

デジタル制御による電磁石電源の開発 および次世代放射光施設への展開

近藤 力^{A,B,C}, 谷内 努^{A,C}, 山口 博史^{A,C}, 青木 毅^{A,C}, 深見 健司^{A,B,C},
渡部 貴宏^{A,B,C}, 小原 脩平^C, 西森 信行^C, 中澤 伸侯^D, 福井 達^B, 田中 均^B

A) JASRI

B) RIKEN SPring-8 Center

C) QST

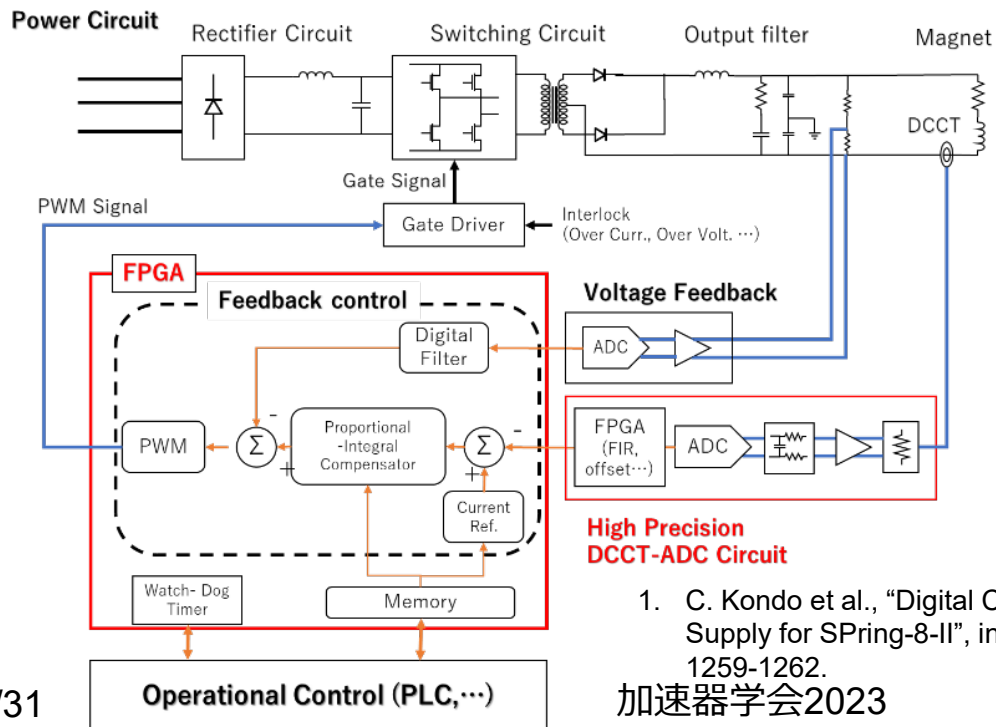
D) SPring-8 Service Co., Ltd.



- デジタル制御による高精度電磁石電源
 - 概要
 - 大電力電源, ステアリング電源
- ステアリング磁石用の電源技術開発
 - 小電流領域の安定性
 - 出力間の同期性
 - パターン動作
- 次世代放射光施設NanoTerasuへの展開
- SPring-8のアップグレードへの応用

デジタル制御電源概要

- これまで、デジタル制御による高安定度の電磁石電源を開発している[1]
- 演算器にFPGAを利用することで、拡張性や柔軟性の高いシステムを実現した。
 - 複雑な機能の追加を、プログラム変更で実現可能。
 - フィードバック制御パラメータの調整を、現場での入力操作でも容易に行える。



1. C. Kondo et al., "Digital Control System of High Precision Magnet Power Supply for SPring-8-II", in Proc. IPAC'19, Melbourne, Australia, 2019, pp. 1259-1262.

加速器学会2023

High Precision DCCT



DS2001D
(Danisense)

Features
Linearity error maximum 2 ppm

High Precise ADC Board (Ohkura)



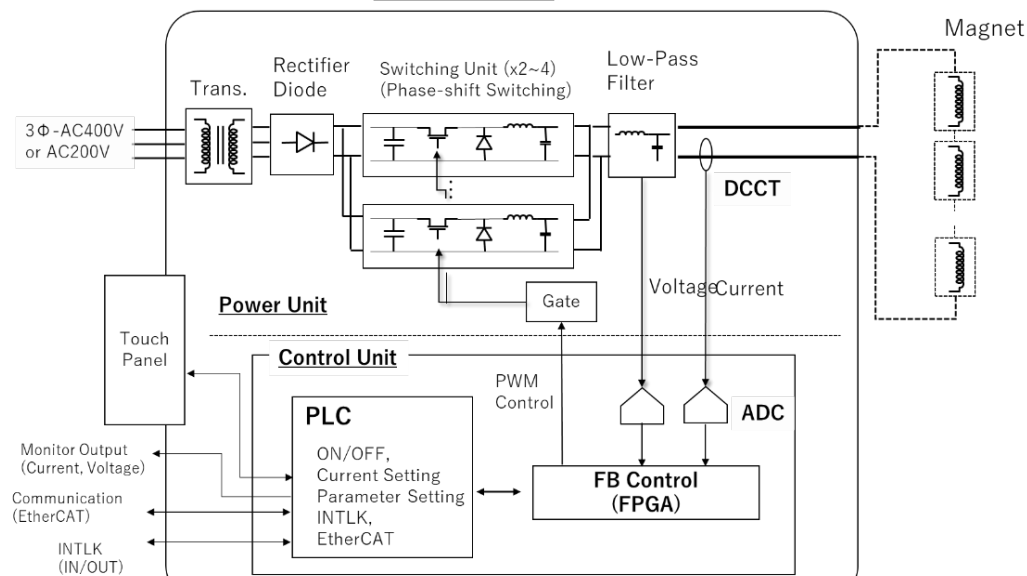
FPGA (Xilinx Zynq 7020)



