

第15回 日本加速器学会年会@ハイブ長岡

SiC-MOSFETを用いた 半導体スイッチ電源の開発

Development of solid-state switch for power supply with SiC-MOSFET

発表

○高柳 智弘, 植野 智晶, 堀野 光喜, 山本 風海, 金正 倫計
(J-PARC/JAEA)

発表内容

□背景・目的

□項目

◆放射対称型モジュールスイッチの開発

助成：科研費 JP17K06334

◆新キッカー電源の開発経過報告

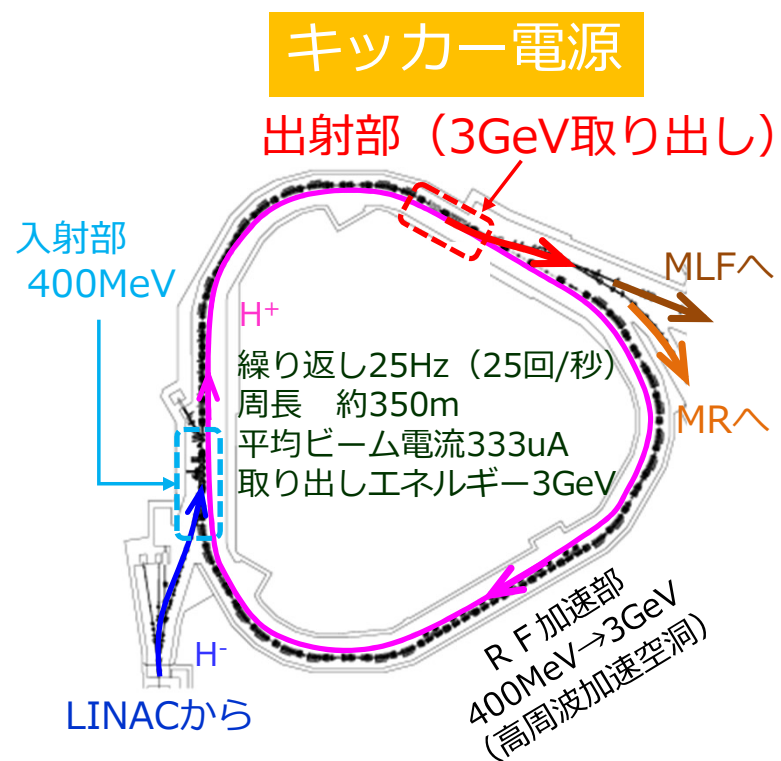
協力：パルスパワー研究所

◆Si-IGBTとSiC-MOSFETの比較

協力：長岡技術科学大学、ニチコン草津株式会社

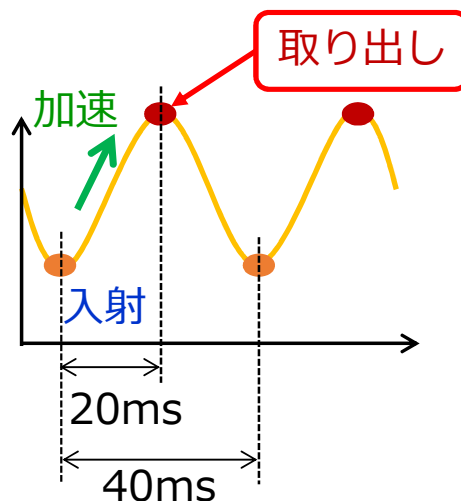
□まとめ

背景

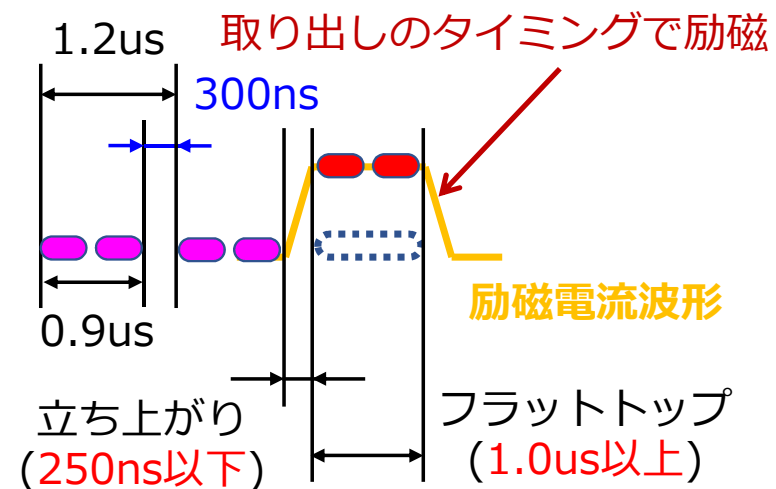


【3GeVシンクロトロン加速器の概念図】

— 1MWの大強度陽子ビーム生成 —



【入射・加速・出射の概要】



【取り出しとキッカー電源波形の概要】

3GeVビームを短パルス波形出力で蹴り出す

現在のキッカー電源 (PFN回路)

- ◆ 大電力パルス出力用高速スイッチにサイラトロンを使用 (CX1193C)
 - ミスファイヤ ⇒ 運転停止 → 施設の稼働率低下
 - 日々の調整 ⇒ 安定維持
 - 高い交換頻度 ⇒ 在庫保持 → 高いランニングコスト (人件費・維持費)

