

放射光源加速器の 入射パルス電磁石電源

篠原 智史

KEK 加速器研究施設, 第六研究系, 第六グループ

2025/09/05



はじめに

- 本講義では「パルス電磁石電源」について解説
 - おそらく、あまりなじみがない分野ではないだろうか
 - パルス電源の規模間、どういうオーダーのものを扱っているかを中心にお伝えする
- 前半では電子蓄積リング入射キッカー用のパルス電源を例に
 - どのようなパルス電流が必要か？
 - 電源パラメータ設定をどのように考えるべきか？
を計算を中心に解説する
- 後半ではKEK-PFで進めている半導体パルス電源を例に製作上必要な要素を紹介

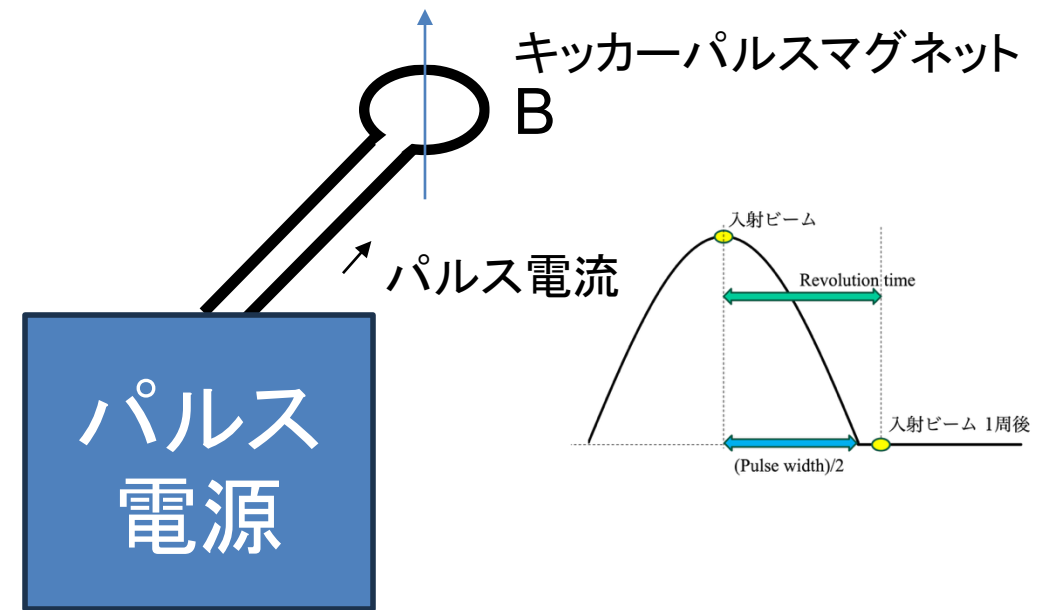
パルス電源とは

- ・ マグネットなどの負荷に電圧・電流をパルスの的に流す電源 (↔ DC電源)

PF入射用キッカーパルス電源 (パルサー一部)



4.5 kA, 15 kVパルス電源群 (の一部)



KEKのパルス電源例

PF入射用キッカーパルス電源 (パルサー一部)



4.5 kA, 15 kVパルス電源

PF-AR入射用キッカーパルス電源



3.5 kA, 45 kV

PF/PF-AR 振り分けベンド用パルス電源 (入射用ではないが)



32 kA, 5 kV

パルス電源の特徴: **数kA, 数十kV級**

新幹線
単相交流 25 kV



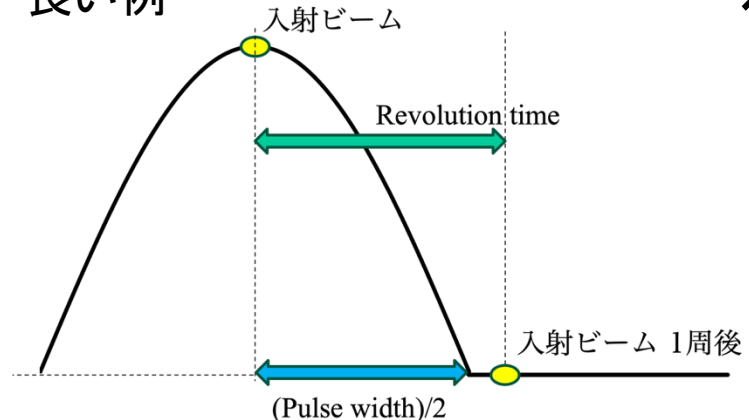
なぜ大電流パルス・高電圧が必要か？

なぜパルスか？

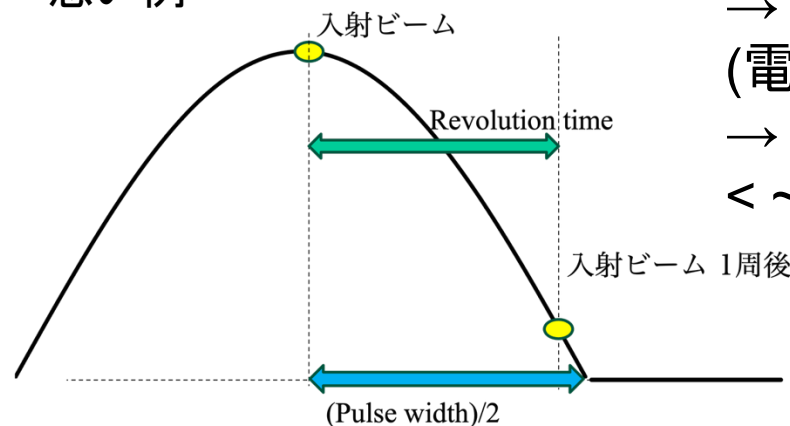
- 入射用パルス電源の代表として
 - 入射キッカー電磁石電源
 - セプタム電磁石電源
 (入射システムについては前講義を参照)