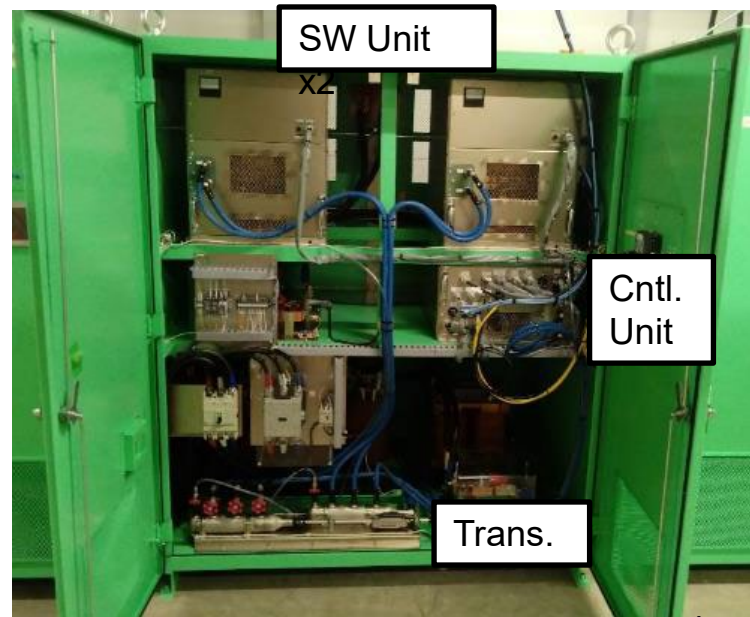
大電力電源概要

- 用途：偏向電磁石、Family電磁石などの大電流が必要な磁石
- 特徴：
 - ユニポーラー出力、50-650A、1出力
 - ADC回路は温調し、長期安定度を20ppm以下を実現
 - 制御回路やスイッチング回路をユニット化。
 - 定格電力に応じて、スイッチングユニットの数を変更。
 - Ex.) 20~100 kW: 2Unit 300kW: 4Unit
 - スwitching動作は、ユニット毎に位相差をつけてスitchingリップルを抑制

ブロック図



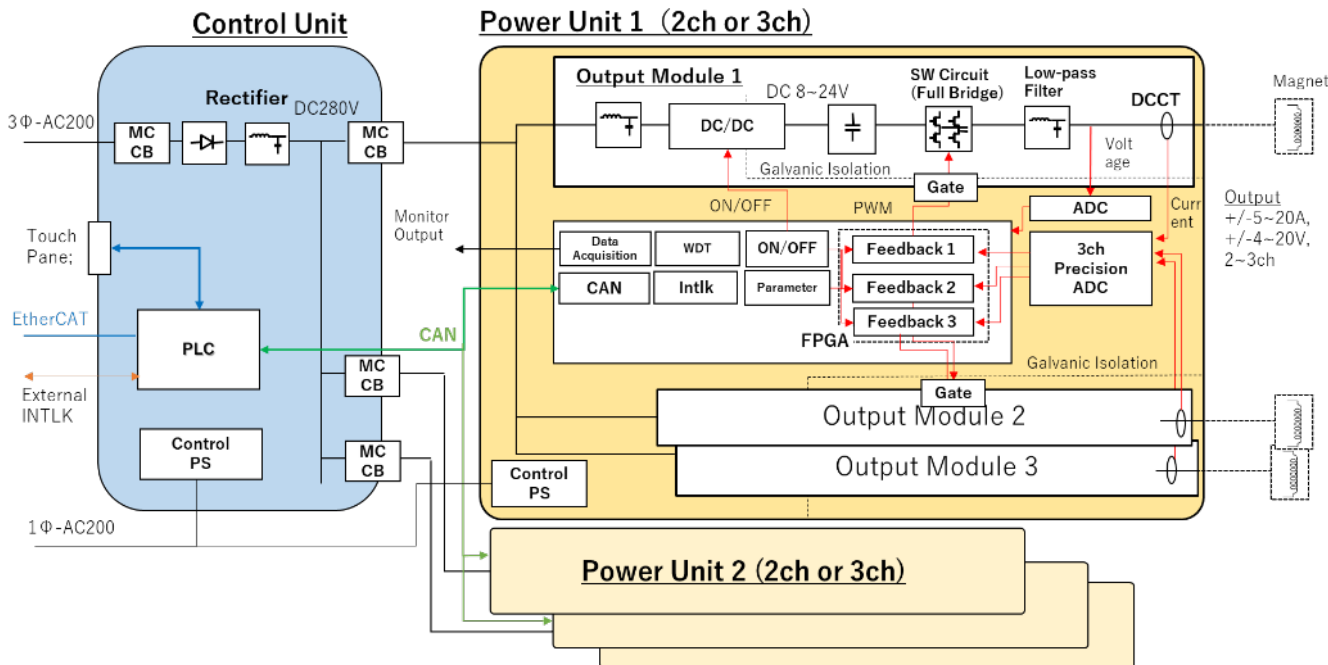
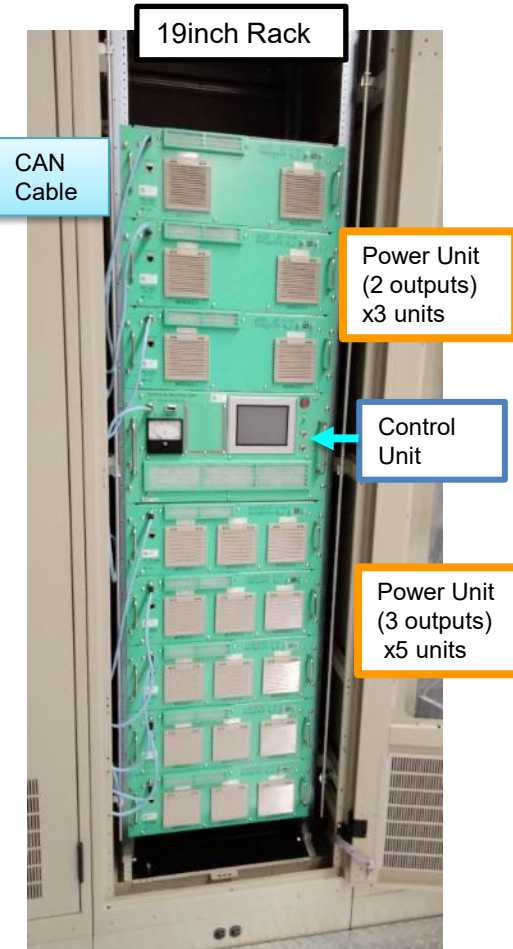
電源内部