目的

- 安定な運転・運用
 - ランニングコスト低減
- ➡ 安定性、信頼性、メンテナンス性（長寿命）

大電力高速型の「半導体スイッチ」「新パルス電源」の開発

SiC-MOSFETが登場！

従来のSi-IGBTと比較して、高速動作、低スイッチング損失、高耐圧を実現

キッカー電源システム要求仕様

- ・ 充電電圧80kV（PFN回路使用時）
- ・ 出力電流4kA



1モジュールで実現する製品は無い

- ・ 複数個のパワー半導体を使用
- ・ 直並列多重化した回路を構築



励磁波形の高速立上り時間を実現

- ・ 250ns以下



低インピーダンス回路の構築
回路寄生成分の抑制構造

発表内容

□背景・目的

□項目

◆放射対称型モジュールスイッチの開発

助成：科研費 JP17K06334

◆新キッカー電源の開発経過報告

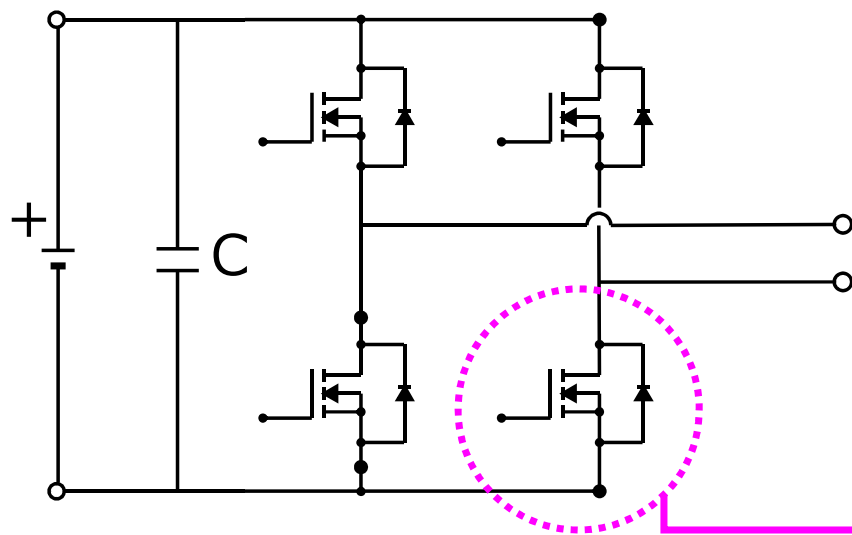
協力：パルスパワー研究所

◆Si-IGBTとSiC-MOSFETの比較

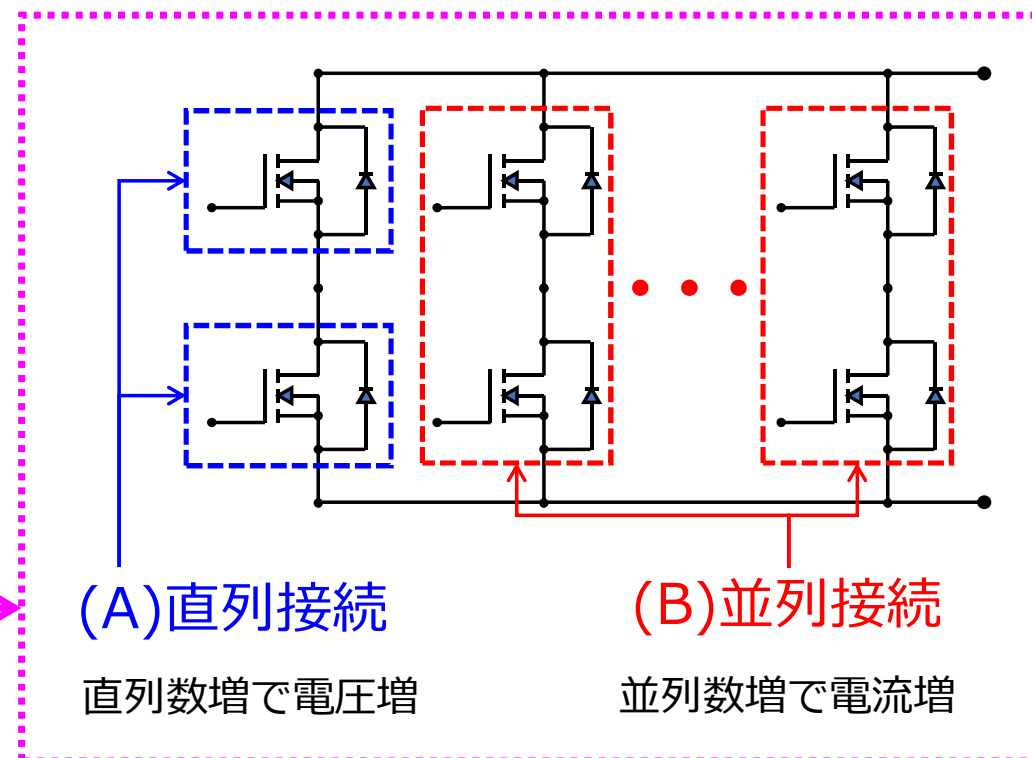
