

SPring-8-IIの電磁石電源システム

近藤 力^{A,B)}, 谷内努^{A)}, 増田剛正^{A)}, 藤田貴弘^{A)}, 福井 達^{B)}, 青木毅^{A)}, 田島美典^{A)},
松原伸一^{A)}, 山口博史^{A)}, 中澤 伸侯^{C)}, 深見健司^{A,B)}, 渡部貴宏^{A,B)},

A) JASRI

B) RIKEN SPring-8 Center

C) SPring-8 Service Co., Ltd.



Outline

- ・ 電磁石電源システムの概要
- ・ 各電源の詳細
- ・ 切替器

SPring-8-IIプロジェクト
100 pmradの低エミッタンス
Green Facilityを目指した省エネ化

今学会の磁石関連発表：

WEPO702 次世代放射光源SPring-8-IIのための加速器設計・開発

WEP070 SPring-8-II縦勾配型偏向永久磁石の製作

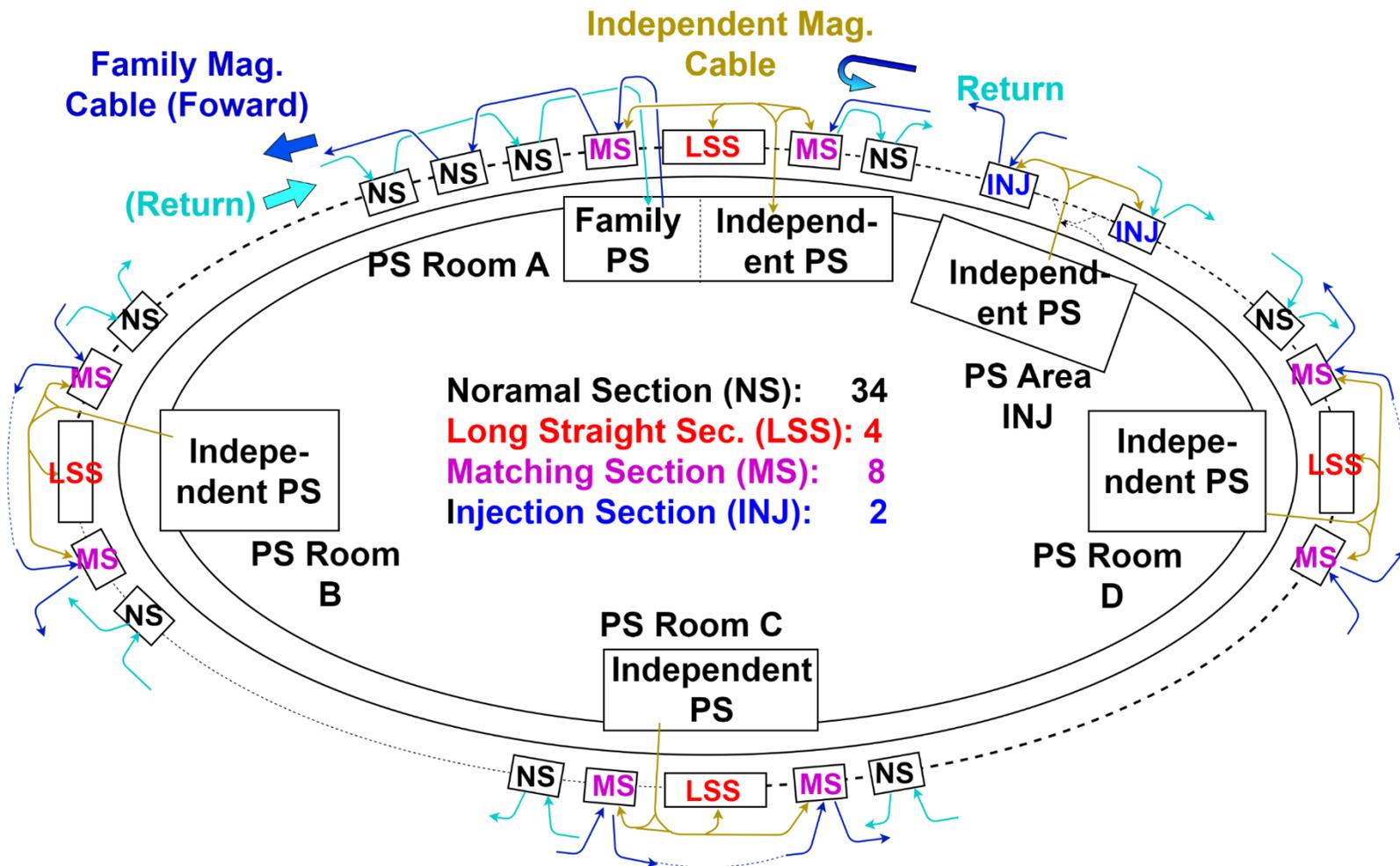
FRO605 SPring-8-II 蓄積リング磁石システム



SPring-8-IIの電磁石電源システム

- ・ FPGAを用いたデジタル制御システム
- ・ 20~50 ppm の高い電流安定度
- ・ 90~93%以上の高い電力効率
- ・ Shunt抵抗方式といったコストを意識した技術を導入
- ・ 切替器による故障時のダウンタイムの短縮

SPring-8-IIの磁石-電源構成



電源の種類別

Family電源：20台

Family接続した多極電磁石を励磁
電源室Aに設置
配線は天井上を折り返し周回

個別電源：~80台

MSなどの多極電磁石を個別に励磁
電源室A~D, 入射部エリアに設置
配線は天井上

DC-link電源：~400台

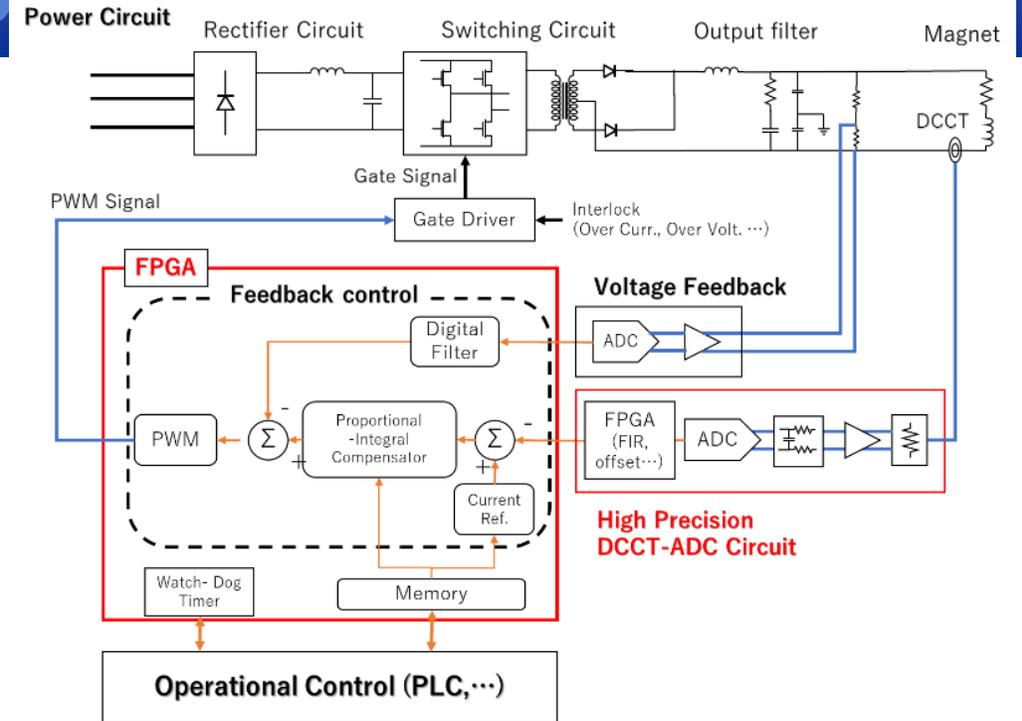
ステアリング磁石などを励磁
リング内周通路に設置
配線は床下ピット

デジタル制御による電磁石電源

- デジタル制御による電磁石電源
 - FPGA(Xilinx Zynq)を用いたフルデジタル制御
 - 20ppm以下の高い安定度を実現可能
 - 高精度DCCT, 24bit-ADC回路による
 - 制御パラメーターの調整が容易
 - 機能拡張が容易なため、将来的な改造や様々な電源に応用が可能。

