリー

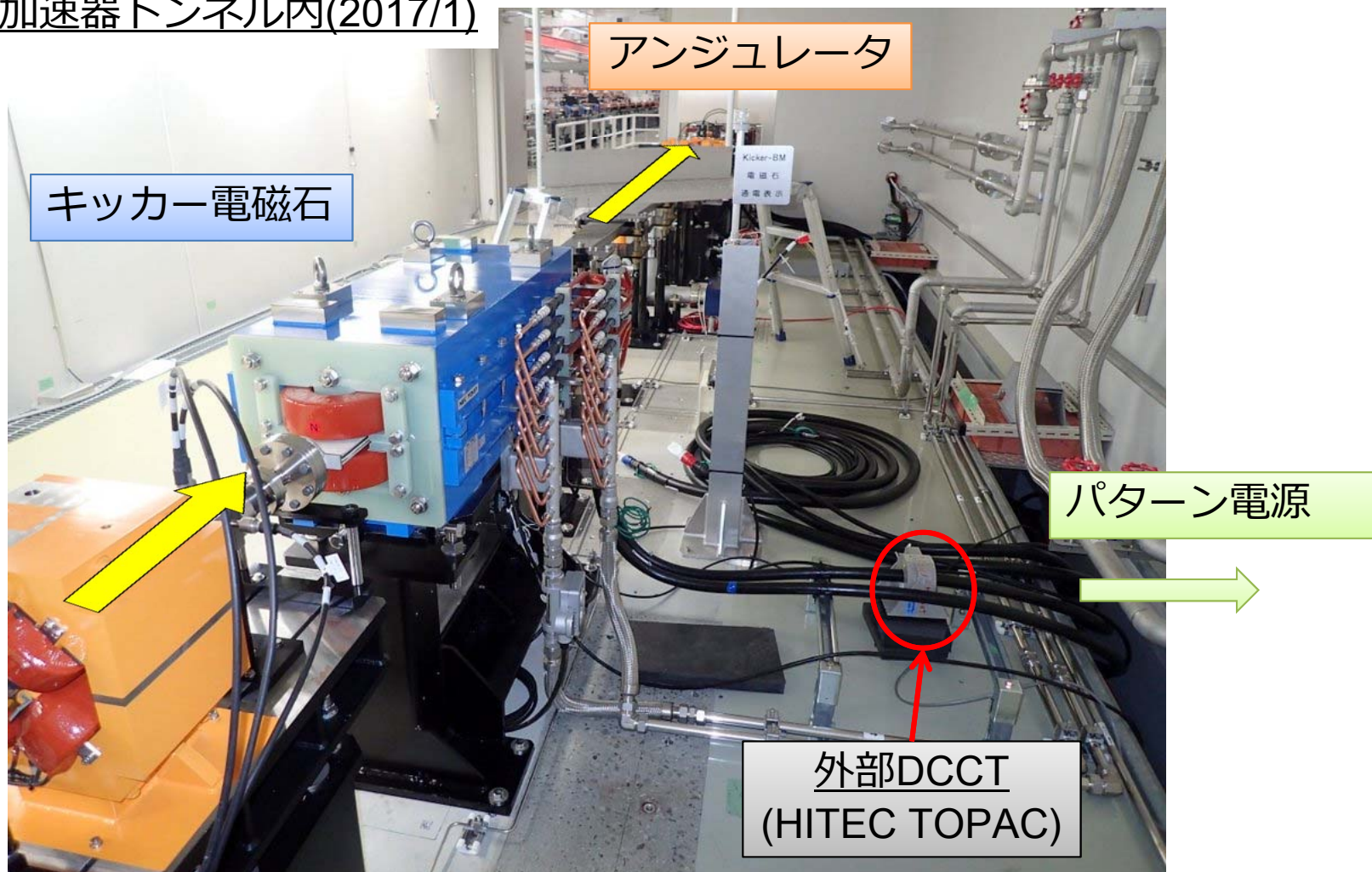


旧電源に比べて6倍の出力電力を、1.5倍の筐体サイズに収めた
主回路内の電力回路はユニット化され、交換し易い構造

キッカー電磁石



加速器トンネル内(2017/1)