協力：長岡技術科学大学、ニチコン草津株式会社

□まとめ

パワー素子の多重化回路

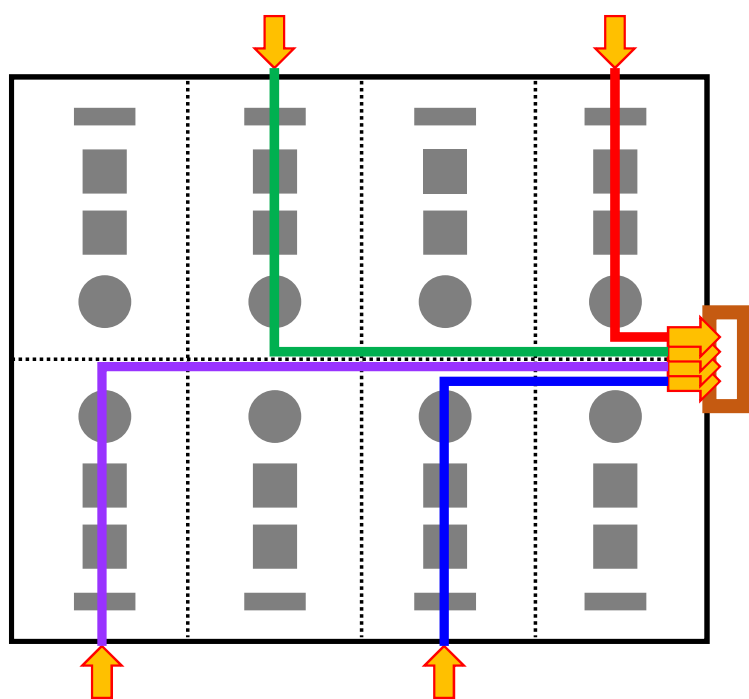


【一般的なスイッチ回路の概念図】



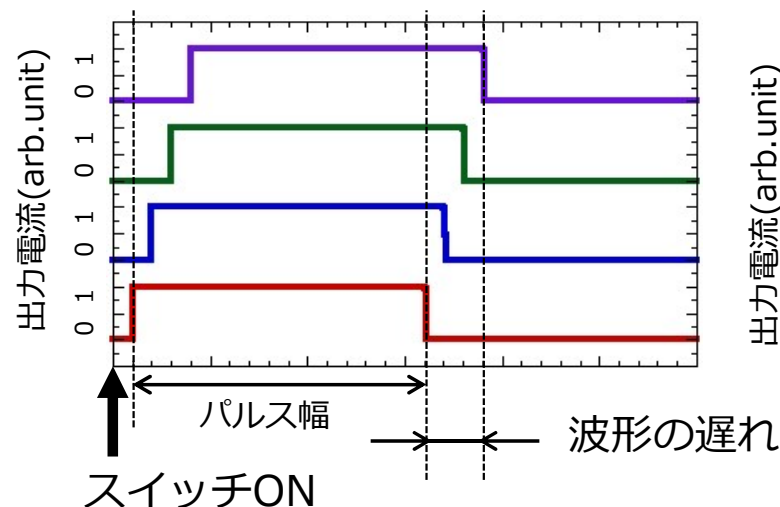
【パワー素子多重化回路の概念図】

線対称型スイッチ回路

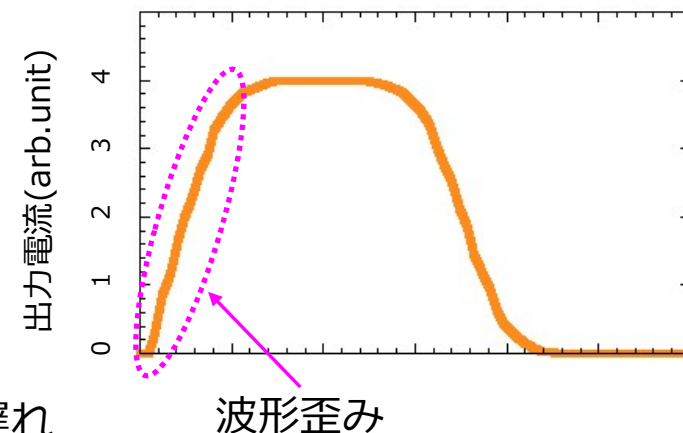


電流の流れ

【線対称型回路構造】



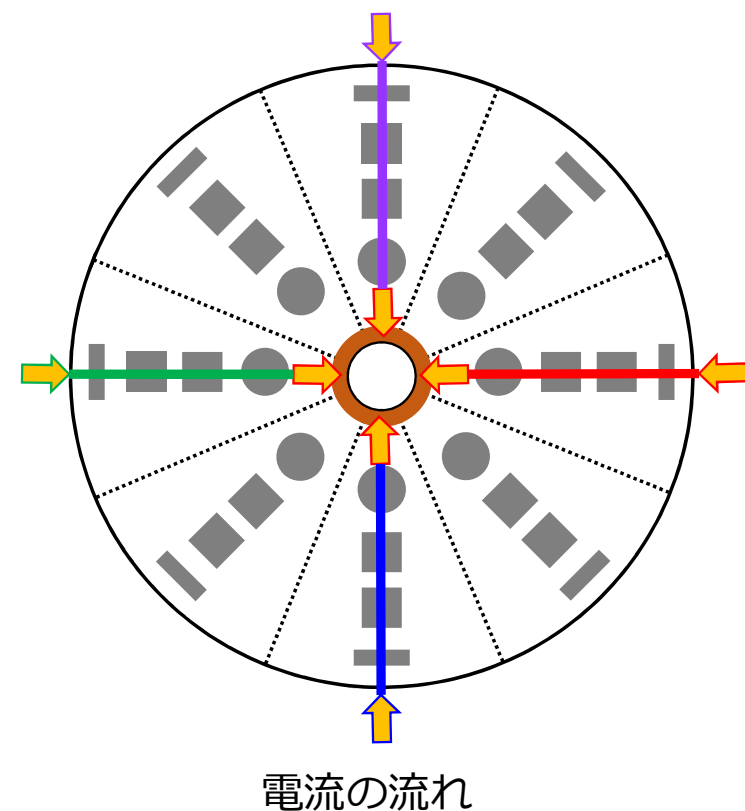
【スイッチ動作と電流波形】



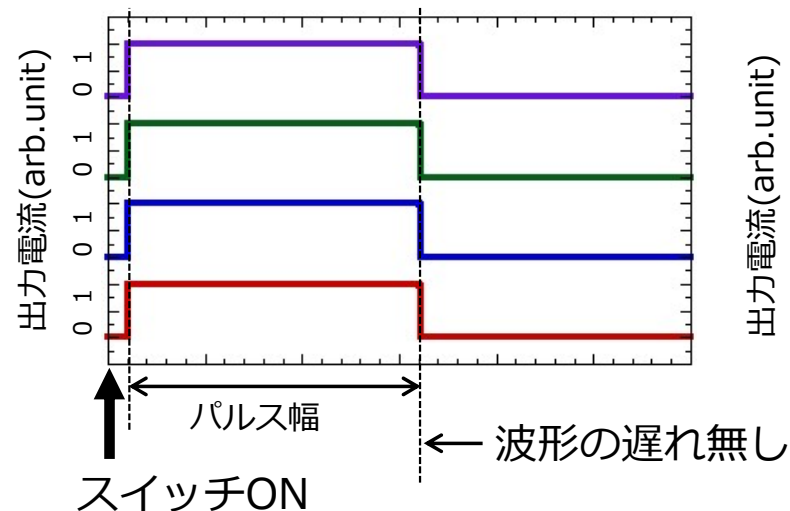
【合成波形イメージ図】

- ☆ コモンモードノイズを抑制
- ★ 並列数増で回路間距離の差が拡大
⇒ 電流伝搬の距離・時間に差 (**不等長回路**)
- ★ 回路インダクタンス起因の波形歪が発生
⇒ スイッチのタイミング調整だけでは補正不可