ステアリング電源概要

- ステアリング電磁石などの小電流の磁石を励磁
- 量産性を考慮し、整流回路や通信操作機器を共有化
 - 制御ユニット 1台：動作制御、通信、AC-DC整流等
 - 出力ユニット 最大8台：
 - DC-DC回路、スイッチング回路、ADC+FPGA、etc
 - 1台あたり5~20A × 2または3出力
 - バイポーラー出力、安定度50ppm

19インチラックに 実装した様子



ステアリング電源の機能開発

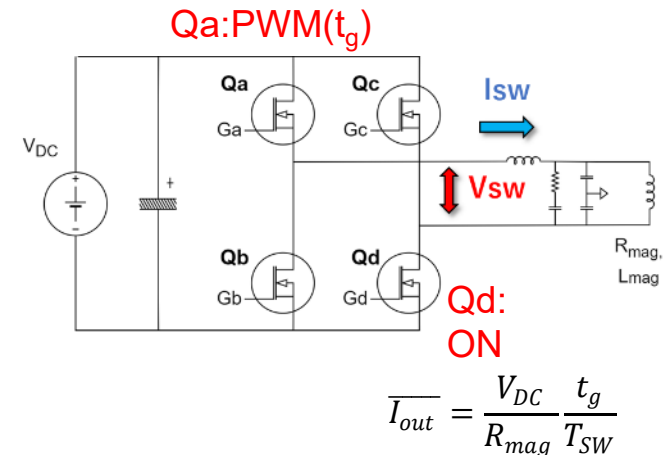
実運転で要求される出力機能を新たに開発

1. 小電流領域における両極スイッチング
2. 3出力の電流の同期制御
3. パターン出力

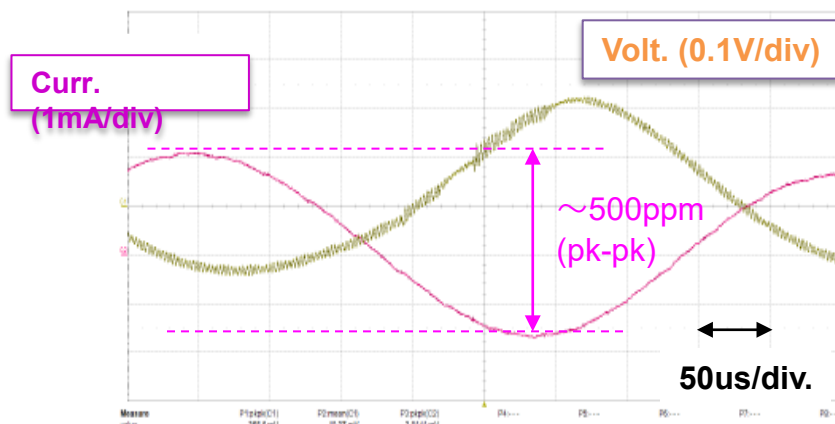
小電流領域における電流制御の不安定性

従来のスイッチングの問題点：

- ステアリング電磁石用電源は、バイポーラー出力かつ全領域で50ppm以下の電流リップルが求められる。
- 一般的なPWM方式(単極スイッチング)では、小電流時はGateのパルス幅が短くなり、FETなどのスイッチング素子の応答性が悪くなり、電流制御が不安定になる。

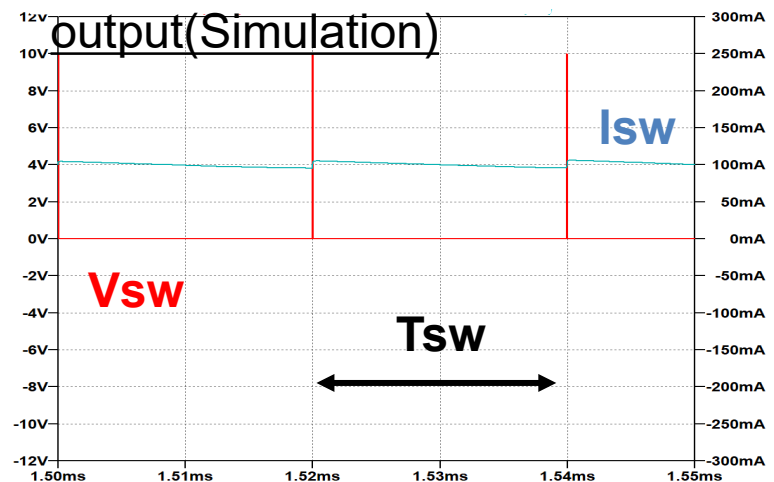


0.1A時の電流時の電流・電圧波形(実測値)