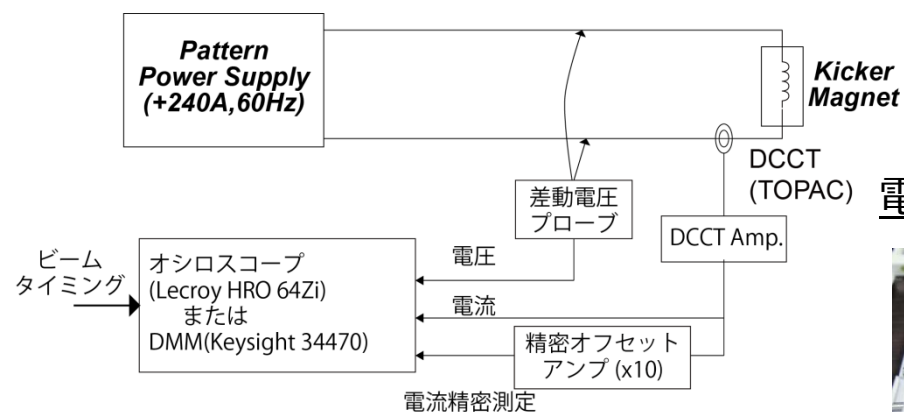


出力試験



1. 出力電流波形、電流安定度
大電流(+240A,60Hz)と小電流(+1A,60Hz)
2. 磁場安定度
3. 電子ビームの振り分け試験

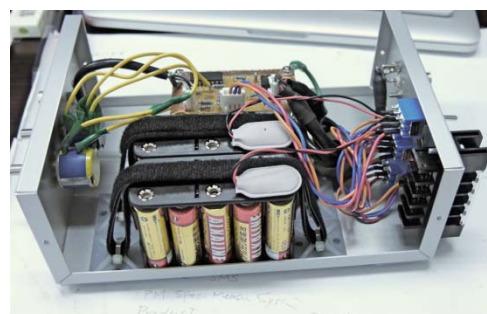
電流・電圧測定のセットアップ



測定の特徴

- ppmオーダーの電流精度