- これまでのデジタル制御電源の開発
 - デジタル制御電源の開発 [C. Kondo, PASJ2018]
 - NanoTerasuの電磁石電源システム [C. Kondo, PASJ2023]
 - SACLAの高精度パターン電源 [C. Kondo, PASJ2024]

Diagram of Digital Control PS



24-bit ADC Board
(Ohkura)



FPGA (Xilinx Zynq 7020)

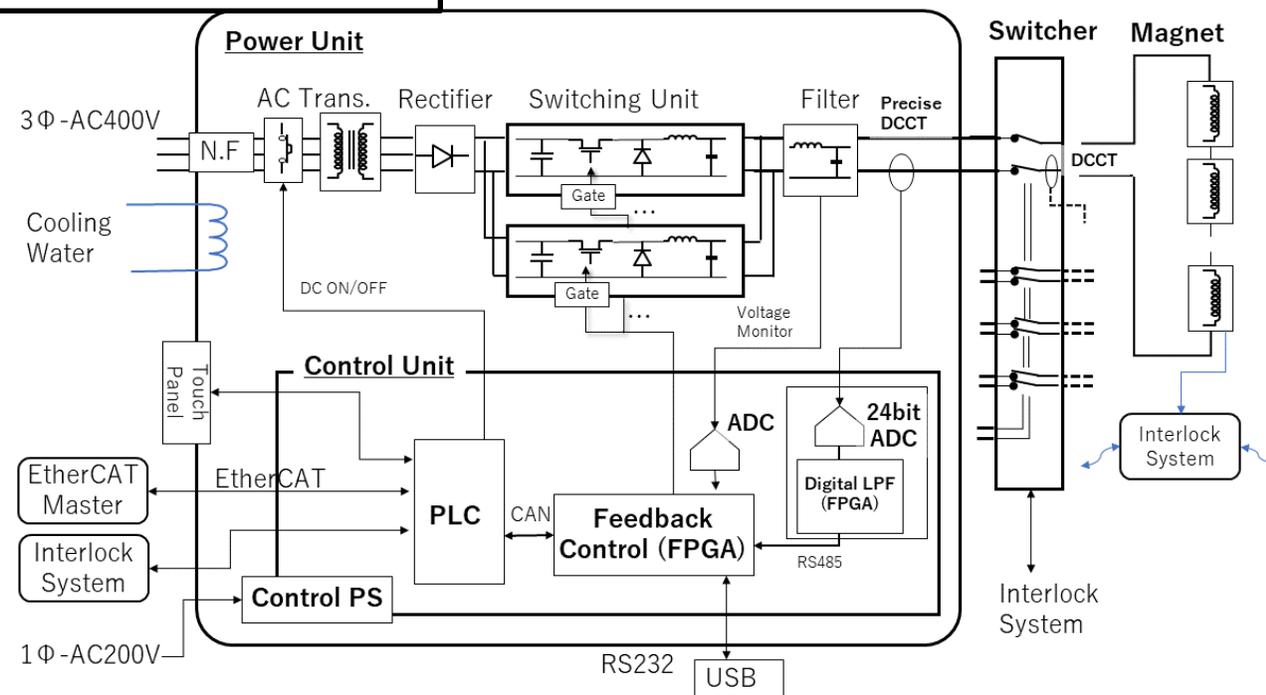


Family電磁石用電源

電源名	電流	電圧	安定度	入力電力	数量(内 予備)
U450A	450 A	1,000 V	20 ppm	3Φ-400V	5台(予備1台)
U450B	450 A	600 V	20 ppm	3Φ-400V	4台(予備0台)
U600	600 A	700 V	20 ppm	3Φ-400V	5台(予備1台)
U250	250 A	280 V	20 ppm	3Φ-400V	6台(予備1台)

- 64~88台を直列接続した多極電磁石を励磁
- 高電圧、大電流の大電力電源
 - 電流安定度：20ppm以下
 - 複数のスイッチングユニットを位相差スイッチング
 - 切替器により、故障時の予備機切替を容易にする
- SiC MOSFETを用いた高効率化
 - 高速スイッチングにより損失
 - 効率93%以上(目標)
 - cf. 現SP8ではサイリスタ電源

Family電源回路図



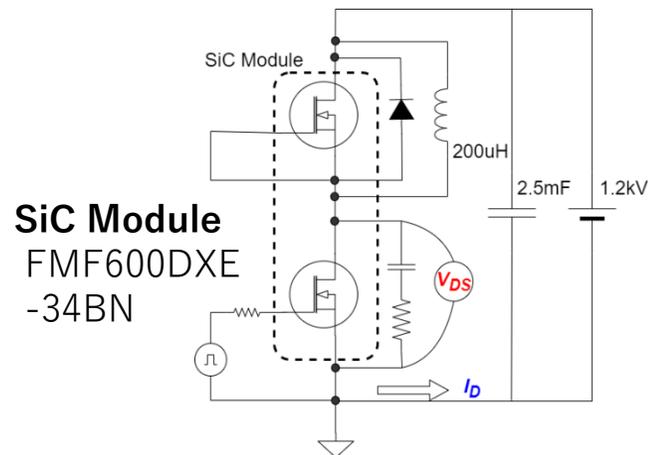
SiC スイッチングユニット

SiC Switching Unit (Proto-type)

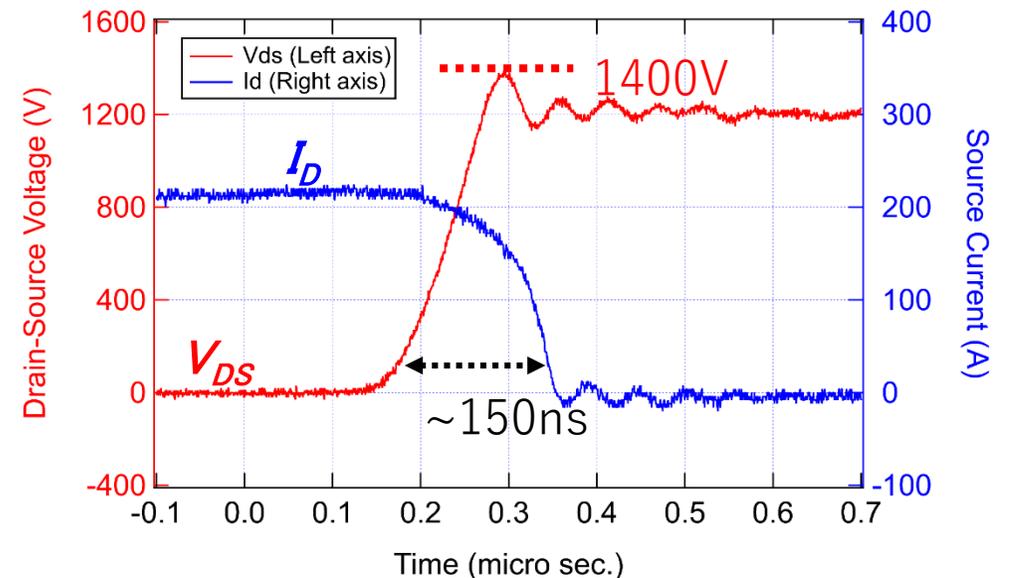
- SiC MOSFET
 - 三菱電機FMF600DXE-34BN : 1.7kV, 600A_{dc}
- 1.2kV, 200Aのスイッチングユニットを試作
 - ラミネート配線による低インダクタンス配線
 - ダブルパルス試験を行い、Turn-Off時のサージ電圧を1.4kVに抑制できることを確認
- 実機では2~4ユニットを並列駆動