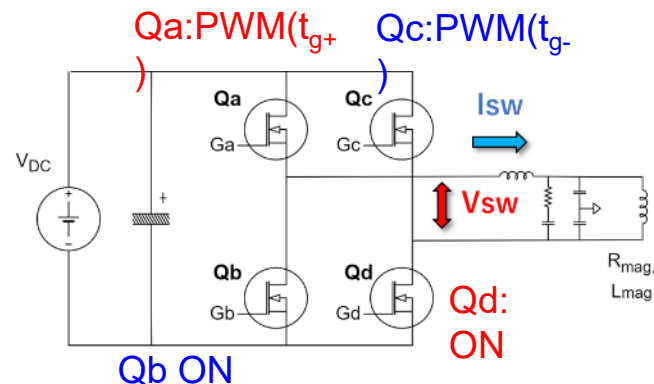
Unipolar Switching

0.1A



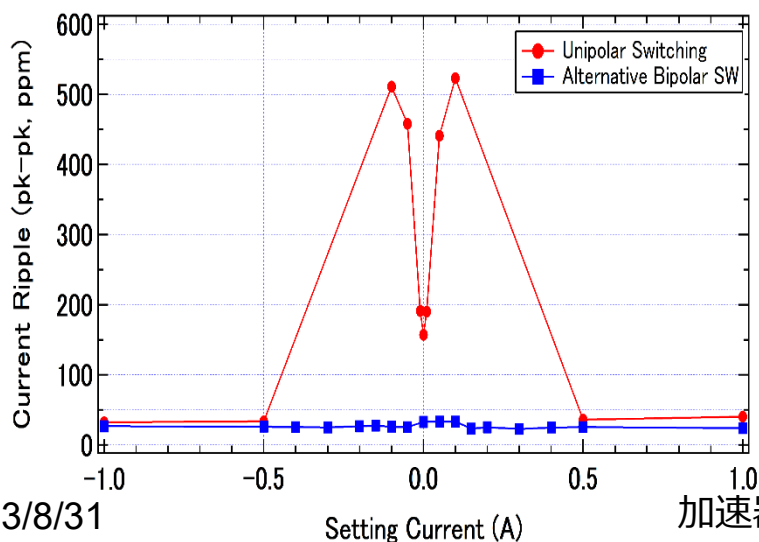
両極スイッチングによる小電流制御

- 両極スイッチング(Alternative Bipolar SW)の概要
 - 小電流領域では正電圧出力と負電圧出力を交互に行う。
 - 出力は、正パルス幅と負パルス幅の比で決まる。
 - 両極動作の範囲などの設定パラメーターが増える
 - スイッチングノイズが増加するため、フィルタを強めに掛ける。
 - 電流リップルを30ppm程度に抑えることに成功

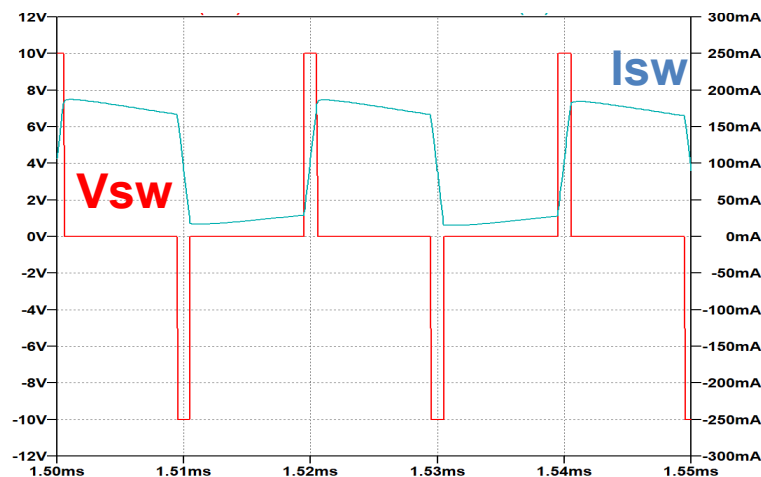


$$\overline{I_{out}} = \frac{V_{DC}}{R_{mag}} \frac{(t_{g+} - t_{g-})}{T_{SW}}$$

設定電流と電流リップル(実測値)



Alternative Bipolar Switching



ステアリング電源3出力の同期性

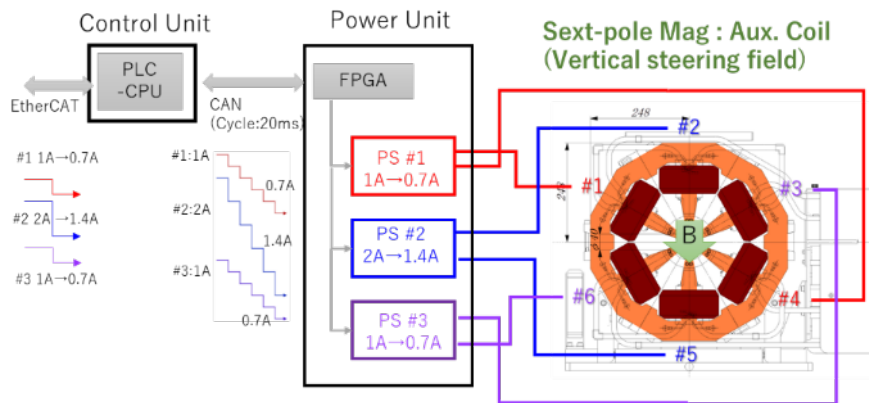
- 目的 :

- 六極電磁石は、3対の補助コイルに通電することでステアリング磁場を生成
- 3対のコイル間の励磁電流は、高次磁場を抑えるため、一定の比率が必要
- 電流変更中でも3対の電流比率は維持できる電源

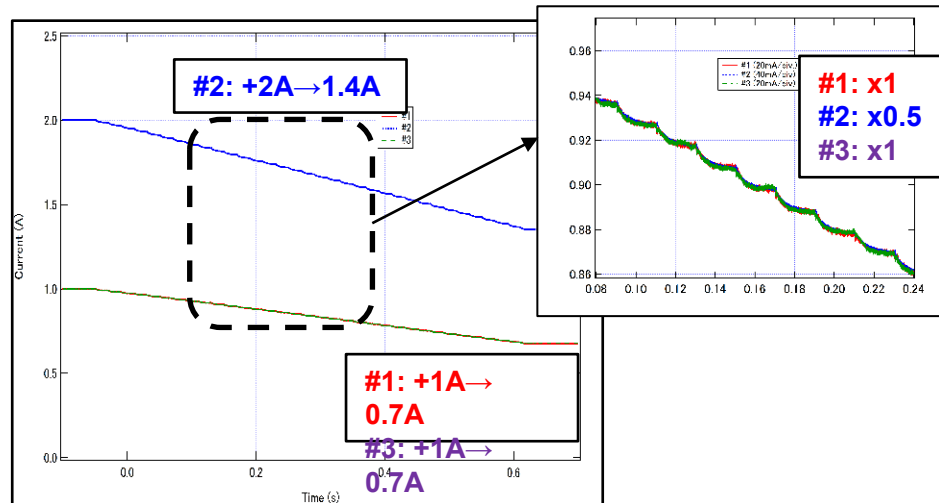
- 機能概要

- 出力ユニットの出力数を3とし、3つの電流変更を1つのFPGAで同期する。
- 制御ユニットにて、目標値に対して3出力の電流値の変更量が、同じ比率になるように計算する。計算値を出力ユニットに、3つ一緒に20ms毎に送信する。

