

講演番号:FRO606

発表日時:8月8日 15:00-15:20

発表会場:6号館61C

SIC-MOSFETを用いたJ-PARC キッカー用半導体LTD電源

SOLID-STATE LTD BASED POWER SUPPLY USING
SIC-MOSFET FOR THE J-PARC KICKER

○高柳 智弘^{1,2}, 堀野 光喜^{2,3}, 小野 礼人⁴, 植野 智晶³, 杉田 萌^{1,2}, 不破 康裕^{1,2}, 篠崎 信一^{1,2}

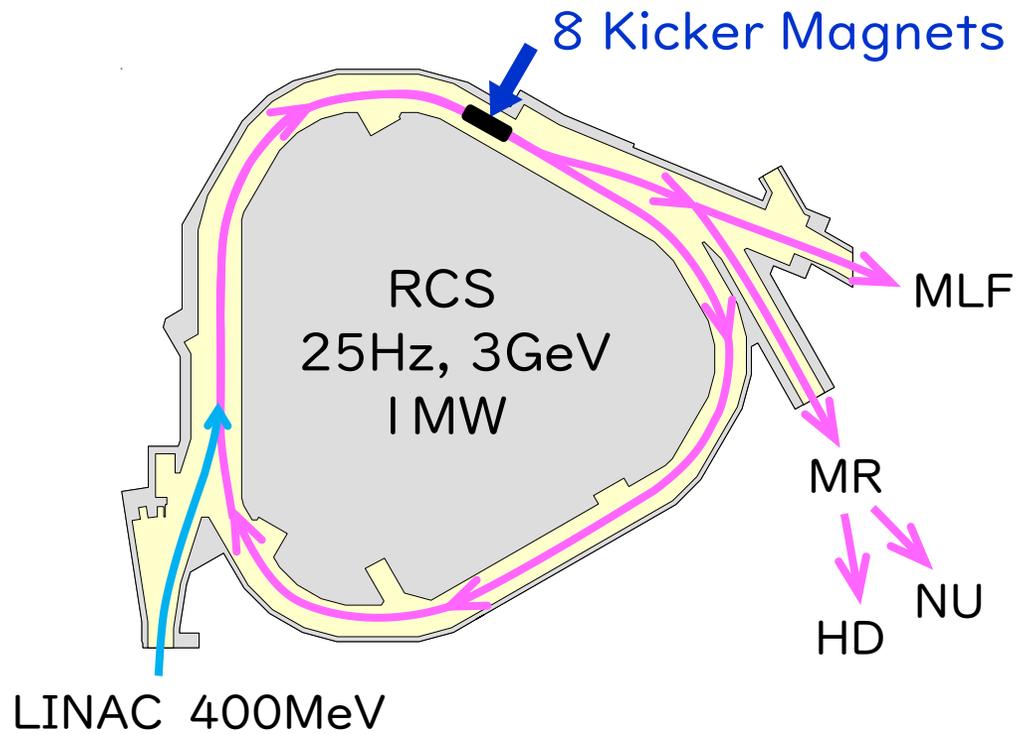
徳地 明⁵, 生駒 直弥⁵, 川上弘晶⁵, 中田 恭輔⁵, 趙 鉄陽⁵, 亀崎 広明⁵, 川瀬 悠太⁶

(¹JAEA, ²J-PARC, ³NAT, ⁴KEK, ⁵PPJ, ⁶岩手大学)

発表内容

- J-PARC RCSキッカーシステム
- キッカー電源代替品LTD半導体スイッチ電源
- LTD半導体スイッチ電源のポイント
 - 波形調整可能
 - 低い発熱温度
 - コロナ放電対策
 - 故障時の早期運転再開
 - 低インピーダンスキッカーの実現
 - 小型化と省電力化
- まとめ

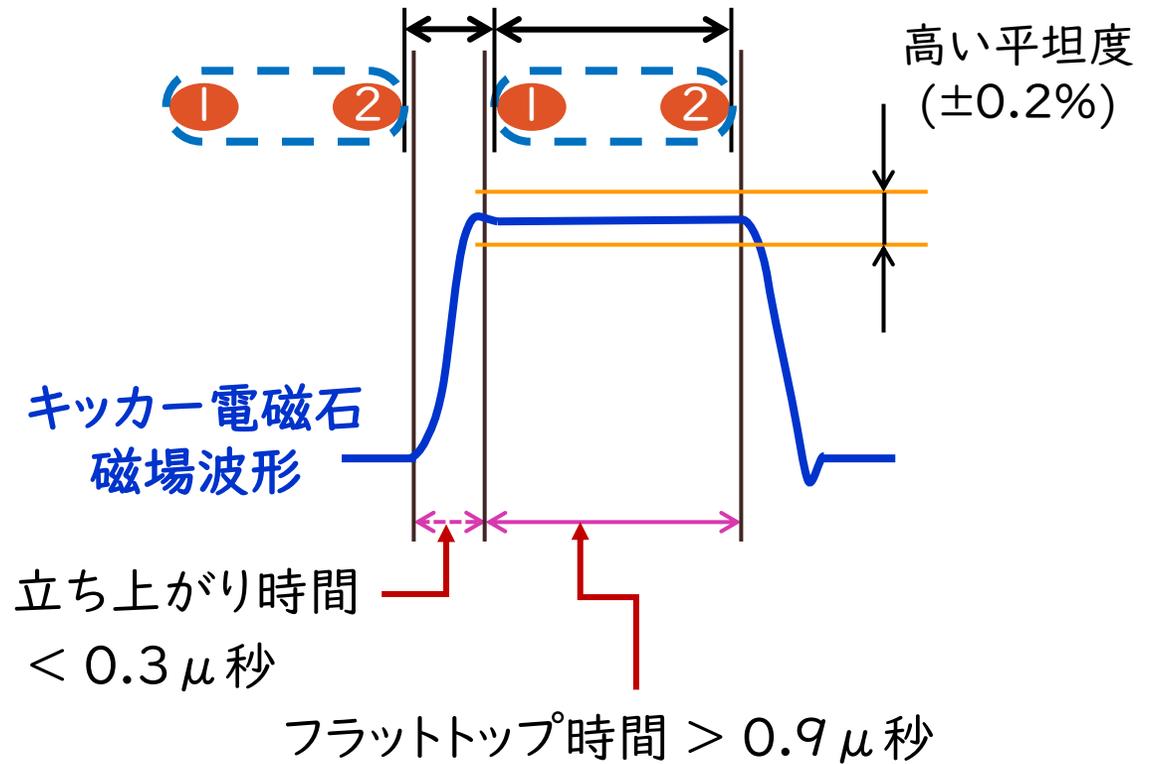
J-PARC RCSキッカーシステム



1 MW大強度ビームの生成は2バンチ運転

① ②
1バンチ 2バンチ

バンチの間隔 2バンチ分の幅
最小 $0.3 \mu\text{s}$ 最大 $0.9 \mu\text{s}$



発表内容

- J-PARC RCSキッカーシステム
- キッカー電源代替品LTD半導体スイッチ電源
- LTD半導体スイッチ電源のポイント
 - 波形調整可能
 - 低い発熱温度
 - コロナ放電対策
 - 故障時の早期運転再開
 - 低インピーダンスキッカーの実現
 - 小型化と省電力化
- まとめ