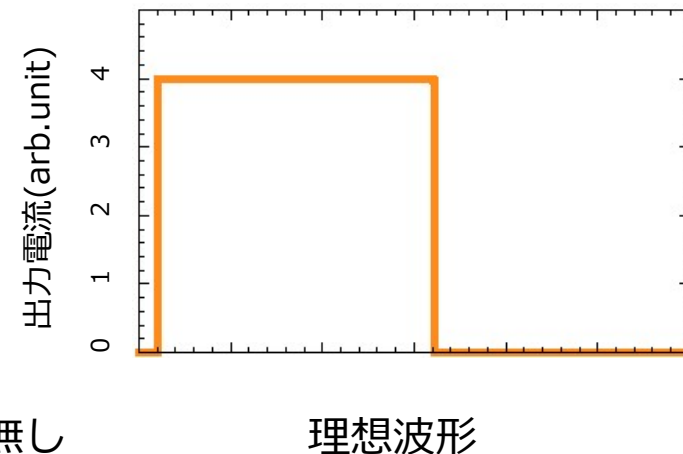
放射対称型スイッチ回路



【放射対称型回路構造】



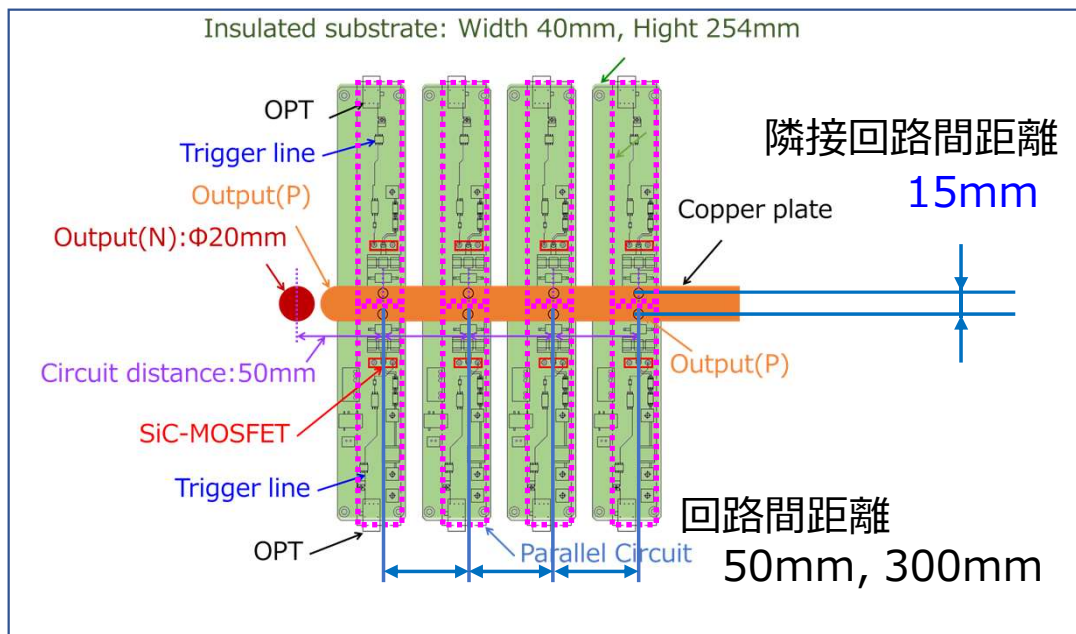
【スイッチ動作と電流波形】



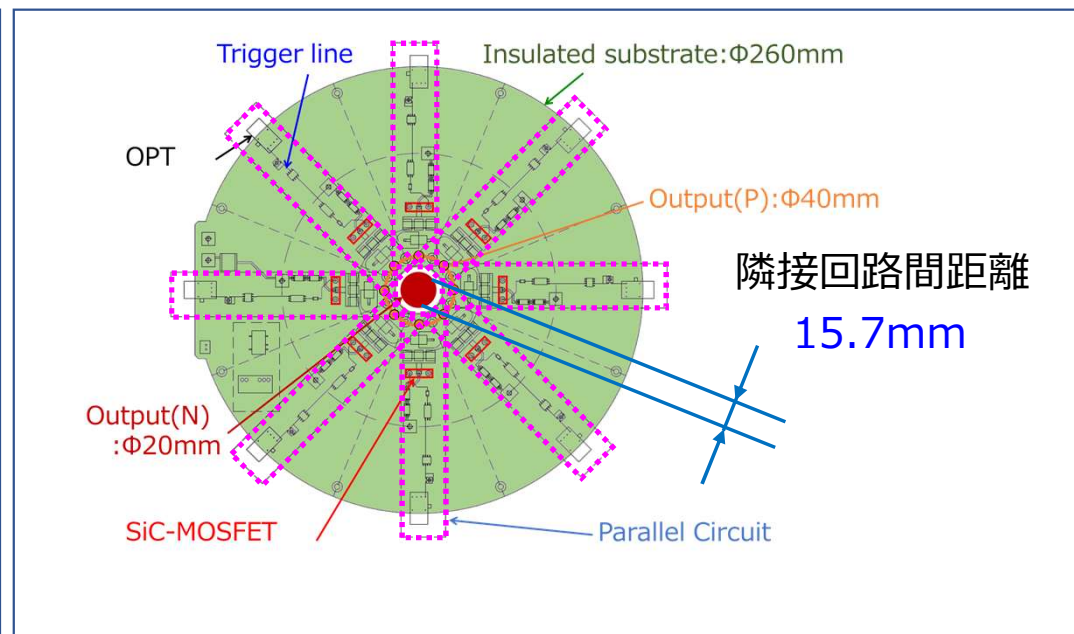
【合成波形イメージ】

- ☆ 全並列数の回路間距離が等しい
⇒ 電流伝搬の距離・時間に差がない (**等長回路**)
- ☆ 回路の寄生成分に差が無い
⇒ 波形歪みが発生し難い

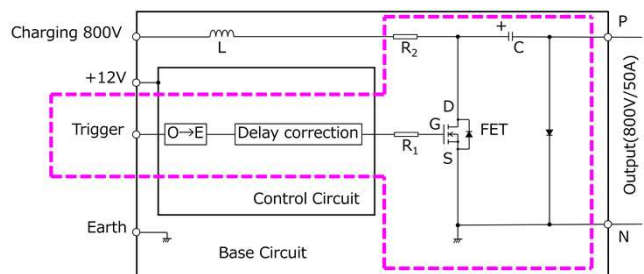
試験回路基板



【線対称型回路基板】



【放射対称型回路基板】



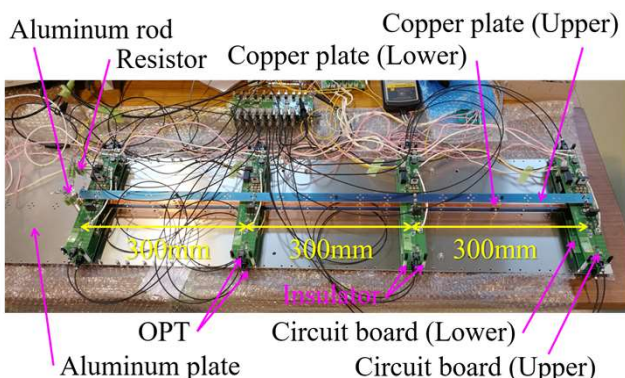
【ブロック回路図 (共通部分)】

パワー半導体SiC-MOSFET(Rohm製)