構成図



電流変更時の波形



波形を拡大&規格化

パターン機能

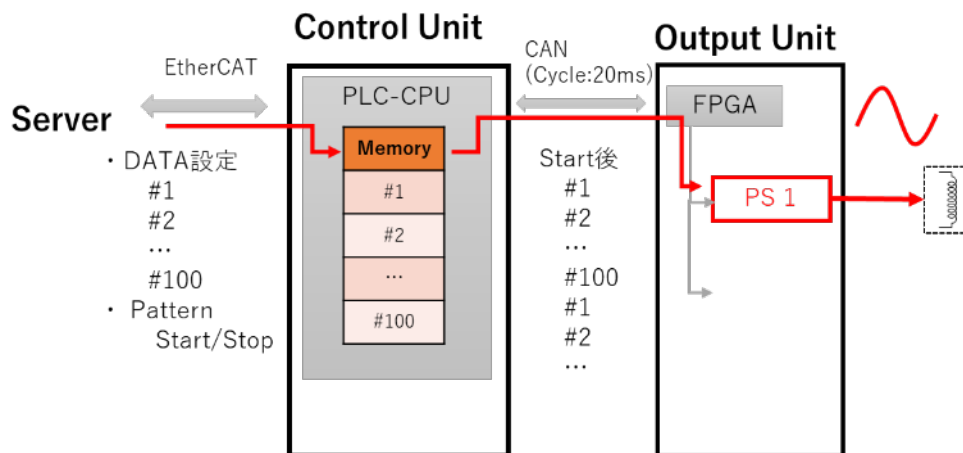
概要：

- ビーム軌道に外乱を加え磁石やモニタ機器のアライメントを効率的に行う
- ビーム運転の要求に応じて、様々な電流パターンを簡易に実現する
- 仕様：振幅は定格の5%、パターン周期は0.5~1Hz、ジッタは5ms以下

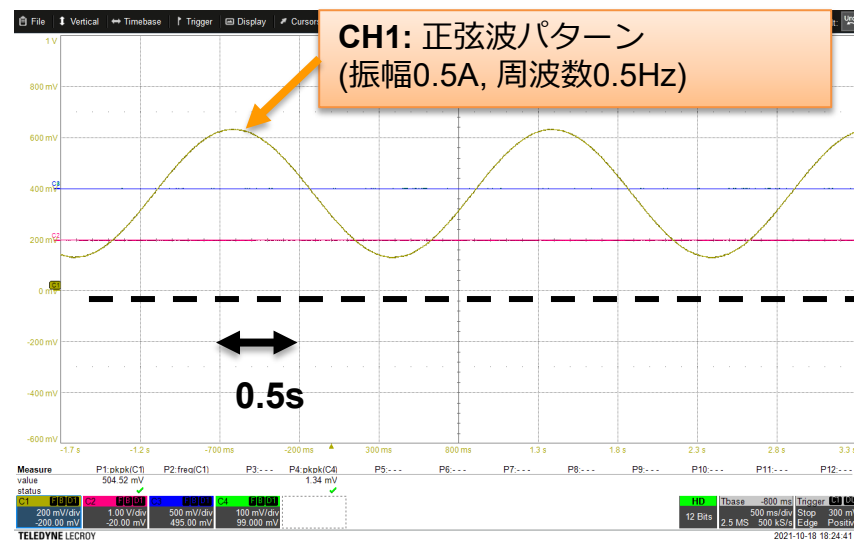
構成

- 制御ユニットのPLC-CPUが100点の設定値のテーブルをもち、外部から入力。
- パターン動作スタート信号を受け、設定値を出力ユニットへ20ms毎に投げる。
- パターン動作ストップを受けるまで、テーブルの値を繰り返し出力。

動作イメージ図



パターン動作時の電流波形



次世代放射光NanoTerasuの電磁石電源

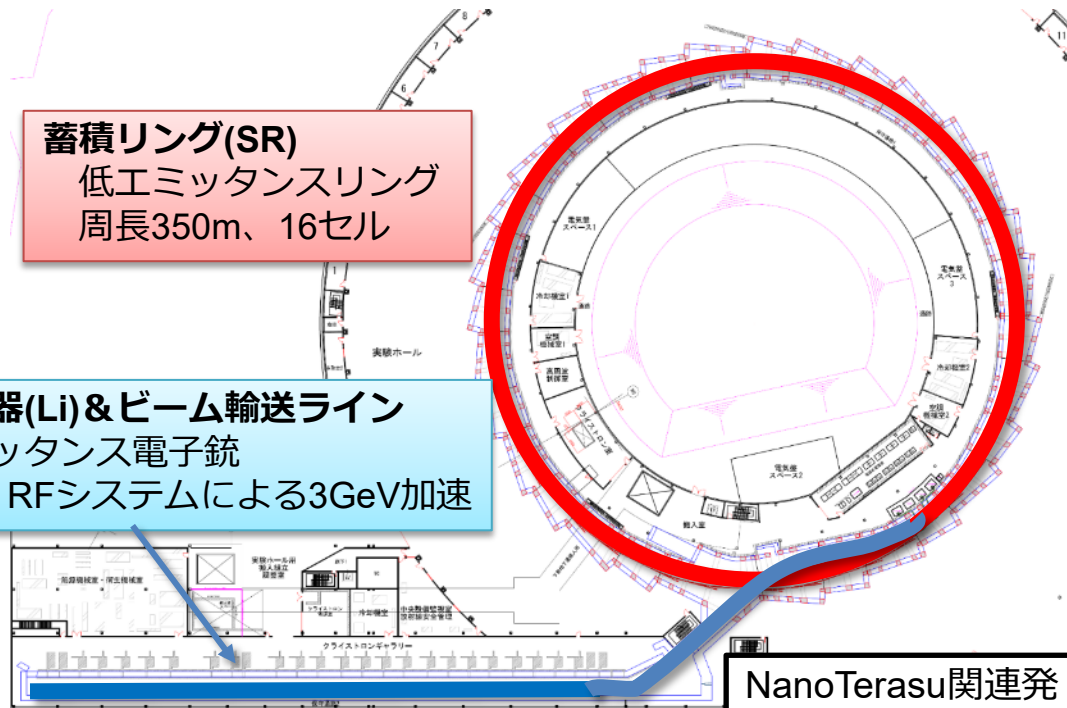
- 次世代放射光施設NanoTerasuにて、DC電磁石電源にデジタル制御方式を採用。
- 線型加速器・ビーム輸送ライン・蓄積リングの電磁石電源を設計、製作
 - 電源の種類を抑え、量産性の向上、設計工数の抑制、予備品の削減を図った
 - 保守性を考慮した設計。トラブル時に、短時間かつ少人数で復旧可能とする
 - 磁石全体をカバーする、インターロックシステムを構築
- 工程
 - 2019～2022：設計、量産
 - 2022～2023：設置、試験
 - 2023～：運用開始