- タイミング同期

電池式精密オフセットアンプ



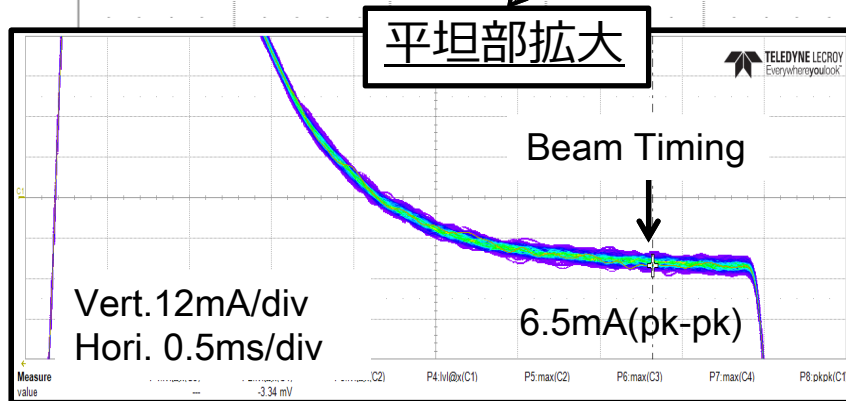
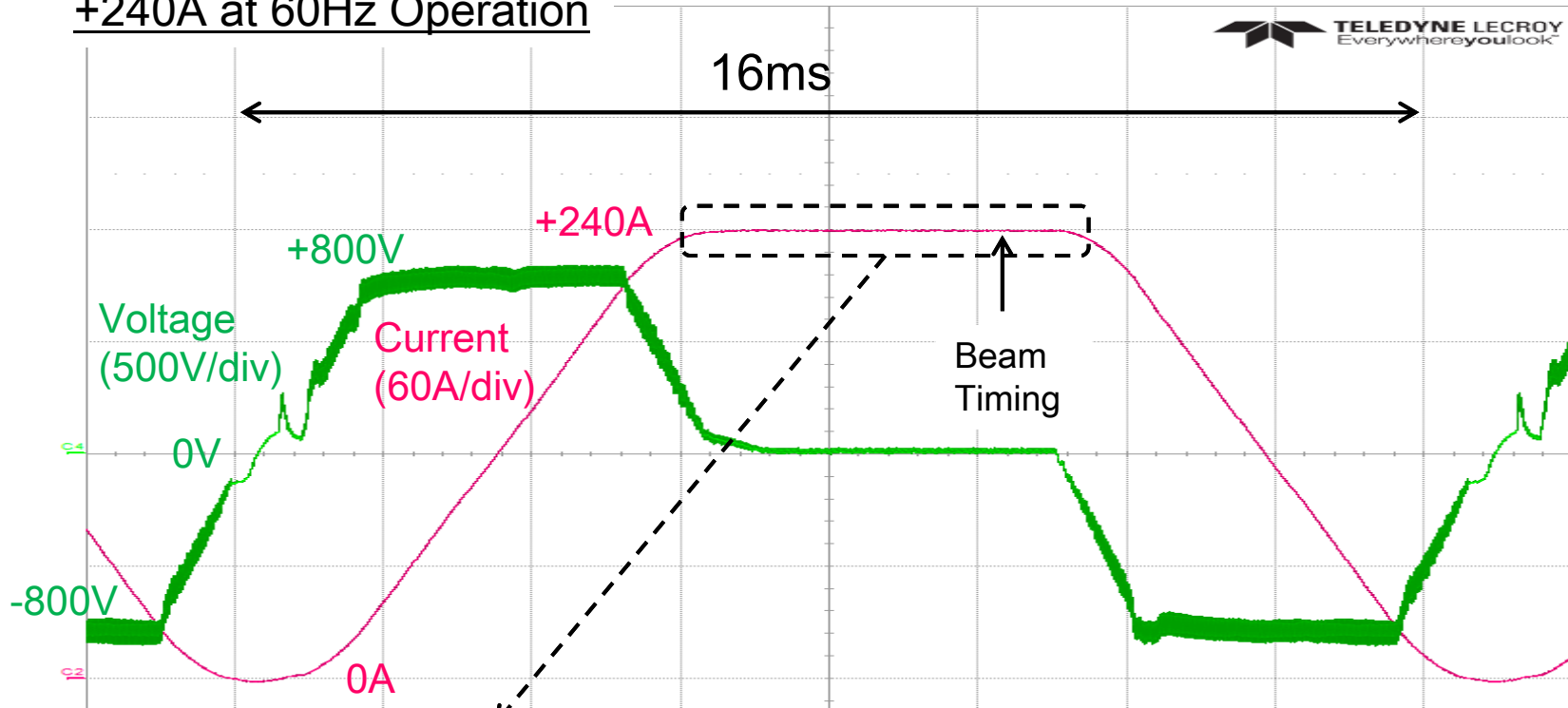
ノイズカットトランス



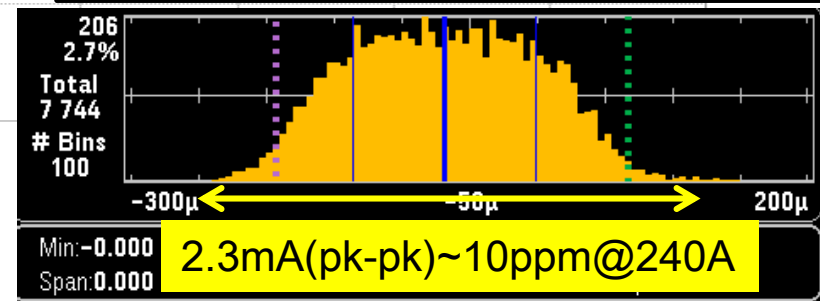
出力試験：電流波形(+240A, 60Hz)