SCT3030KL : 1200V/72A

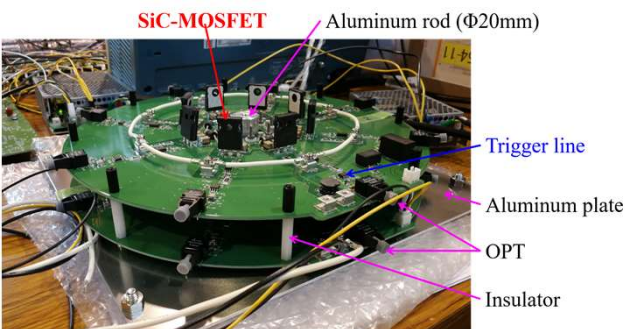
試験

- 線対称型は回路間距離2パターン測定 (50mm, 300mm)
- 基板1枚と2枚 (2段構造で電圧2倍) で測定

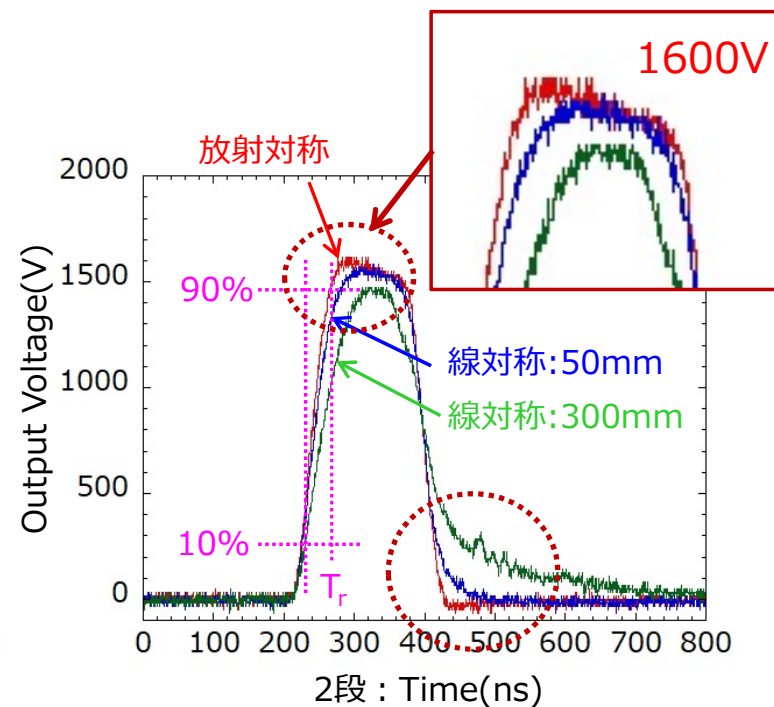
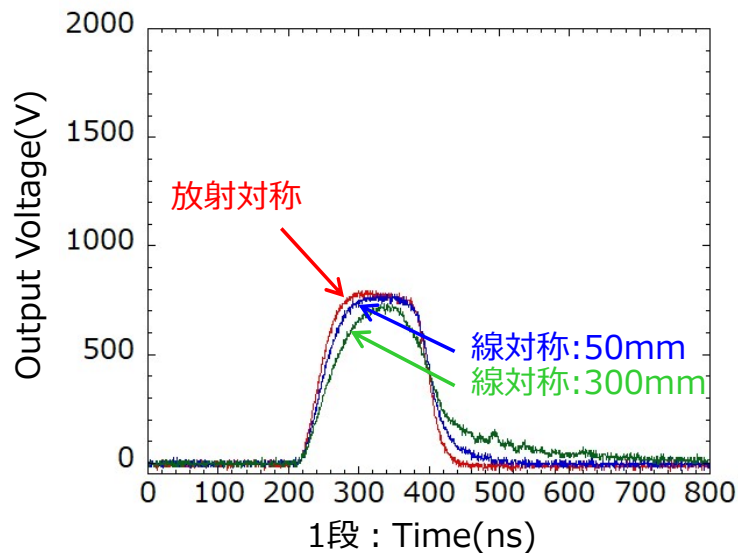
出力波形の確認試験結果



【線対称型回路の距離300mm試験】



【放射対称型回路の2段（電圧2倍）試験】



放射対称型回路基板

- ピークと減衰の波形が急峻
- 立ち上がり時間 (T_r)が高速
- 波形歪みを抑制
- 円形構造は同軸ケーブルとの取り合いが容易

Type	One layer	Two layers
Radial	48ns	45ns
Line(50mm)	54ns	52ns
Line(300mm)	74ns	70ns