NanoTerasu

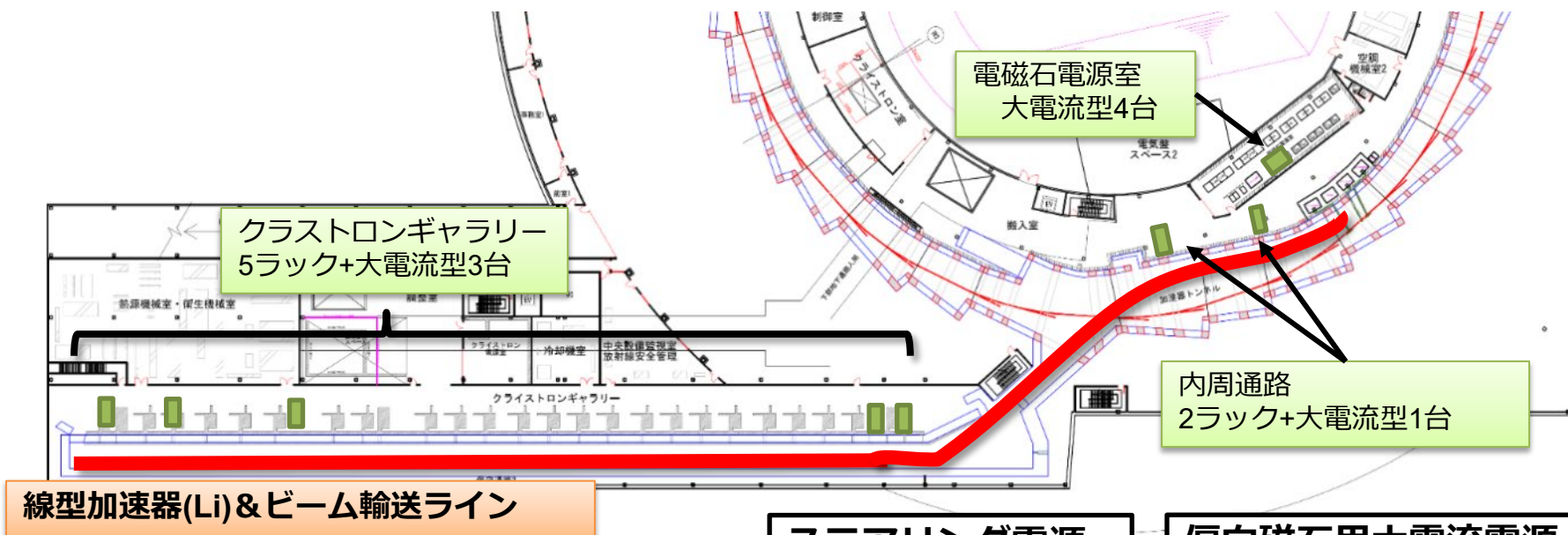
2023/8/31

線型加速器(Li)&ビーム輸送ライン
低エミッタンス電子銃
C-band RFシステムによる3GeV加速



加速器学会2023

線型 & ビーム輸送系の電磁石電源



**ステアリング電源
(出カユニット8台)**

**偏向磁石用大電流電源
(Kly.ギャラリー)**

構成

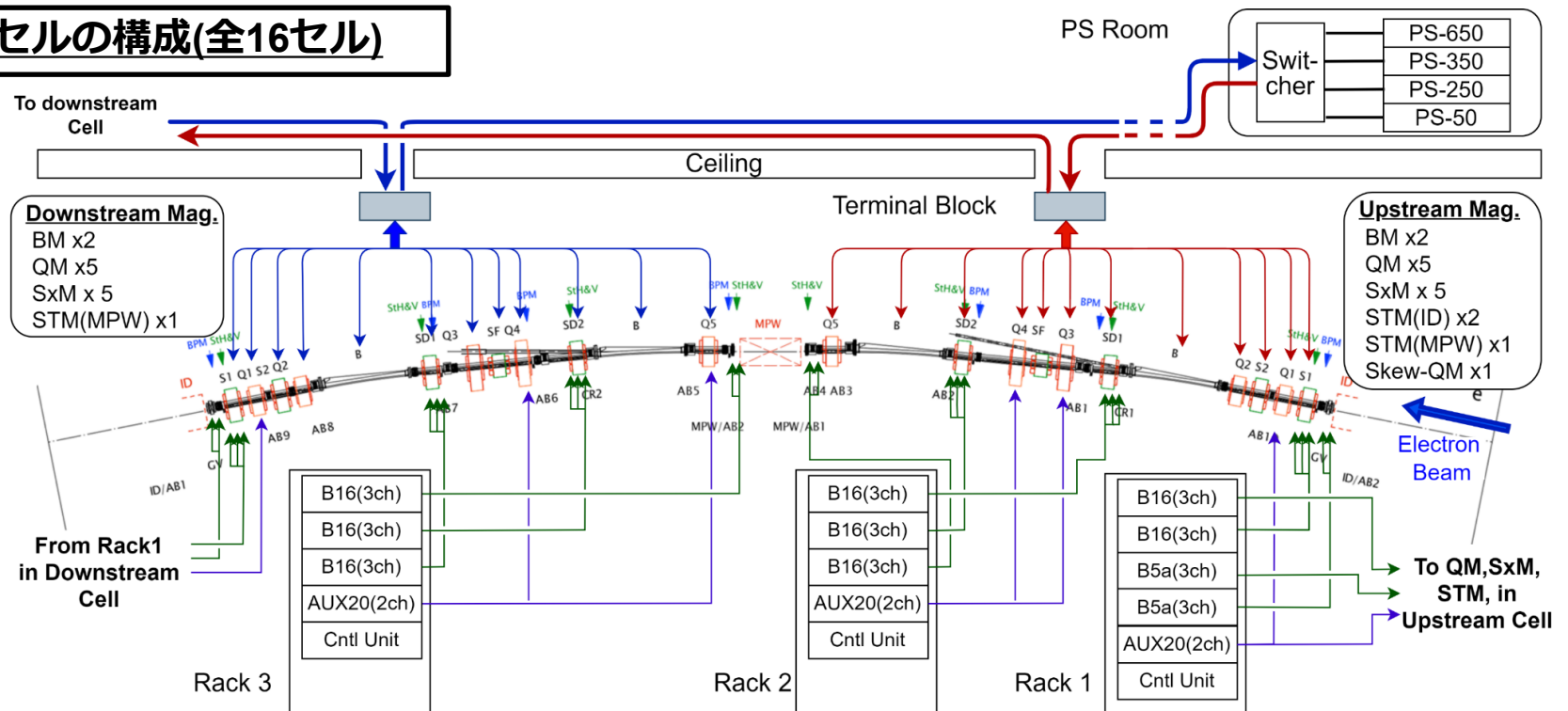
- 小型電磁石(3~20A) 13種類96台
 - ステアリング電源 5種54台 (7ラック)
- 水冷型電磁石(170~300A) 5種類9台
 - 大電流電源 3種9台