例: PF入射キッカー用電源
電子ビームの運用形態から欲しいパルスが決まる

○ 良い例



× 悪い例



例: PF周長: 187 m

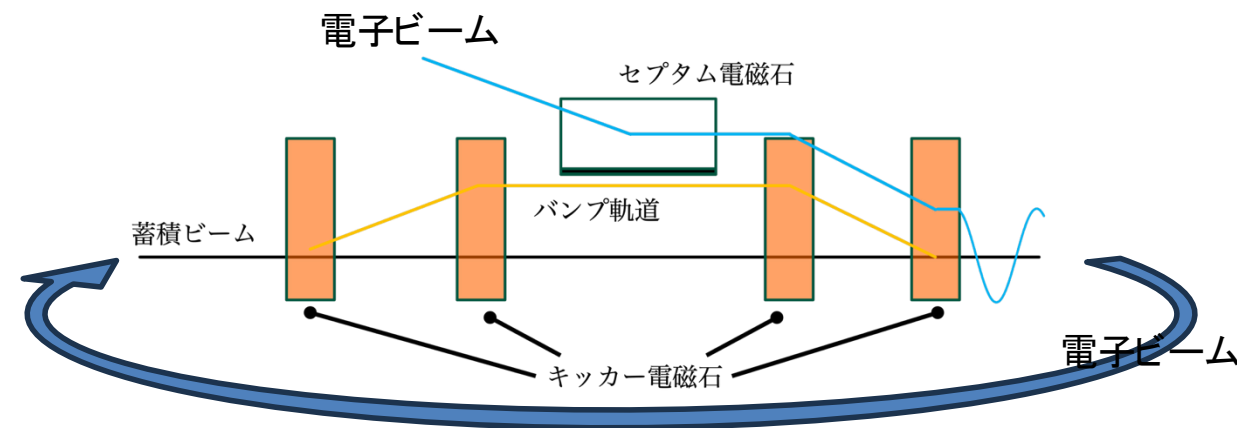
→ revolution time

(電子のリング周回時間): ~ 620 ns

→ 求められるパルス幅

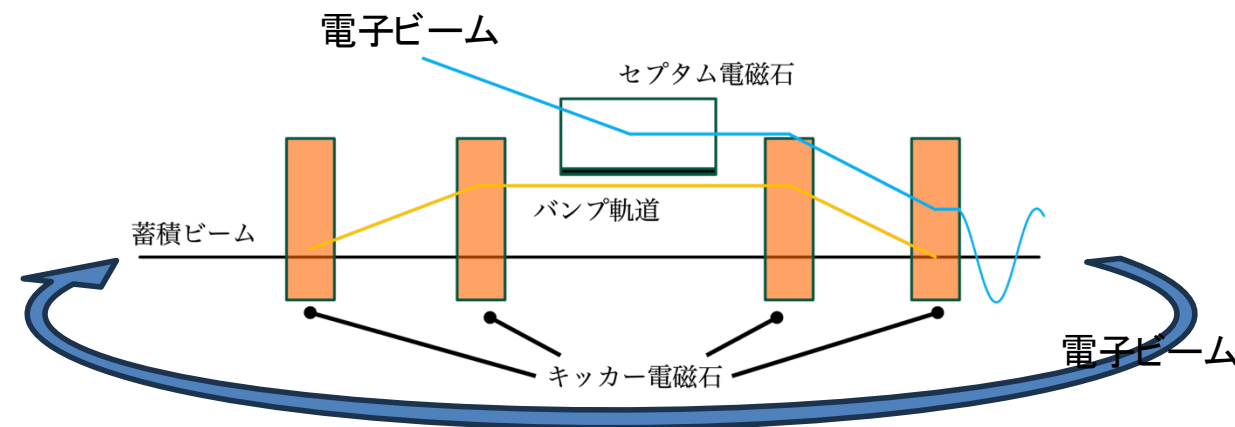
$< \sim 1.2$ μ s

DCではなく、**パルス**
キッカー電磁石の場合、
幅は **μ sオーダー** (周回時間の
倍以下)



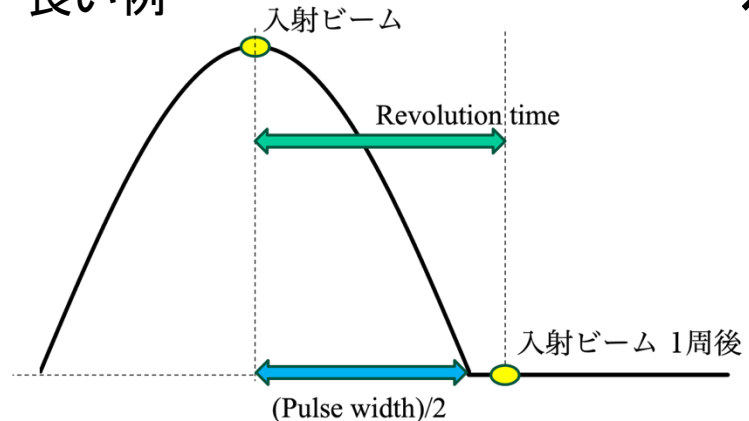
なぜパルスか？

- 入射システムについては前講義を参照
- 入射用パルス電源の代表として
 - キッカー電磁石電源
 - セプタム電磁石電源

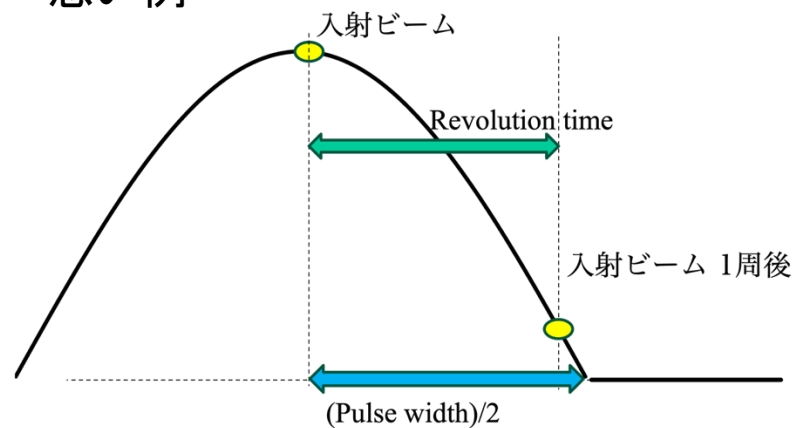


例: PF入射キッカー用電源では電子ビームの運用形態から決まる

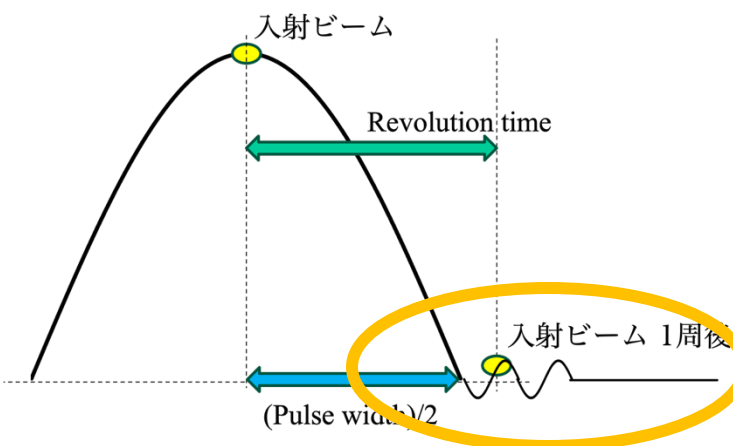
○ 良い例



× 悪い例



他、悪い例



なぜ大電流か？

・ビーム運用形態 + 電磁石からの要請で決まる

- ビームから決まる量 (運動量 p , 蹴り角 θ) と電磁石 (磁場 B , 磁石長 ℓ) との関係

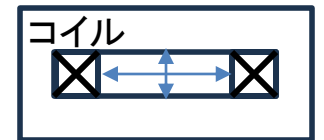
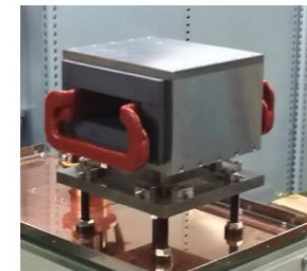
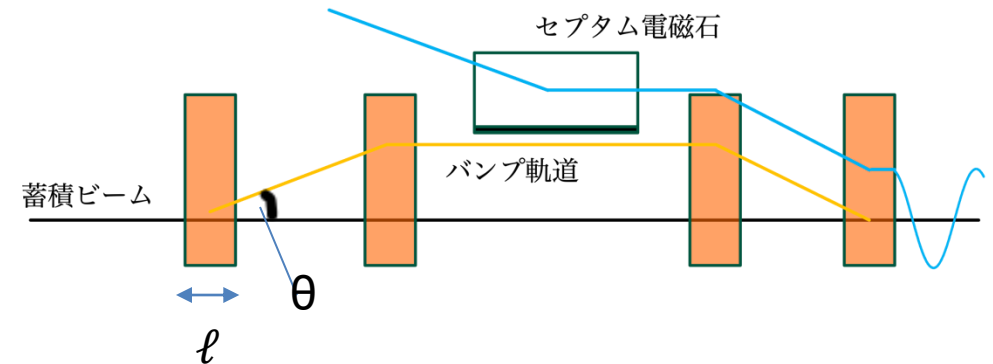
$$B\ell [Tm] = \frac{p\theta}{0.3}$$