Double Pulse Test Circuit



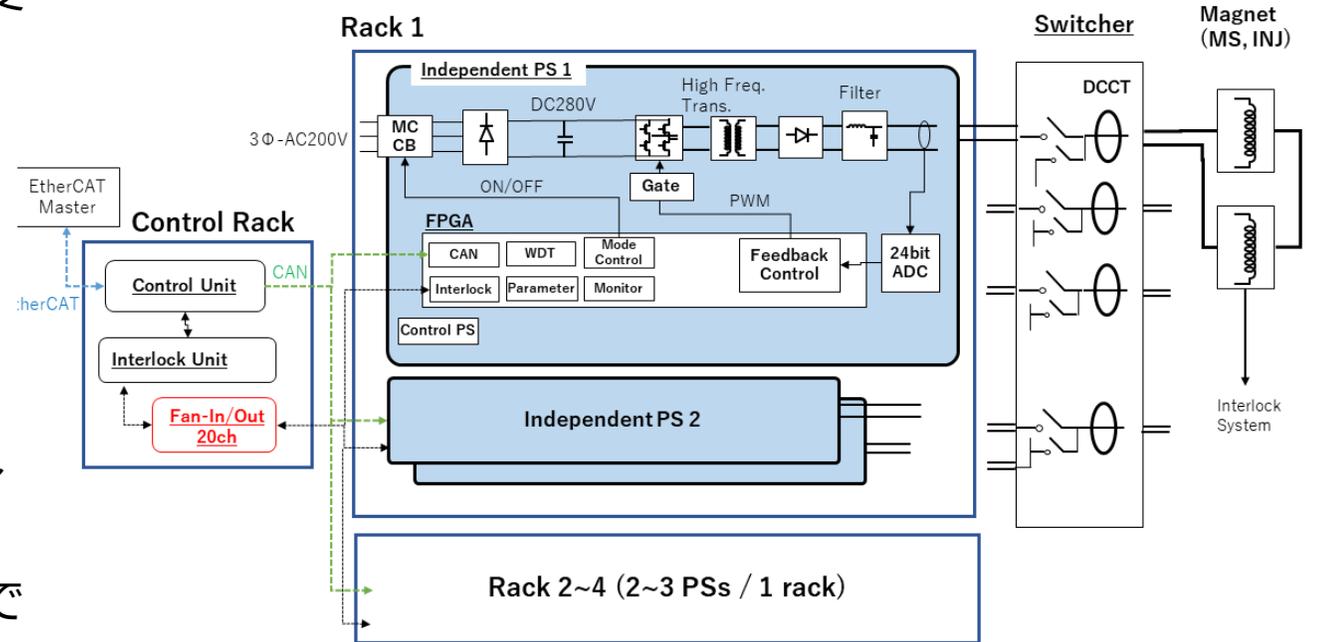
Waveforms at Turn-off



単独磁石用個別電源

電源名	電流	電圧	安定度	入力電力	数量(予備)
U300MS	300 A	15 V	20 ppm	3Φ-200V	60台(予備5台)
U450MS	450 A	20 V	20 ppm	3Φ-200V	22台(予備4台)

- MS/INJ/LSSの一部の磁石を、個別に電流変更するための電源
 - 1~4台の直列接続した電磁石
 - 大電流、低電圧
 - 効率：90%以上
 - 安定度：20ppm
- 特徴
 - タイプを2種類に抑え、量産性の向上や、予備品の削減
 - 13~15台の電源に対し、1台の制御ユニットで通信制御
 - 切替器により故障時の切替を容易とする

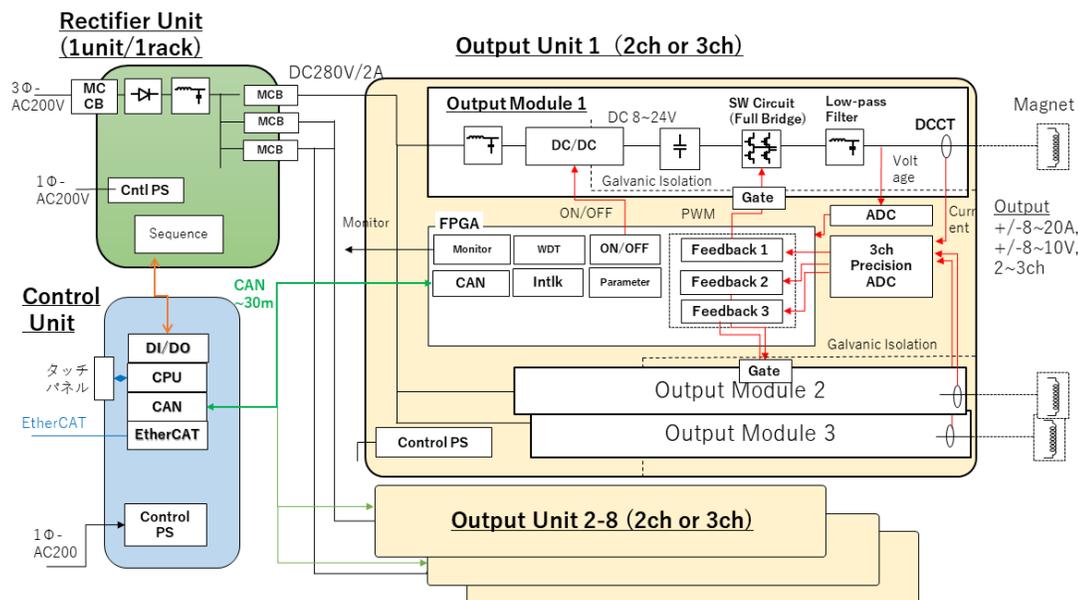


DC-link型電源

電源名	電流	電圧	出力数	安定度	入力電力	数量(使用/予備)
B7	±7 A	±9 V	2ch	50 ppm	DC280V	76台 (予備4台)
B16	±16 A	±8 V	3ch	50 ppm	DC280V	290台 (予備8台)
AUX20	±20A	±10 V	2ch	50 ppm	DC280V	53台 (予備4台)

- 200W以下の小電力電源
 - ステアリング磁石用電源や四極補正電源など
 - 安定度 : 50 ppm
 - 出力数 : ~1000 ch.
 - 両極スイッチングによる小電流領域の安定化[C. Kondo, PASJ2023]