蓄積リングの磁石電源の構成 (基本セル)

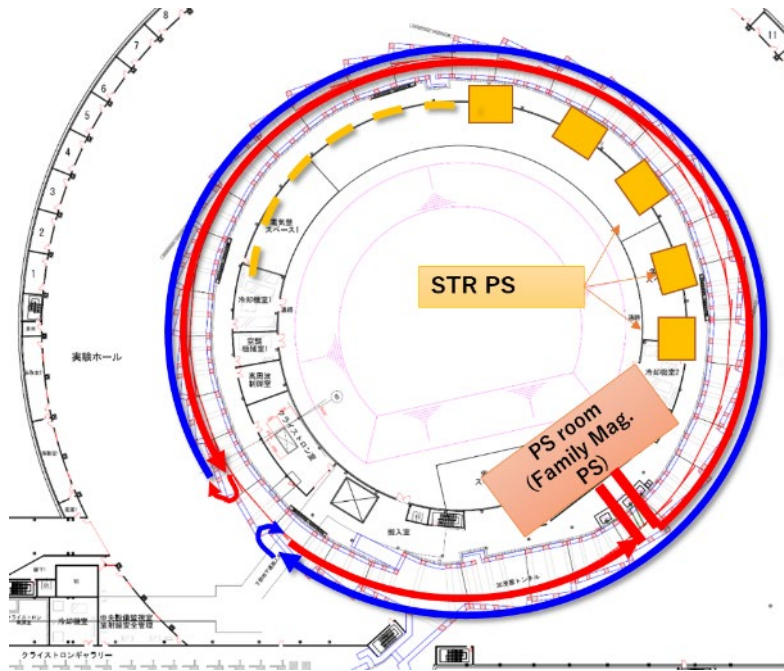
- B,Q,Sx磁石 : 11種類の磁石を、それぞれ16セル分を直列接続
→ファミリー毎に大電力電源1台で直列励磁
- ステアリング磁石 → 個別に電源を接続して励磁
 - 六極電磁石の一部には、3対の補助コイルにステアリング電源(3ch)を接続
- Q磁石の一部 → 四象限型電源(AUX20)を直接接続し、個別に電流補正

基本セルの構成(全16セル)



SR系の電源配置、ケーブル

- 大電力電源は、電磁石電源室に設置
ケーブルは天井上に配線。
- STR電源(ラック)は、内周通路に設置
ケーブルは床下ピットから導入。



磁石インターロック

機能

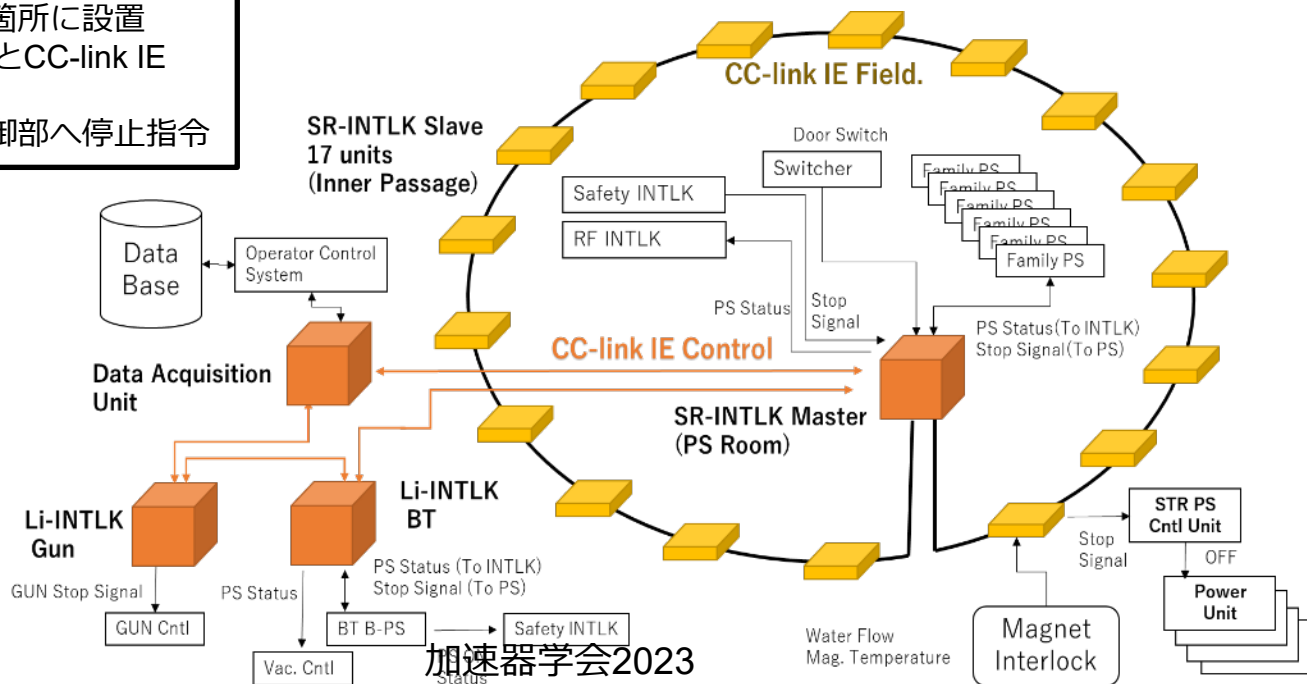
- 磁石の異常時に電源停止
- 主要電源の停止時に電子銃出射を停止
- 他機器へ主要電源ON状態を送信
- 外部停止信号の受信と電源停止