- 電磁石から決まる量 (コイルターン数 n , コイル面積 S , ギャップ長 h) 真空中の透磁率 μ_0 から電流量 I , と電磁石インダクタンス L は

$$B [T] = \frac{\mu_0 n I}{h} \Leftrightarrow n I [A \cdot \text{turn}] = \frac{B h}{\mu_0}, \quad L [H] = \frac{\mu_0 n^2 S}{h}$$

ex)

p [GeV/c]	θ [mrad]	ℓ [m]	h [mm]	w [mm]	B [T]	nI [A·turn]	L [uH] (@ $n=1$)
2.5	4	0.4	60	170	0.08	4000	1.4



ギャップ長 h , 幅 w

キッカー電磁石 [14]

➡ **パルス電源の設計では μH 程度の負荷に数 kA 級の電流を流すことを考える**
 ターン数と高速性はトレードオフ (後述), n は大体 1, 2 巻程度

パルス電源の種類と特徴

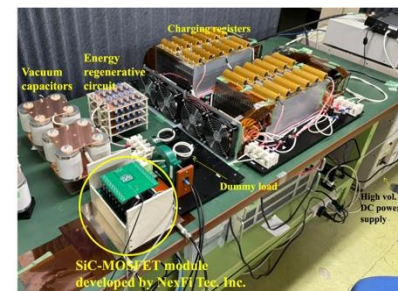
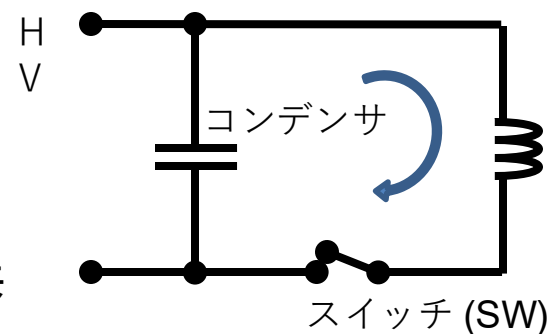
・パルス発生原理

- エネルギーを貯めて、スイッチの切替で放出

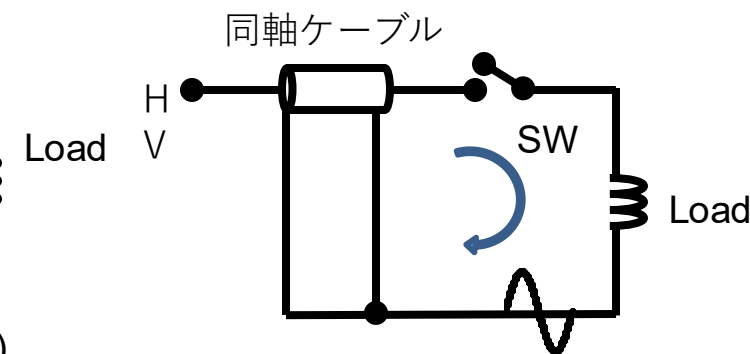
・回路方式

- 集中定数型 (LC共振回路など)
 - 電磁石負荷 (L)と充放電コンデンサ (C)でLC共振. 正弦波を発生
 - メリット/デメリット: 回路構成がシンプル. 小型(にしないといけない) = キッカー近傍に設置 (加速器トンネル内), 放射線耐性必要
- 分布定数型 (伝送線型回路など)
 - 特性Zを合わせて伝送線も含めエネルギー伝達. 波形整形可能
 - メリット/デメリット: 矩形波 (フラットトップ) を作れる (↔ 矩形端の制御に難). 同軸ケーブルを長くできトンネル外に設置可能(↔ 長ケーブルにより電源巨大化)

LC共振回路



伝送線型回路



パルス電源の種類と特徴

・パルス発生原理

- エネルギーを貯めて、スイッチの切替で放出

・回路方式

今回説明

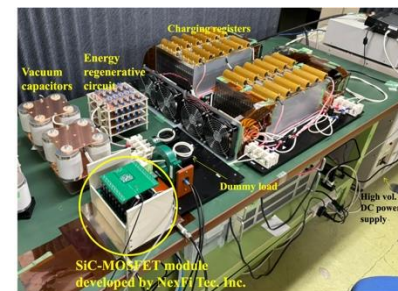
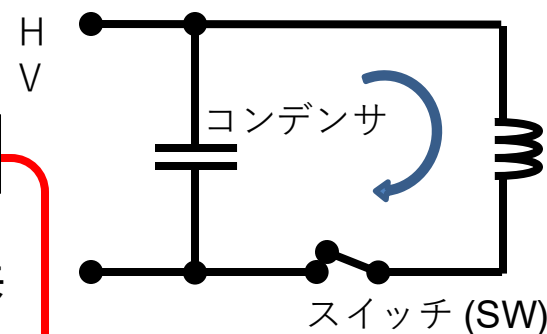
– 集中定数型 (LC共振回路など)

- 電磁石負荷 (L)と充放電コンデンサ (C)でLC共振. 正弦波を発生
- メリット/デメリット: 回路構成がシンプル. 小型(にしないといけない) = キッカー近傍に設置 (加速器トンネル内), 放射線耐性必要

– 分布定数型 (伝送線型回路など)

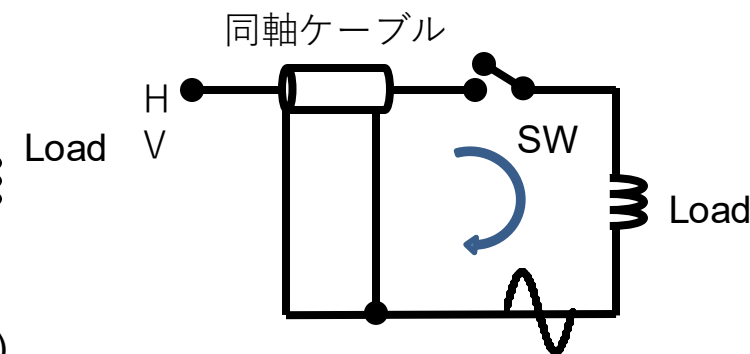
- 特性Zを合わせて伝送線も含めエネルギー伝達. 波形整形可能
- メリット/デメリット: 矩形波 (フラットトップ) を作れる (↔ 矩形端の制御に難). 同軸ケーブルを長くできトンネル外に設置可能(↔ 長ケーブルにより電源巨大化)

