

# SiC半導体を用いた高速キッカー用 パルス電源の開発

---

**篠原 智史**, 満田 史織, <sup>1</sup>内藤 大地

KEK 加速器研究施設, 第六研究系, 第六グループ

<sup>1</sup>KEK 加速器研究施設, 第六研究系, 第二グループ

# 自己紹介を簡単に

- 1991/3/26 生まれ
- 2014/3 東北大学理学部卒
- 2014/4 京都大学大学院高エネルギー物理学研究室 (修士, KOTO)
- 2016/4 京都大学大学院理学研究科 (博士, KOTO)
- 2019/4 大阪大学山中研 (博士延長線)
- 2021/4 KEK加速器第六研究系 (研究員)
- 2021/7 京大で博士号 (研究員→博士研究員)
- 2022/7 KEK加速器第六研究系 (特別助教)
- 2023/10 KEK加速器第六研究系 (助教) – 現在に至る
- KEKでは
  - 放射光源加速器の入射/電源グループに所属
  - パルス多極入射
  - 半導体パルス電源開発

阪大には19, 20年度に在籍

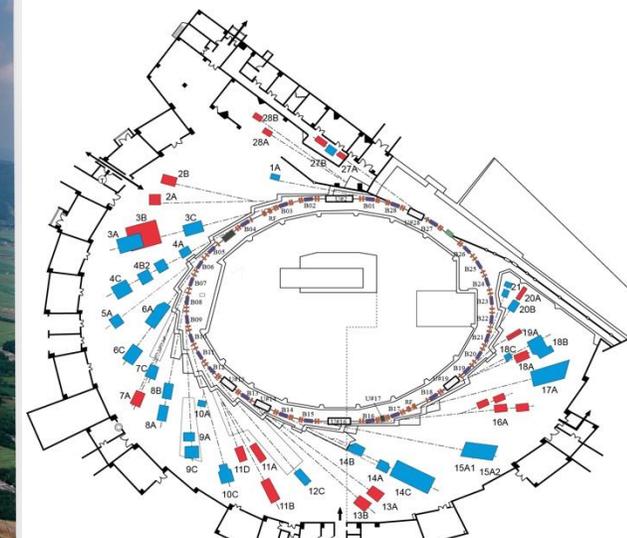


# KEK-PF

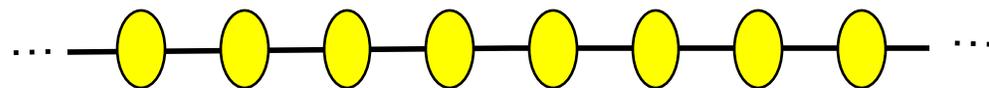
- 放射光実験施設 @KEK (つくば)

- PFリング

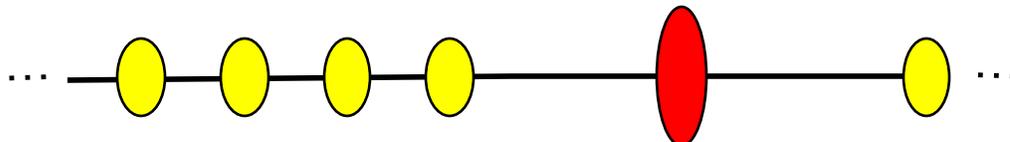
- 電子ビームエネルギー: 2.5 GeV
- 周長: 187 m  
(周期: 620 nsec = 1.6 MHz)
- 運転モード



Filling mode (250 バンチ, 450 mA)



Hybrid mode (130 バンチ + 孤立バンチ, 450 mA)



## KEK-PF 基本パラメータ

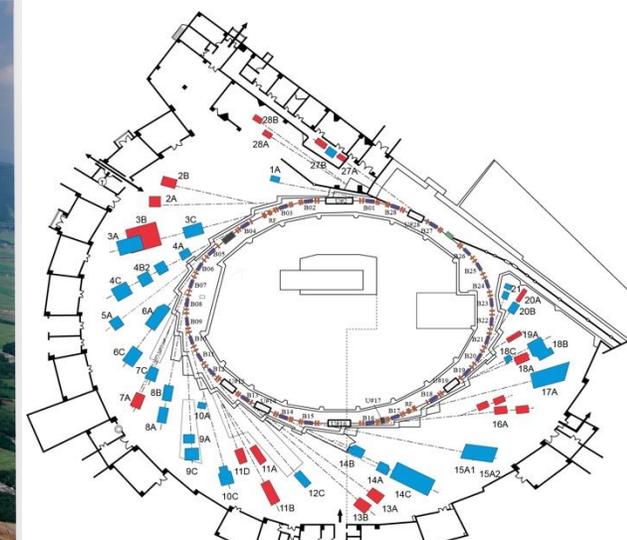
Beam energy	2.5 GeV
Circumference	187 m
Period	624 ns (=1.6 MHz)
Emittance	34.6 nm
RF frequency	500.1 MHz

# KEK-PF

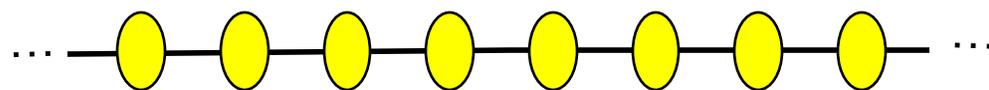
- 放射光実験施設 @KEK (つくば)

- PFリング

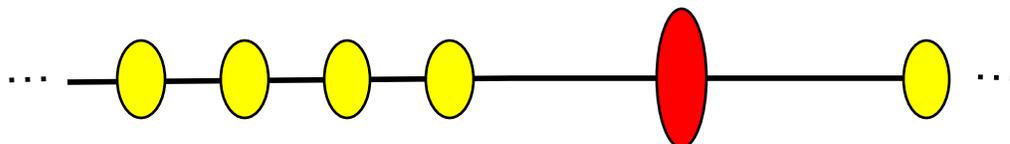
- 電子ビームエネルギー: 2.5 GeV
- 周長: 187 m  
(周期: 620 nsec = 1.6 MHz)
- 運転モード



Filling mode (250 バンチ, 450 mA)



Hybrid mode (130 バンチ + 孤立バンチ, 450 mA)

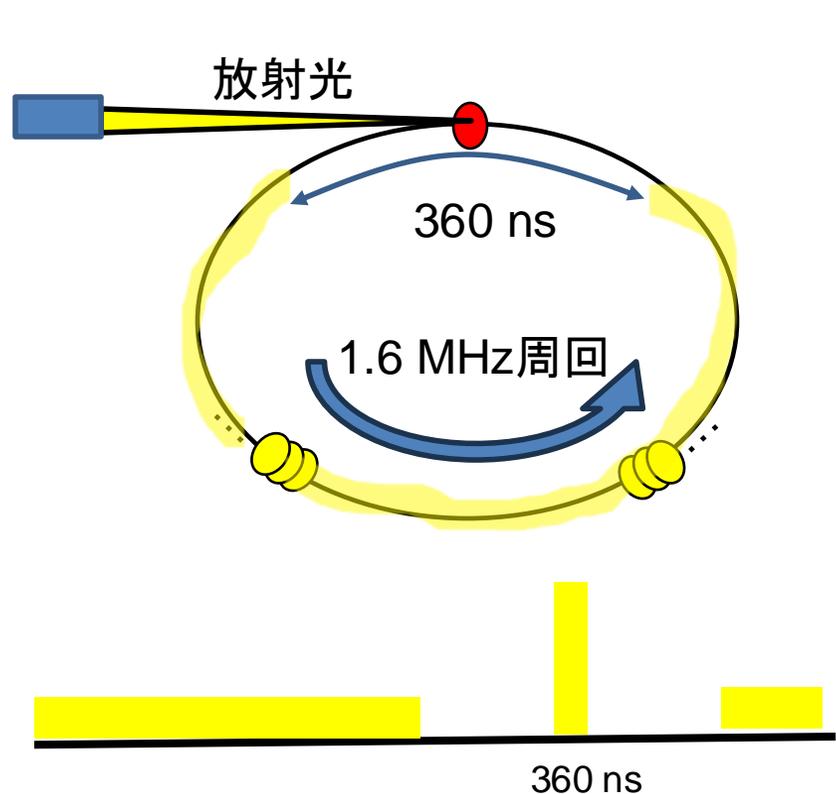


薄く広く蓄積  
カレントをたくさん積める

→ 動的な測定が可能: 時間分解実験等  
シングルバンチ 50 mA程度が限界  
マルチとシングルを組み合わせた運転  
モードで複数ユーザーへ幅広く恩恵

# ハイブリッド運転モードの高度化

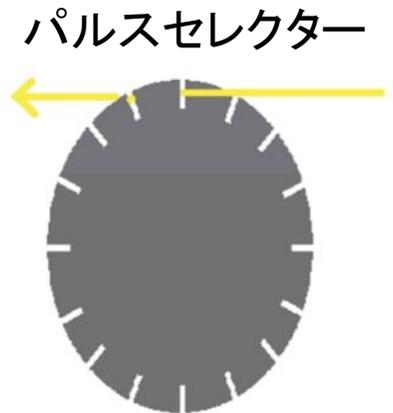
- 130 マルチバンチ + 大電荷シングルバンチ (hybrid mode, 450 mA)
- ハイブリッド運転モードのデメリット
  - シングルバンチ放射光が一定間隔で常に供給される (624 ns)



孤立バンチの取り出し

1. ゲート信号でveto  
× 長時間応答, 余分なX線が照射
2. 物理的に回避  
高速チョッパーが必要  
1.6 MHz周回のため技術的に困難

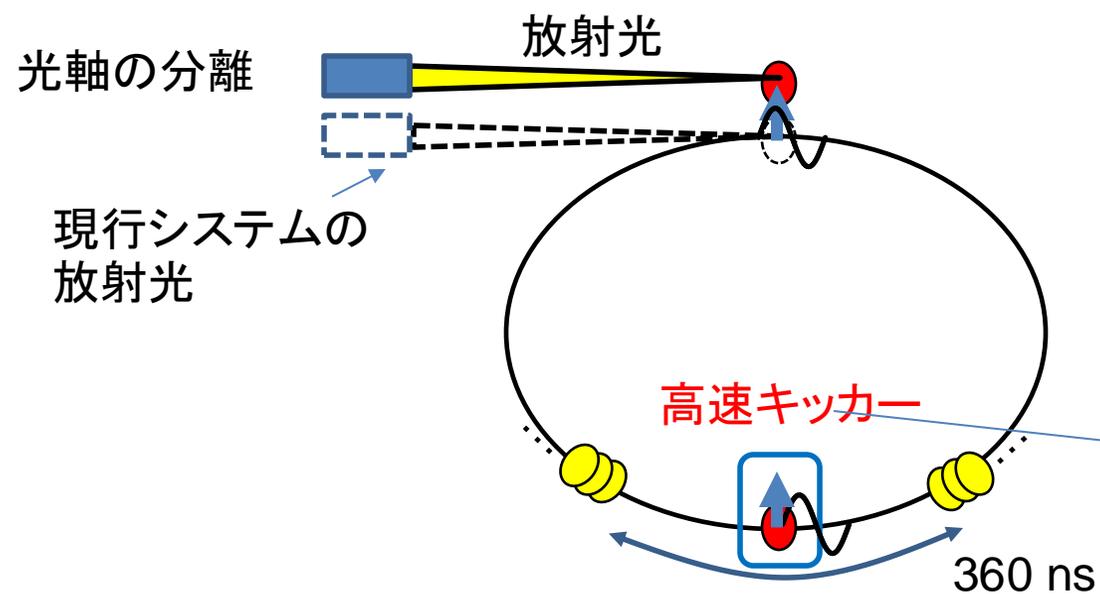
加速器側で何かできないか?  
→ Camshaft bunch system



<https://www.google.co.jp/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://inis.iaea.org/records/ac562-z9s02/files/50040028.pdf%3Fdownload%3D1&ved=2ahUKewj6hNTEvKCMAxWIk1YBHUCOI9IQFnoECBwQAQ&usg=AOvVaw3YxreRIBFNNonU6JhV4ys>

# Camshaft bunch system

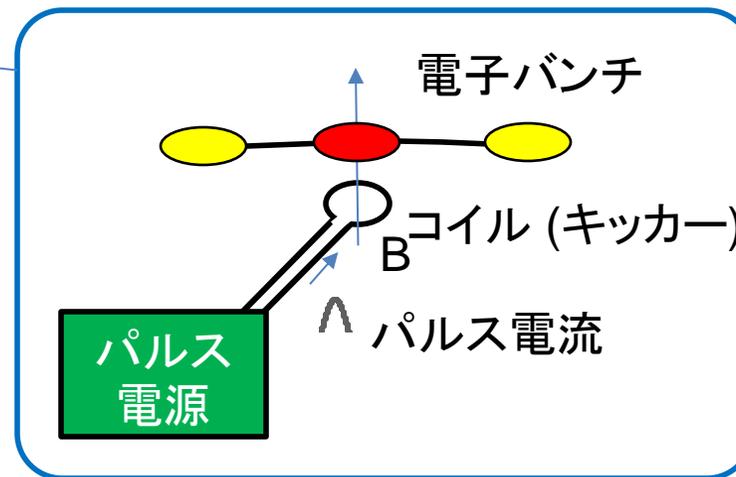
- Kick and cancelを用いる手法
  - (適切なチューンのもとで) 一つのキッカーで全て制御



カムシャフト

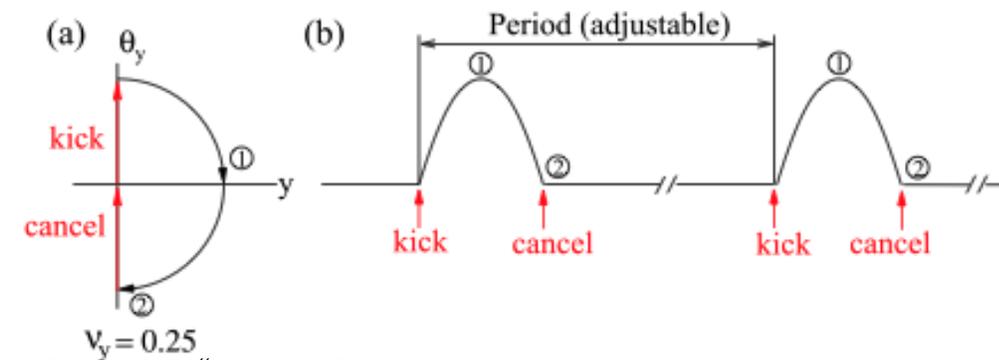


高速キッカーシステムが必要



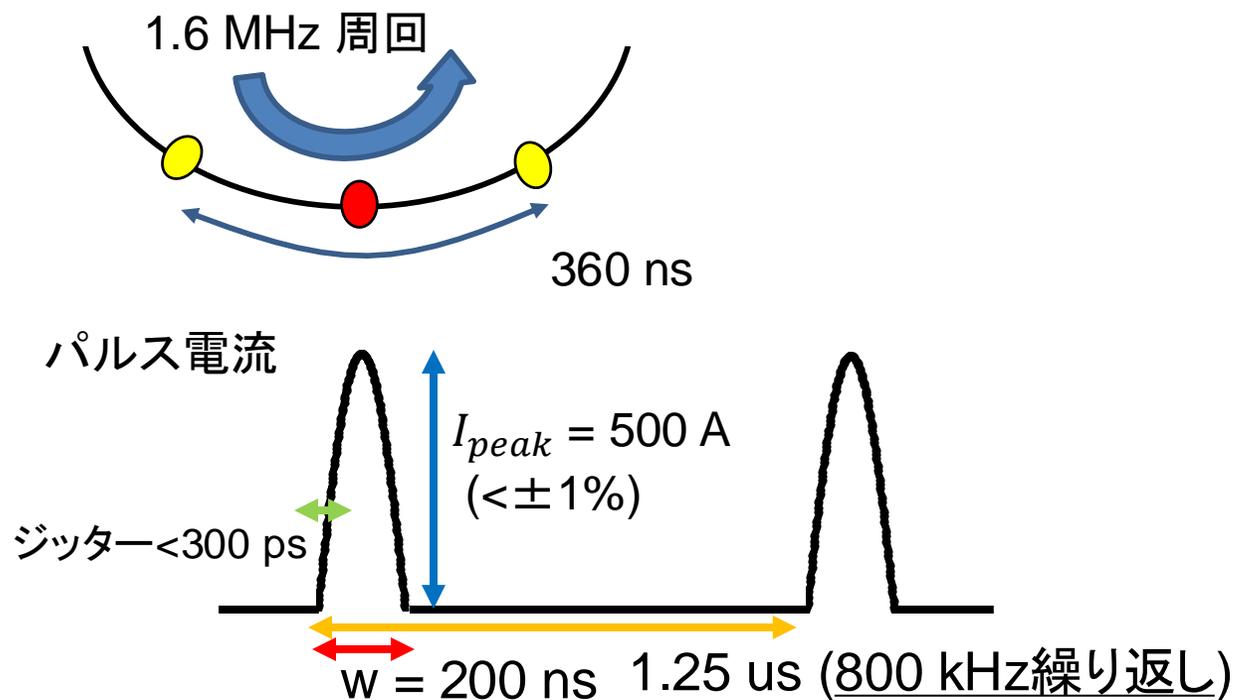
シングルバンチだけを蹴る必要がある

Kick and cancel



C.Sun et.al., "Pseudo-Single-Bunch with Adjustable Frequency: A New Operation Mode for Synchrotron Light Sources", PRL 109, 264801 (2012)