Liのインターロック構成

- 電子銃と輸送部の2箇所に設置
- Li機器とSR親機などとCC-link IE Controlで通信接続
- 異常時に、電子銃制御部へ停止指令

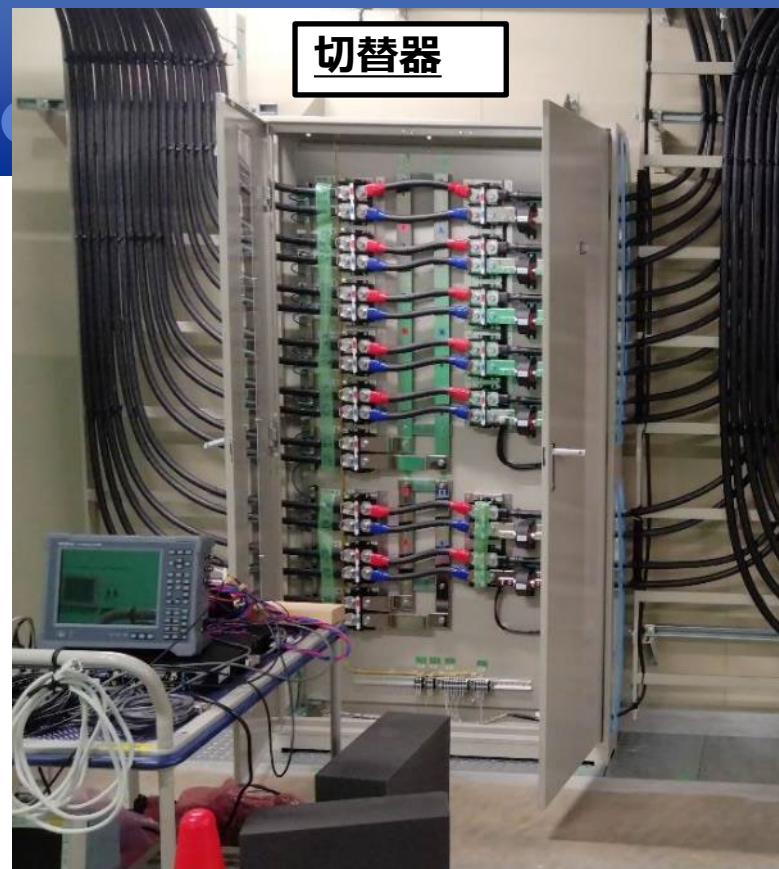
SRのインターロック構成

- 親機1台+子機17台をCC-link IE-Fieldで接続
- 子機：磁石の異常監視、DC-link電源へ停止指令
- 親機：異常情報の集約、各電源へ停止指令



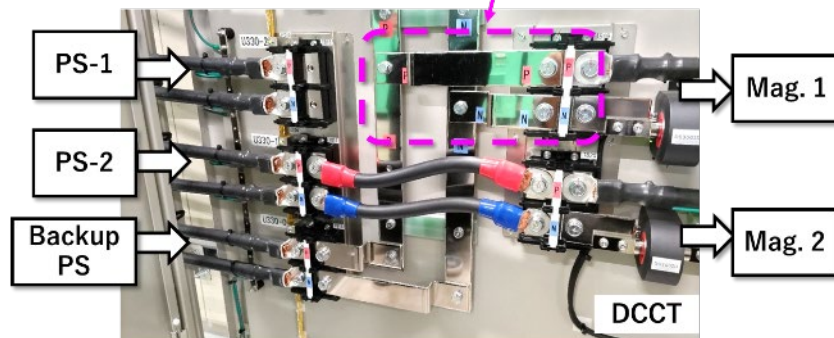
保守性

- **トラブル時の対応**
 - 少人数かつ短時間で復旧可能とした
 - 大電力電源：
 - 切替器により通常機と予備機を変更
 - ステアリング電源：
 - 他を運転しながら、故障ユニットだけを交換可能
- **保守品の抑制**
 - ユニットや部品を共通化することで、保守品を抑制



切替時の配線

Bus bar
from Backup PS to Mag. 1



SPring-8アップグレードに向けて

- SPring-8の低エミッタンス化に向けたアップグレードを計画中。
 - 電磁石電源は、デジタル制御電源の利用を検討している。
- 電源のアップグレード
 - 量産性、保守性、信頼性などの向上
 - NanoTerasuよりも数量が増大するため、一層の共通化などを進める。
 - Hot-swap技術の開発：励磁電流を維持しながら電源を切り替える(将来計画)
 - Green Facilityに向けた高効率な電源開発
 - 入力DC電圧の最適化、SiCなどの最新半導体などを検討。

まとめ

- デジタル制御技術による電磁石電源を発展させ、次の技術を開発した。
 - 両極スイッチング動作による小電流領域の電流リップルを抑制
 - 六極電磁石のステアリング磁場のため、3対の電流バランスを偏向中でも維持できる同期動作
 - ビームアライメントに利用する、電流の周期パターン機能
- 次世代放射光NanoTerasuにおける電磁石電源を設計して導入
 - 線型加速器から蓄積リングまで、統一した設計による電源を導入
 - 多種の電磁石を、少ない種類の電源でカバー
 - 加速器全体をカバーしたインターロックシステムを開発
 - 切替器の導入などにより、トラブル時の復旧作業を簡易とした
- SPring-8のアップグレードに向けて、デジタル制御電源の開発を継続している。

- 協力メーカー
 - 工藤電機会社
 - デジタル電源開発、大電力電源開発・量産、AUX電源の開発・量産、ケーブル配線など
 - ニチコン株式会社
 - 出力同期・パターン機能の実装、ステアリング電源開発・量産・設置、など
 - 日立造船
 - インターロックシステムの製作・設置
 - 大倉電気
 - 高精度ADC回路、DCCT読み出しADC回路の開発・量産

ご協力、ありがとうございました！！