サイラトロンの半導体化



【サイラトロン】

e2V製CX1193C@英国
Peak voltage: 130kV
Peak current: 10kA

ビームの入射や取り出して使用するキッカー電磁石用電源

大電力の高速開閉器として唯一のスイッチ素子 ⇒ サイラトロンスイッチ

完全受注品、難しい寿命評価

共同利用実験・研究開発施設への要求

故障・停止が少なく稼働率が高い ⇒ 安定性と信頼性

予備品の確保と低ランニングコスト ⇒ メンテナンス性

➔ 優れた安定性とメンテナンス性（長寿命）
パワー半導体の活用

◎次世代パワー半導体のSiC-MOSFET

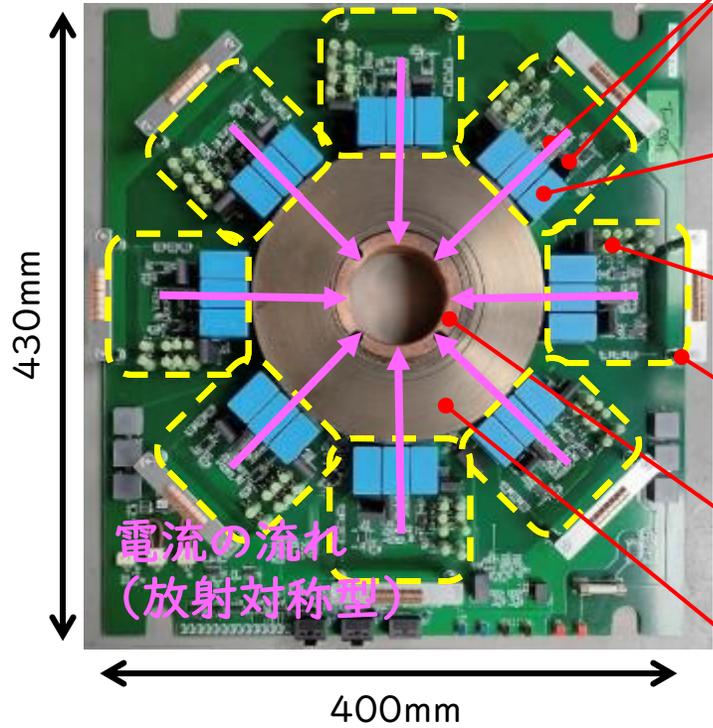
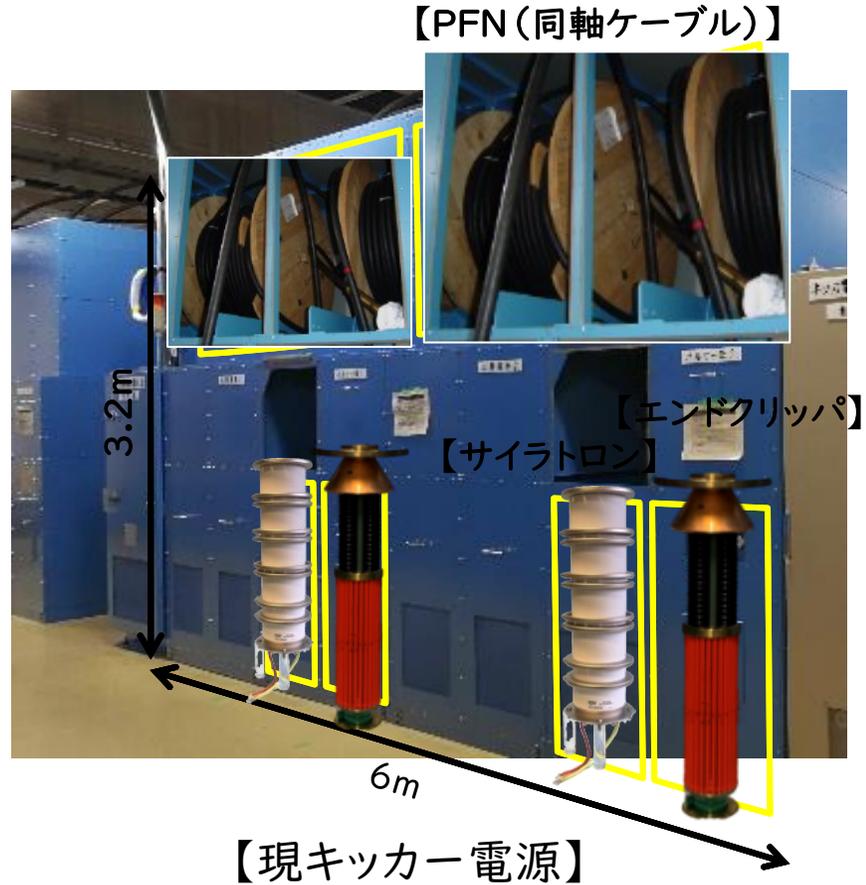
主流のSi-IGBTより「高耐圧」「高速応答」「低スイッチング損失」



【SiC-MOSFET】

Cree/Wolfspeed@米国
C2M0045170P
Peak voltage: 1700V
Peak current: 250A
Rise time: 13ns

キッカー電源代替用半導体スイッチ電源の開発



- ・半導体スイッチ(SiC-MOSFET)
1.7kV/0.25kA
※サイラトロンの役割
- ・充電用コンデンサ
※PFNの役割
- ・反射波吸収回路
※エンドクリップの役割
- ・並列回路
8並列:2kAに対応
- ・電流伝送外導体(出力部)
内径φ66mm
- ・トロイダルコア
誘導電圧重畳(LTD)方式
主回路と出力部を分離