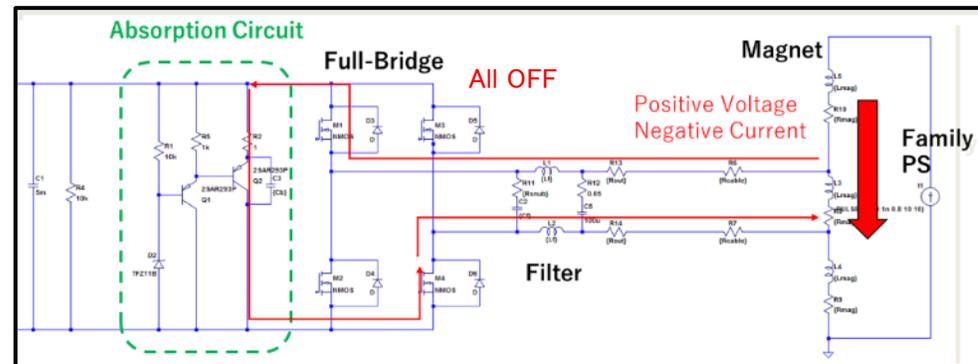
- コストを意識した設計
 - 1ユニットあたり2~3chの出力
 - 整流回路や制御ユニットを複数のユニットで共有
 - 設置場所を、現在の電源室から磁石に近い保守通路とし、磁石までの距離を短くしてケーブル損失を抑制



局所的電流変更機能；四極補正電源とShunt抵抗方式

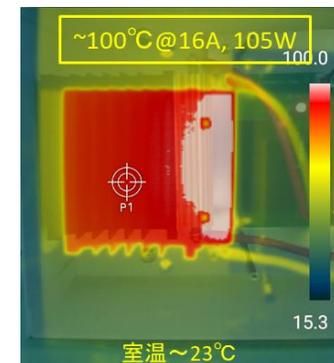
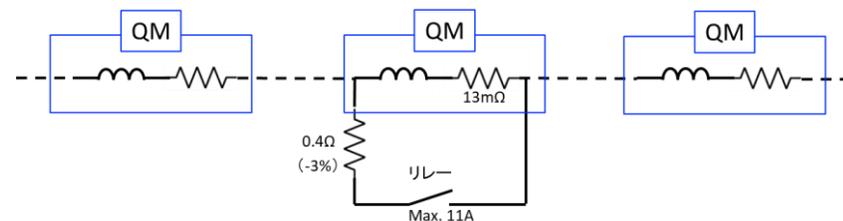
四象限動作の回路図

- 補正電源(AUX電源)
 - 四極電磁石を局所的に励磁電流を変更する
 - 四象限動作により、±5%の範囲で可変
 - 1セルあたり2箇所



Shunt抵抗による電流変更と動作時の温度

- Shunt抵抗方式
 - Shunt抵抗を磁石と並列接続し、リレーでON/OFF制御
 - BPMのBeam-based Calibrationに使用
 - 変更量は固定だが、低コストで導入可能
 - 4台/1cellを設置。約170台を導入。



故障時の電源切替

- ・ SPring-8のFamily電源の切替
 - 配線の入替え作業が必要。
 - 復旧作業に数時間が掛かっていた
- ・ SPring-8-IIのFamily電源の切替
 - ブスバー式の切替器を導入
 - 復旧作業を数10分に短縮
- ・ 将来構想
 - ビームロスをせずに電源を切替えたい！
 - 励磁電流を維持したまま電源を切り替える Hot-swap方式を目指す！

[“EBS Storage Ring Technical Report”, ESRF, 2019]

SP8の電磁石電源室

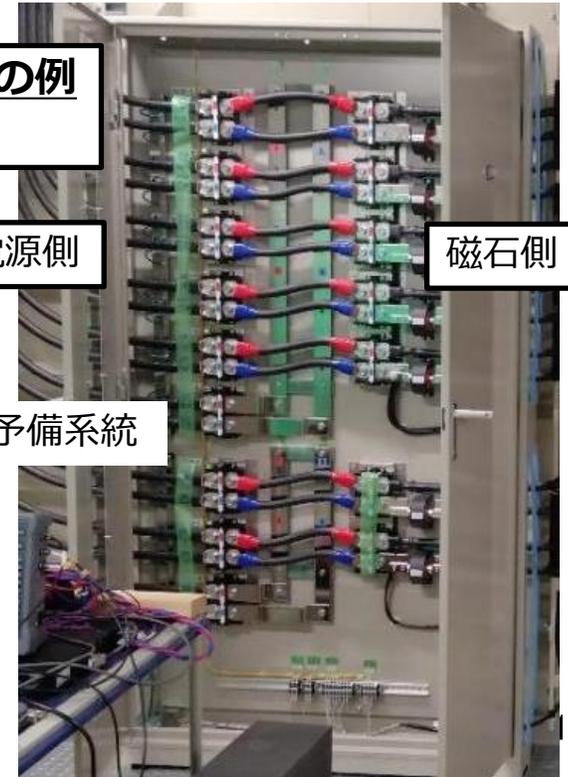


ブスバー式切替器の例
(NanoTerasu)