# Required Pulsed Power Supply



大電流・高繰り返し・高速性能を持った  
電源が必要  
人類未達の電源(のはず)

## 大電流, 高耐圧

- 0.5 mradの蹴り角  $\rightarrow I_{peak} = 500 \text{ A}$  ( $< \pm 1\%$ ,  
ジッター <math>< 300 \text{ ps}</math>),  $V = \sim 15 \text{ kV}$  ( $I \propto V$ )

## 高繰り返し

- $\geq 2$ 周に一回キック (800kHz)
- $\rightarrow$  800 kHz 繰り返し目標

## 高速 (短パルス)

- $w = 200 \text{ ns}$  ( $\ll 360 \text{ ns}$ )
- 電源自体の低インピーダンス化も必要  
 $\rightarrow$  電源は加速器近傍に設置  
 $\rightarrow$  省スペース, 放射線防護, ビームノイズ耐性  
加速器環境下の動作必須

○: 加速器近傍

パルス  
電源

× 長い配線

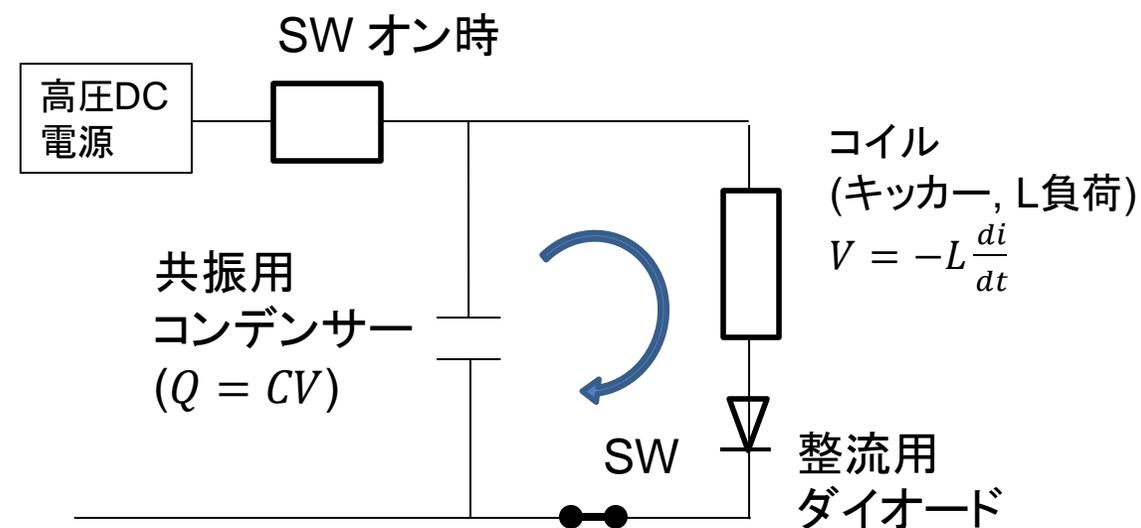
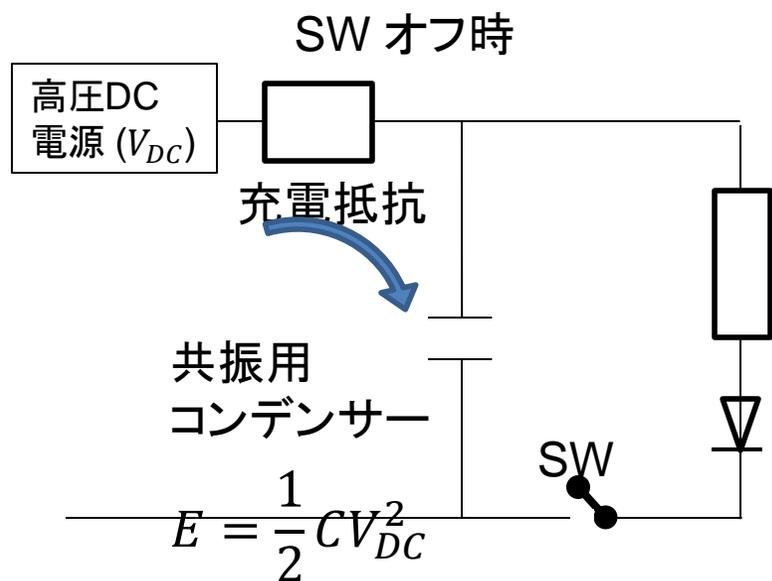
パルス  
電源

コイル  
(キッカー)

# パルス電源とは？？まずざっくりと

- スイッチ (SW) オフ時に充電, SWオン時に放電

基本例

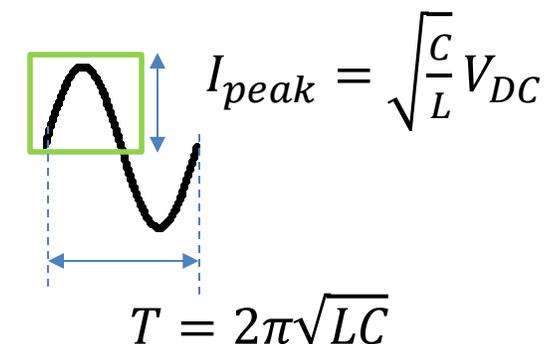


LC共振回路の電流波形: 正弦波

※ 回路方程式

$$L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = V_{DC} \rightarrow L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C} = V_{DC}$$

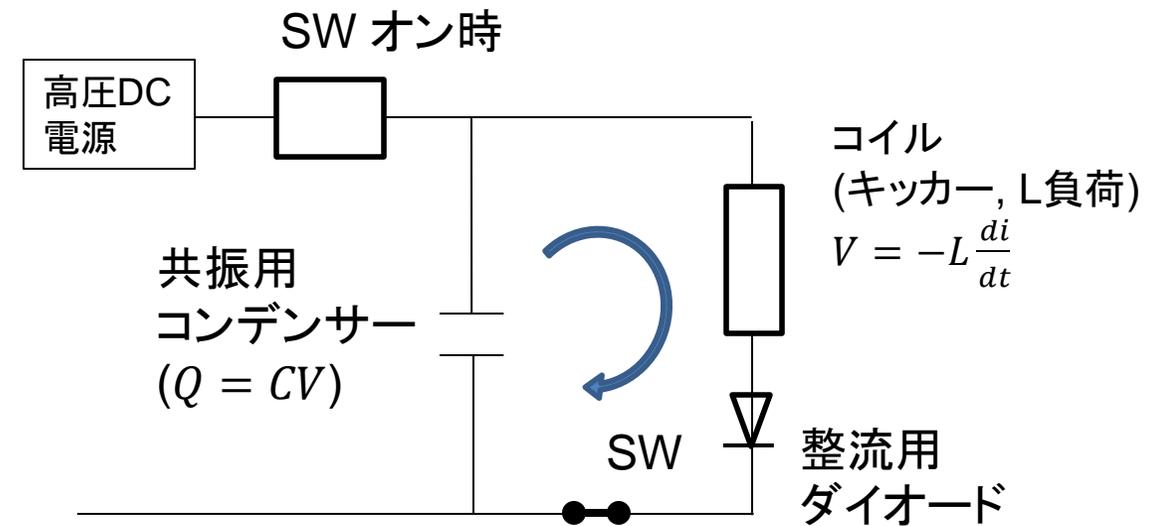
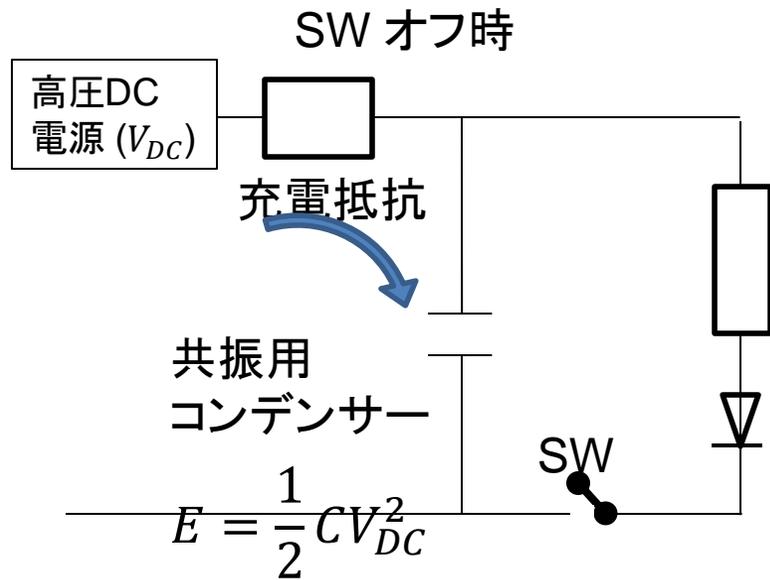
$$i(t) = V_{DC} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}}$$



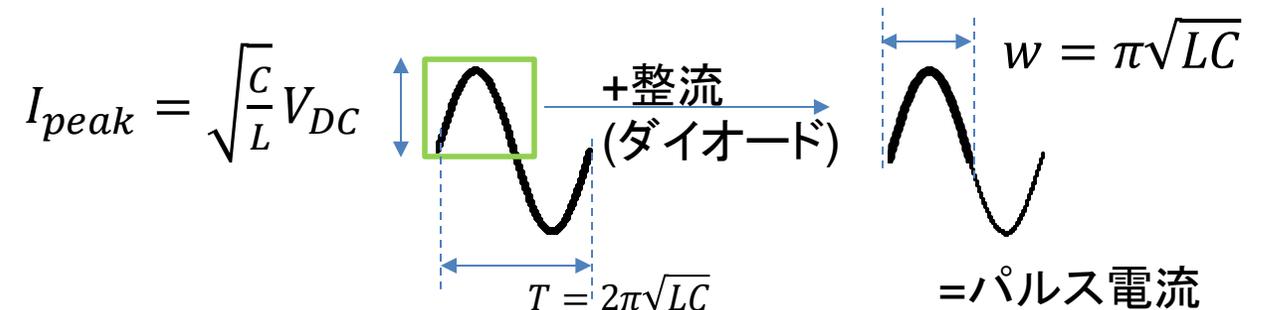
# パルス電源とは??まずざっくりと

- スイッチ (SW) オフ時に充電, SWオン時に放電

基本例



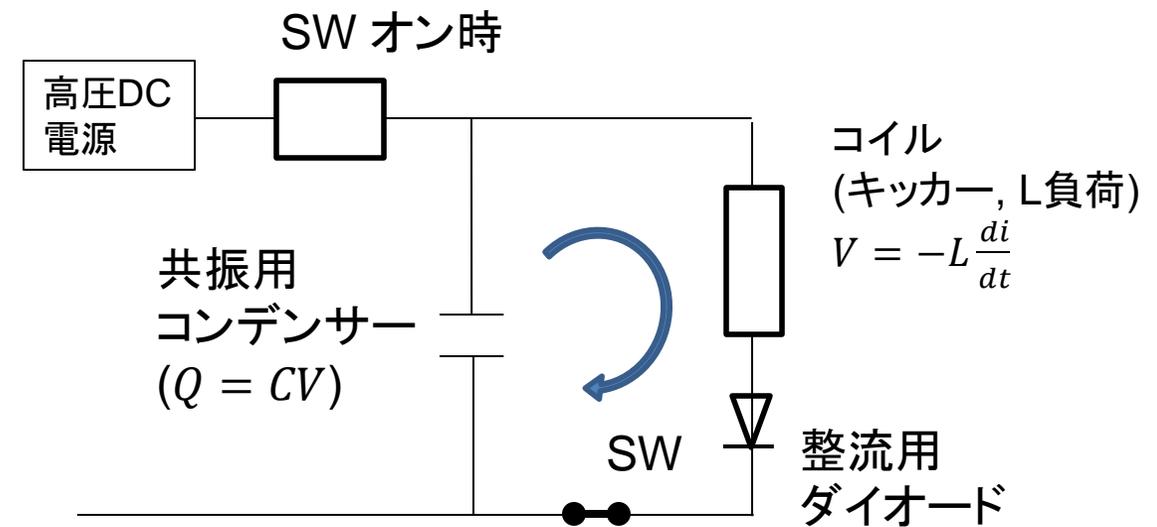
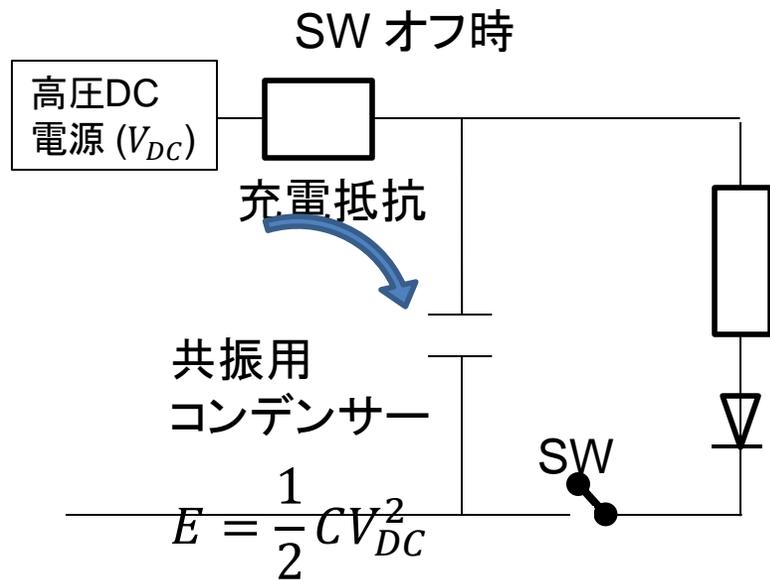
LC共振回路+ダイオードによる整流→半正弦波を生成