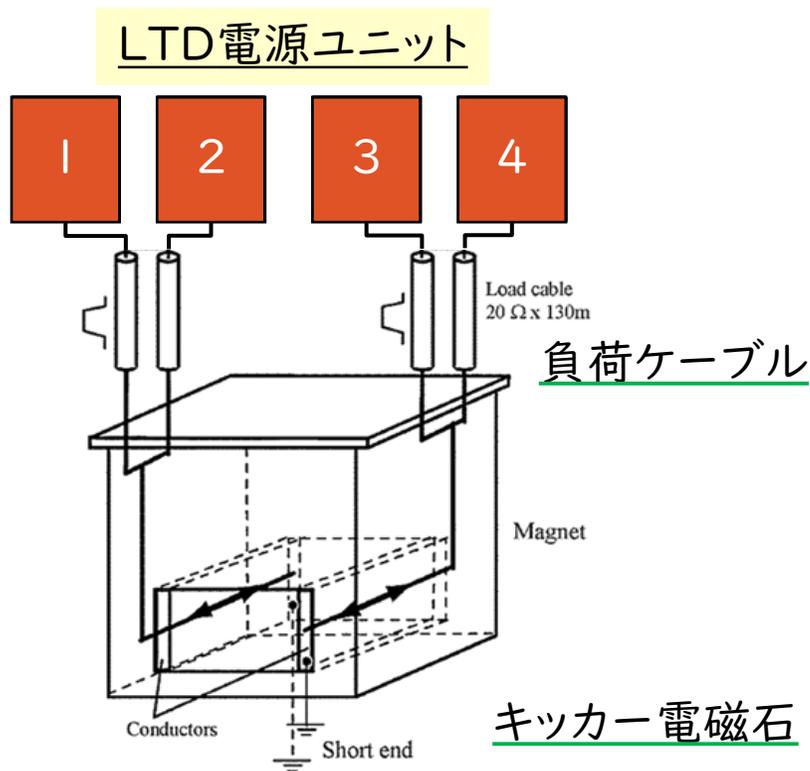
【半導体スイッチ電源】
キッカー機能をモジュール化

- 基板1枚でキッカー電源の機能を実現
- 1枚当たり:電圧1.25kV、電流2kA

➡ LTD電源

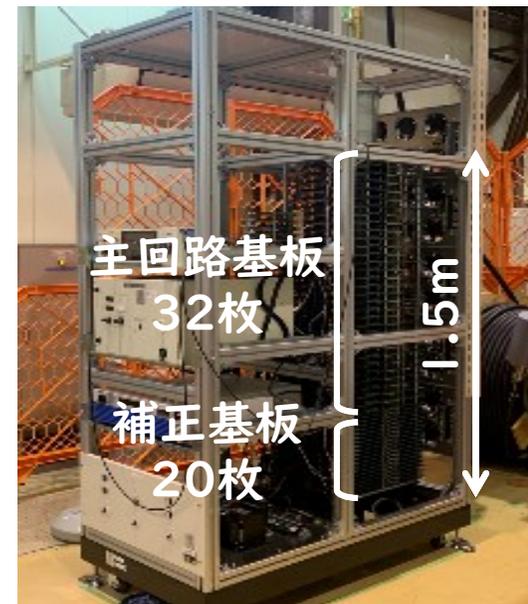
J-PARC RCSのキッカーシステム構成

キッカー電源



【現キッカー電源】

双子型: (80kV-4kA) × 2並列



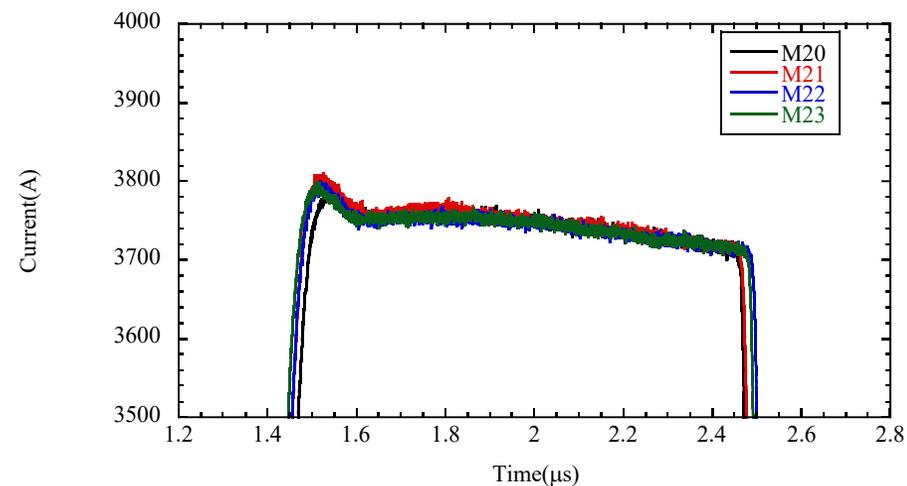
【LTD電源ユニット】

電源ユニット: 40kV-2kA

- ・PFNケーブル削減
- ・定格半減: 80kV ⇒ 40kV

現キッカー電源=LTD電源ユニット×4並列

LTD電源の4ユニット並列運転

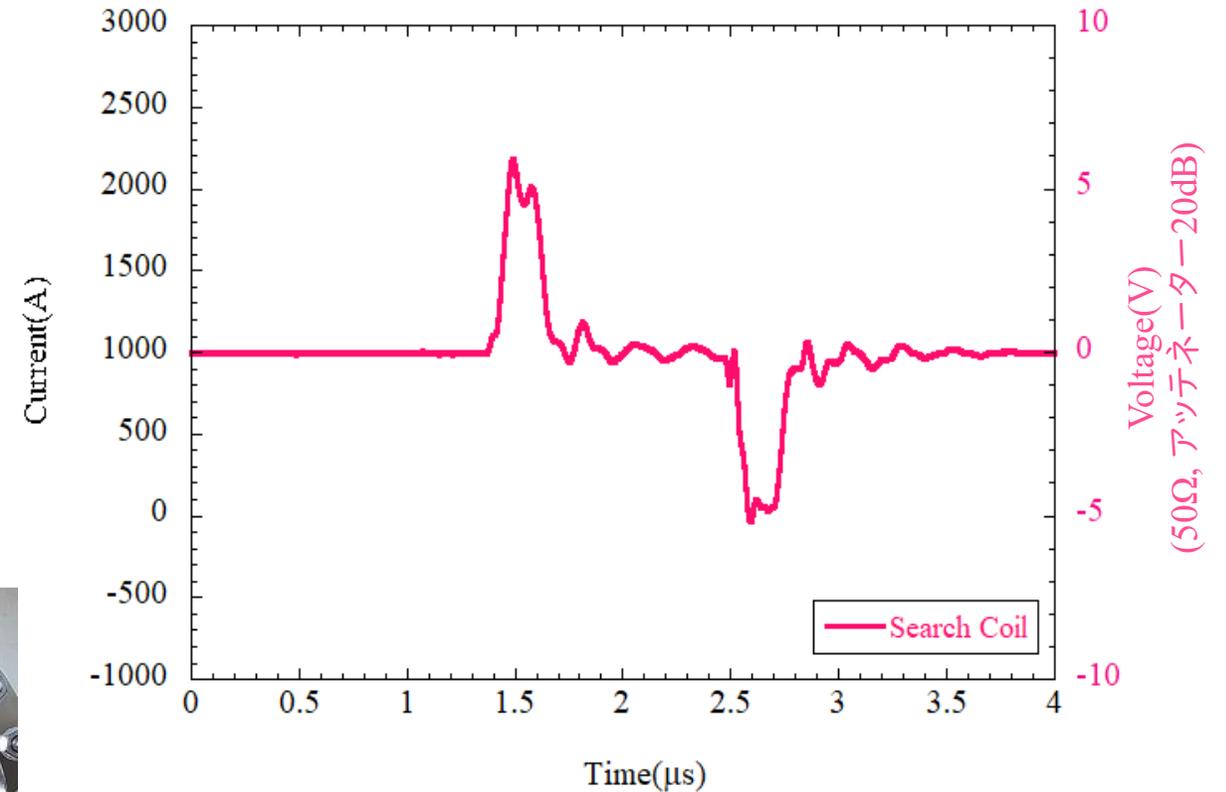
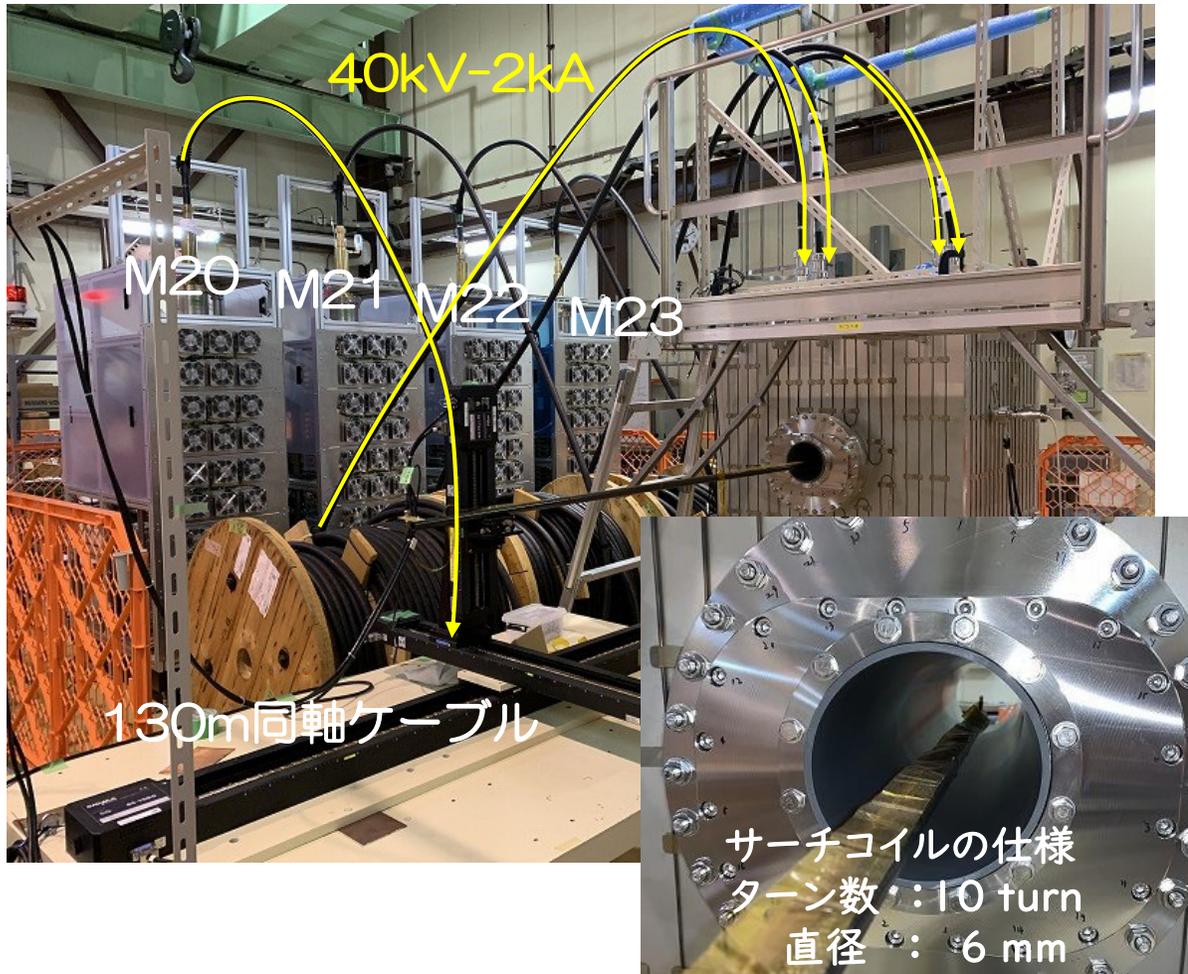


運転パラメータ

PS	主充電器	補充電器
LTD1 (M20)	1189V	10V
LTD2 (M21)	1200V	10V
LTD3 (M22)	1178V	10V
LTD4 (M23)	1200V	10V