LC共振回路



過去の
OHO参照

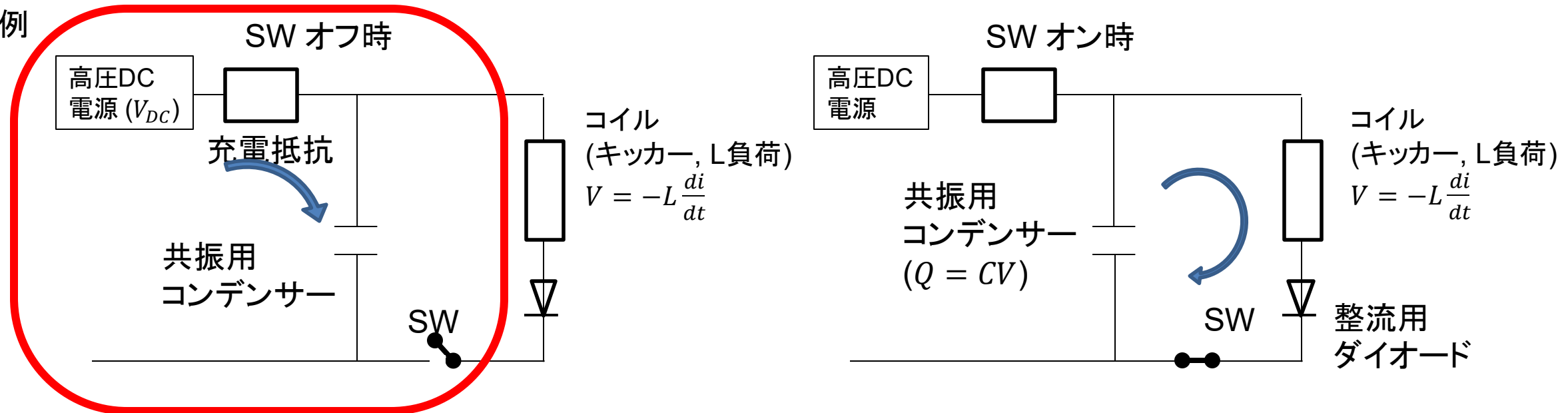
伝送線型回路



LC共振回路: 充電過程

- スイッチ (SW) オフ時に充電, SWオン時に放電

基本例

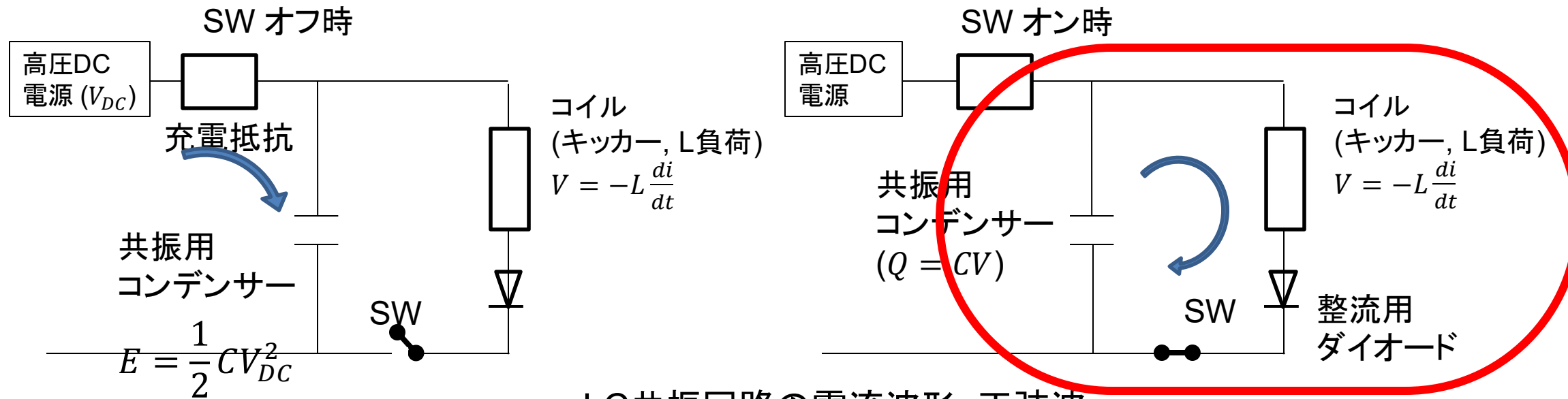


- コンデンサに V_{DC} を印加, 蓄えるエネルギー: $E = \frac{1}{2} CV_{DC}^2$
- インピーダンス源を設置 (抵抗など) することで充電速度を調整
 - 例) 抵抗だけであればRC回路になり、 $V(t) = V_{DC} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right)$ で充電
 - 消費エネルギー: $P = \int i v dt = \frac{1}{2} CV_{DC}^2$

LC共振回路: 正弦波の生成

- スイッチ (SW) オフ時に充電, SWオン時に放電

基本例

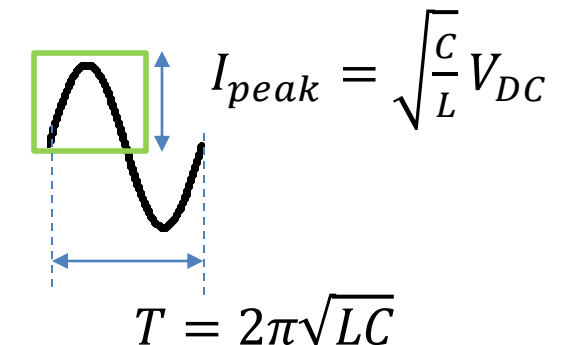


LC共振回路の電流波形: 正弦波

※ 回路方程式

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

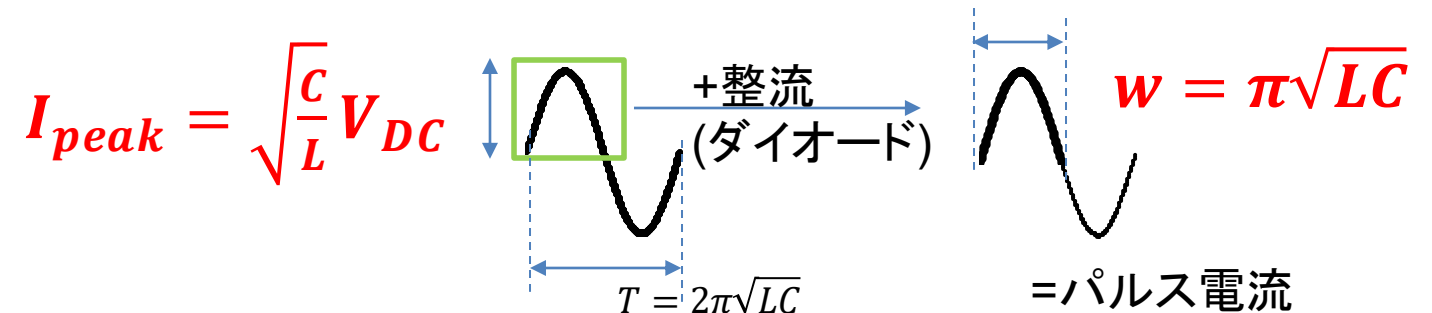
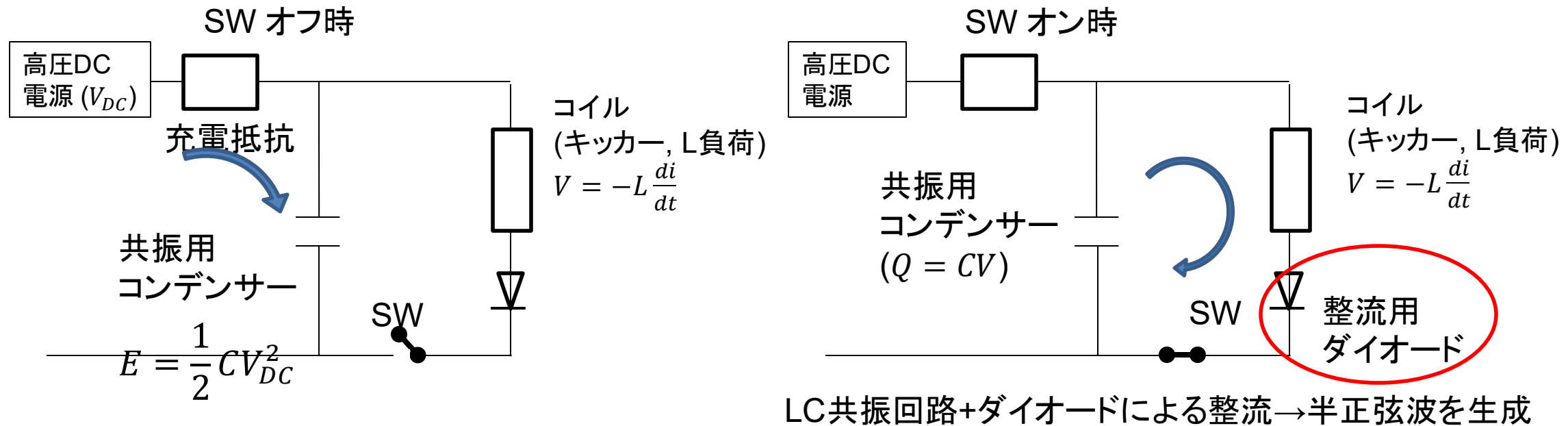
$$i(t) = V_{DC} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}}$$