# パルス電源とは??まずざっくりと

- スイッチ (SW) オフ時に充電, SWオン時に放電

基本例



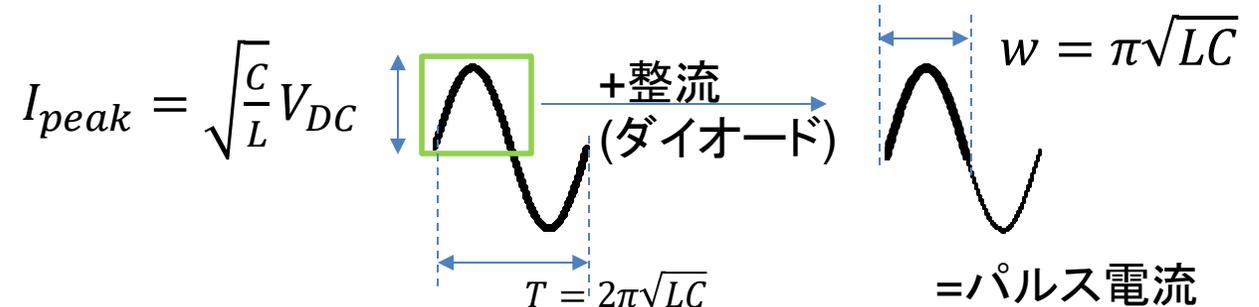
LC共振回路+ダイオードによる整流→半正弦波を生成

パルス電源開発の鍵

大電流 (500 A)・高繰り返し (1 MHz)

高速性能 (100 ns)を両立する回路

構成の工夫と要素開発



# KEKのパルス電源

PF入射用キッカーパルス  
電源 (パルサー一部)

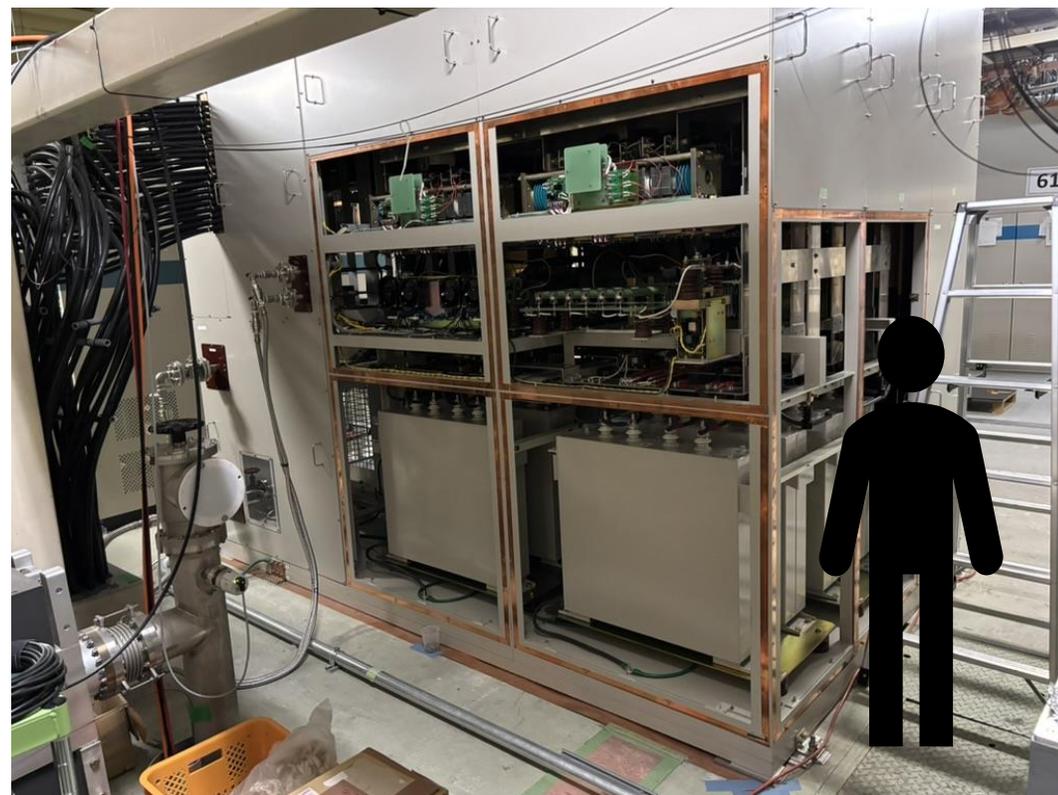


~5 kAパルス電源

PF-AR入射用キッカー  
パルス電源



PF/PF-AR 振り分けベンド用パルス電源



30 kAパルス電源

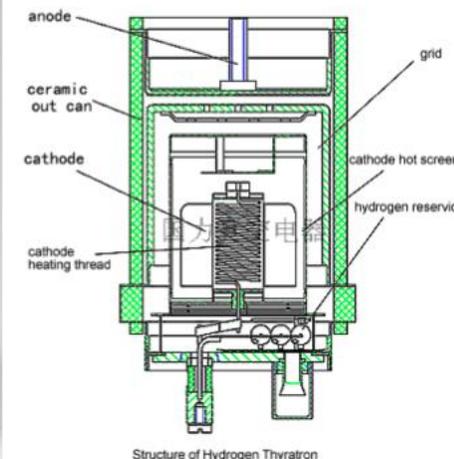
# 高電圧・大電流スイッチについて

要求に対する代表的なスイッチング (SW) デバイス候補

	サイラトロン (放電管)	半導体	
		MOSFET	IGBT
SW速度	○ (<数十 ns)	○ (<数十 ns)	× (~us)
高繰り返し	× (<100 Hz)	○ (> MHz)	× (< kHz)
耐圧 電流容量	○ (>数十 kV, 数十 kA)	△ (~1kV, 100 A)	○△ (数kV, ~kA)
加速器電源	広く普及	展開中	

- 高繰り返しには半導体**MOSFET**が**唯一の技術候補**
  - サイラトロンは市場の衰退もあり入手性, メンテナンス性が悪化
- **電源の半導体化**は加速器の持続的な運用にも重要な命題

## サイラトロン



ガス入り (Ar等) の放電管  
制御電極に電圧をかけるとアノード-カソードでアーク放電が発生. 大電流を流せるようになる

# SiC-MOSFET

開発と応用が進んでいる**SiC-MOSFET**  
(Metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor)

Si → SiC: オン中の抵抗が  $< 1/10$ 、高速

ただし、1素子定格:  $\sim 150$  A,  $\sim 1$  kV  
(目標: 500 A, 15 kV)

加速器電源として応用するには

- 多積層技術の確立  
多積層 → 電源大型化 → インダクタンス増加 → パルス幅大 → 高繰り返しに難
- パルス電流通過能力をおさえる必要がある



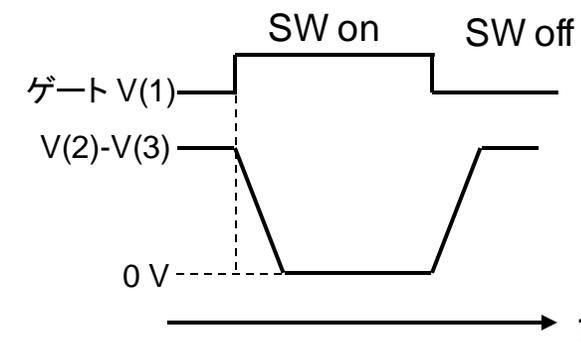
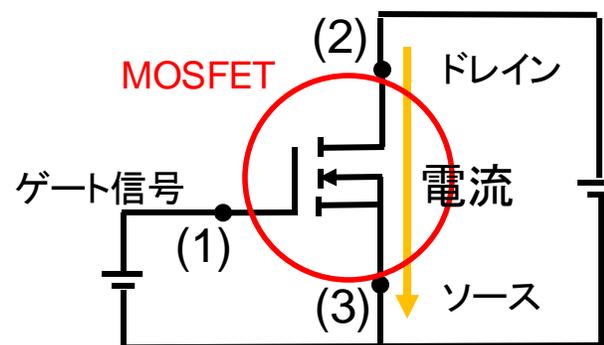
ex.)

**SCT2080KE**

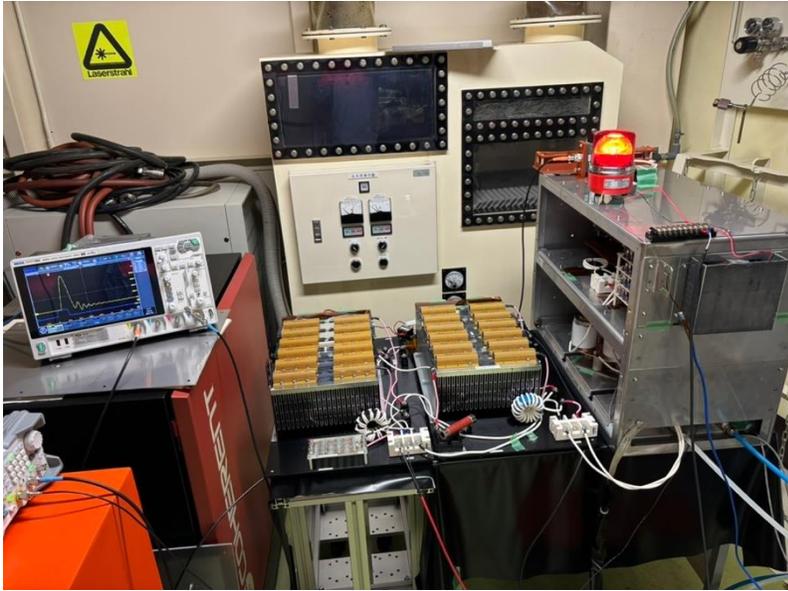
1200V, 40A, THD, SiC-MOSFET

<https://www.rohm.co.jp/products/sic-power-devices/sic-mosfet/sct2080ke-product>

大きさ: 16 × 21 (t=5.2)



MOSFET: 高速・低損失・長寿命なスイッチング素子



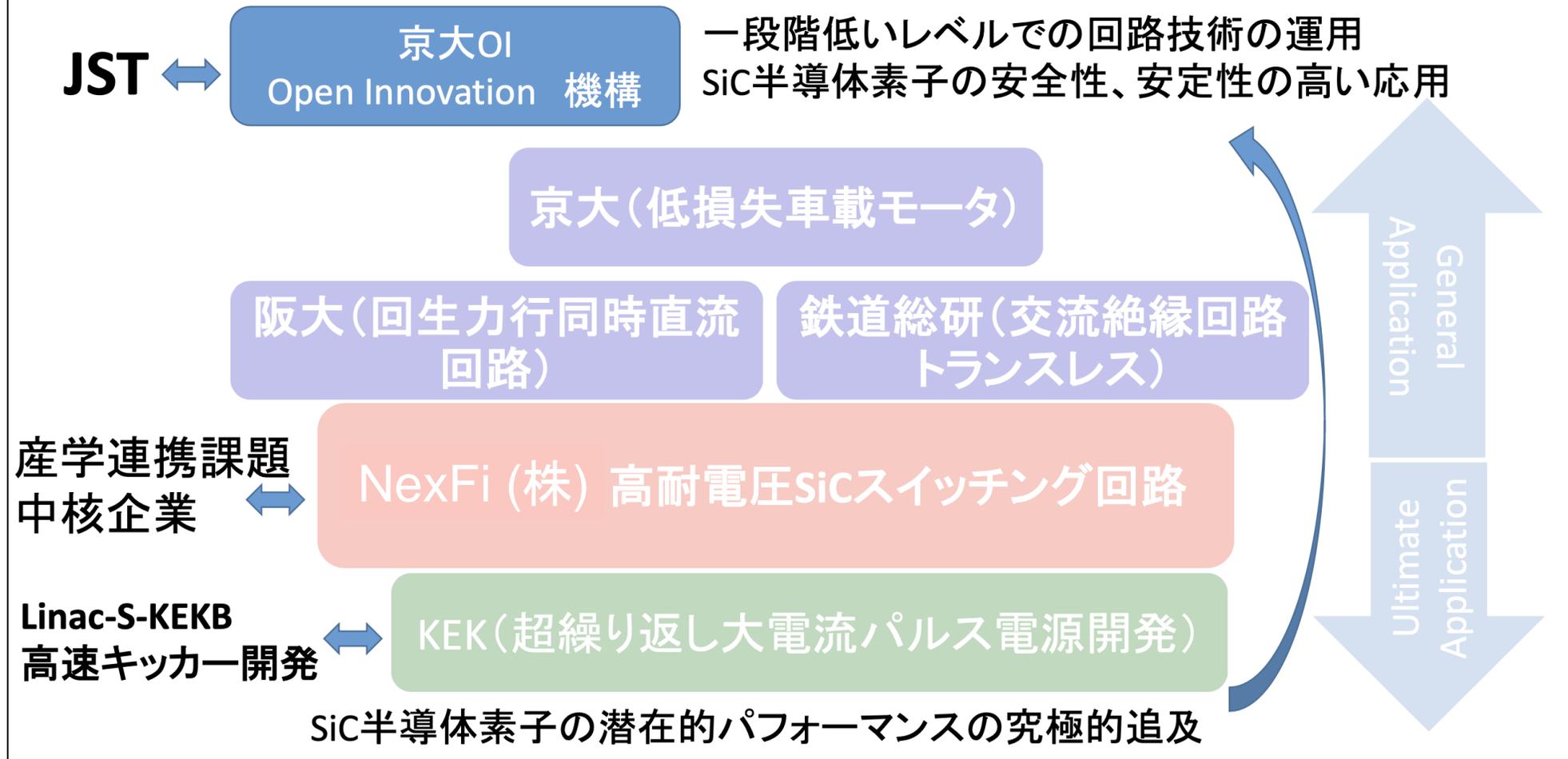
# 半導体パルス電源開発



# SiCスイッチングモジュールの高性能化とその応用開発 (2020-2024)

## JST/A-step課題 体制図

C. Mitsuda



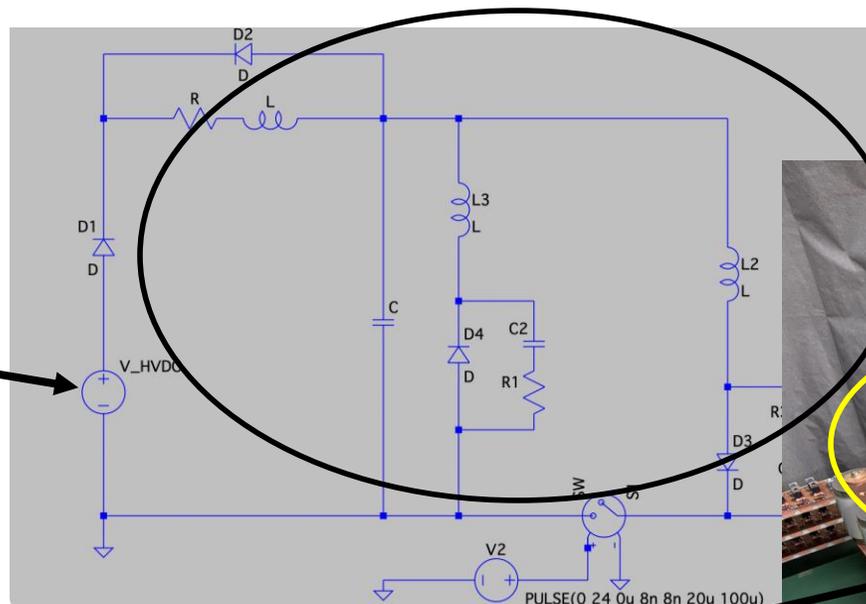
半導体化を目指す機関で中核メーカーのもとSiCスイッチングモジュール開発を進める