電源側

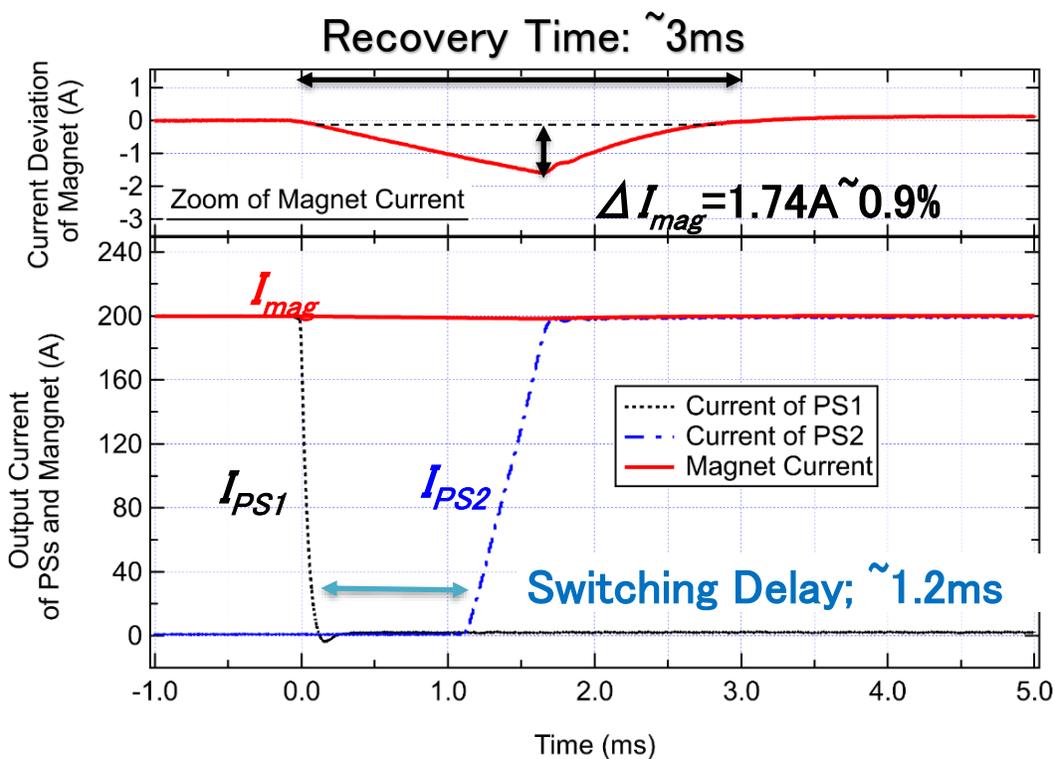
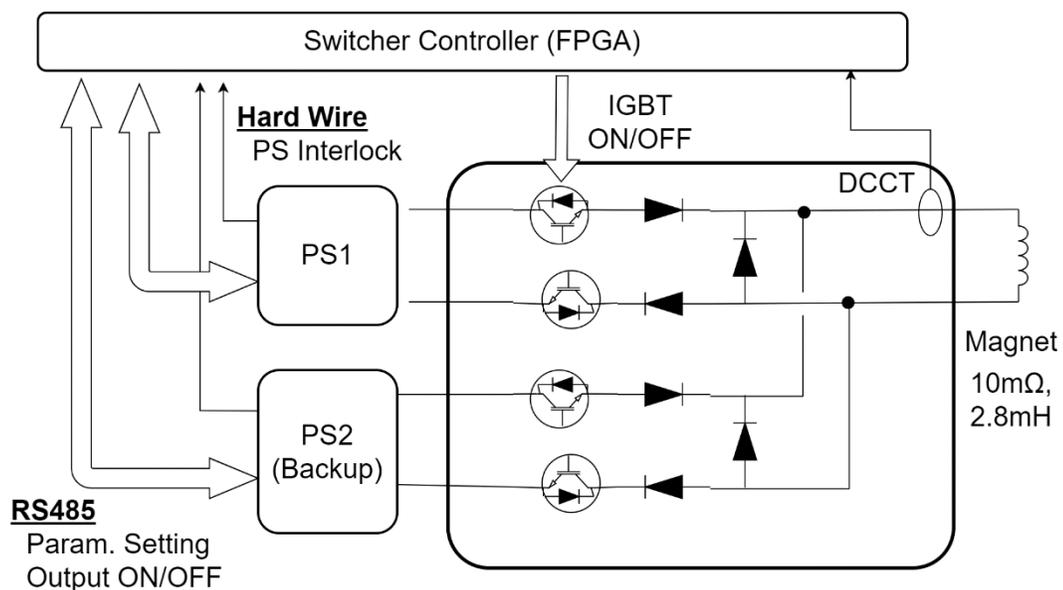
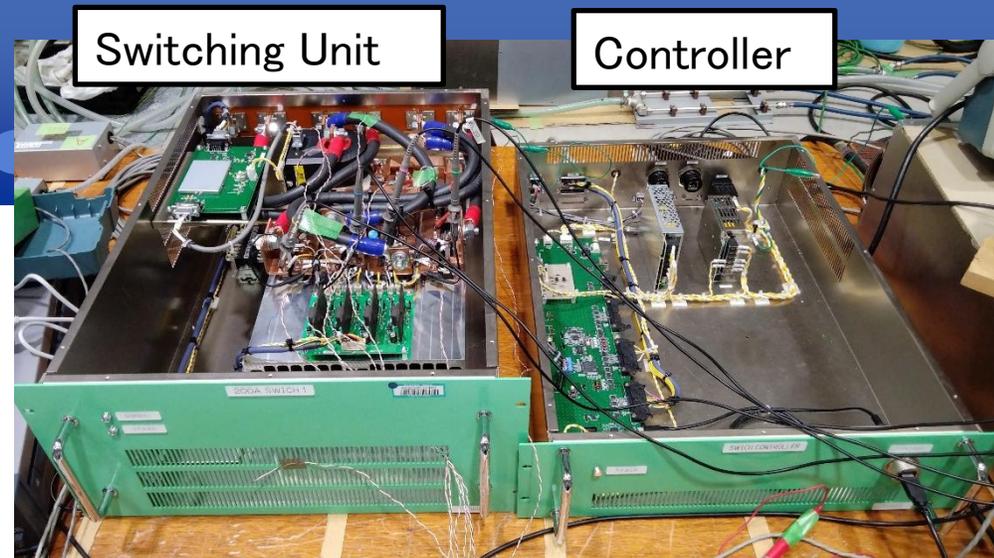
磁石側

予備系統



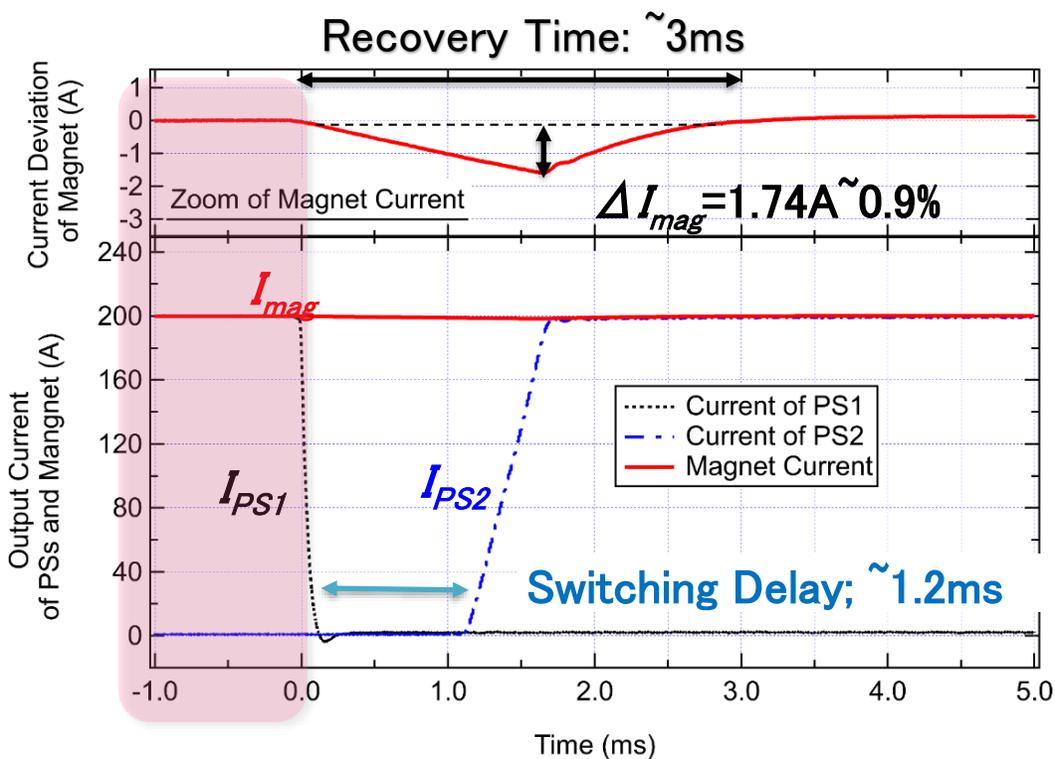
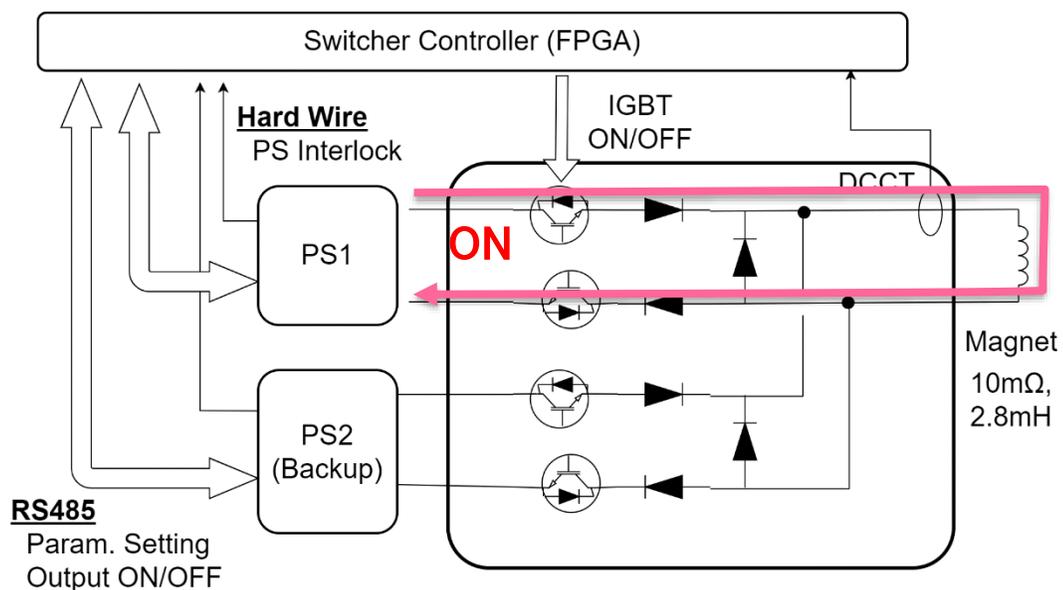
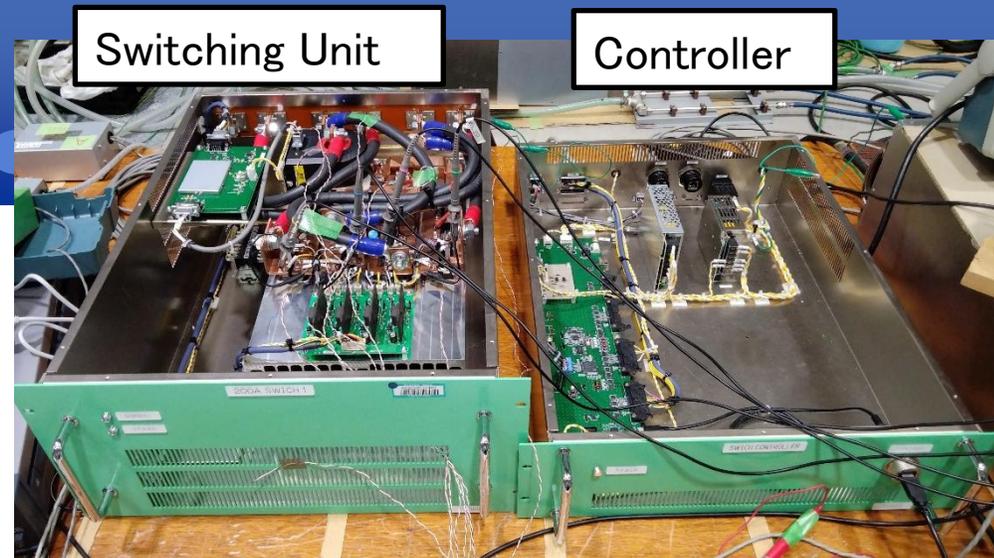
高速切替器の試作