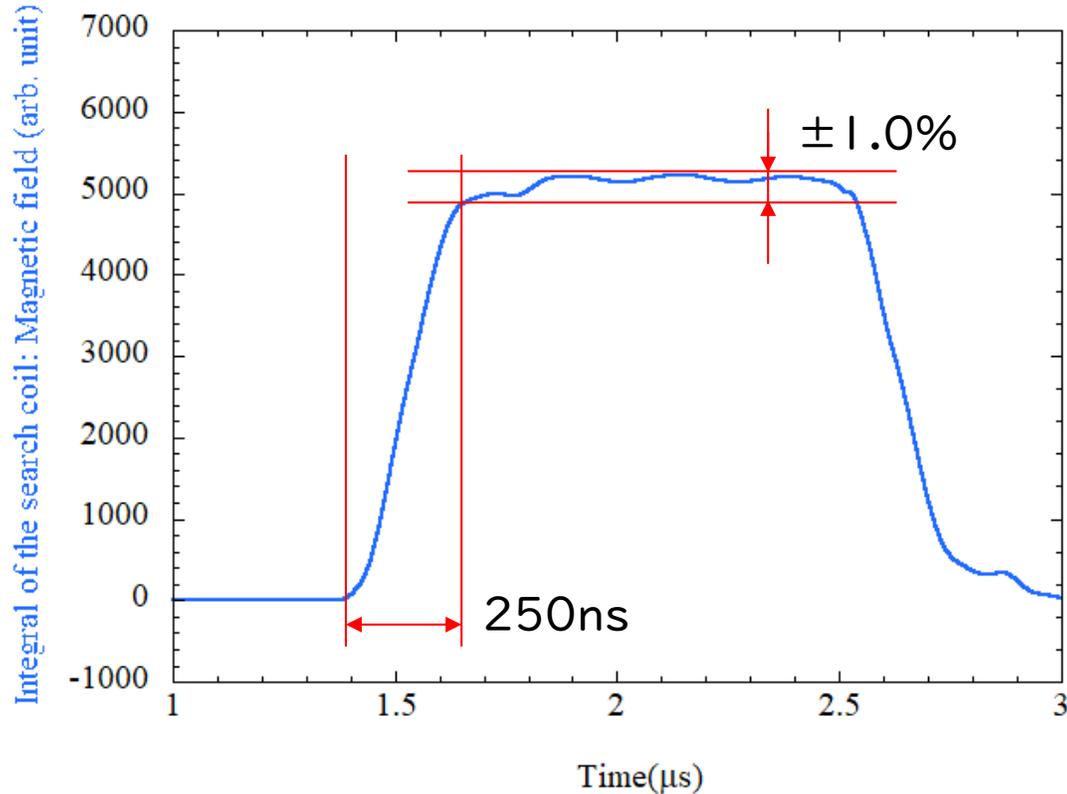
ユニット間のバランス調整

実負荷出力試験 (キッカー-電磁石接続)

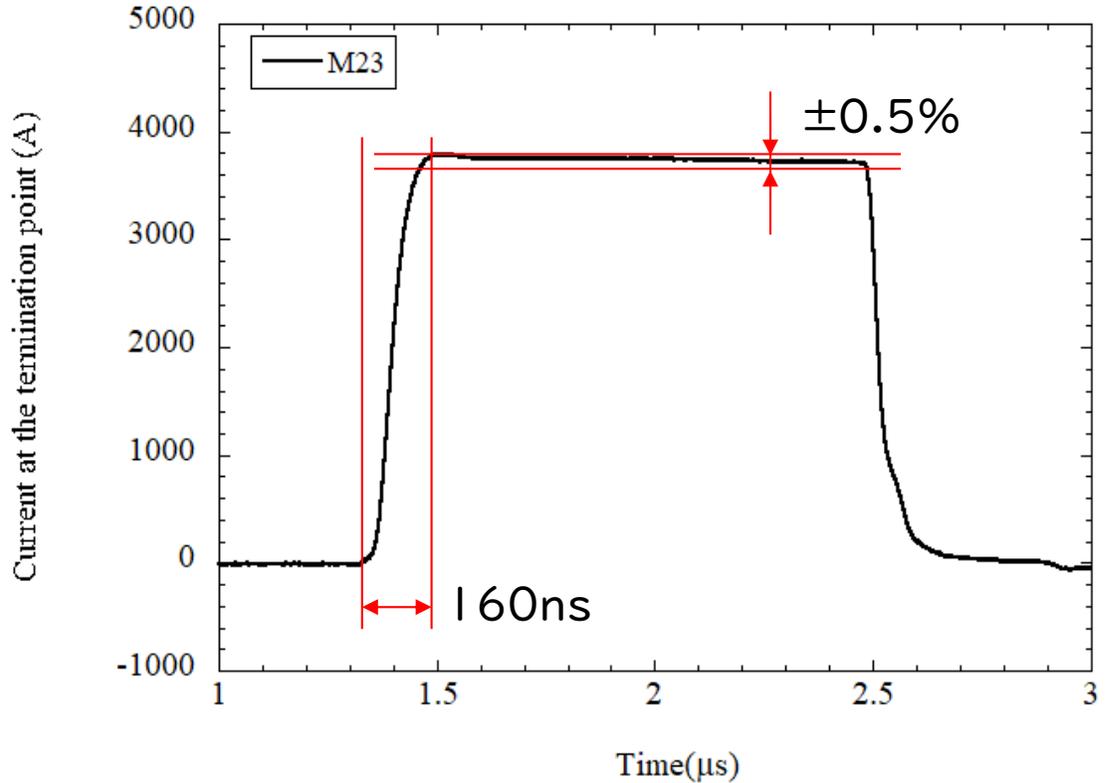


LTD1(M20)	1189V	1V
LTD2(M21)	1200V	10V
LTD3(M22)	1178V	10V
LTD4(M23)	1200V	10V

磁場波形と電流波形



【サーチコイル積分波形】



【負荷端部波形(終端短絡)】

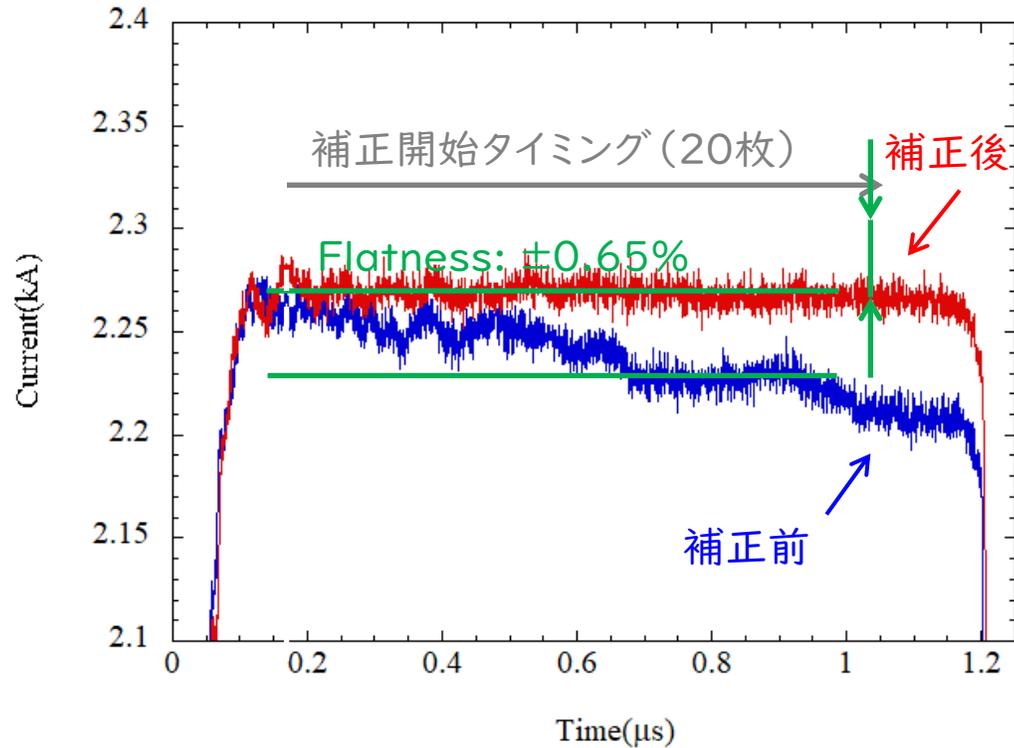
PS	主充電器	補充充電器
LTD1(M20)	1189V	10V
LTD2(M21)	1200V	10V
LTD3(M22)	1178V	10V
LTD4(M23)	1200V	10V