# 半導体パルス電源開発 @ KEK

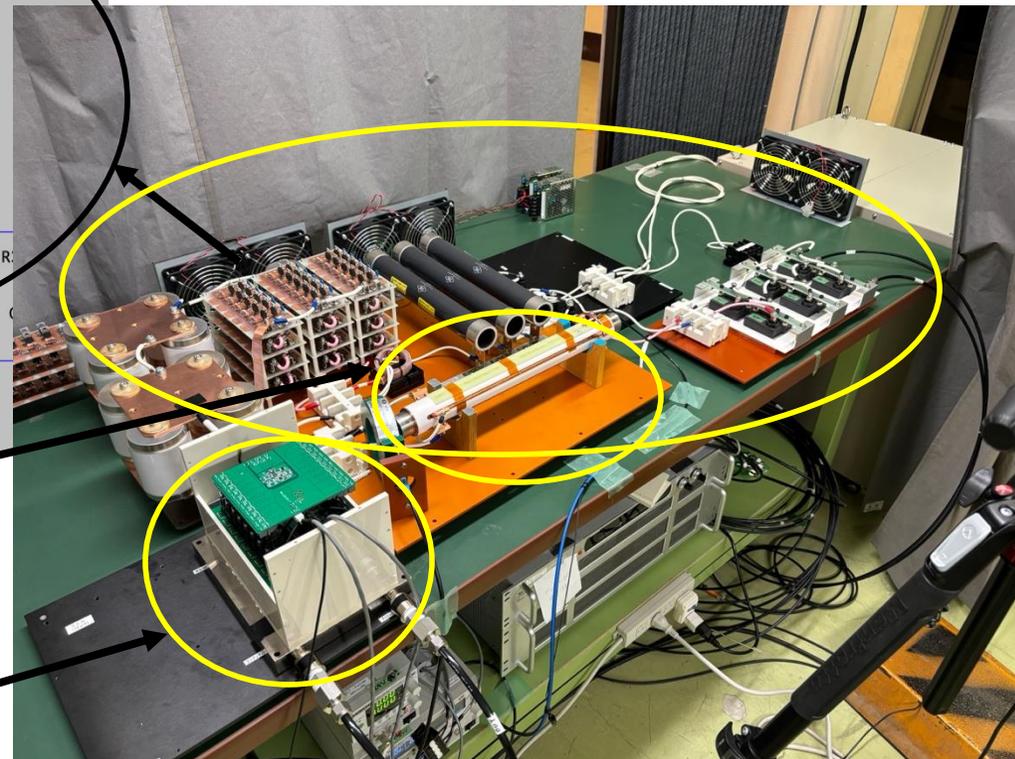
特注高圧DC電源 (HSE社製)



内藤さんが主に担当



パルス電源充電部、パルサー一部 (篠原が主に担当)



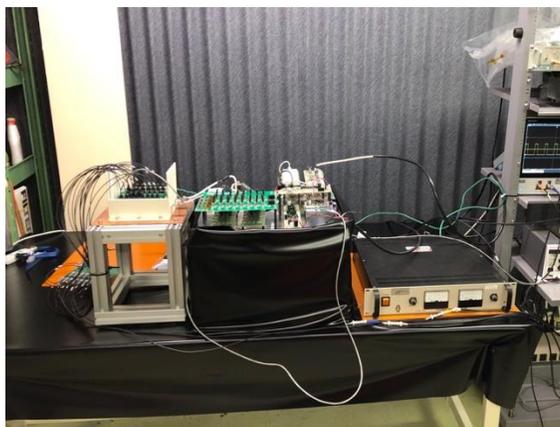
キッカー  
(KEK側の責任者: 満田さんが開発)

半導体スイッチ  
(中核企業: NexFiさんが担当)

# 開発スタート (2021-)

- 改めて開発目標

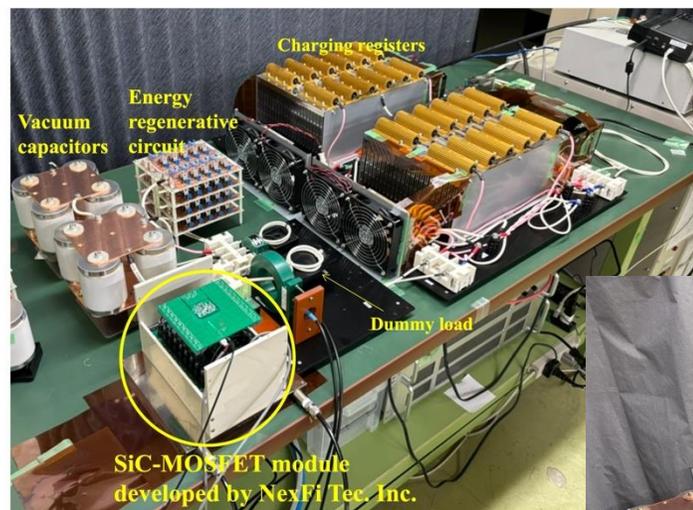
- 高速 (200 ns), 大電流 (500 A), 高安定性 (ピーク電流 $\pm 1\%$ , ジッター $< 300\text{ps}$ )  
高繰り返し (800 kHz)



2021



2022



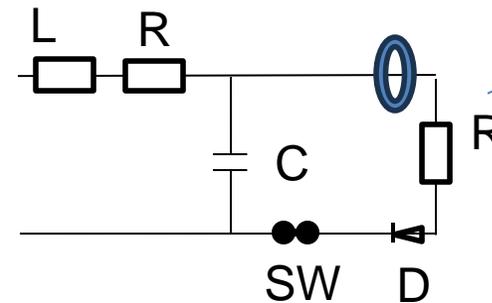
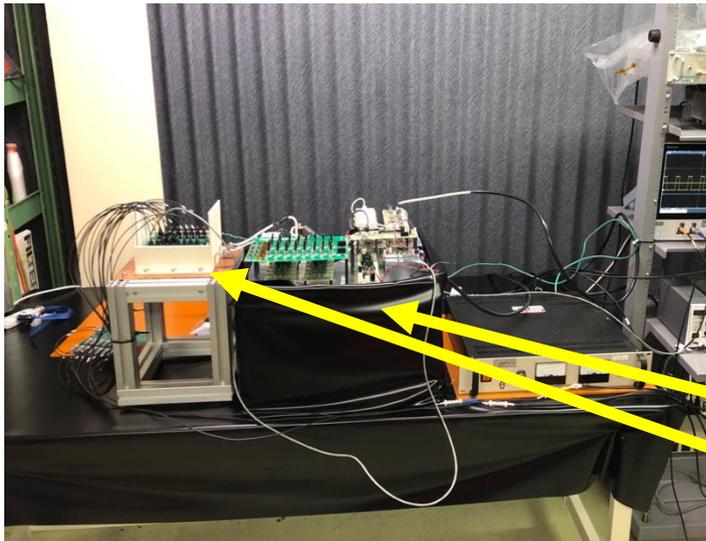
2023



2024

# パルス電源回路の理解

- 面白そうなので加速器電源製作へ飛び込んだものの全くの素人
- いきなり作れと言われても難しい
- 旧テスト機を使って遊んでみる



抵抗負荷



パルス電源テスト機 (developed by C. Mitsuda)  
SiCスイッチングモジュール 1号機

回路としては LR回路とLCR回路を組み合わせた出力になるだろうと予測. 以下の式通りに出力されると嬉しい

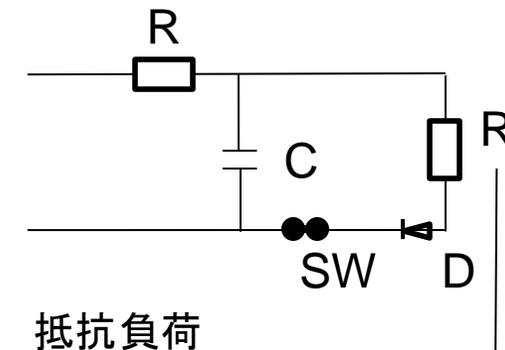
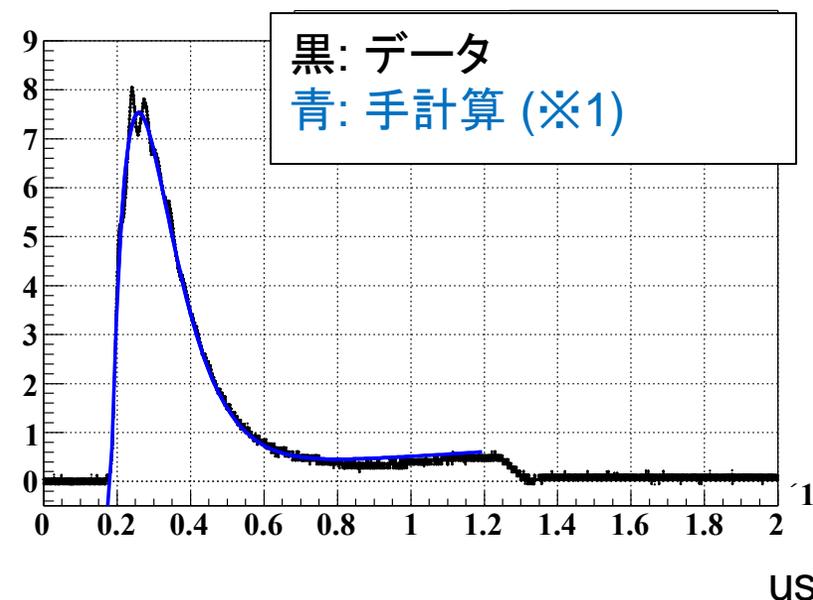
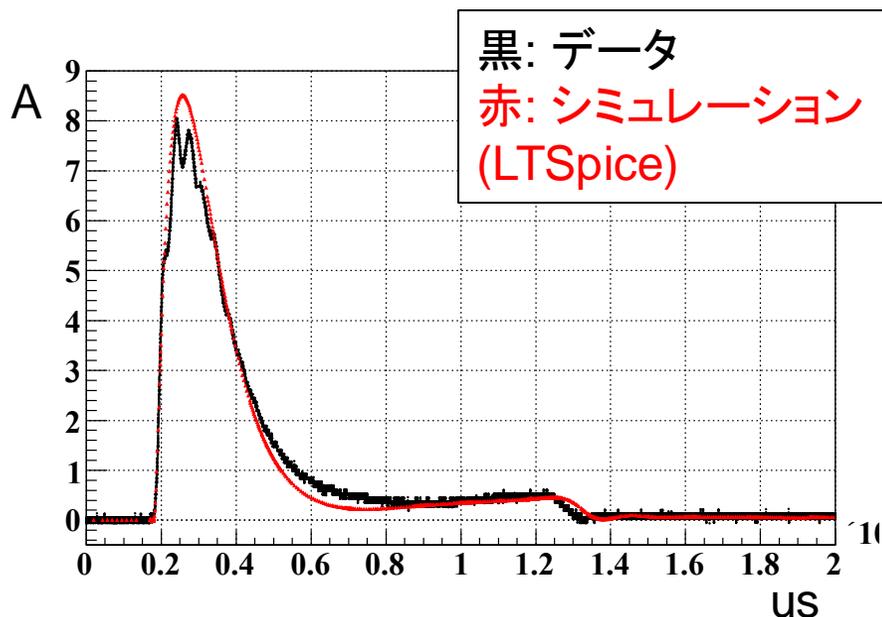
$$I(t) = \frac{V_{dc}}{L_2 \sqrt{\left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{L_2 C}}\right)^2}} e^{-\frac{R_2}{2L_2}t} \sinh\left(\sqrt{\left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{L_2 C}}\right)^2} t\right) + \frac{V_{dc}}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2}t}\right)$$

LCR回路

LR回路

# パルス電源回路の理解

- 使用した電源回路の理解のため出力をシミュレーションと手計算により比較



シミュレーションや手計算によりパルス電源出力が再現可能  
(狙った通りに獲物が動くとやはり楽しい...ということでハマリだす)

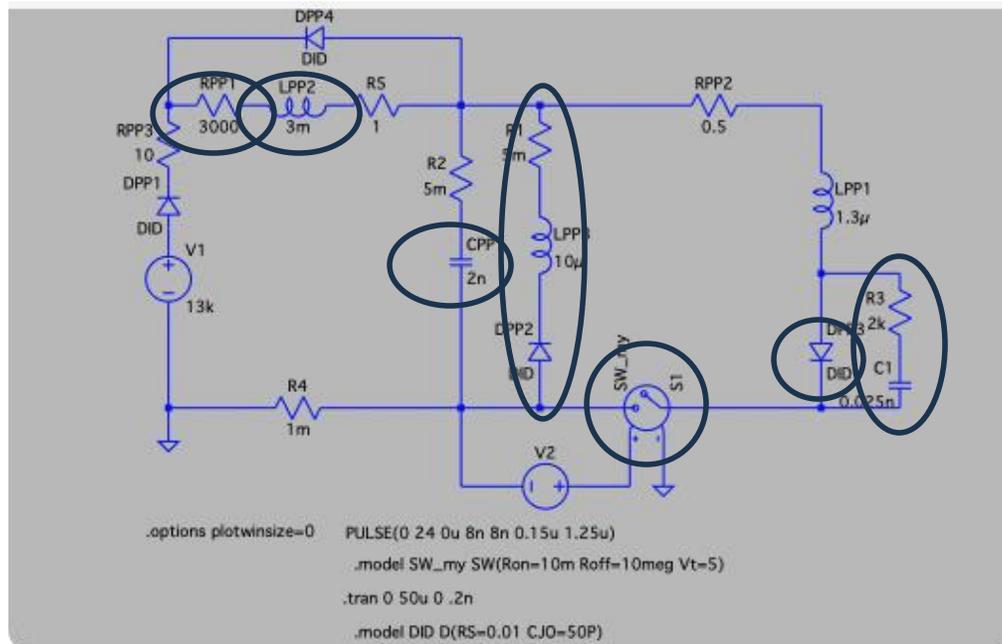
※1) CTで見える電流波形の計算式

$$I(t) = \frac{V_{dc}}{L_2 \sqrt{\left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{L_2 C}}\right)^2}} e^{-\frac{R_2}{2L_2} t} \sinh\left(\sqrt{\left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{L_2 C}}\right)^2} t\right) + \frac{V_{dc}}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} t}\right)$$

, where  $\left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{L_2 C}}\right)^2 > 0$

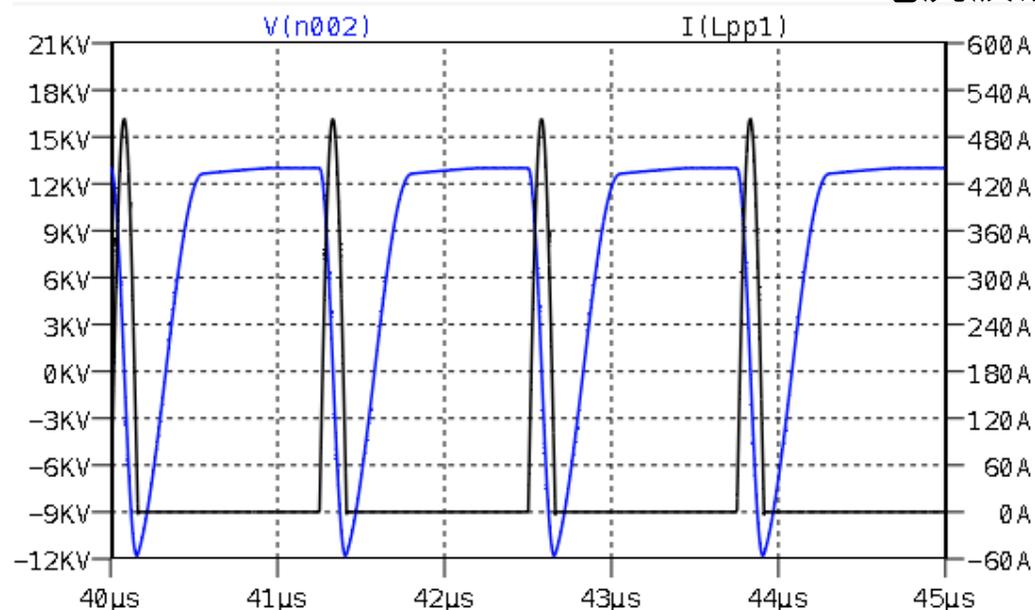
# 開発パラメータの決定

## LTSpiceによるシミュレーション



コンデンサ充電電圧波形

パルス電流波形



シミュレーション上は目標のパルスを発生可能と分かった  
ただし、ハードへの要求はかなり厳しい (この後いくつか紹介)

ピーク 500 A  
パルス幅 160 ns  
繰り返し 800 kHz  
充電電圧 13 kV

ちなみにシミュレーションは内藤さんにかなり助けて頂いている

# 1. SiC-MOSFETの電流透過能力

再掲

	サイラトロン (放電管)	半導体	
		MOSFET	IGBT
SW速度	○ (<数十 ns)	○ (<数十 ns)	× (~us)
高繰り返し	× (<100 Hz)	○ (> MHz)	× (< kHz)
耐圧 電流容量	○ (>数十 kV, 数十 kA)	△ (~1kV, ~100 A)	○△ (数kV, ~kA)
加速器電源	広く普及	展開中	

半導体素子の電圧・電流定格について

電圧: 絶縁耐圧が決まっており、超えると破壊 (守らないといけない)

電流: 熱容量で決まっている

→ パルス幅が短い場合は定格を超えることが可能?