- ・ 電流変動の目標：0.4%以内(暫定値)
- ・ 半導体(IGBT)とFPGAを用いた高速切替器を試作
- ・ 四極磁石(2.8mH, 10mΩ)を用いて切替動作の実証試験
 - 最大電流低下：1.74A (定格200Aに対し0.9%)
- ・ 課題/改善点：切替の高速化、発熱の低減、etc



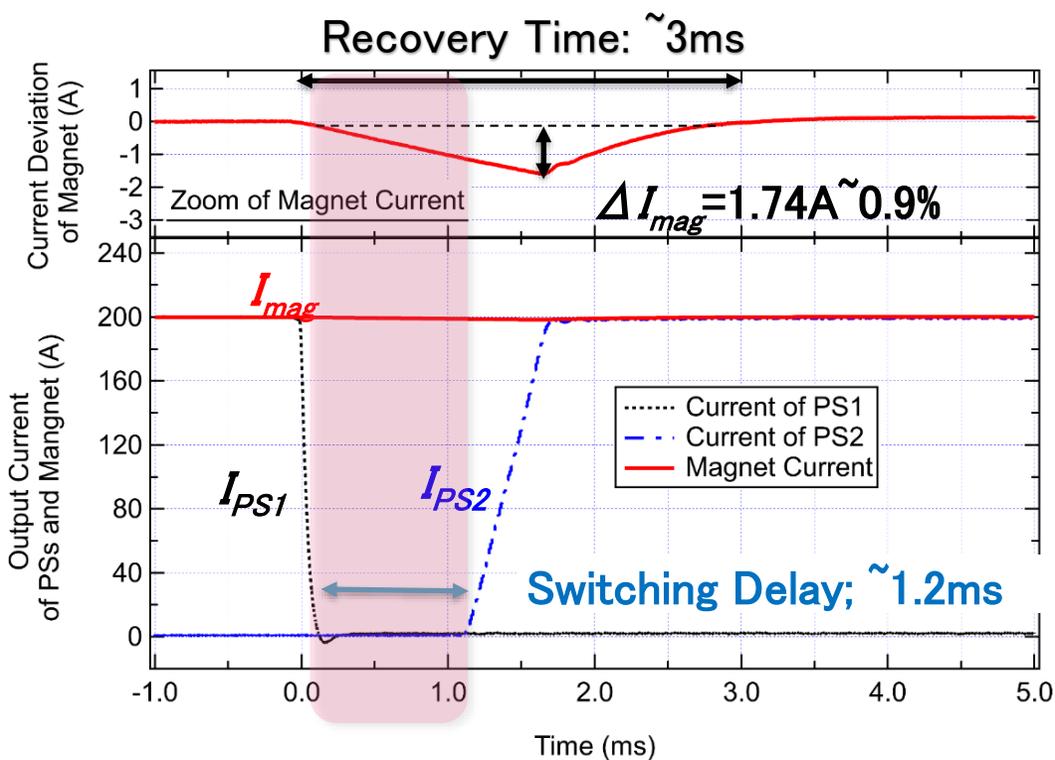
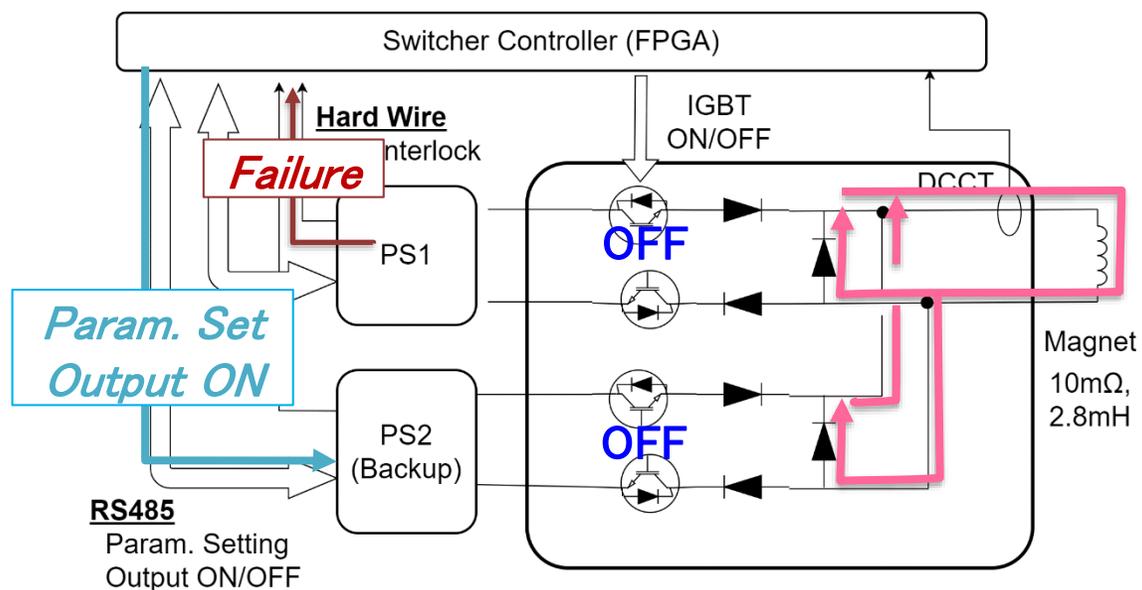
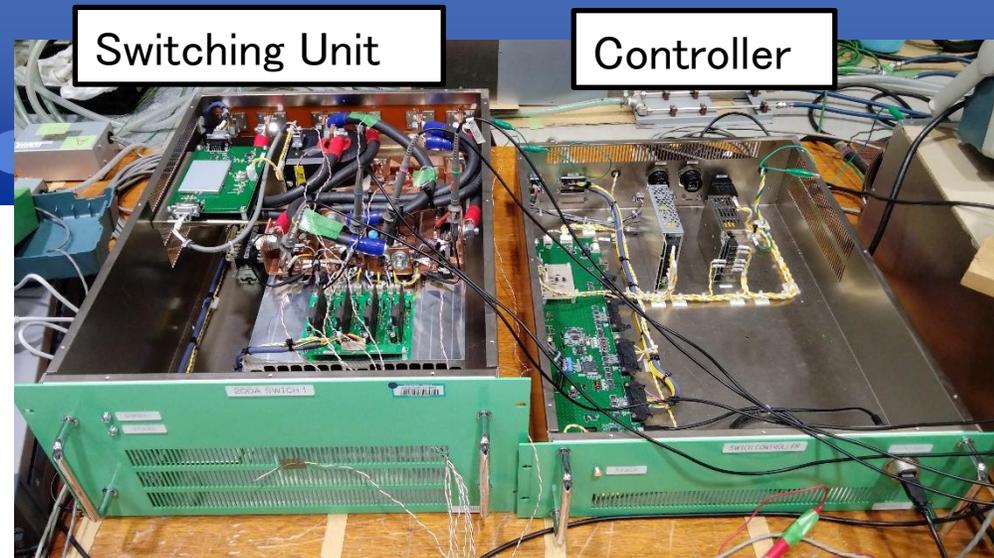
高速切替器の試作