LC共振回路: 正弦波→正弦半波

- 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: 構成要素, 役割, 出力まとめ

• 充電部

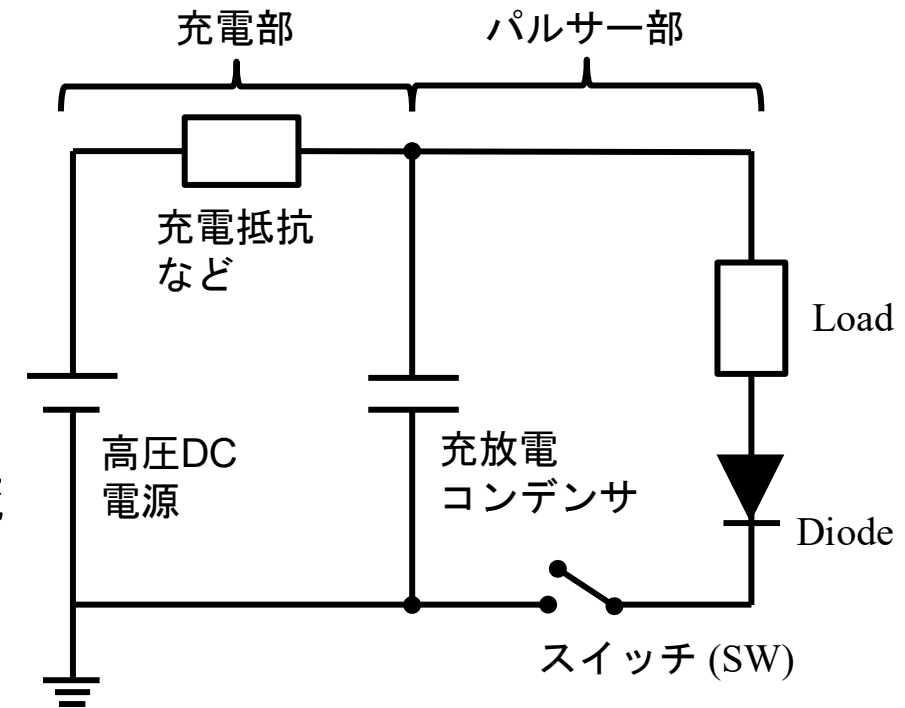
- 充放電コンデンサに充電するための回路部
- インピーダンス源をうまく設置することで充電速度を調整
- 発熱のコントロール

• パルサー部

- LC共振を起こす部分
- 充放電コンデンサ, キッカーマグネット (L負荷), スイッチ, 整流用ダイオード

- 波高 $I_{peak} = \sqrt{\frac{C}{L}} V_{DC}$, パルス幅 $w = \pi\sqrt{LC}$

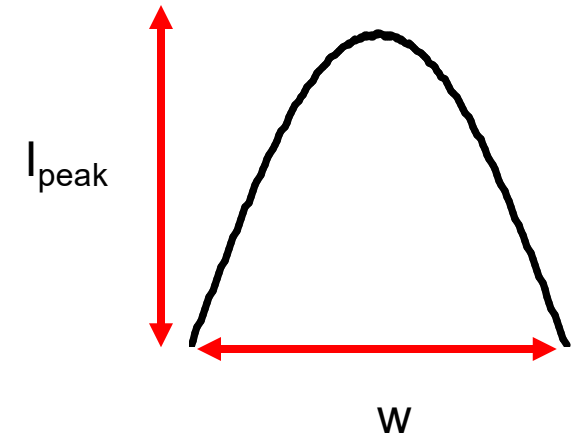
(→ 波高は $I_{peak} = \frac{wV_{DC}}{\pi L}$ とも書ける. コンデンサ容量は設計者しか知らないこともあるのでこの表式も知っておくと便利)



回路パラメータの決定

• LC共振型の正弦半波

- 波高 $I_{peak} = \sqrt{\frac{C}{L}} V_{DC}$, パルス幅 $w = \pi\sqrt{LC}$
- これまでの話でビーム運用形態、電磁石パラメータから、必要な電流量 (I_{peak})、電磁石インダクタンス (L)、パルス幅 (w) は決まっていた
- 残る未知のパラメータは C , V_{DC} のみ $\rightarrow$ 2式あるので決定できる (一意に決まってしまう)



先ほどの例

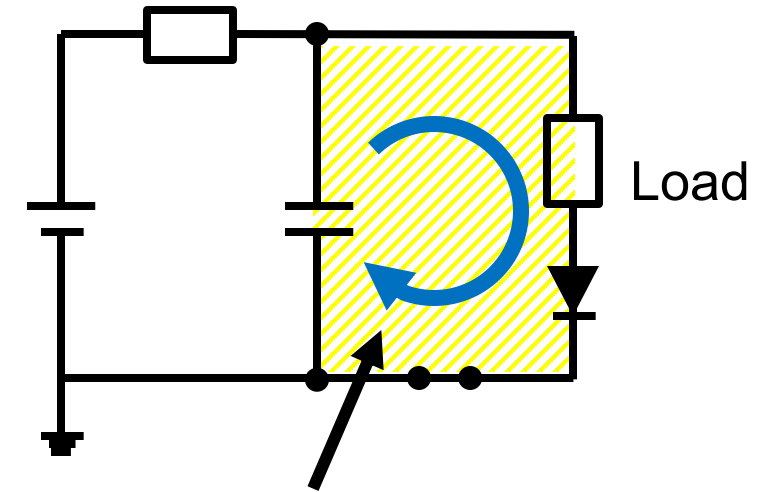
p [GeV/c]	θ [mrad]	ℓ [m]	h [mm]	w [mm]	B [T]	nl [A·turn]	L [uH] (@ n=1)	w [us]	C [nF]	V_{DC} [kV]
2.5	4	0.4	60	170	0.08	4000	1.4	1.2	100	15