(意外にも?) 安全動作領域外の挙動についてはよく調べられていない

並列数を減らせるとメリットはかなり大きい (価格、小型化、制御簡略化)

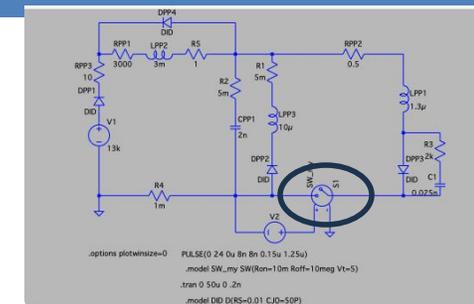
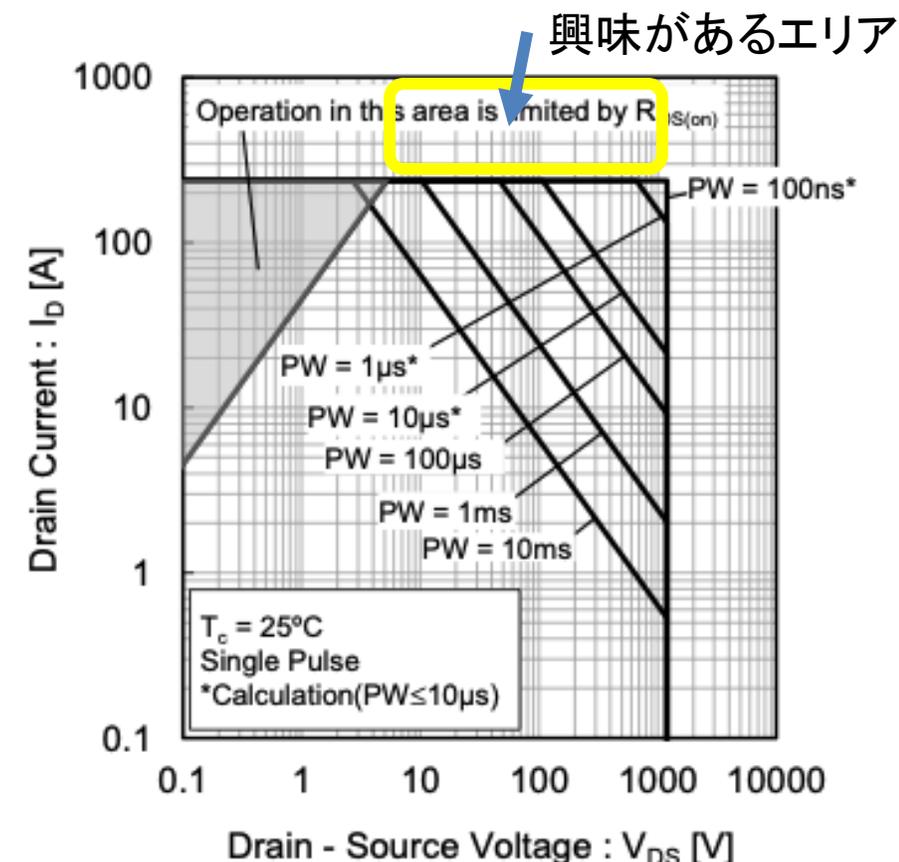
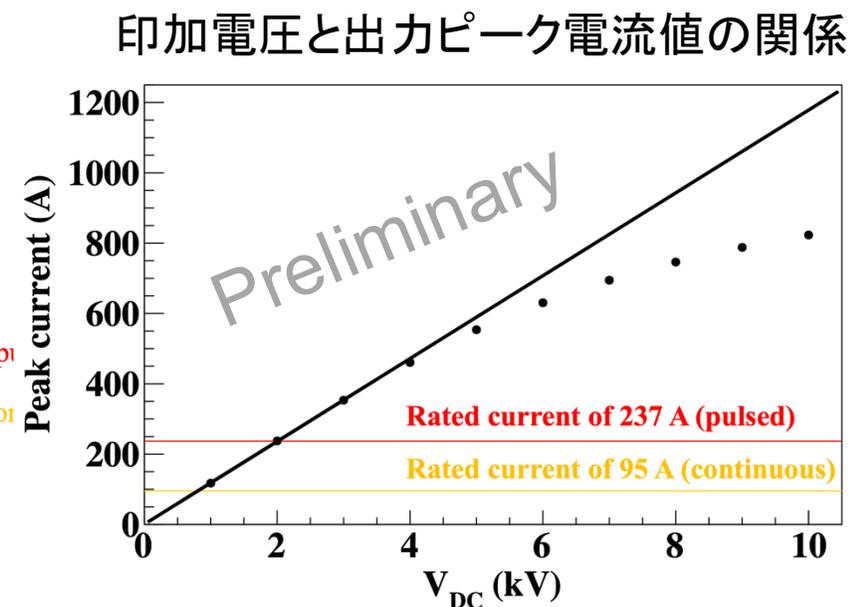
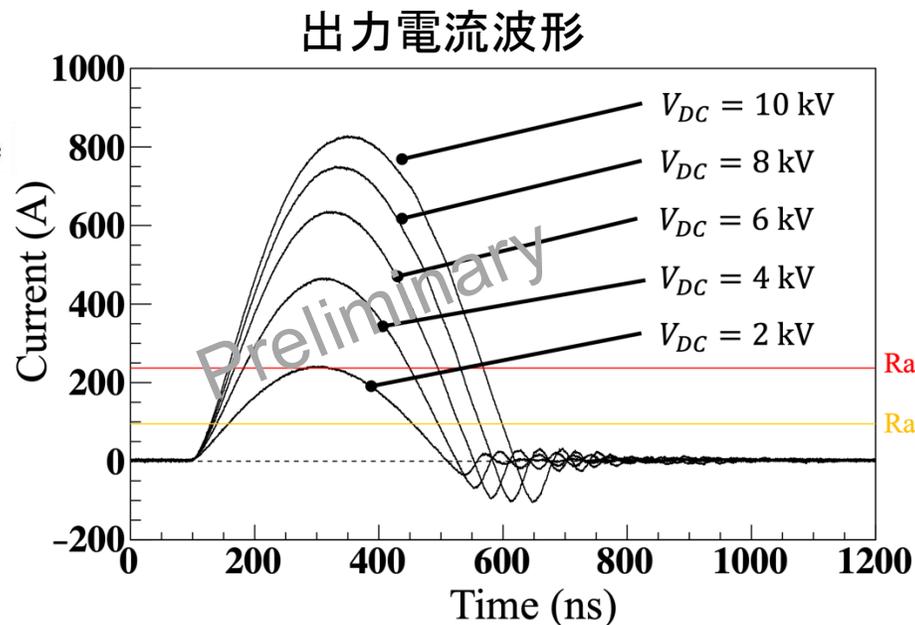
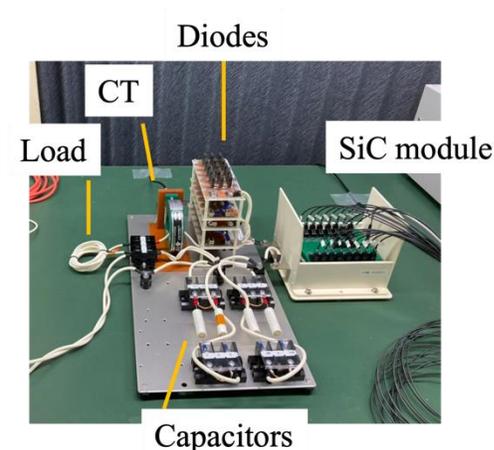


Fig.2 Maximum Safe Operating Area



# 1. SiC-MOSFETの電流透過能力



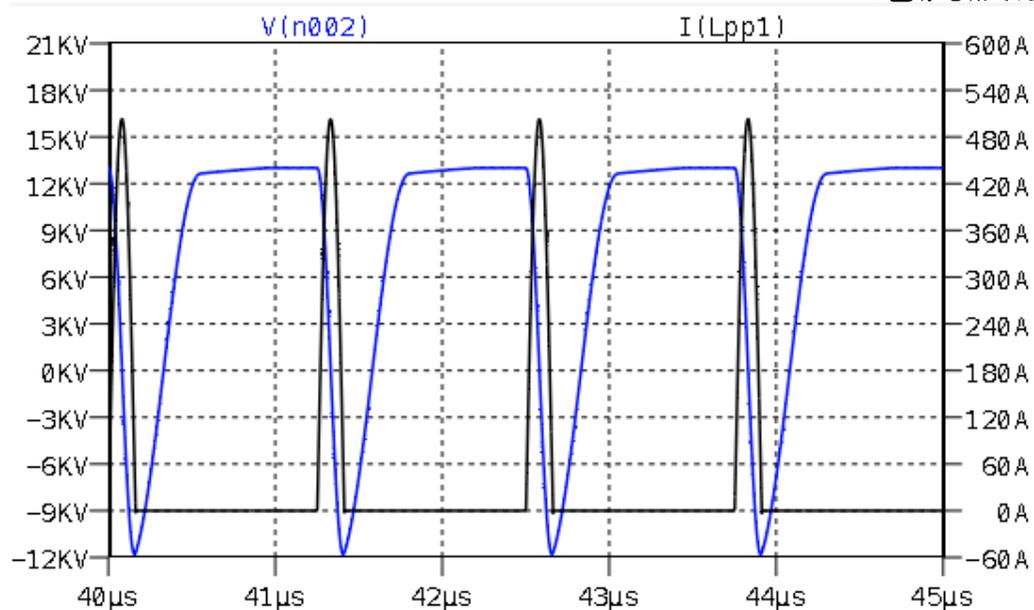
短パルスであれば定格を余裕に超えることが可能と判明. 定格の3倍以上  
 → 大電流用途には向いていないと思われたMOSFETも (加速器用途では) 十分使用  
 可能であると分かった.

最大出力と出力特性について論文化 (NIMに投稿中)

## 2. 充放電コンデンサの開発

コンデンサ充電電圧波形

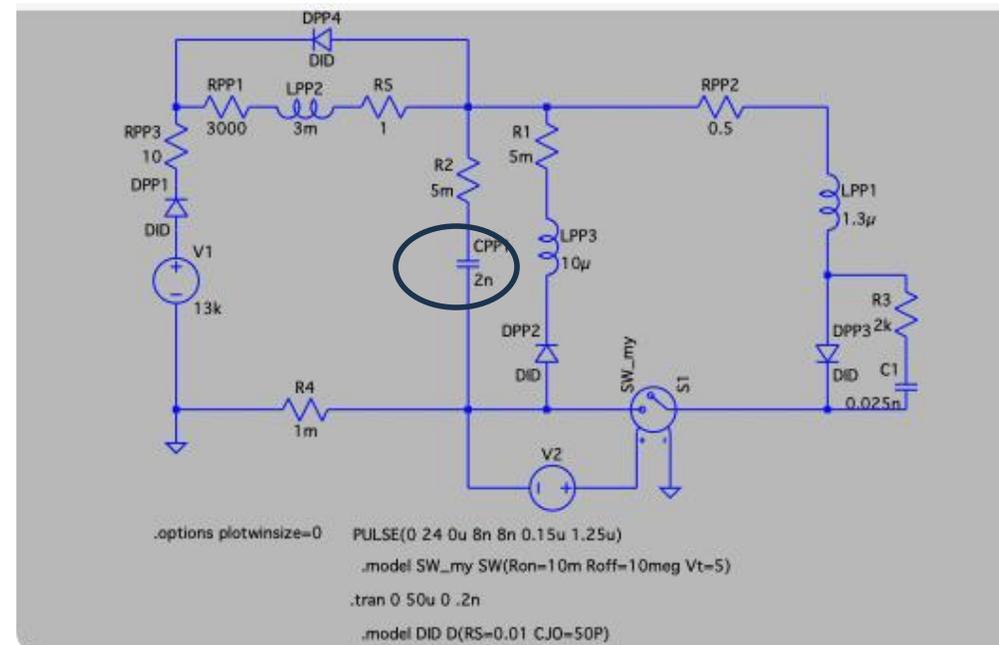
パルス電流波形



充電電圧 (V) 13 kV

電流 ピーク 500 A, 平均 40 Arms

繰り返し(f) 800 kHz



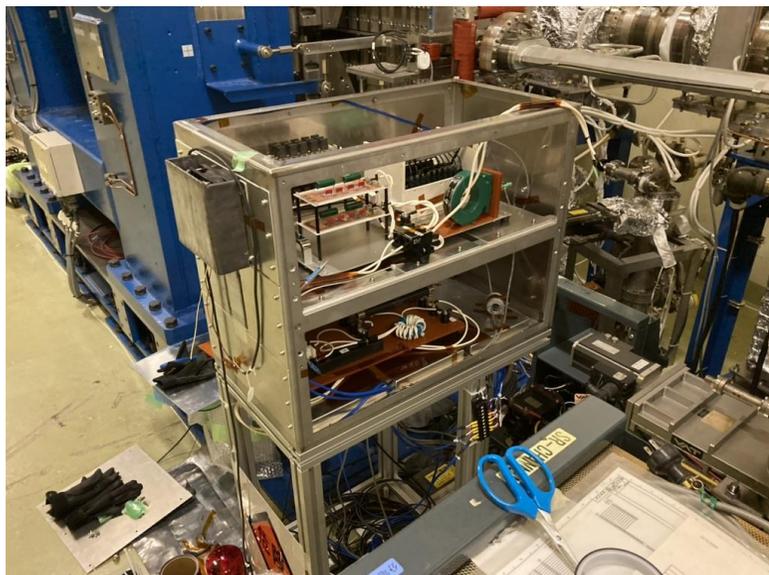
充放電エネルギー:  $E = \frac{1}{2} CV^2 f = 135 \text{ kW}$