- ・ 電流変動の目標：0.4%以内(暫定値)
- ・ 半導体(IGBT)とFPGAを用いた高速切替器を試作
- ・ 四極磁石(2.8mH, 10mΩ)を用いて切替動作の実証試験
 - 最大電流低下：1.74A (定格200Aに対し0.9%)
- ・ 課題/改善点：切替の高速化、発熱の低減、etc



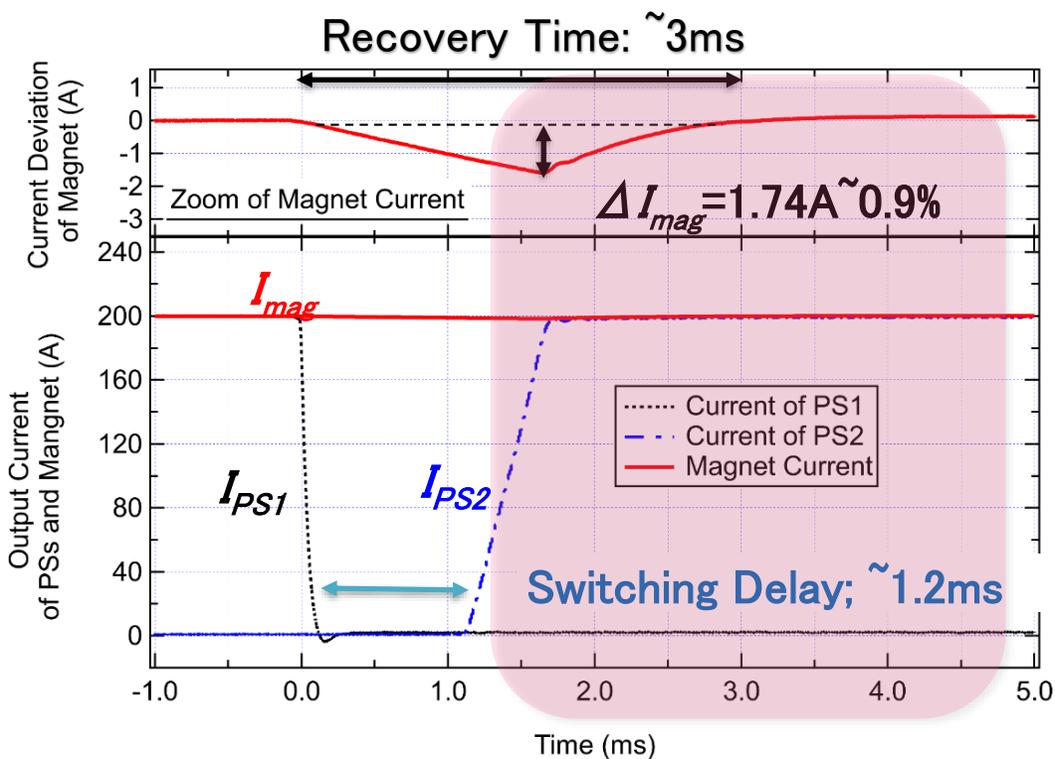
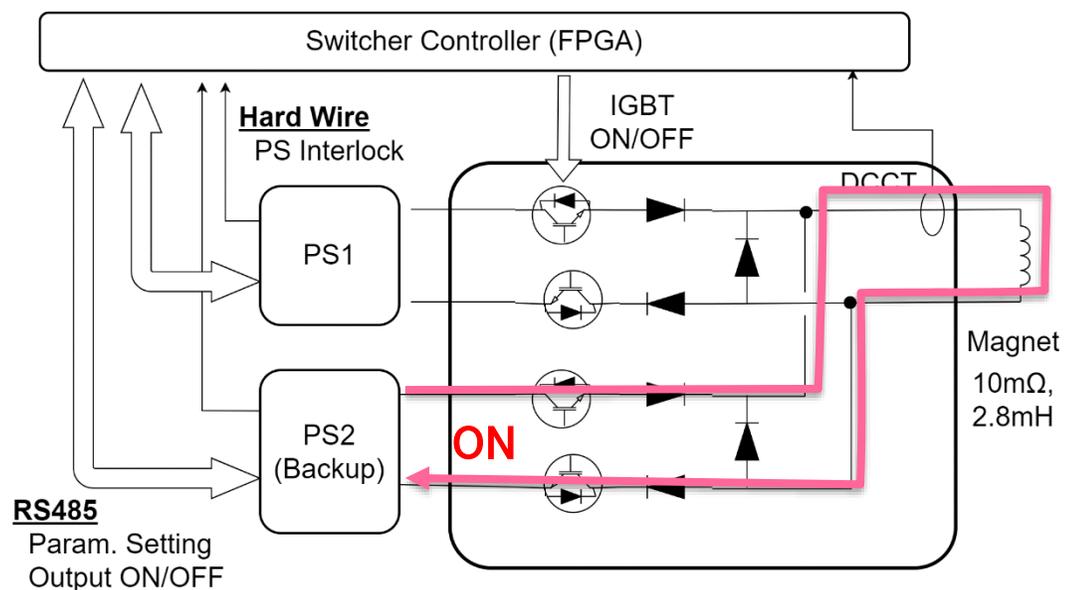
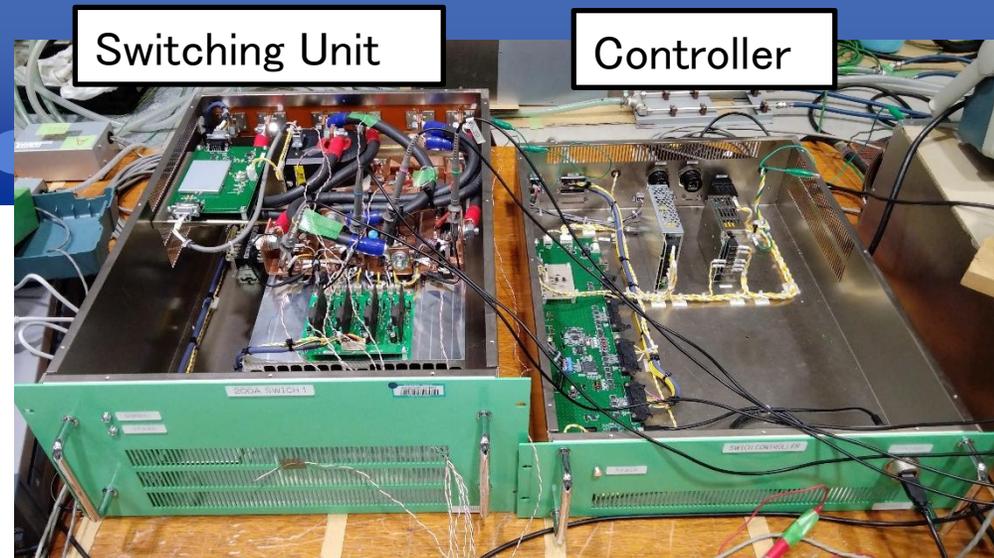
高速切替器の試作