ショートパルス電源に最適

発表内容

□背景・目的

□項目

◆放射対称型モジュールスイッチの開発

助成：科研費 JP17K06334

◆新キッカー電源の開発経過報告

協力：パルスパワー研究所

◆Si-IGBTとSiC-MOSFETの比較

協力：長岡技術科学大学、ニチコン草津株式会社

□まとめ

LTD回路を用いた新キッカー電源の開発

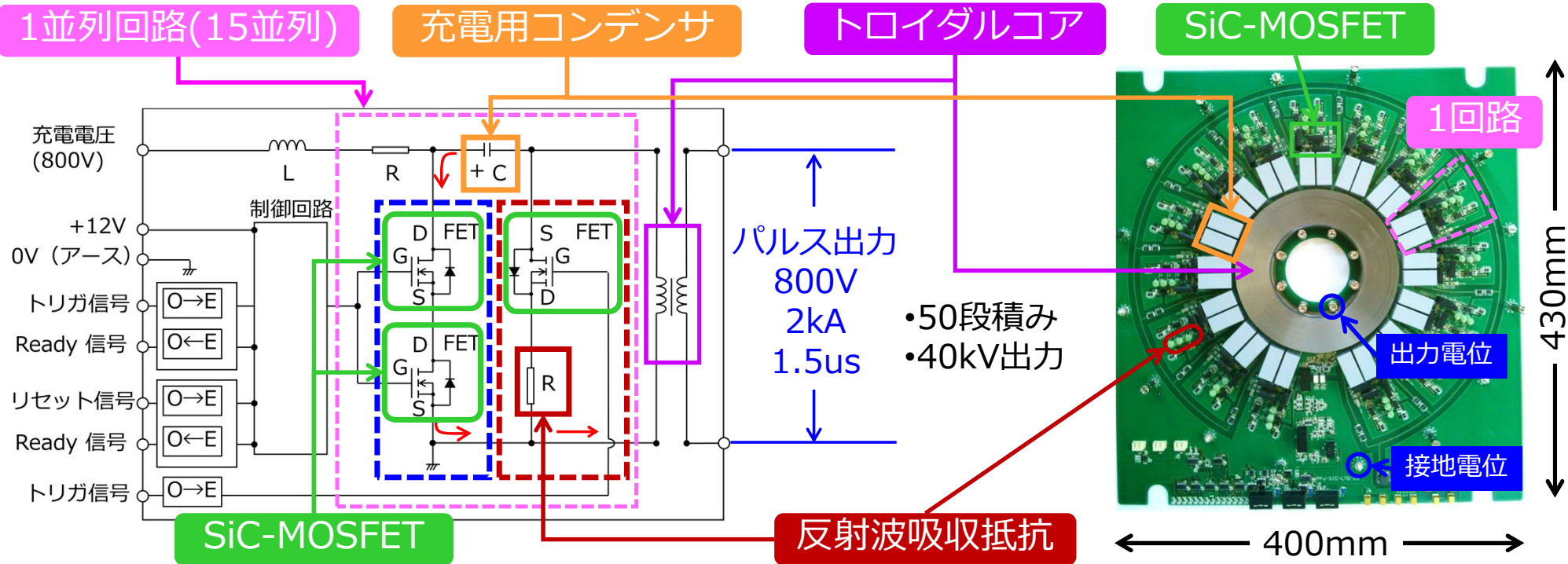
■ LTD(Linear Transformer Drivers)回路

※長岡技術科学大学 江先生発案、パルスパワー研究所 製品化

- 半導体スイッチと誘導電圧重畳回路の組み合わせ
- 高電圧・大電流をナノ秒オーダーで波形制御可能

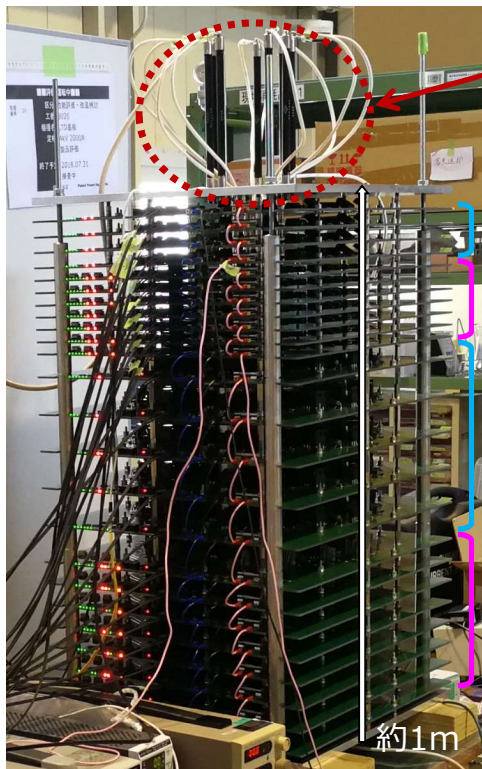


Drain - Source Voltage (Max.)	1200V
ON-Resistance (Typ.)	30mΩ
Pulsed Drain Current (Max.)	180A
Junction Temperature (Max.)	175°C



【主回路基板のブロック図】

新キッカー電源の開発経過報告



負荷抵抗5Ω
(20Ω8並列)

旧補基板 4枚
新補基板 7枚

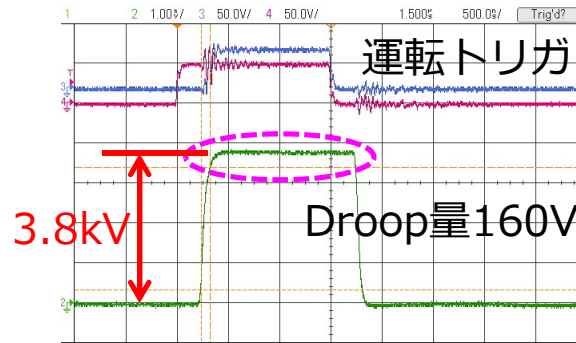
旧主基板 5枚

新主基板 8枚

約1m

積み上げ評価試験

充電電圧800V : 主基板13枚
充電電圧40V : 補基板11枚
(新補基板は定格100V)



旧主補基板 (定格4kV)