10 kV以上の高電圧を扱う必要があると分かる

もう少し現実的な場合

- これまでの話は理想的な電源回路の場合
- 現実的には
 - 電源回路ループによる浮遊インダクタンス, 回路素子の浮遊容量, 抵抗が存在
 - (篠原の理解): 寄生xxは構造に起因して再現性あるもの, 浮遊xxは回路配線によるL, Cなど再現性低いもの, 明確な使い分けはないようだ
 - 影響が大きいのは L, R
 - L: 負荷が μH オーダーだが50 cm程度のループでも $2 \mu\text{H}$ に (高電圧を扱うため、回路は大きくなりがち)
 - R: LC回路では0と仮定. 0との比較になる
 - C: メインのコンデンサ 100 nF オーダー, 寄生容量はせいぜい数 100 pF と小さい



単純化した回路図であるが、現実的にこのようなループを作ってはいけない



普通の電子回路と違い、大型になるので意識しないと容易にループができあがる

LCR回路

- 浮遊L, Rがある場合の定式化
- 集中定数型を考えているので回路パラメータを合成

- $L_{\text{全体}} = L_{\text{負荷}} + L_{\text{浮遊}}$

- $R_{\text{全体}} = R_{\text{浮遊}}$

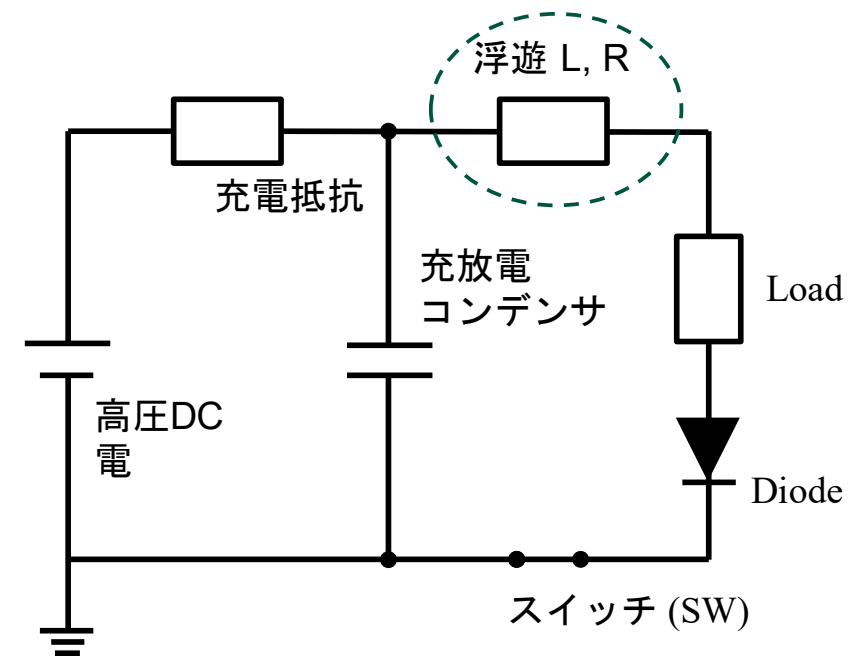
のときのLCR回路を考えればよい

- LCR回路のときの電流波形

$$i(t) = \frac{V_{DC}}{L\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t, \text{ where } \alpha = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \omega_0 > \alpha$$

減衰項 振動項

と減衰振動になる (導出はテキスト参照. よくある式)



浮遊成分がある際の違い

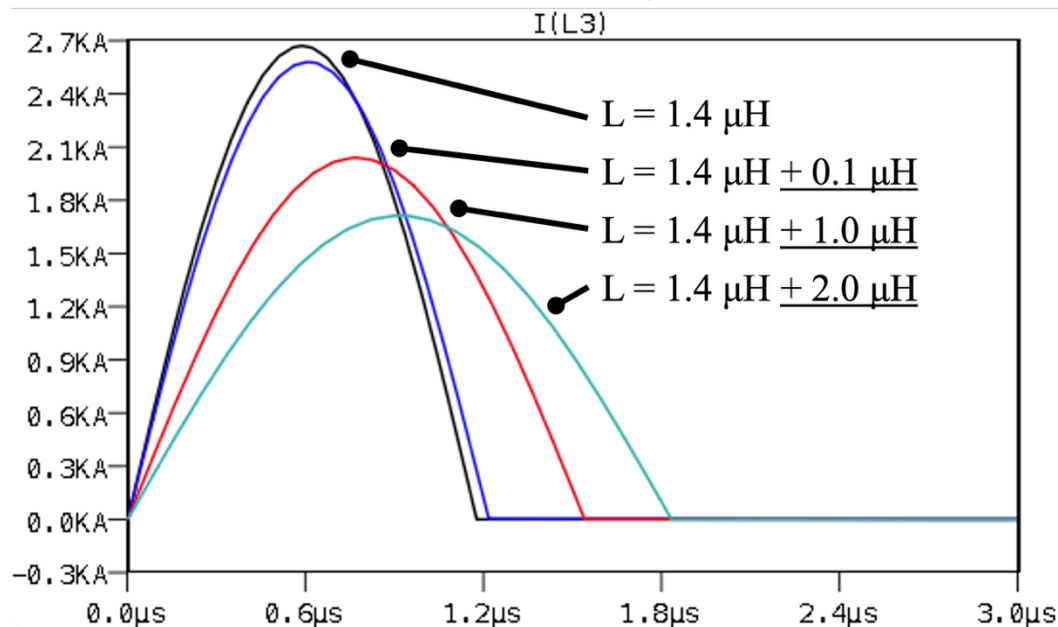
- LCR回路のときの電流波形

$$i(t) = \frac{V_{DC}}{L\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t, \text{ where } \alpha = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \omega_0 > \alpha$$