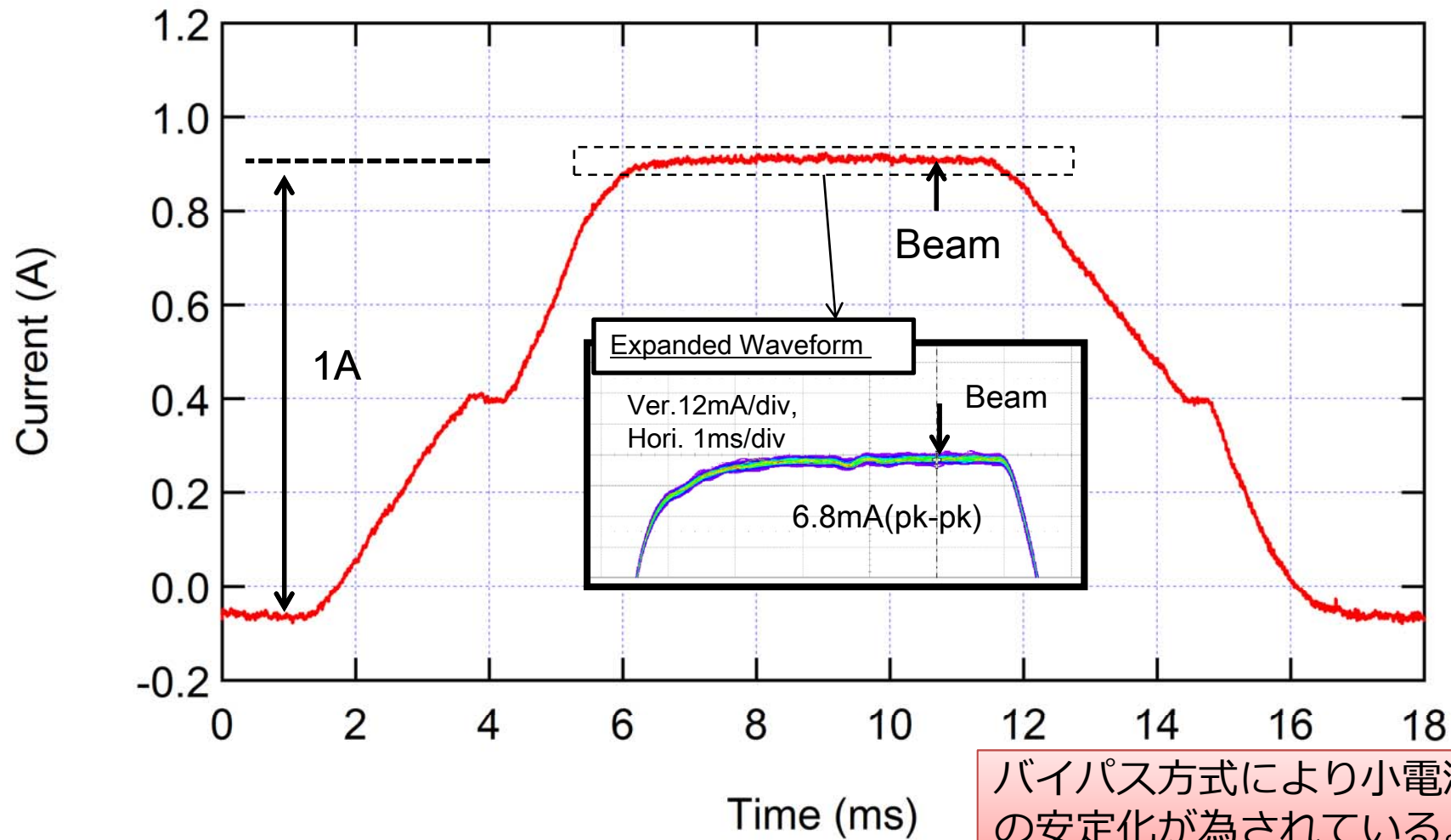
+240A at 60Hz Operation



ショット毎の電流ジッタ(34470A)



出力試験：小電流波形(+1A, 60Hz)



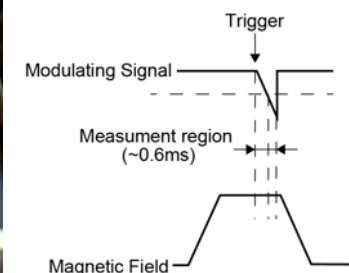
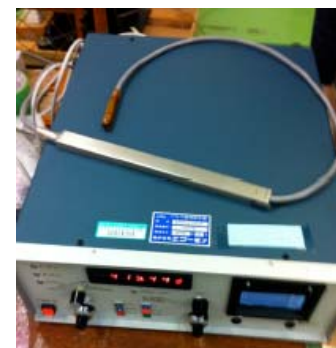
バイパス方式により小電流の安定化が為されている。