SW回数 (例えば 800 kHzで1日運転): 70e9回

低損失で膨大なSW数でも劣化しない  
高電圧コンデンサが必要

# ダメだった例; 長期耐久試験

パルス電源本体



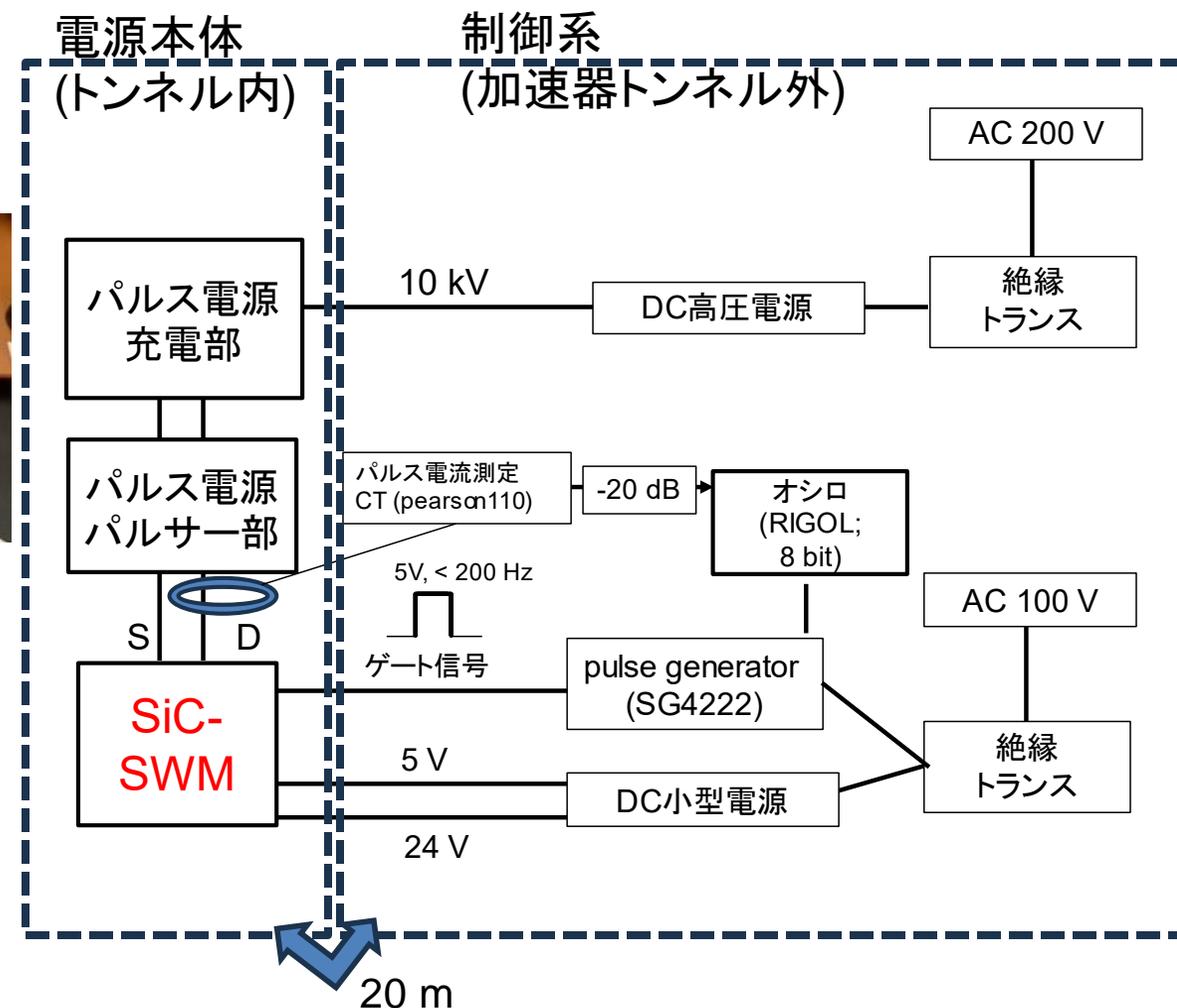
フィルムコンデンサ



16 kV耐圧  
特徴: 温度特性が良い

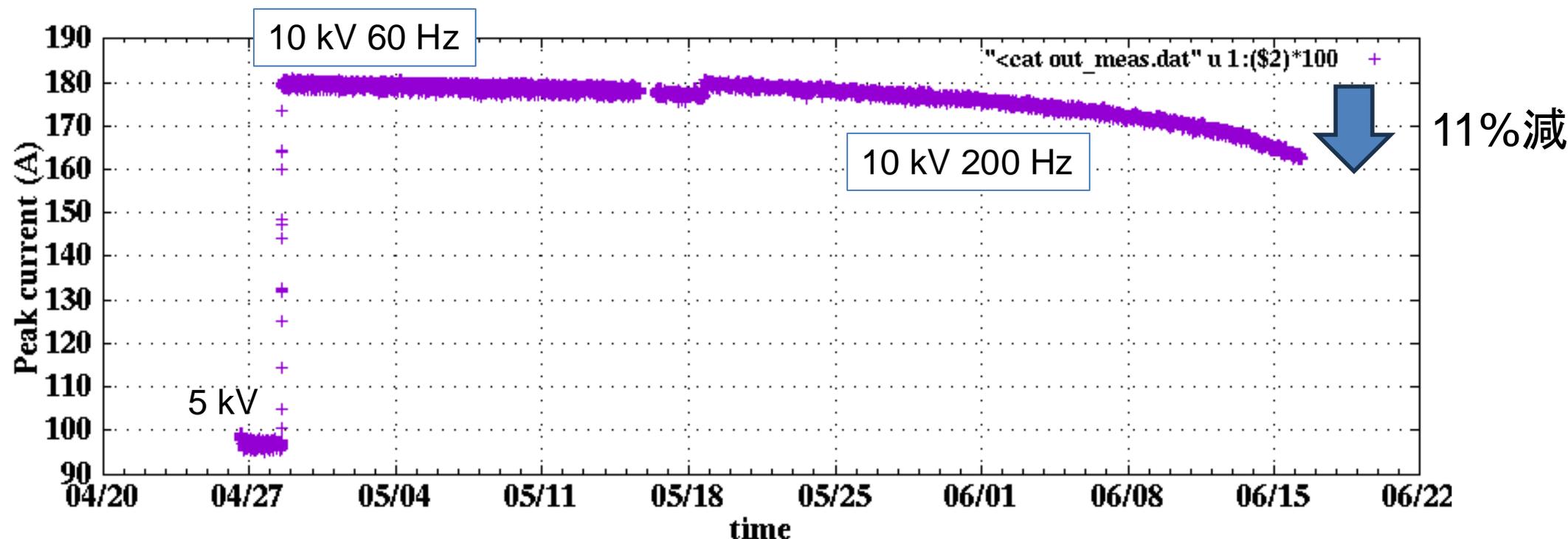
2023 4-6月にかけて長期試験を実施

- 加速器リング近傍で実施
- 電源はシールドボックスで遮蔽 (電子加速器はハドロン加速器と比べると遮蔽はだいぶ楽)



# 長期運用による出力減少

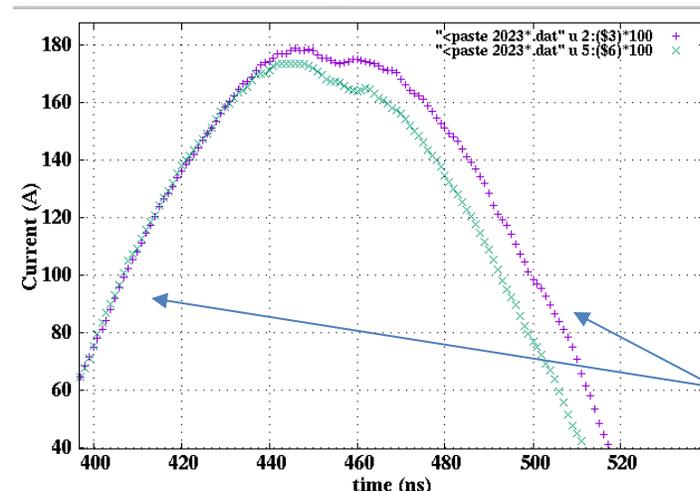
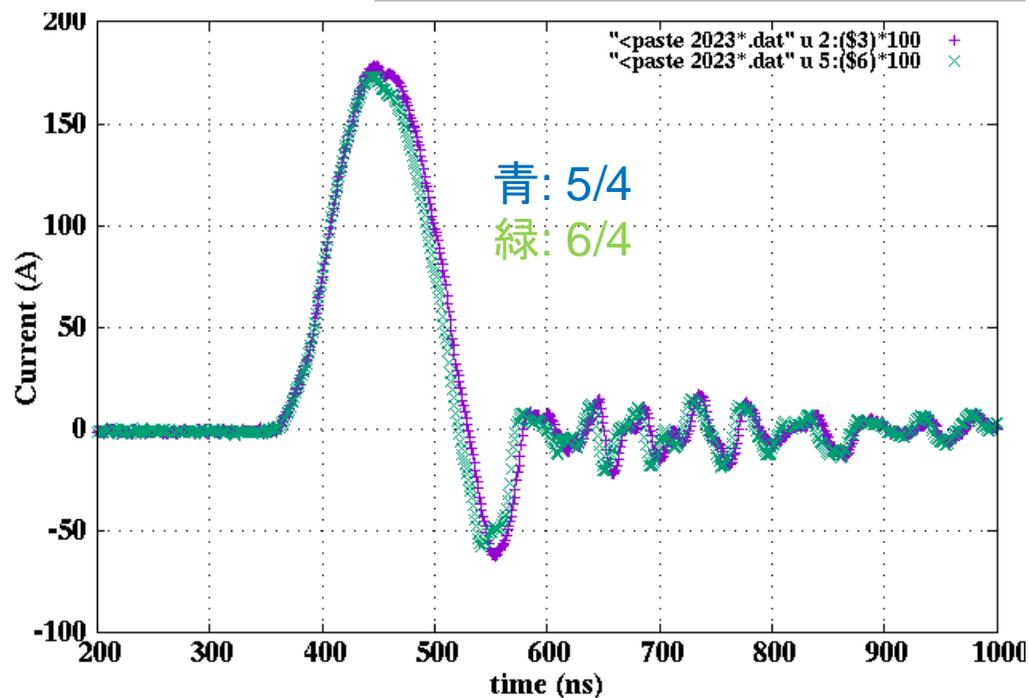
パルス電源2ヶ月長期試験におけるピーク電流推移



- 2ヶ月間の連続試験
  - 総スイッチング回数:  $0.9 \times 10^9$  回
  - 出力電流の低下を確認 最終的には11%減

# ピーク電流値減少の原因

パルス出力波形



立ち上がりは変わらず、  
ピーク付近から大きく変化

$$W = \pi\sqrt{LC}$$

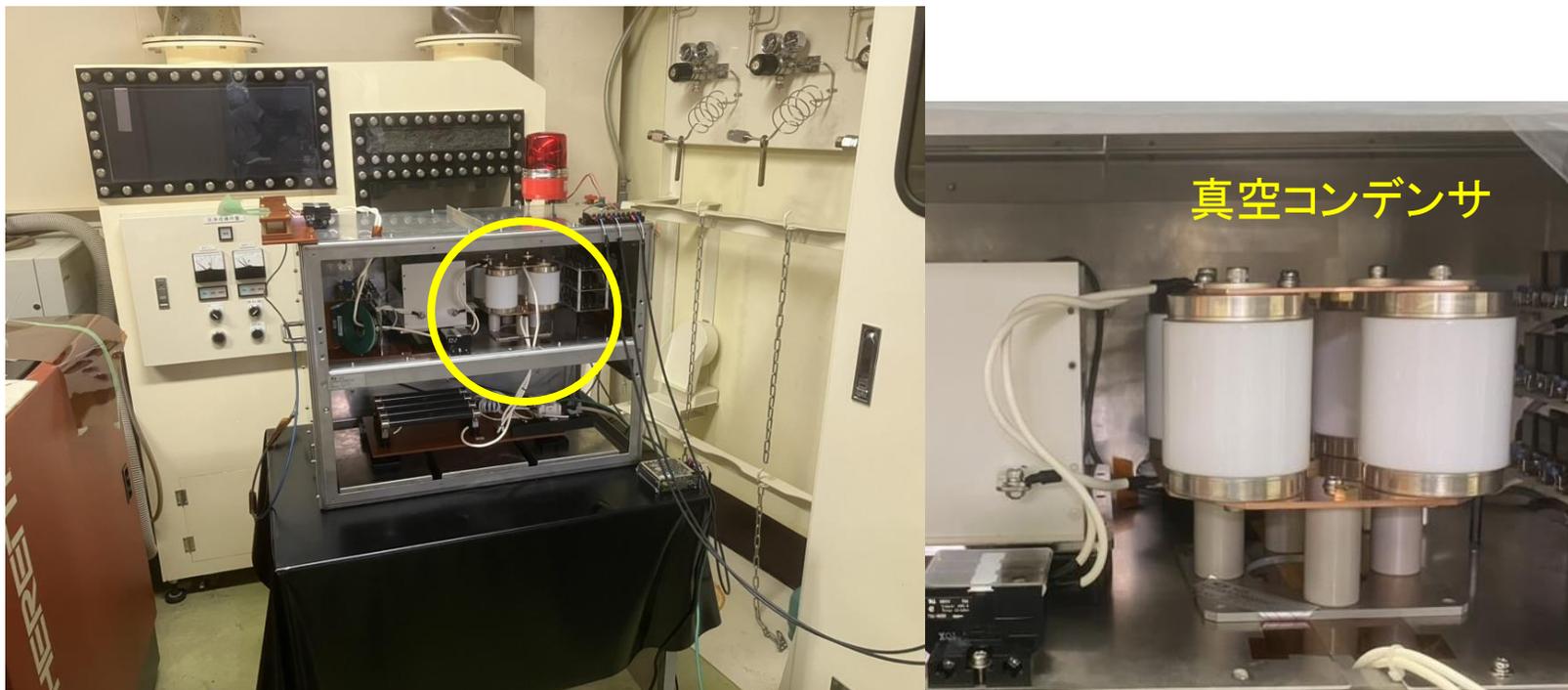
$$I_{peak} = \sqrt{\frac{C}{L}} V_{DC} \quad \text{パルス電流: } I(t) = V_{DC} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)$$

傾き:  $V/L$  (Cの変化によらない)

- 波形の比較から問題は**コンデンサの容量劣化**と推定
- 運転終了後に容量を確認
  - コンデンサ容量が  $\times 3/4$  に  $\rightarrow$  波高 ( $\sqrt{3/4} \sim \times 0.87$ ) なのでコンシステント高繰り返し化には性能向上が必須

# 真空コンデンサの導入

(たまたま)見つけた”真空コンデンサ”



見つけた瞬間いけると確信  
真空コンデンサ (250 pF) 4並列にした特注コンデンサバンクを製作  
→ 長期試験で耐久性を確認

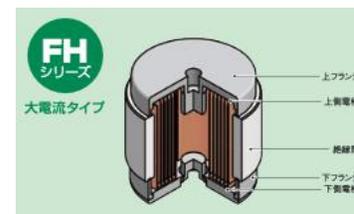
真空コンデンサ  
誘電体のない電極間が真空の  
コンデンサ

メリット:

- 真空により絶縁 (21kV耐圧)
- 熱損失は電極のみ  
→ 許容電流が高い(350 Arms)