※フラットトップ平坦度は未調整

発表内容

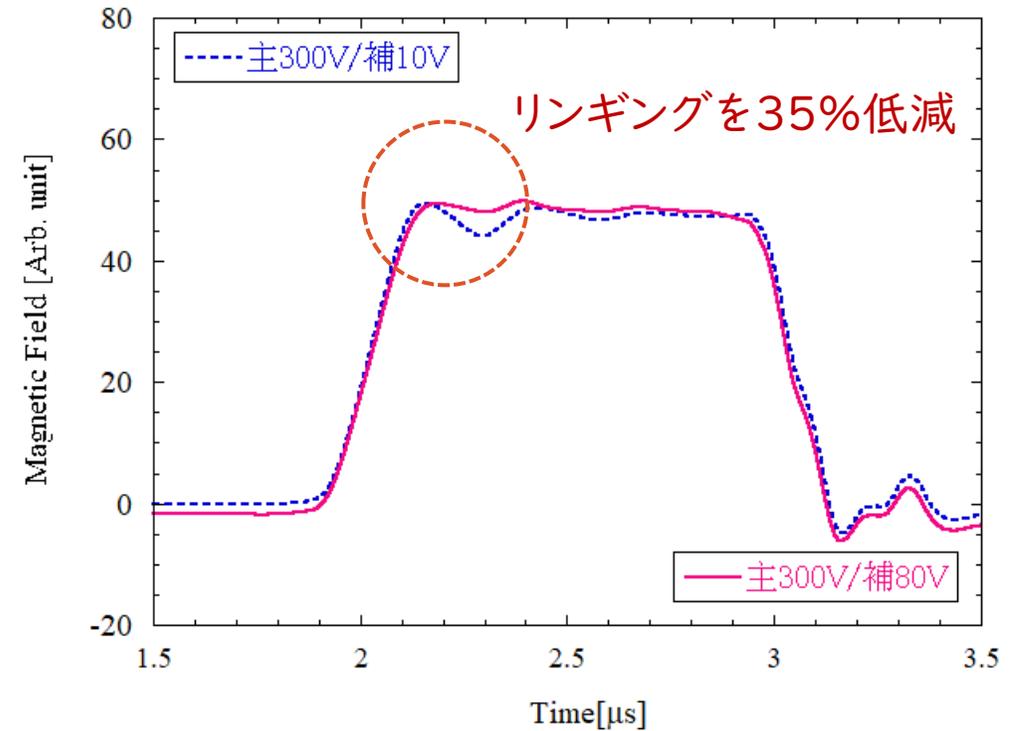
- J-PARC RCSキッカーシステム
- キッカー電源代替品LTD半導体スイッチ電源
- LTD半導体スイッチ電源のポイント
 - 波形調整可能
 - 低い発熱温度
 - コロナ放電対策
 - 故障時の早期運転再開
 - 低インピーダンスキッカーの実現
 - 小型化と省電力化
- まとめ

波形調整



電源の励磁波形補正

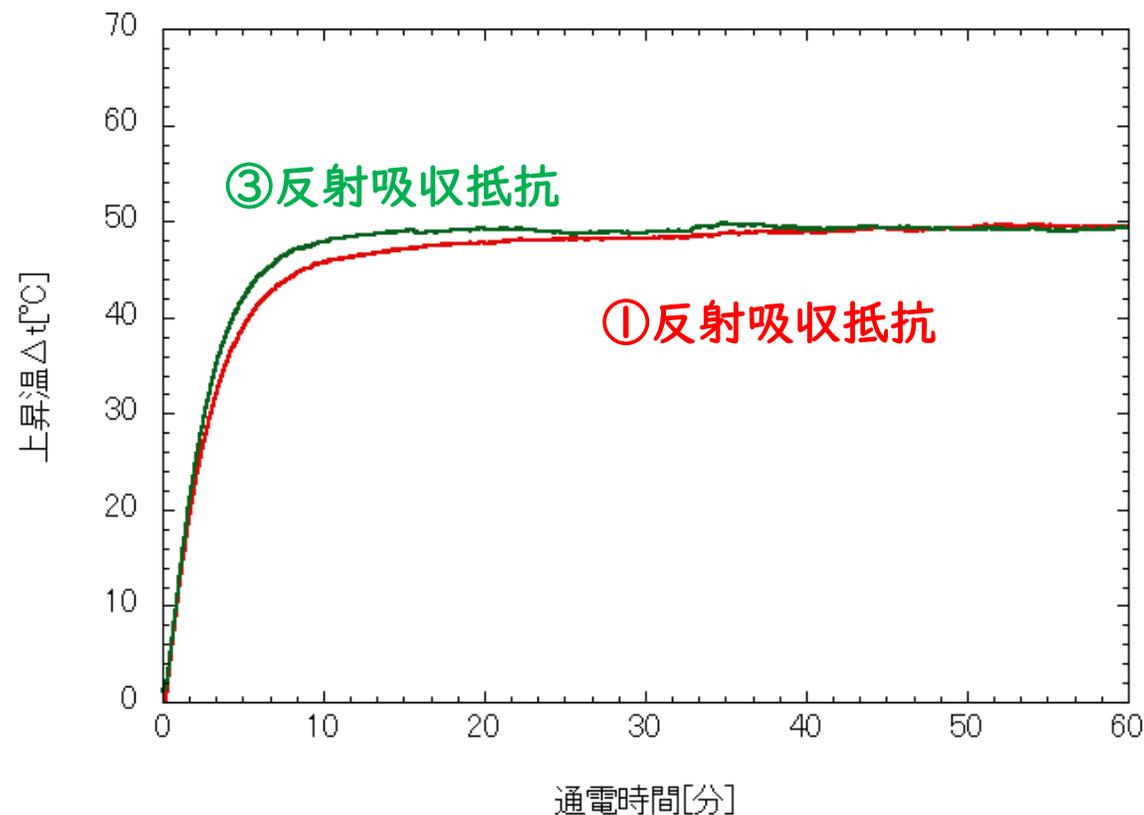
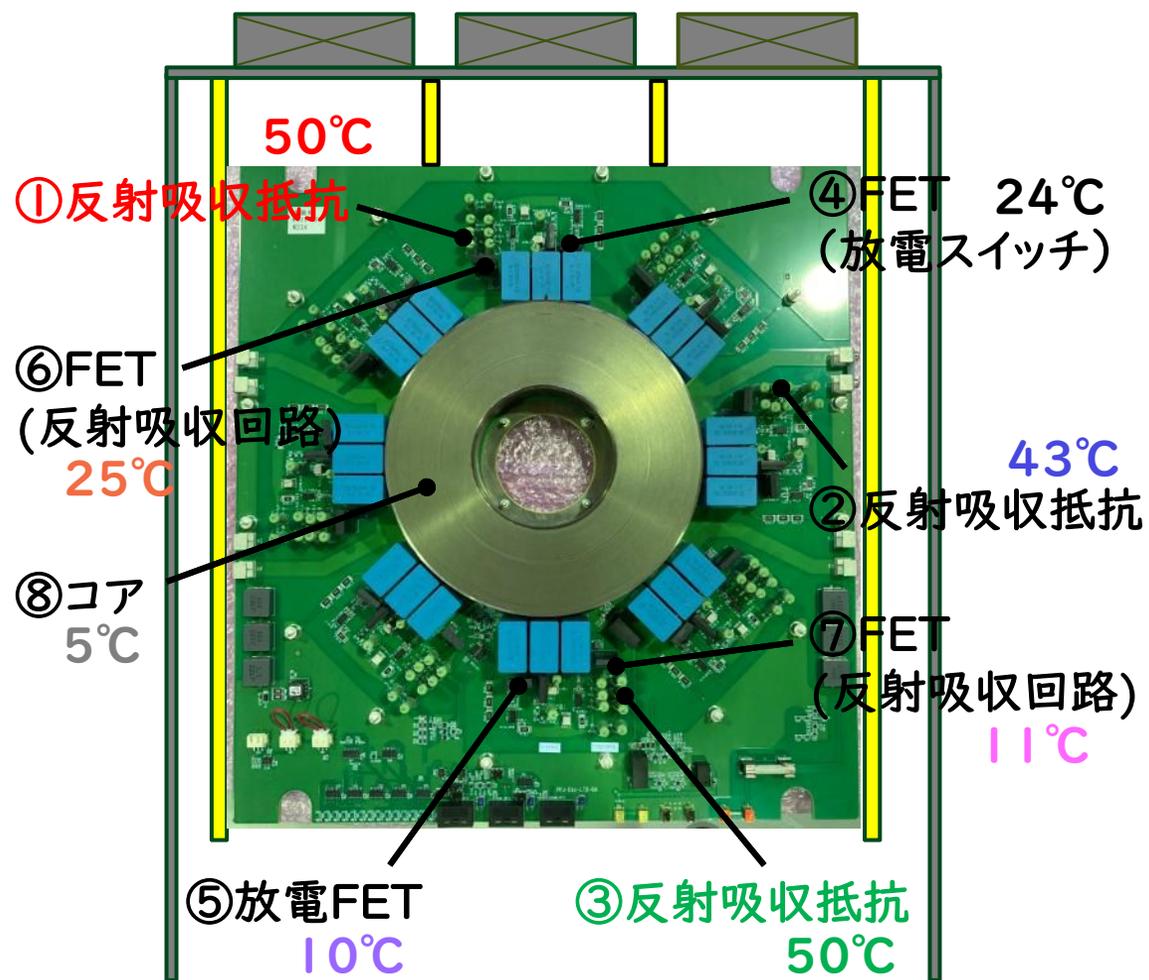
20枚の補正基板を50nsずらして出力