(手計算でもできるが)
LTSpiceによる比較結果

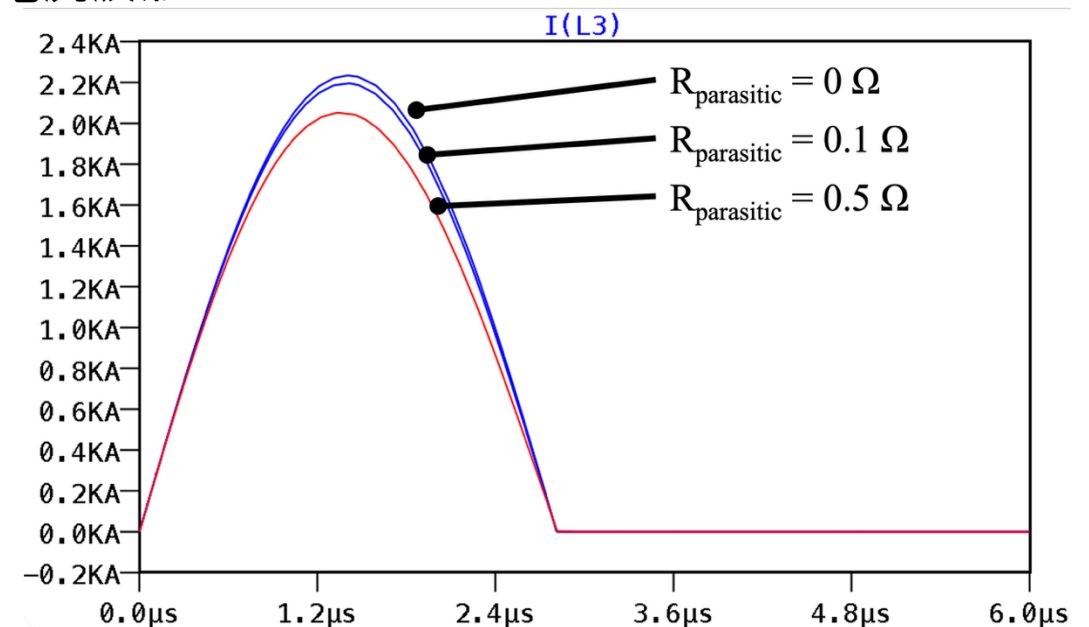
電流波形

インダクタンスによる違い



電流波形

抵抗による違い



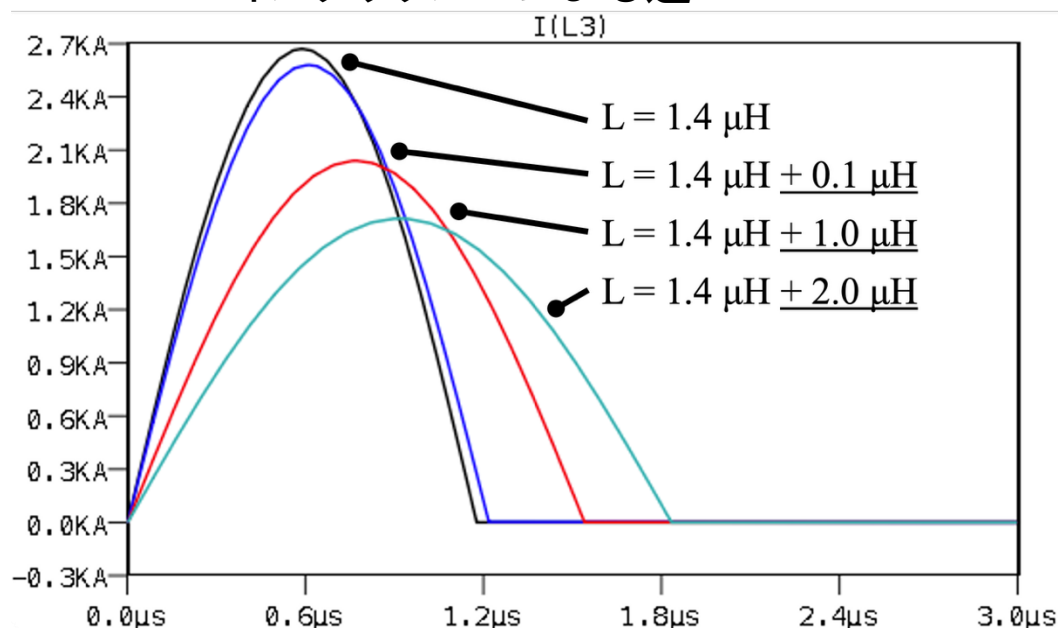
浮遊インダクタンスにはかなり気をつけて設計する必要あり

設計パラメータへの影響

• LCR回路のときの電流波形

$$i(t) = \frac{V_{DC}}{L\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t, \text{ where } \alpha = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \omega_0 > \alpha$$

インダクタンスによる違い



入射キッカーパルス電源の例

浮遊インダクタンスがある場合について計算

パラメータ	定格 1	定格 2
ピーク電流	4000 A	4000 A
負荷インダクタンス	1.4 μ H	1.4 μ H
浮遊インダクタンス	0 μ H	1 μ H
パルス幅	1.2 μ s	1.2 μ s
充放電コンデンサ	100 nF	60 nF
★印加電圧	15 kV	25 kV

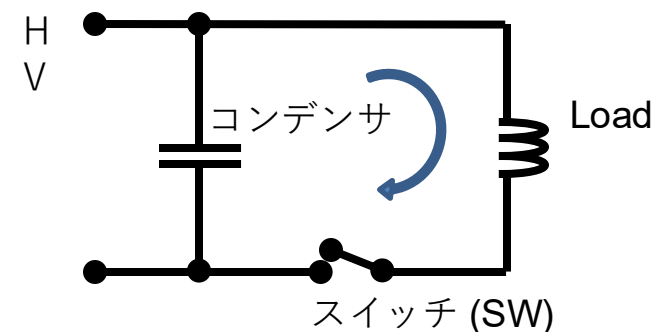
電源側で調整可能なパラメータ

同じパルス幅で同じピーク電流を出そうとすると
必要電圧は大きく増える

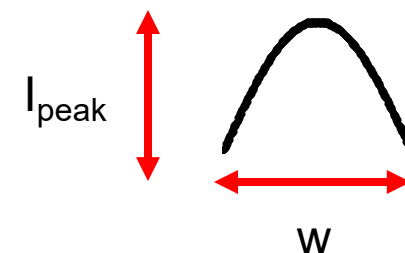
パルス電源基本設計まとめ

- 放射光源電子蓄積リングで用いるパルス電源を入射用キッカーを例に説明
 - セプトム用のパルス電源についてはテキスト参照
 - 入射キッカーでは
 - 入射形態、電磁石の要請からパルス幅 μs オーダーで数kA級の大電流パルス電源が求められる
 - 必要電圧は理想的な回路でも 10 kV以上の高電圧を扱う必要あり
 - 現実的には 20 kV, 30 kVといった高電圧を求められる
 - 覚えておくべき関係式は最低限

$$\text{パルス幅 } w = \pi\sqrt{LC}, \text{ 波高 } I_{peak} = \sqrt{\frac{C}{L}} V_{DC} = \frac{wV_{DC}}{\pi L}$$



- これまでは机の上での話
- 次に実際の開発例 (半導体パルス電源) とともに開発上の様子、課題などを紹介



開発例

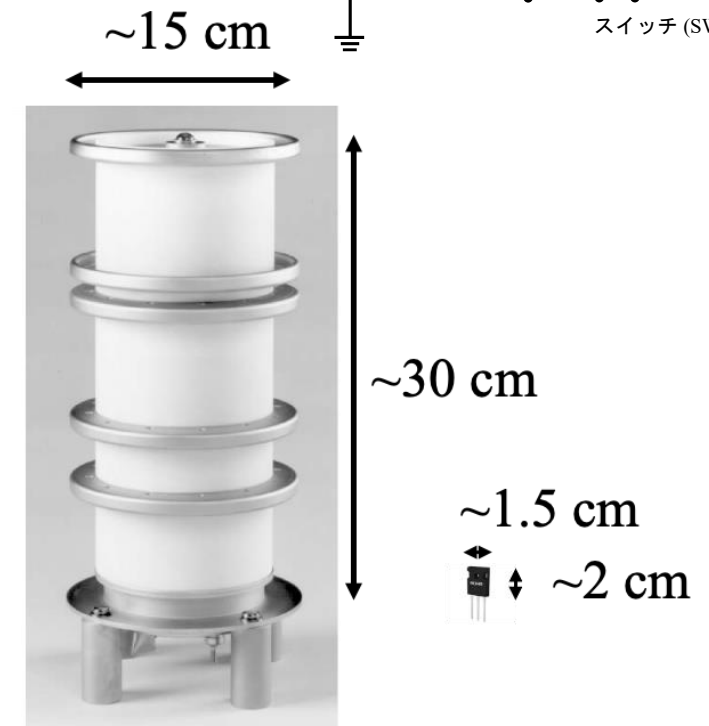
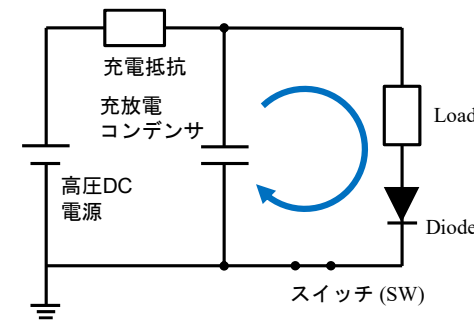
半導体パルス電源の開発