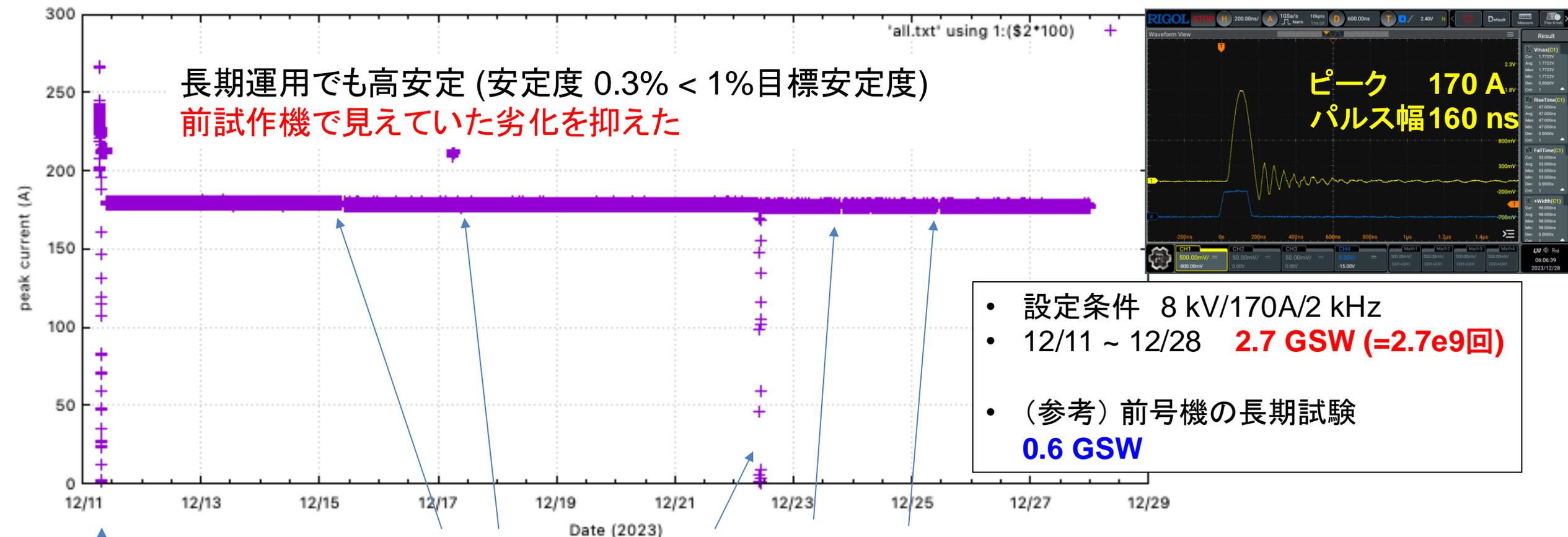
デメリット:

- 誘電体がないため大容量用途には向いていない (< 数nF)  
**ただし、今回は 1~2 nFで良くデメリットにならない**



明電舎

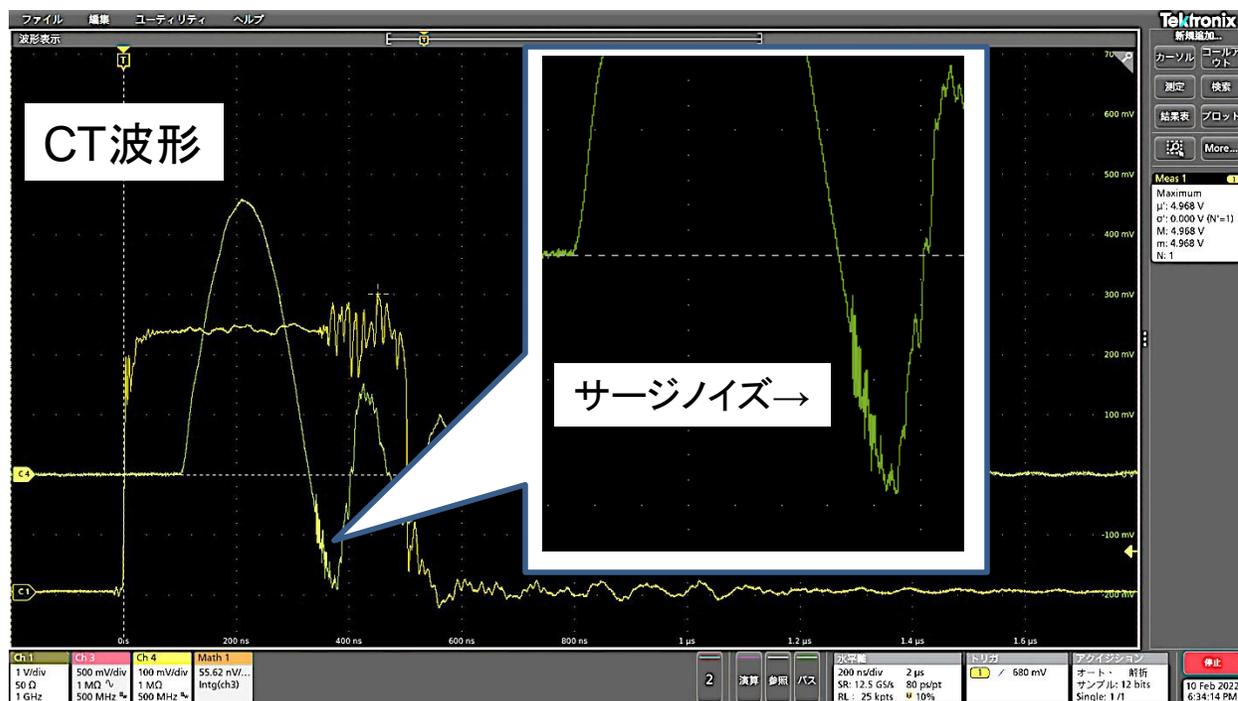
# 真空コンデンサ搭載機の長期試験



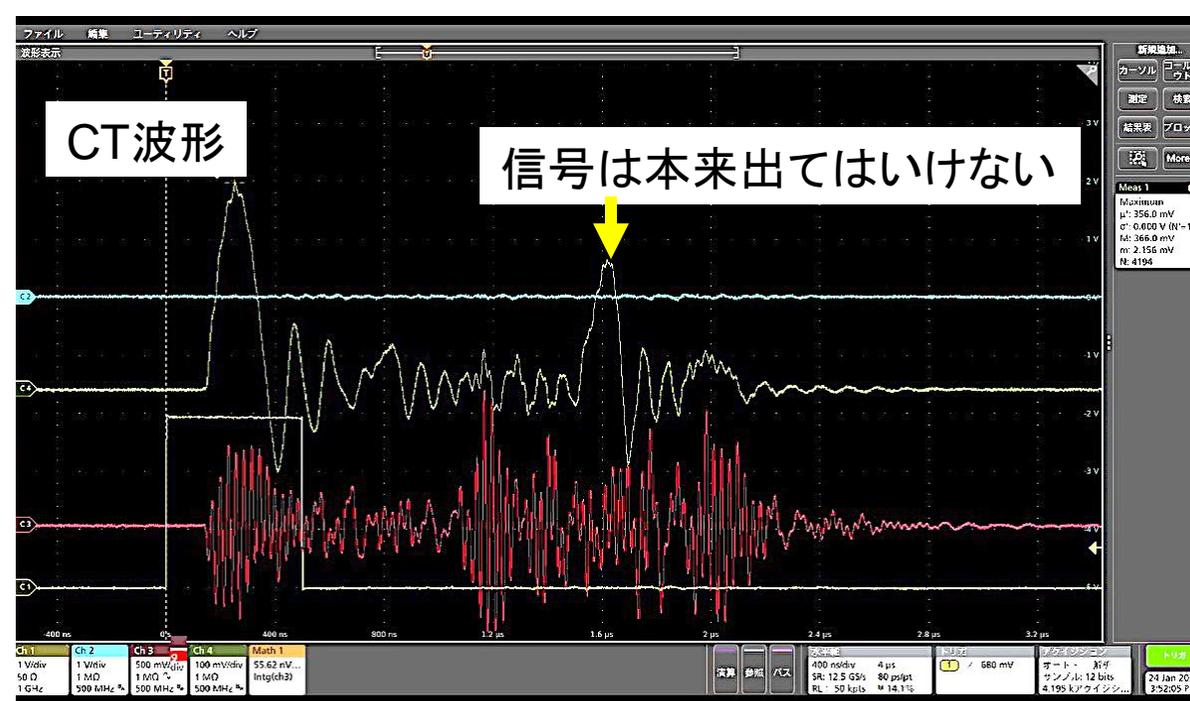
### 3. 他にも...(開発中の苦労話はたくさんあるが)

- 試作パルス電源の動作試験; 当初は上手く動作せず
  - サージノイズ重畳やスイッチの誤点弧が起きるといった問題

サージノイズ重畳



スイッチの誤点弧



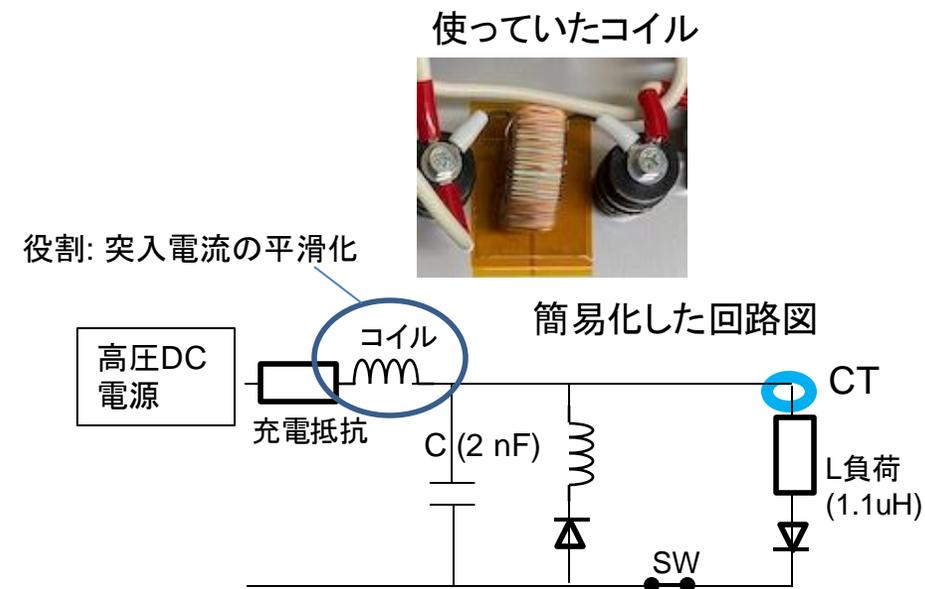
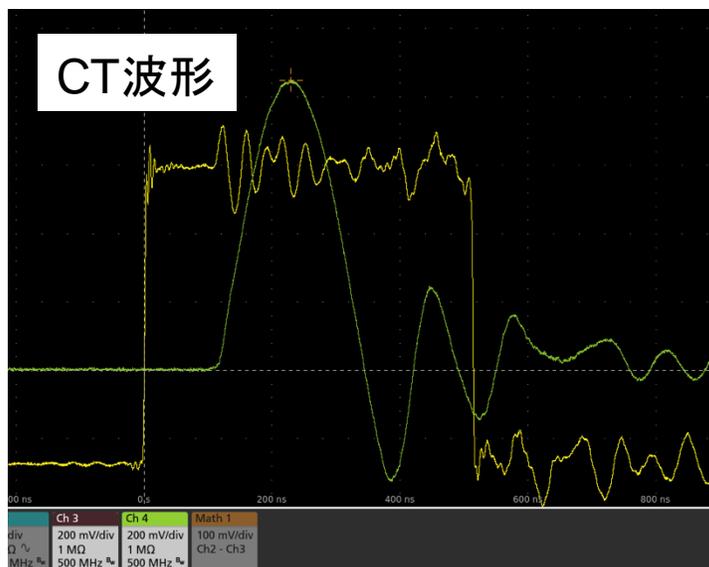
次ページで紹介

誤点弧はGNDの取り回しやゲート信号を改善することで解消

# トラブルシューティング例

## 原因: 電流平滑化用コイル

- モジュール化により問題の切り分けは容易
- 導線の巻きが緩くローレンツ力による振動、部分放電が大きいと疑う
  - コイルを接着剤で固める
  - シリコン高圧ケーブルで固く巻いたコイルを自作