電磁石の磁場波形補正

主回路と補正基板の出力タイミングを変更
更なる改善のために主回路出力タイミング機能の変更を検討

低い発熱温度



- ◆ 冷却水設備が不要
- ◆ 空調設備の縮小が可能

最上段(40kV)の主回路基板の素子を測定

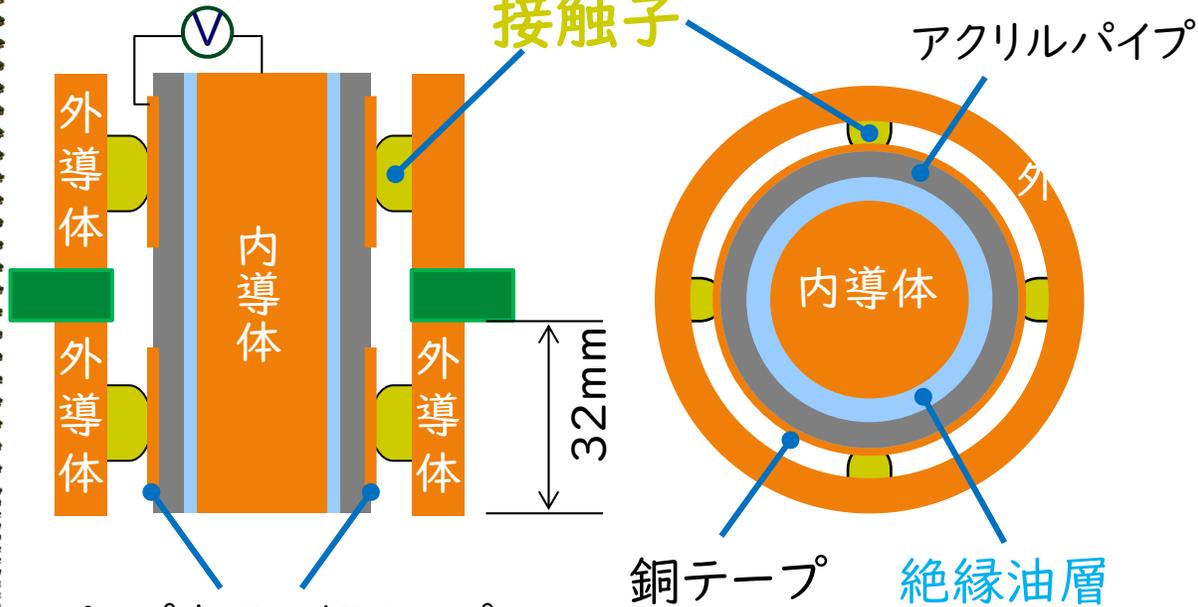
コロナ放電対策

内導体・外導体

最大40kV

接触子

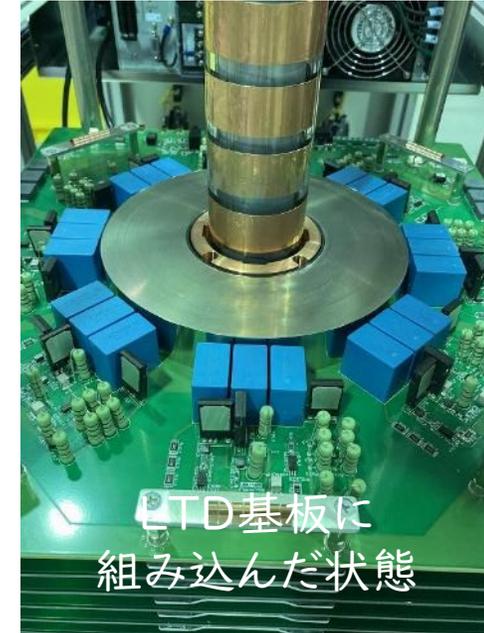
アクリルパイプ



パイプ表面に銅テープ
(幅25mm,厚0.07mm)

「液体+固体」絶縁

空気層を無くす
⇒ コロナ発生領域の削除



ETD基板に
組み込んだ状態

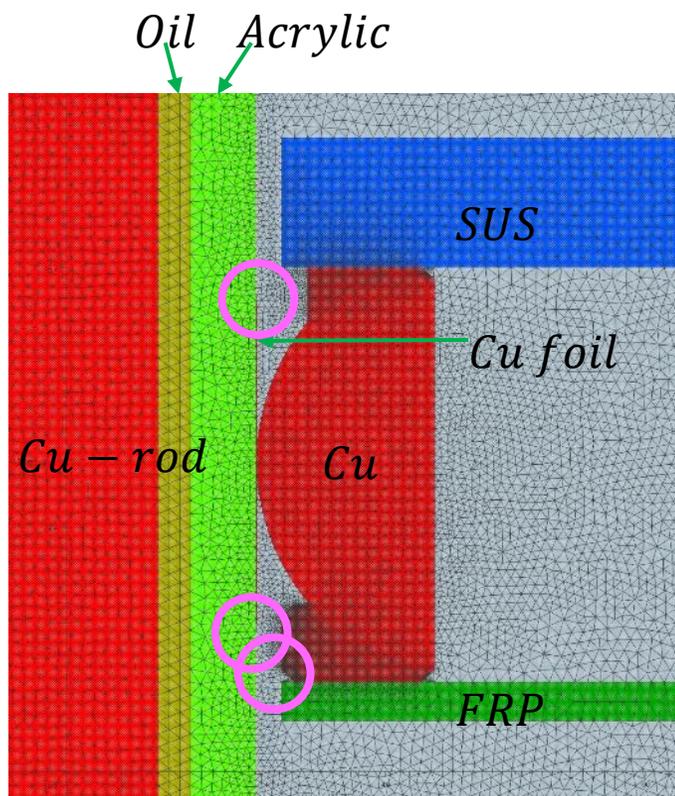


コロナ放電が発生

※図作成 (堀野氏)

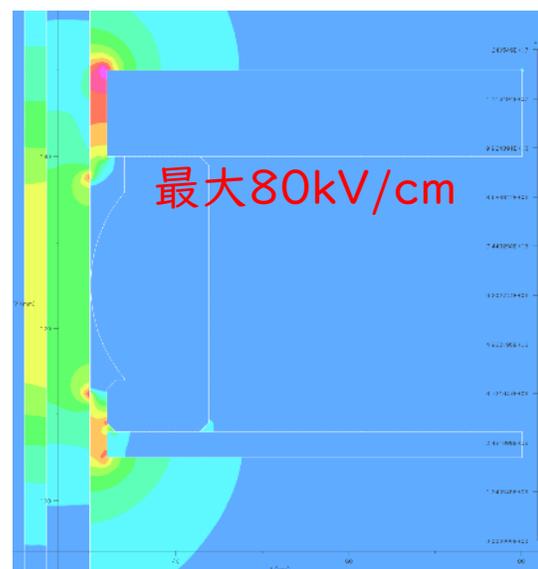
【伝送導体の縦横断面図】

電界の緩和

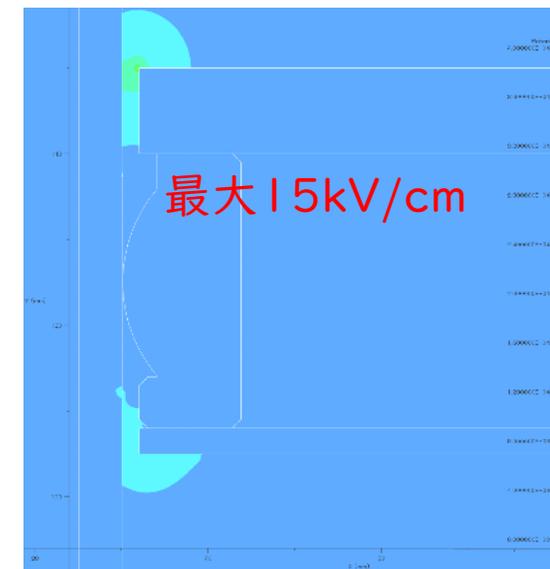


Cu ($\sigma = 38000 S/mm$) $Acrylic$ ($\epsilon = 4$)
 SUS ($\sigma = 5000 S/mm$) Oil ($\epsilon = 2.5$)
 FRP ($\epsilon = 7$) $Cu\ foil$ (thickness 0.1mm)

※OPERA-2D解析(藤森氏)



$Cu - rod$
 (内導体半径 $R = 22.5mm$)



$Cu - rod$
 (内導体半径 $R = 11.5mm$)

電界集中箇所(コロナ放電臨界電圧 $21.1kV/cm$)