出力試験：磁場測定

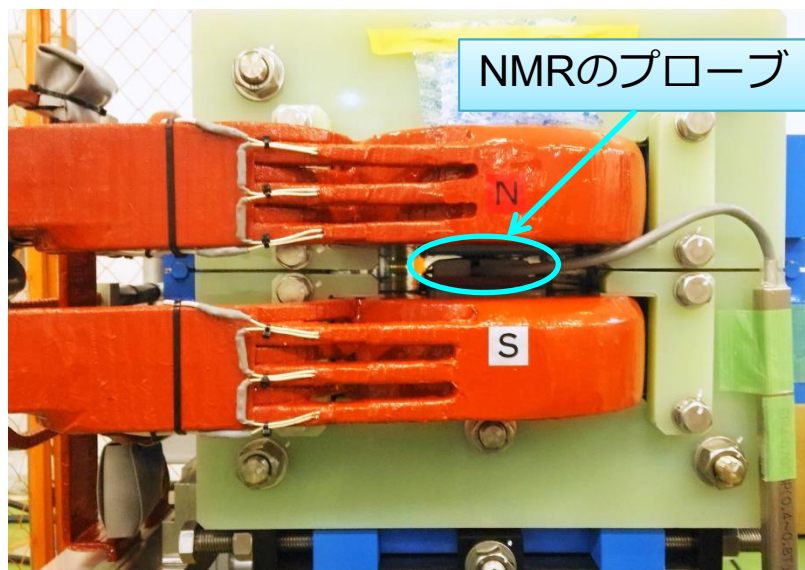


- 高精度の磁場測定
 - ビームタイミングでの磁場測定
 - ゲート機能付きNMRを使用
- ショット毎の磁場変動は、10ppm以下を確認
 - 0.72 Tに対し、7 μ Tの変動幅(pk-pk)

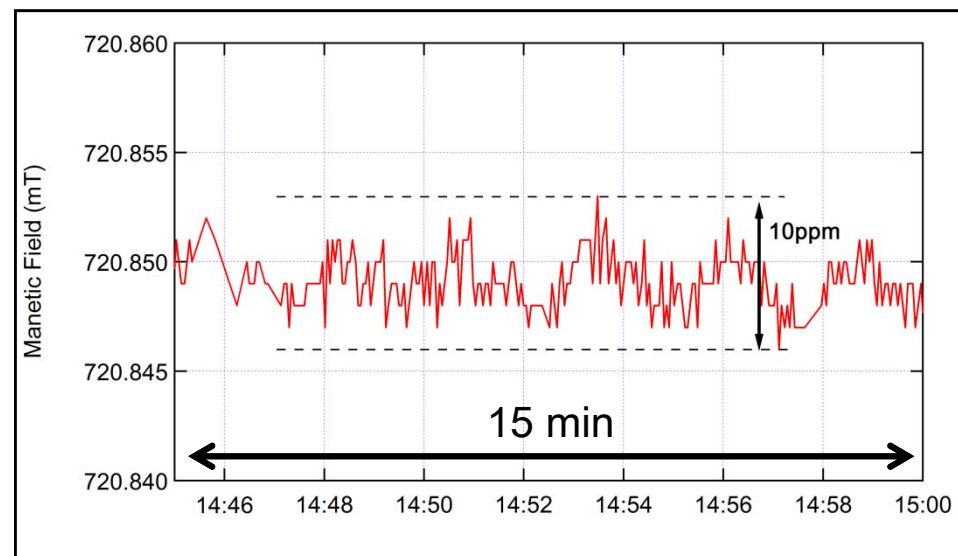
Gated NMR (工コー電子: EPM-6700SP)