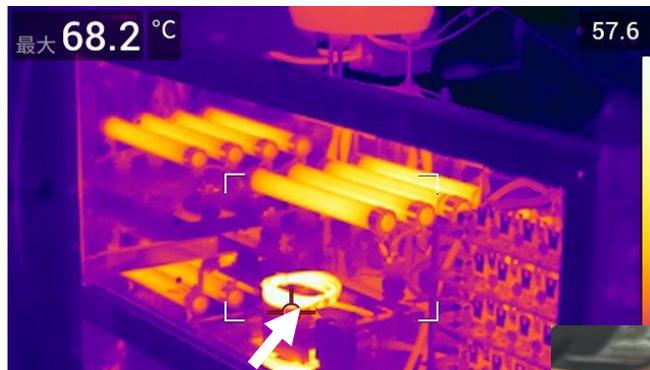


作成したコイル



回路図にはないノウハウ

### 発熱改善



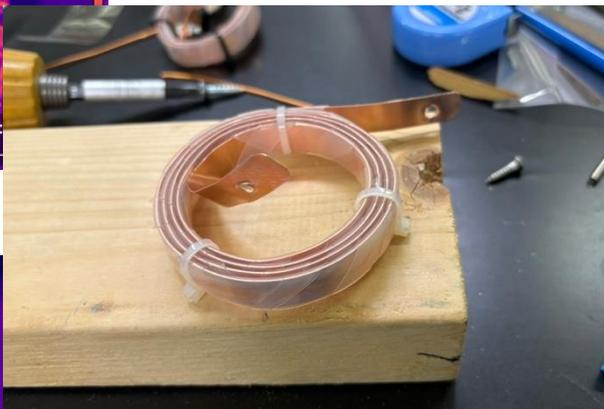
回生コイル~70°C



回生コイル~30°C

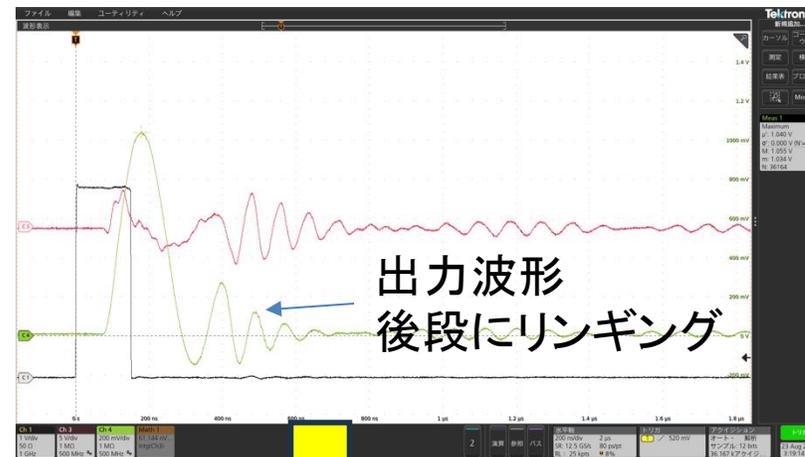


### 自作コイルで発熱改善

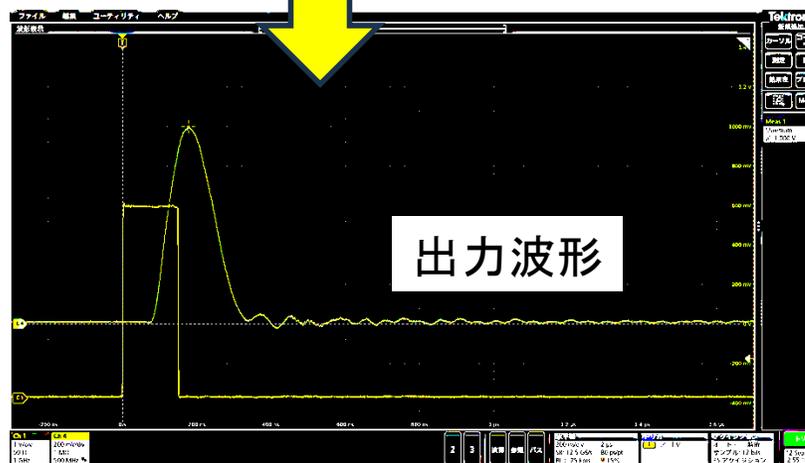


銅バー (w: 12 mm,  
t: 0.3 mm)  
で空芯コイルを製作  
4 turn, 1.2 uH  
自己融着シリコン  
シーンを巻いて絶縁

### リングング抑制

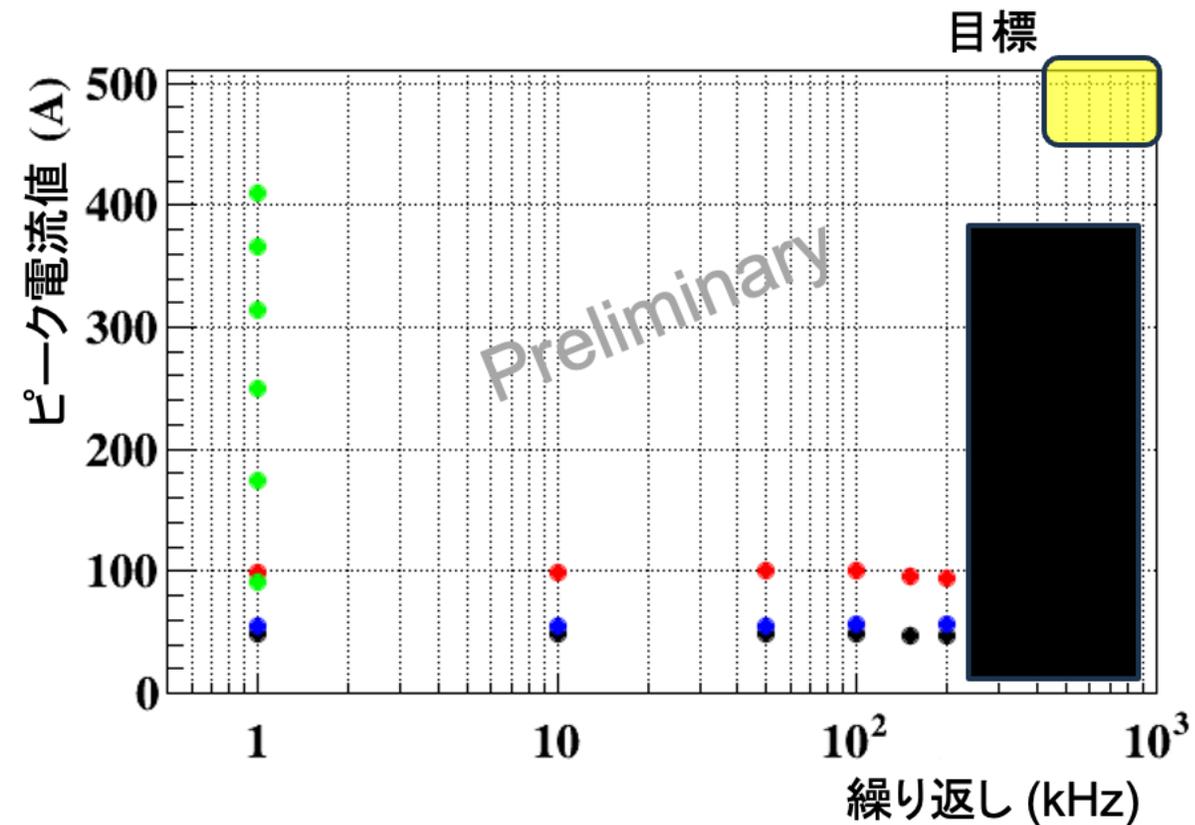
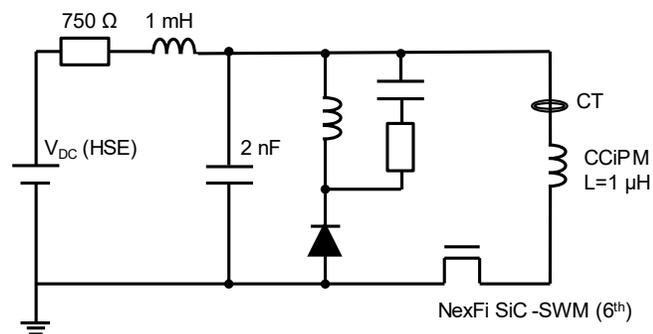


回路パラメータ  
調整でリングン  
グを抑制



## 一つずつ着実に解決

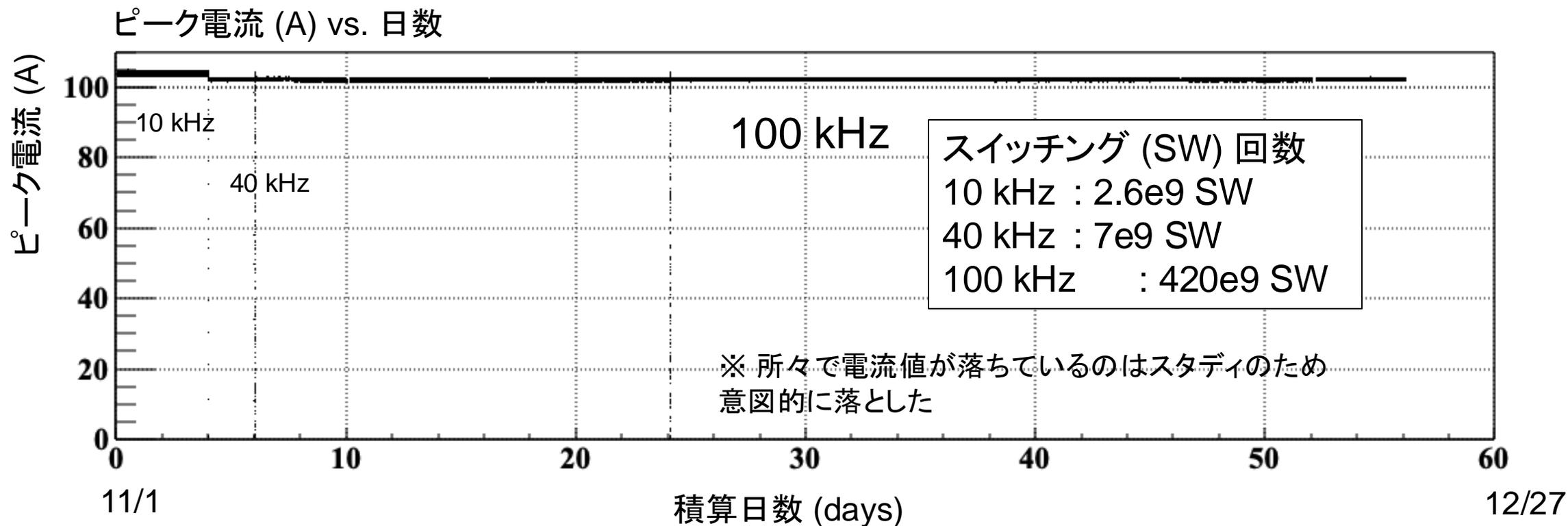
# 最新機の性能評価



- 低繰り返しでは大電流スイッチング (420 A) を達成
  - 低電流 (100 A) では100 kHzの大台に突入中
- 大電流&高繰り返し両立を目指して改良中

# 最新機の長期安定度

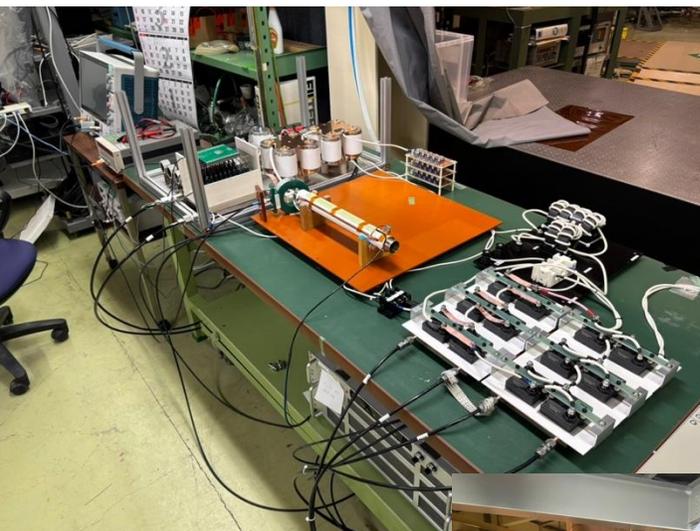
2ヶ月の間 100 kHzにてパルス電源を連続通電



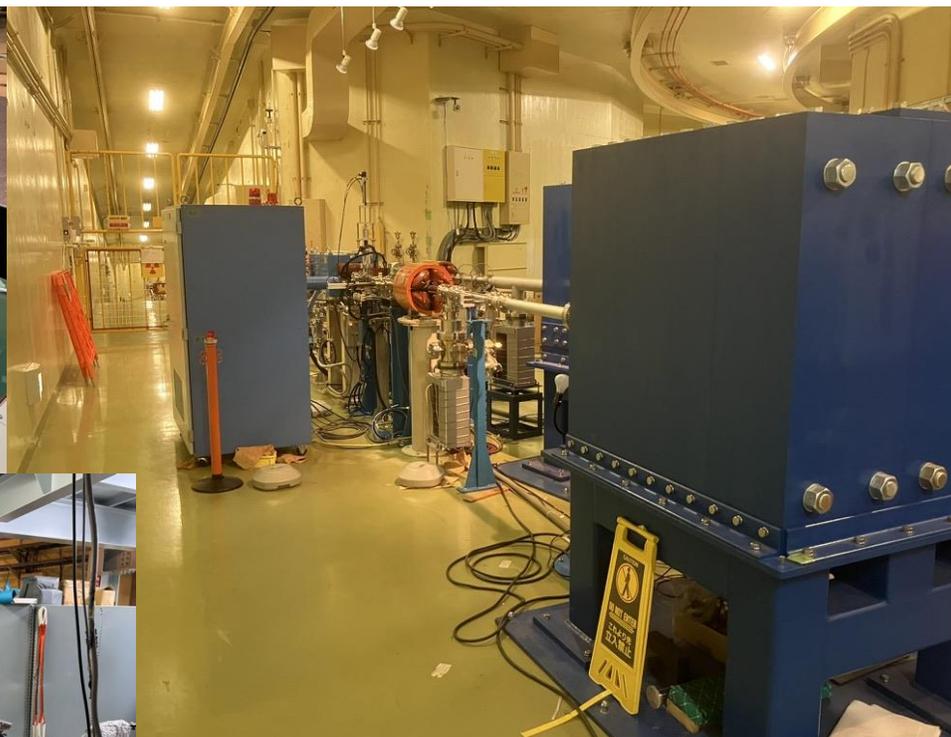
総SW回数: 4300億回 (例: 100 Hzで運転する場合, 約130年分の繰り返し数) → **高耐久パルス電源の実現**  
2ヶ月を通して目標を達成する安定度: 0.14% (< 1%)

# 今後の展開

800 kHz機の製作



KEK-PFダンプラインでのビーム試験



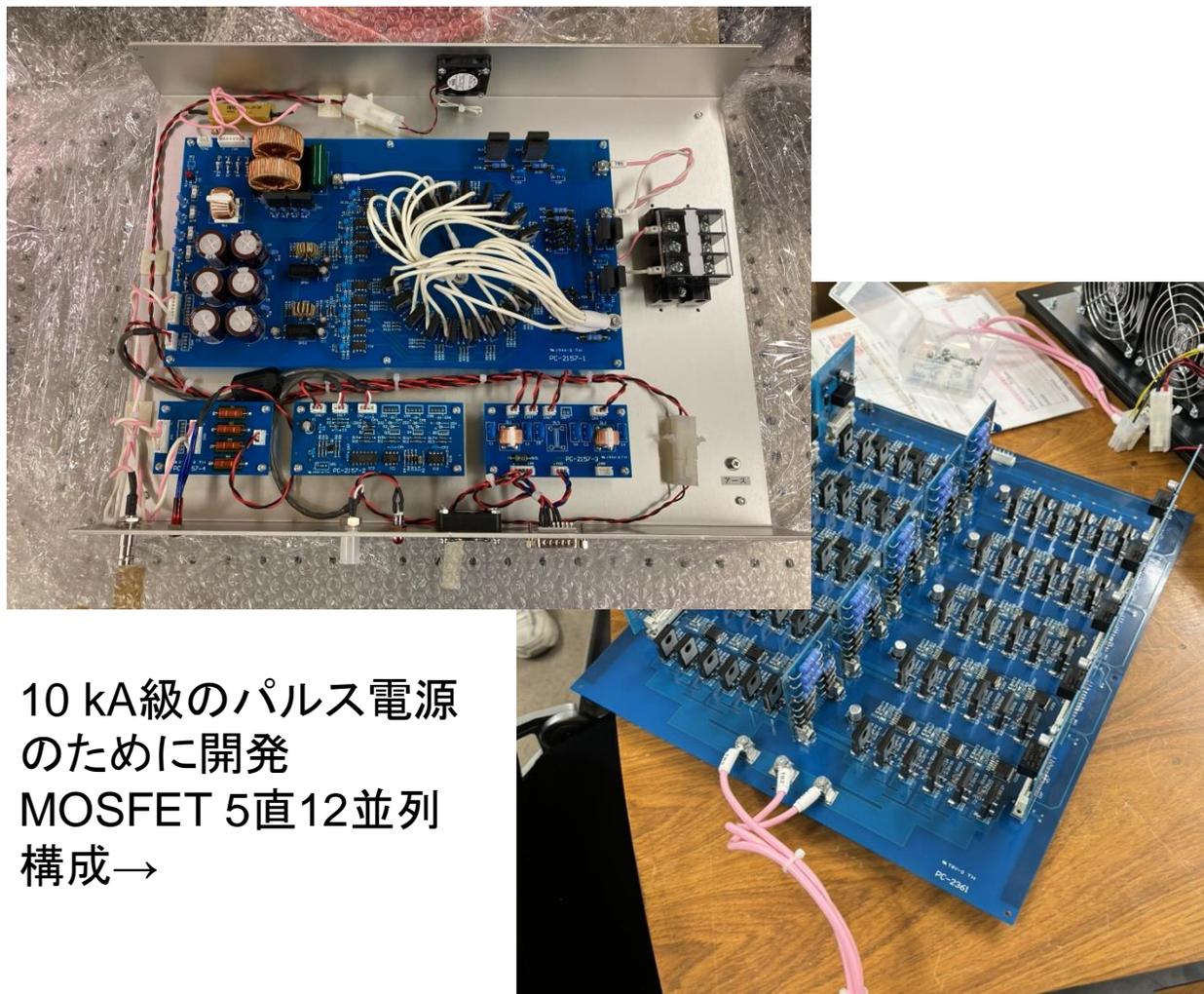
実戦投入目指す



高速キッカーシステムの完成に向けて整備中

# その他展開

## KEK製 SiCスイッチングモジュール開発



10 kA級のパルス電源  
のために開発  
MOSFET 5直12並列  
構成→

## Linac-SuperKEKB用パルス電源



Pulse PS module

T. Kamitani, et al.

## キッカー磁場測定



本プロジェクトで開発が  
進んだSiC半導体モ  
ジュールがSuperKEKB  
運転にすでに実戦投入  
されている

# まとめ

- KEK-PF 高速パルスキッカーのためのSiC半導体を用いた高速パルス電源の開発を進めている
  - 開発目標: 高速 (200 ns), 大電流 (500 A), 高安定性 (ピーク電流 $\pm 1\%$ , ジッター $< 300\text{ps}$ ), 高繰り返し (800 kHz)
  - 100 kHzを超える繰り返し領域達成 $\rightarrow$  半導体でしかなし得ない領域に突入中
  - かなりニッチに思われる開発だが電源技術はほぼ全ての基盤、波及効果も大きい $\rightarrow$  完成すれば応用展開が可能 (すでにLinacで運用中)

素核実験でもそうだが、加速器の性能が物理結果に直結 (ビームパワー, ビーム平坦度等). 学生さんが持っているハード/ソフトの技術と研究への考え方は世界的に見ても非常に高度. 加速器分野でその貴重な才能を活かしてみないでしょうか.

ハード研究をやったことがなくても気後れする必要は全くない  
私自身も学生時代ハード研究がメインという訳ではなかった!

END

---