- 電流変動の目標：0.4%以内(暫定値)
- 半導体(IGBT)とFPGAを用いた高速切替器を試作
- 四極磁石(2.8mH, 10mΩ)を用いて切替動作の実証試験
 - 最大電流低下：1.74A (定格200Aに対し0.9%)
- 課題/改善点：切替の高速化、発熱の低減、etc

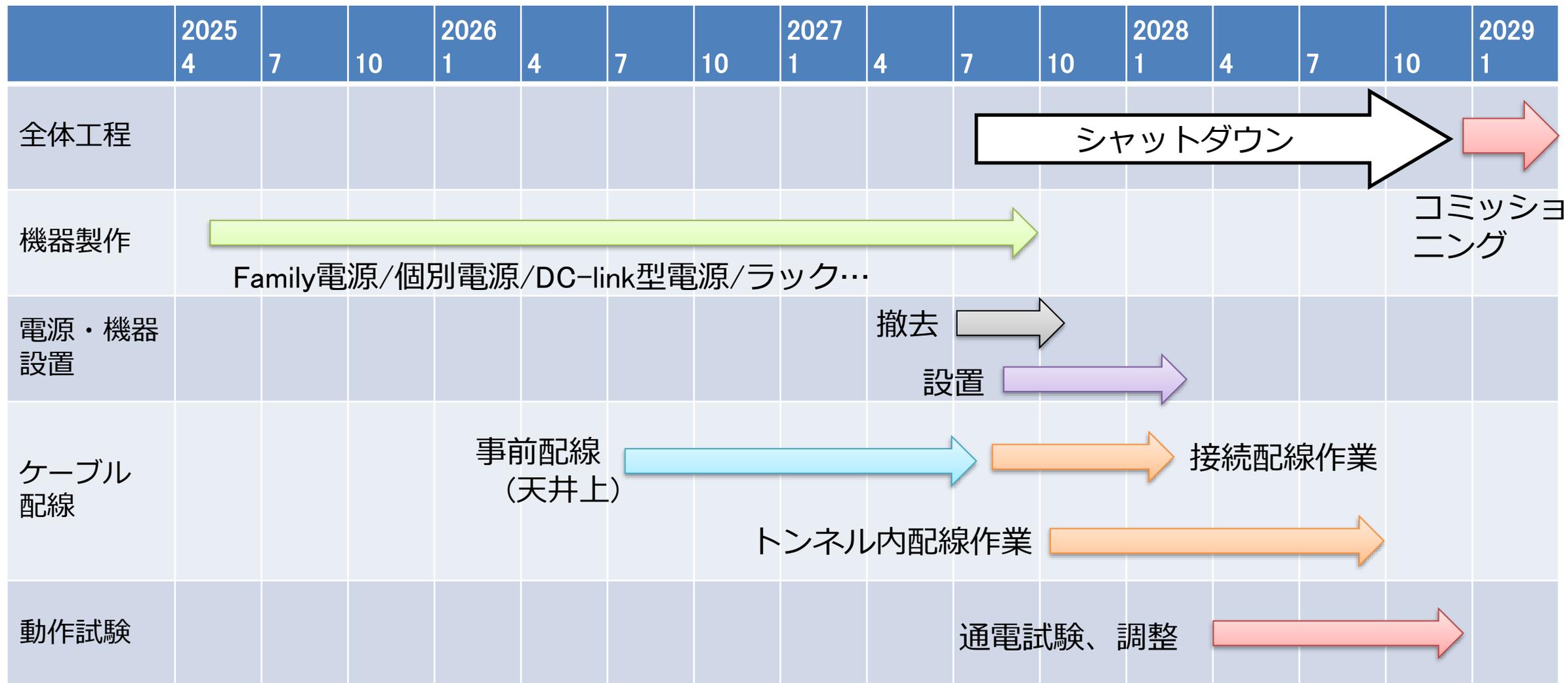


高速切替器の試作

- ・ 電流変動の目標：0.4%以内(暫定値)
- ・ 半導体(IGBT)とFPGAを用いた高速切替器を試作
- ・ 四極磁石(2.8mH, 10mΩ)を用いて切替動作の実証試験
 - 最大電流低下：1.74A (定格200Aに対し0.9%)
- ・ 課題/改善点：切替の高速化、発熱の低減、etc



スケジュール



まとめ

- ・ SPring-8-IIの電磁石電源は、これまで開発してきたデジタル制御を用い、高い安定度と高効率な電源とする。
- ・ Family電源ではSiCモジュールにより93%以上の高効率化を目指す
- ・ 局所的な電流変更機構としてShunt抵抗方式を導入する。
- ・ 高速切替器の開発し、デモ試験では切替時間 $\sim 1.2\text{ms}$ 、電流低下0.9%の動作を確認。今後、改良を加え将来的な導入を目指す。
- ・ 2025年から量産を開始し、2027年夏 \sim 2028年冬の間設置および試験を実施する。

- ・ 協力メーカー
 - 工藤電機会社
 - ・ SiCスイッチングユニットの開発、試験
 - ・ 高速切替器の開発、試験
 - ニチコン株式会社
 - ・ 長距離CAN通信の試験
 - カナデビア株式会社
 - ・ CAN通信の試験
 - アイデン株式会社
 - ・ Shunt抵抗回路の試作

ご協力、ありがとうございました！！