- ◆銅テープの端
- ◆銅リングとアクリルパイプとの隙間

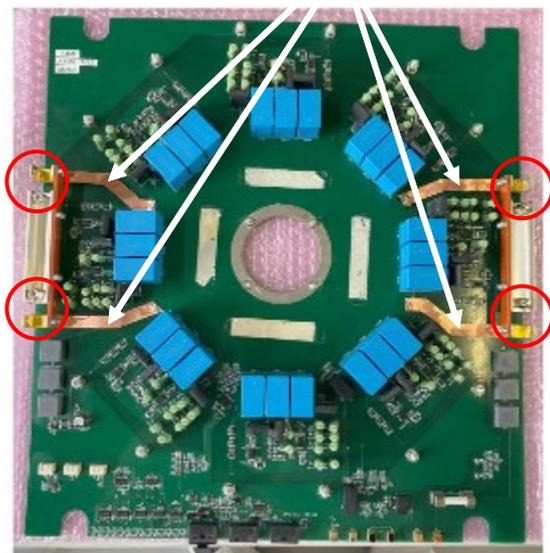
高電圧部の内導体直径を細くする

(電極間距離 $7.5mm \Rightarrow 17.5mm$)

\Rightarrow 高電位部に向かって段階的に細くする以前の形状に戻す

故障時の早期運転再開

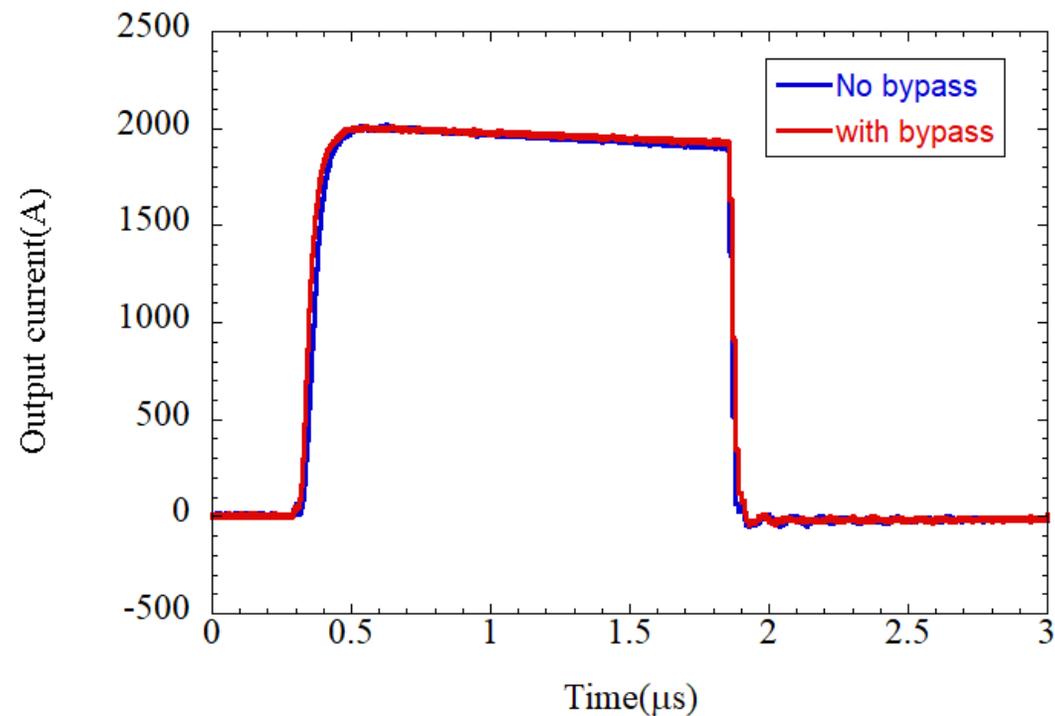
追加改造したバイパス回路



※銅板をねじ止め
3枚の主回路基板
真ん中の1枚をバイパス

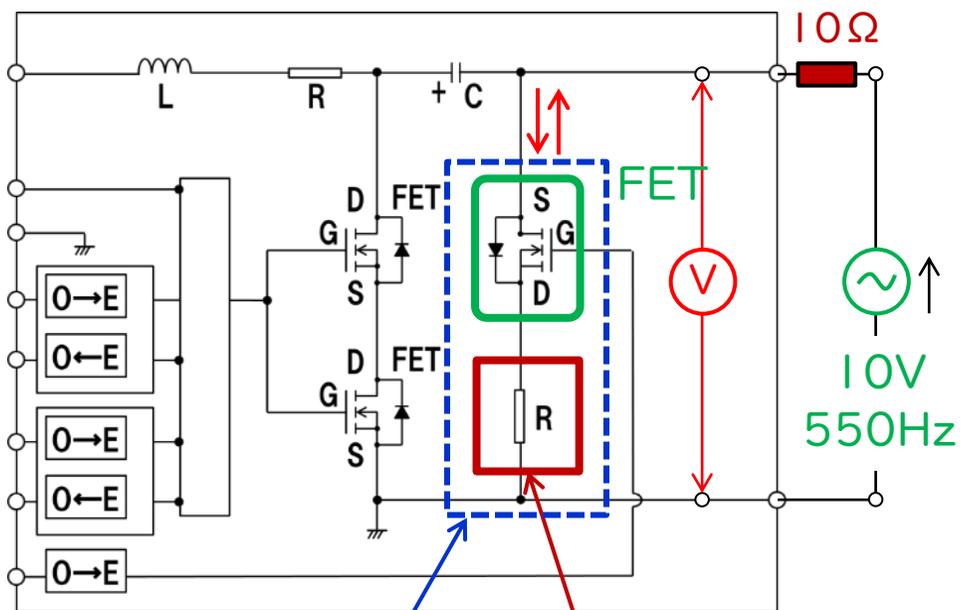
【画像はプロトタイプ】

【バイパス有り】



- 出力波形にバイパス有り無しによる有意な差は見られない。
- バイパス回路(銅板)の温度上昇は $\Delta t=6^{\circ}\text{C}$ (8時間通電後)

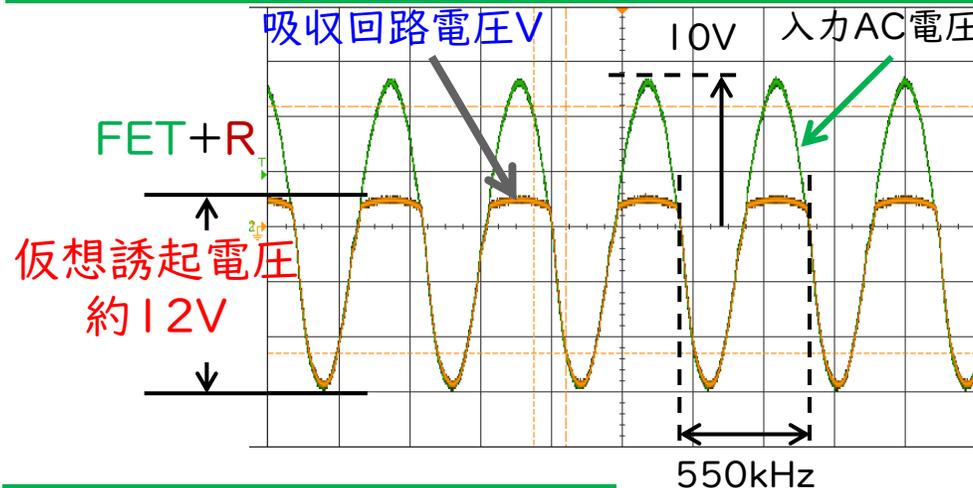
低インピーダンスキッカーの実現



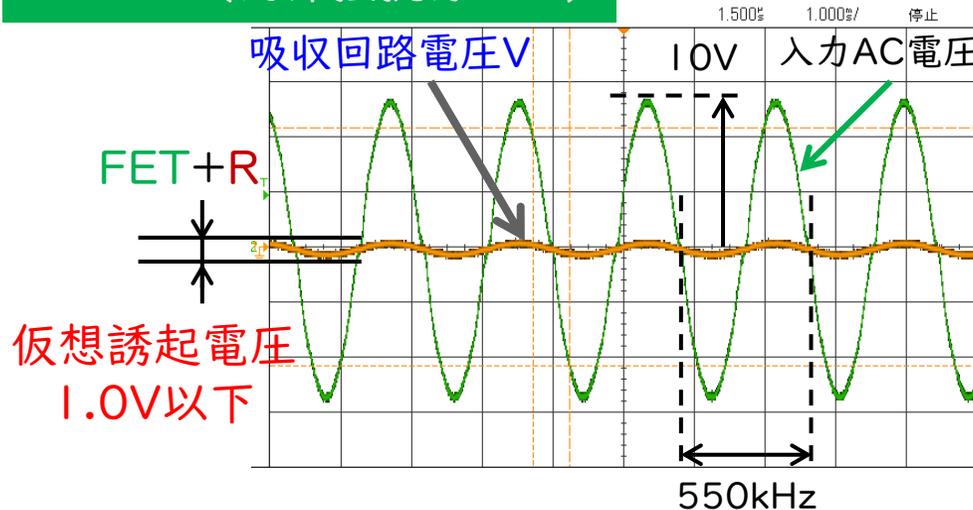
反射波吸収回路
(エンドクリップの機能)