ピーク値3.8kV⇒設計値より低い

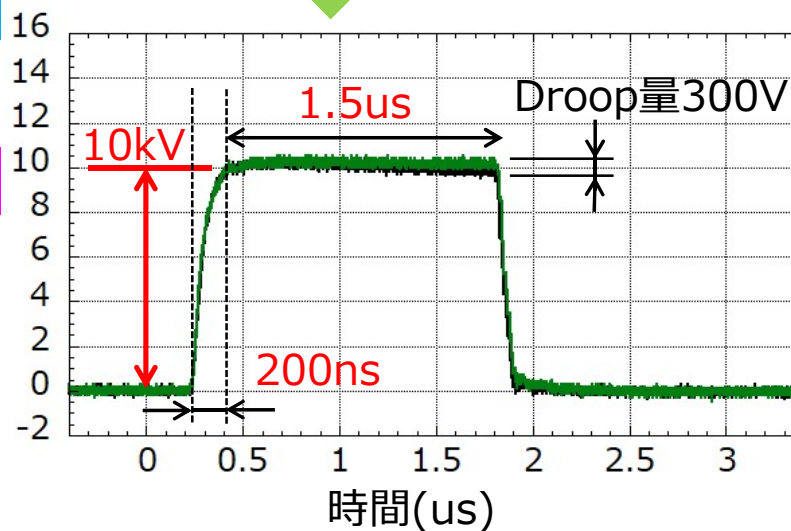
変更内容

主回路

- 基板パターンの電流路を拡幅
- インピーダンスの低減
- 電解コン⇒フィルムコン
- 等価直列抵抗の低減

補基板

- 電解コン⇒セラミックコン
- 等価直列抵抗の低減

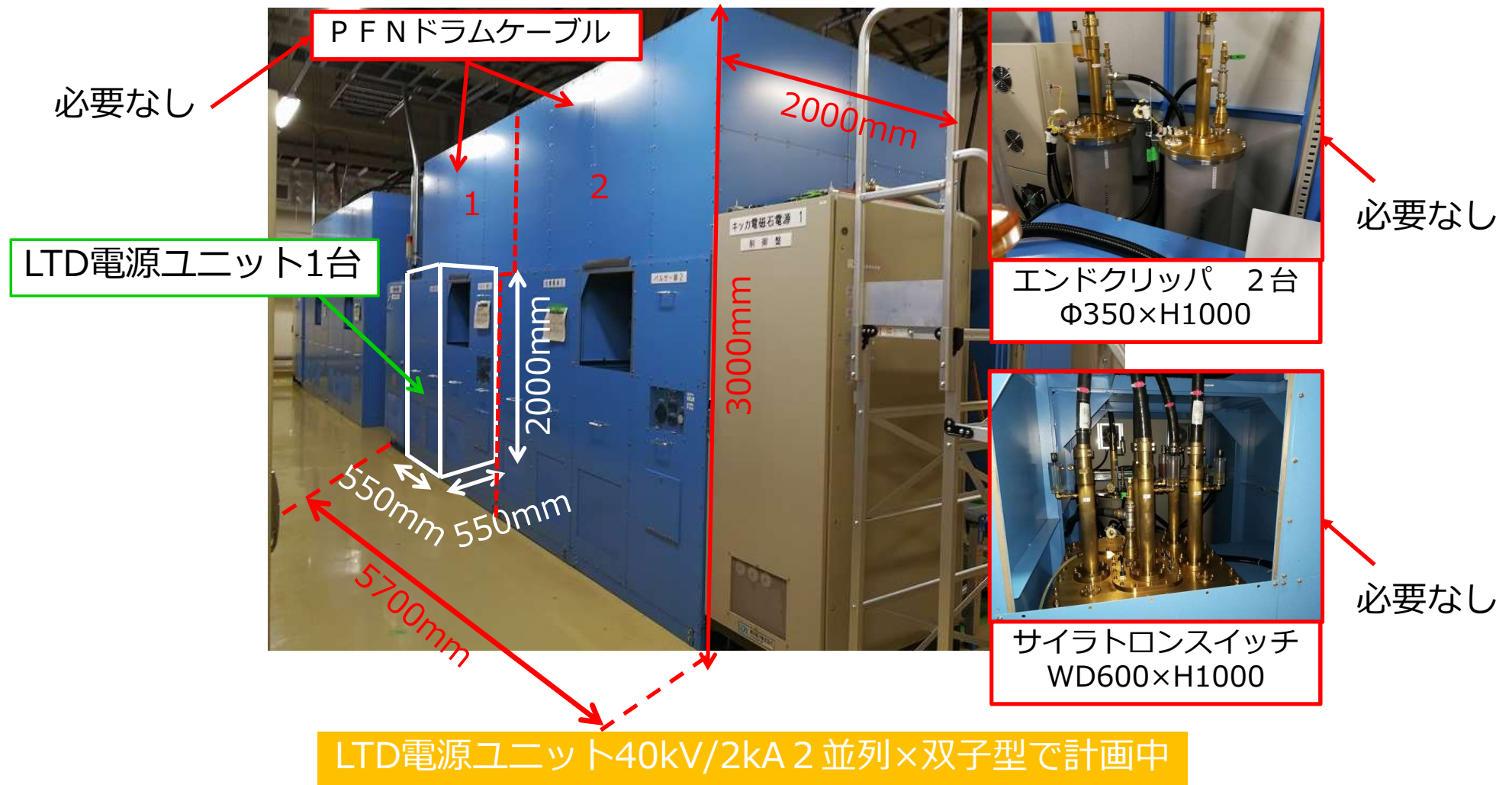


出力電圧の改善

ピーク : 10kV
立上り : 200ns
フラット : 1.5us

参照 : THP075 虫邊 陽一他 バイポーラ型S I C - L T Dパルス電源の改良

キッカーシステムと新電源(LTD)