磁場の強度測定



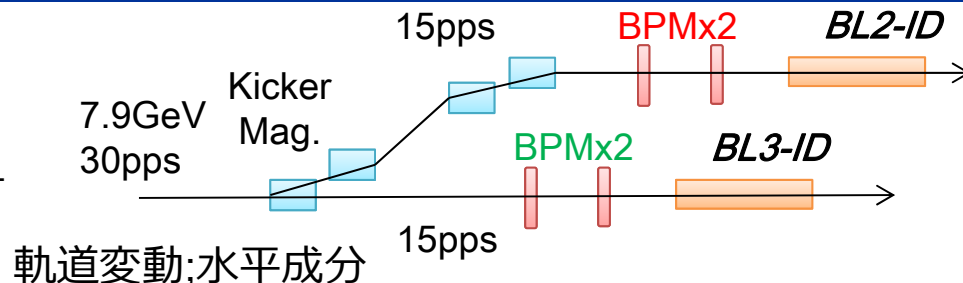
短時間の磁場変動 運転条件：+240A, 60pps



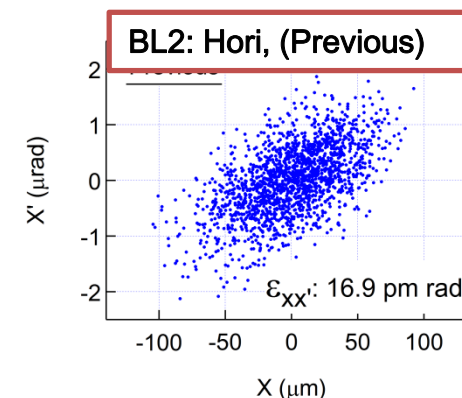
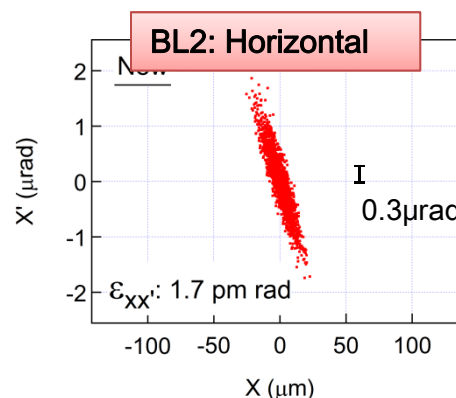
ビーム振り分け運転



- 電子ビームの振り分け運転
 - 7.9GeV, 30 ppsの電子ビームを、BL3→BL2→BL3→...と交互振り分け(均等振り分け)

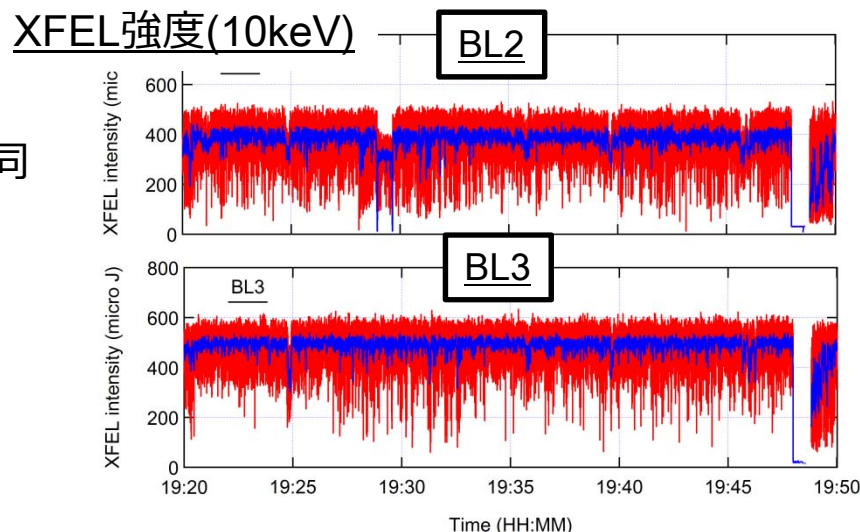


- 軌道安定性
新しい振分システムの軌道変動
 水平方向 : 1.7 pm rad@BL2
 (旧システム : 17 pm radの1/10)
 →CSRの影響を抑制できた。
 cf. 磁場安定度による角度変動:~0.3 μrad



- XFEL運転
 - 加速器は同じ加速パラメーター
 - BL2, BL3で、300μJ以上のXFELを同時に得ることに成功
 - マルチビームラインによるXFEL供用運転が可能

詳しくは、THOL14にて



まとめと今後



- SACLA-BL2のマルチビームラインXFEL供用運転に向け、CSR抑制用の新しいビーム輸送ラインの改造に伴い、大電力パターン電源の開発を行った。
- 新しい電源は、 $\pm 299\text{A}$, 10ppm(pk-pk), 60Hzが可能
 - 旧電源の約6倍の出力電力
 - SiC MOSFETや水冷抵抗の活用などにより、電源のサイズは1.5倍に留めた
 - 電流、磁場安定度共、10ppm(pk-pk)を達成
 - バイパス方式により、1A以下の小電流時でも電流制御が可能
- ビーム運転を実施し、CSRの抑制とマルチビームラインでXFEL供用運転が可能なることを実証した。
- 2017年秋からのマルチビームライン運転での運用、および将来的にはSPring-8への入射にも使用する予定である。

本電源の製作・設置に、ご協力頂いた方々

- ニチコン草津 株式会社
- スプリング8サービス 株式会社
- 日立造船 株式会社
- 株式会社 アイデン

...

ご協力、ありがとうございました