吸収抵抗0.4Ω

FET:OFF (ダイオードで半波整流化+内部抵抗)



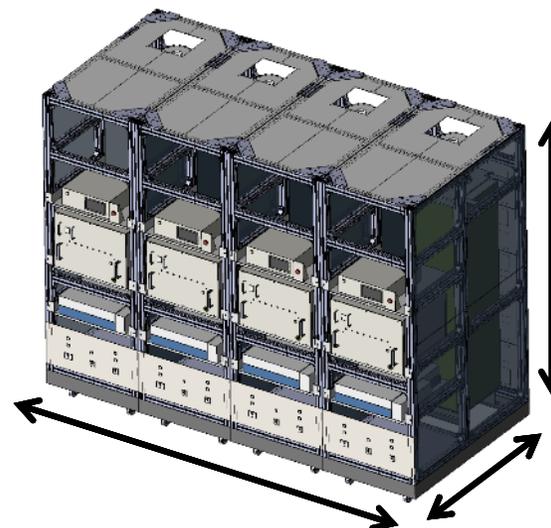
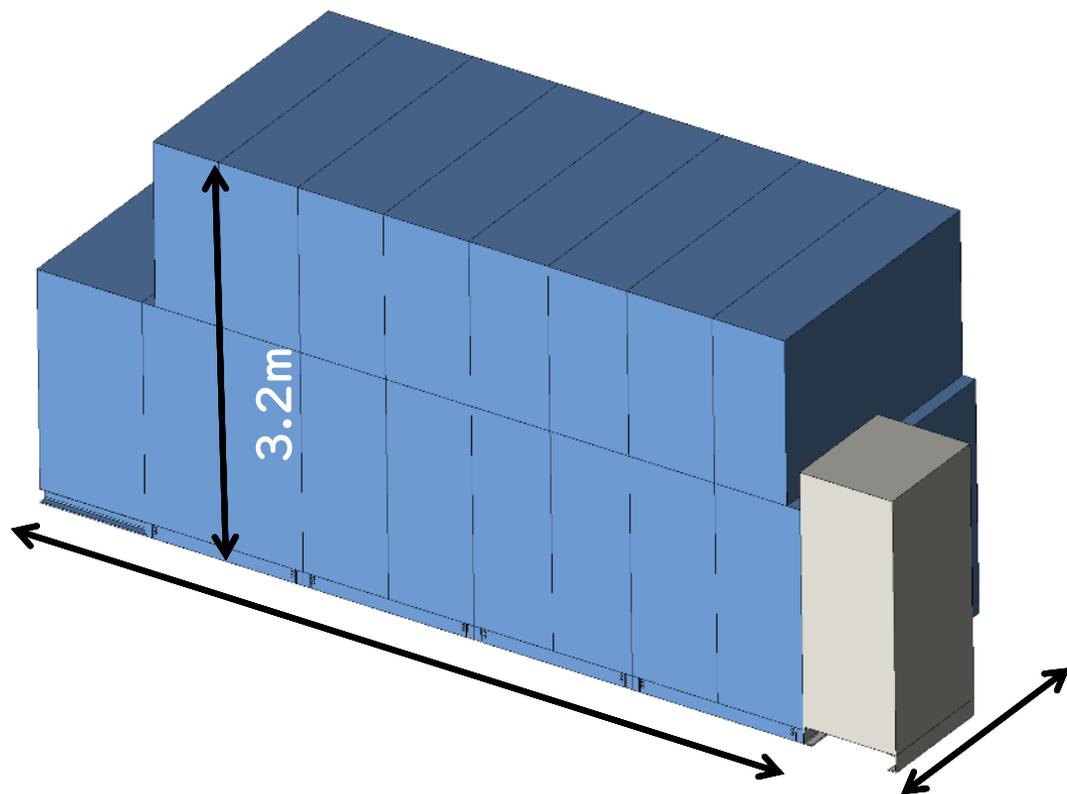
FET:ON (内部抵抗分のみ)



FET:ONにより反射波を吸収

- ビーム誘起電圧の吸収に使用
- キッカーインピーダンスが引き起こすビーム不安定性を軽減

小型化と省電力化



◆ 性能仕様

LTD電源ユニット4台 = キッカー電源1台

- ☑ 小型化 : 体積比21%
- ☑ 省電力化 : 電力25%削減
SiCパワー半導体で損失を70%以上削減
- ☑ その他 : 冷却水設備不要, 空調設備縮小

まとめ



2017年 開発スタート
4kV-2kA

- SiC-MOSFETを利用
- サイラトロンを半導体化
- 電源の小型化と省電力化を実現

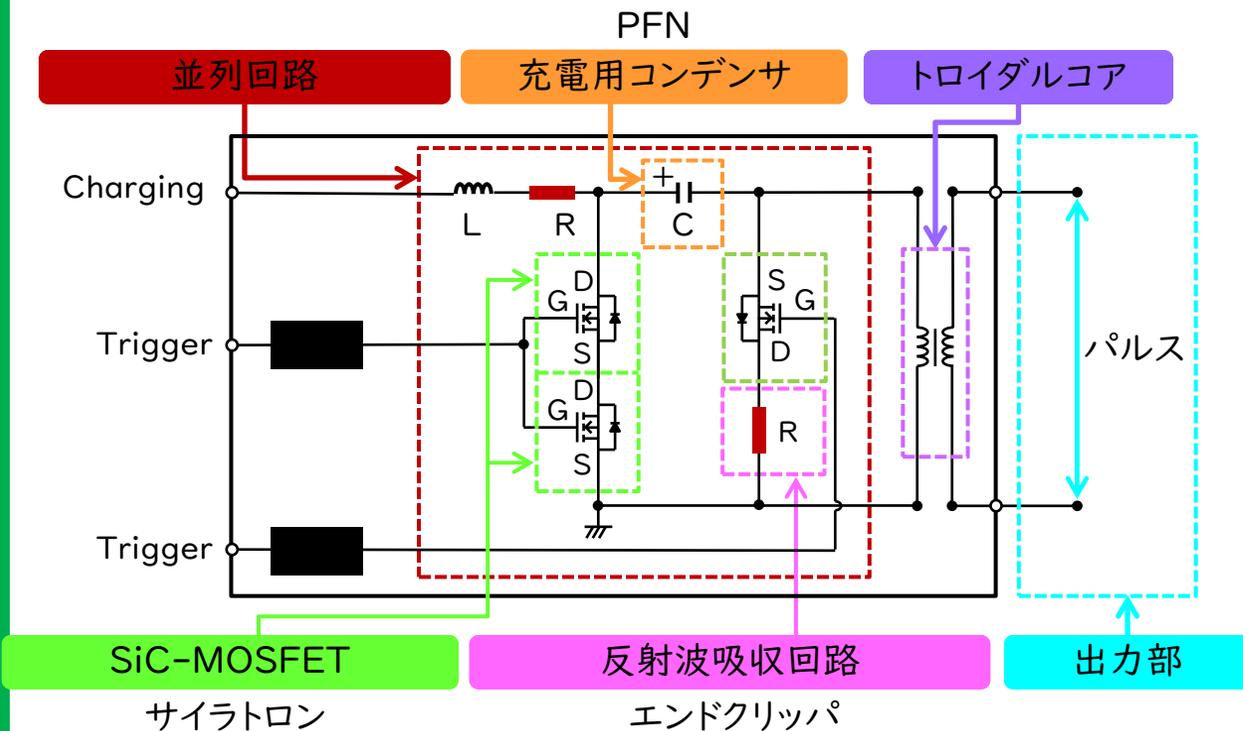


2025年 LTD電源ユニット4台並列運転
(40kV-2kA) × 4台

- 2025年度中に連続運転にて耐久性を確認
- 2026年10月以降に実機運用開始(予定)

LTDジュール基板

電流の合成は並列接続、電圧の合成は誘導的な重畳 (=モジュール基板の直列接続) で実現。



【LTD回路ブロック図】

任意の電流と電圧のパルス出力が可能
回路の一次側と二次側が分離

一般的な構造は高電圧になるほど絶縁設計が必要
⇒モジュール基板の一次側回路が接地電位

☆江先生、徳地氏、PPJが実用化!

LTD回路をベース回路とする

- ・充電電圧40kV
- ・出力電流2kA

キッカー電源を一枚のモジュール基板で実現!