発表内容

□背景・目的

□項目

◆放射対称型モジュールスイッチの開発

助成：科研費 JP17K06334

◆新キッカー電源の経過報告

協力：パルスパワー研究所

◆**Si-IGBTとSiC-MOSFETの比較**

協力：長岡技術科学大学、ニチコン草津株式会社

□まとめ

Si-IGBTをSiC-MOSFETに換装・温度比較



三相整流ダイオード ヒートシンク



冷却ファン

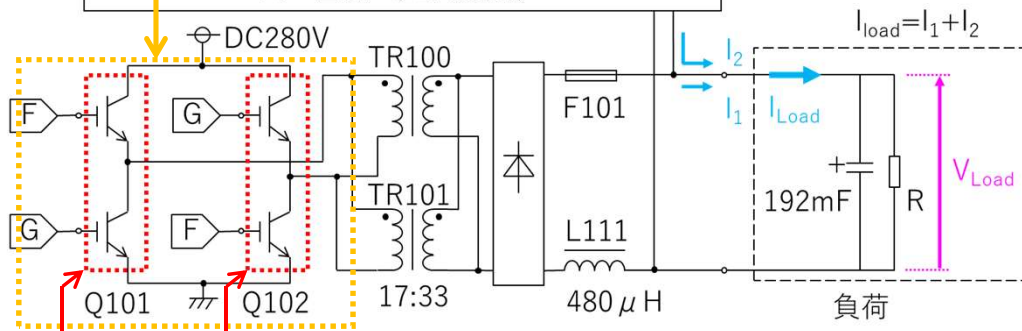


半導体パッケージ

IGBT (旧日本インター製)
PDMB200BS12
1200V 200A

SiC-MOSFET (CREE製)
CAS120M12BM2
1200V 193A

同一回路 (並列接続)



半導体パッケージ
21kHz

定格300V/45A

【水平シフトバンク電源FTユニット用DC充電器】

試験

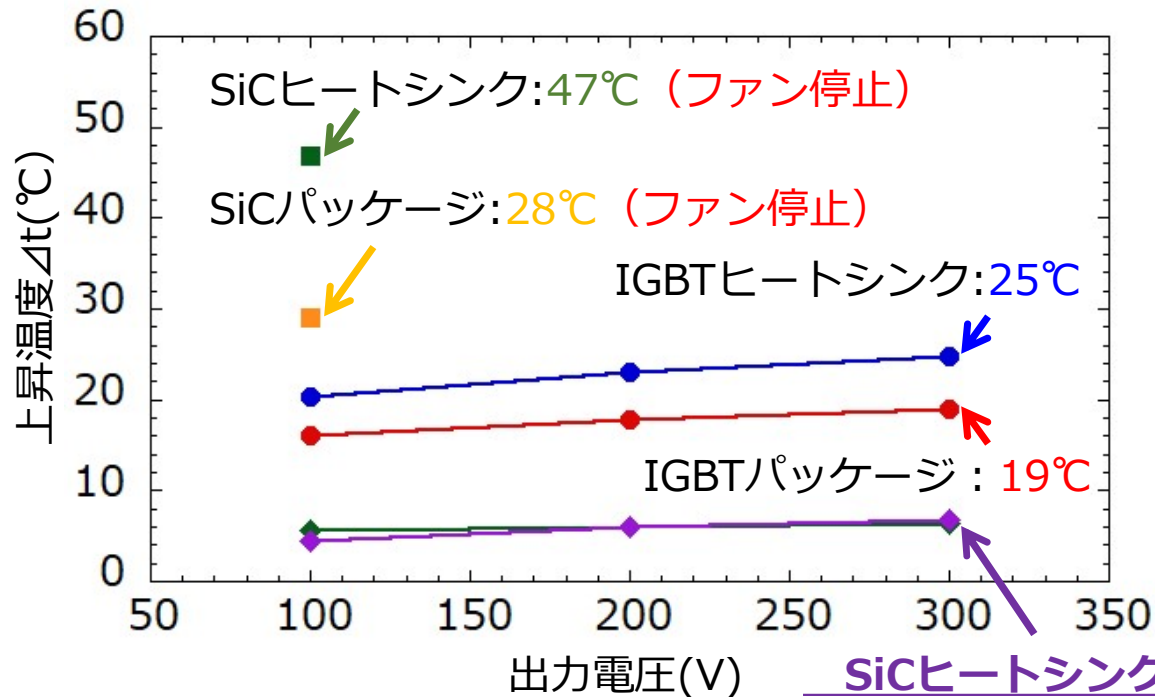
半導体を交換し、同じ出力電圧・電流で比較
ヒートシンクとパッケージの温度をそれぞれ測定

- 出力電圧 : 100V, 200V, 300V
- 出力電流 : 45Aで一定

※出力電圧依存の温度特性の評価

長岡技術科学大学 岡田裕司氏、ニチコン草津株式会社 内藤伸吾氏

測定結果 (SiC-MOSFETの可能性)



電圧(V)	IGBT(W)	SiC(W)	損失差(W)
100	341	72	269
200	387	96	291
300	416	109	307

ヒートシンク発熱=素子+ダイオード

- ・ヒートシンクの熱抵抗から総損失を算出
- ・ダイオード損失に素子違いによる差はない

IGBTとSiCの損失差はおよそ300W

- 損失の大幅低減 (SiC-MOSFETの発熱量はSi-IGBTの約35%に減少)
- ファンレス動作が可能 ⇒ 冷却水や空調などのインフラ設備の縮小
ただし、SiC素子専用として下記項目の最適化が必要
 - ・ヒートシンク形状を自然対流型とする
 - ・寄生成分の最小化構造と整流ダイオードとスナバ回路の構造を最適化する

まとめ

- ◆放射対称型回路の開発：回路基板の特性評価
 - 同一回路が隣接する**放射対称型回路**を着想。
 - 回路間で出力電流が伝搬する距離と時間が等しいため**回路寄生成分に差が無いことを確認**。
 - 半導体スイッチ動作のタイミング調整では補正できない回路のインピーダンスと寄生成分の抑制が可能であることを確認。
 - **ショートパルス電源に最適な構造であることを実験的に確認**。
- ◆新キッカー電源の開発：ハイパワー化試験
 - 主補両基板の**電流経路のパターン幅を拡大**しインピーダンスを低減。
 - コンデンサを変更し**等価直列抵抗を低減**。
⇒設計値の定格出力を確認。
 - 10kV(1/4モデル)の試験にて性能を確認した。早期に定格40kVの試験を目指す。
- ◆Si-IGBTとSiC-MOSFETの比較：既存システムとの比較
 - 既存充電器のSi-IGBT部分をSiC-MOSFETに換装し、**発熱量が35%に低減することを確認**。
 - **ファンレス動作が可能である**こと。水冷や空調の**冷却設備の縮小が可能である**ことを確認。

SiC-MOSFETを採用したスイッチ・電源を積極的に設計製作したい