パルス電源界隈が抱える課題

高電圧・大電流スイッチ (SW) デバイス候補

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

- パルス電源の要であるSW部に荒波
 - 大電力を扱える良いデバイスではあるのだが、電源が大型化、ジッターがns以上 (経年で劣化)、まれに暴発といった問題
 - 加えて寿命が5~10年 (KEK加速器全体を考えると、どこかしらで毎年交換)、世界で2社、価格
- SWの半導体化が将来加速器と持続的な運転に重要な命題となっている
 - SiC-MOSFETを例に半導体パルス電源を紹介



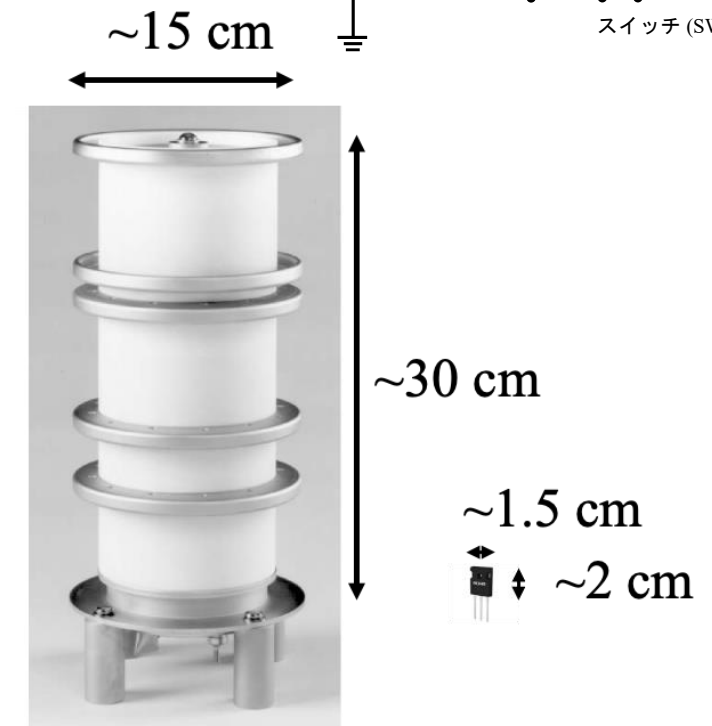
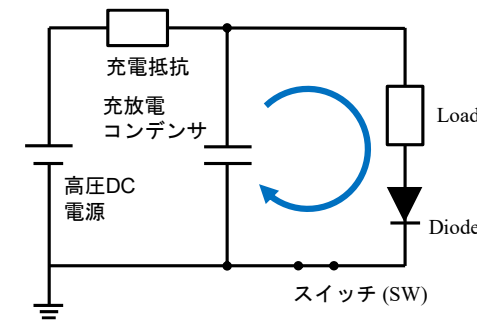
例: 左図サイラトロン (e2v; CX1175C)
と 右図 MOSFET (Rohm;
SCT3040KL) データシートより

パルス電源界隈が抱える課題

高電圧・大電流スイッチ (SW) デバイス候補

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

- パルス電源の要であるSW部に荒波
 - 大電力を扱える良いデバイスではあるのだが、電源が大型化、ジッターがns以上(経年で劣化)、まれに暴発といった問題
 - 加えて寿命が5~10年(KEK加速器全体を考えると、どこかしらで毎年交換)、世界で2社、価格
- SWの半導体化が将来加速器と持続的な運転に重要な命題となっている
 - SiC-MOSFETを例に半導体パルス電源を紹介



例: 左図サイラトロン (e2v; CX1175C) と右図 MOSFET (Rohm; SCT3040KL) データシートより

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 $< 1/10$ 、
高速性にかなり優れる

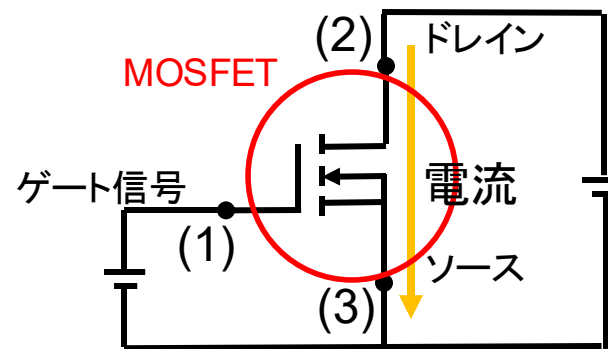
ただし、1素子定格: $\sim 150\text{ A}$, $\sim 1\text{ kV}$

加速器電源として応用するには

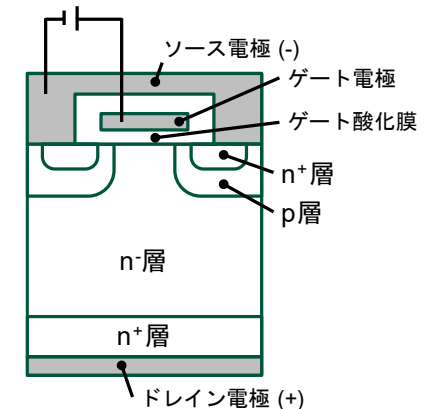
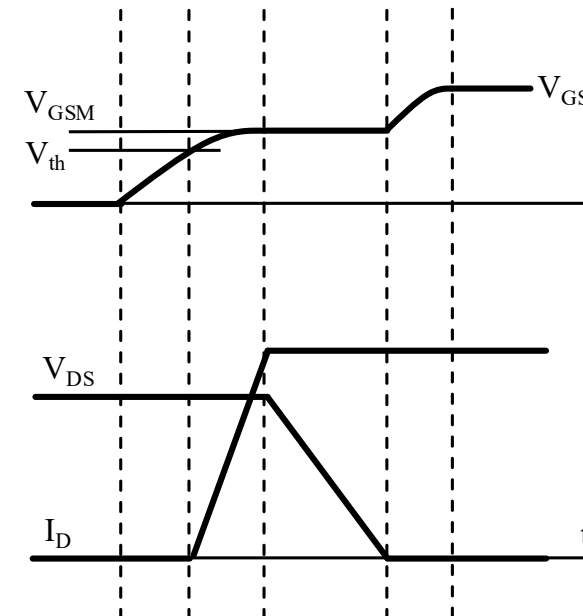
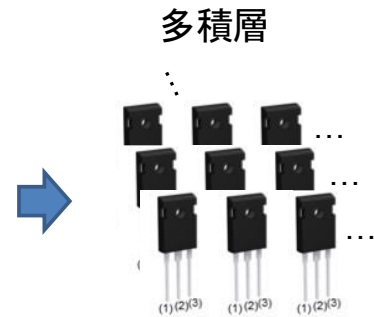
多積層技術の確立

多積層 → 電源大型化 → インダクタンス増加

をおさえる必要がある



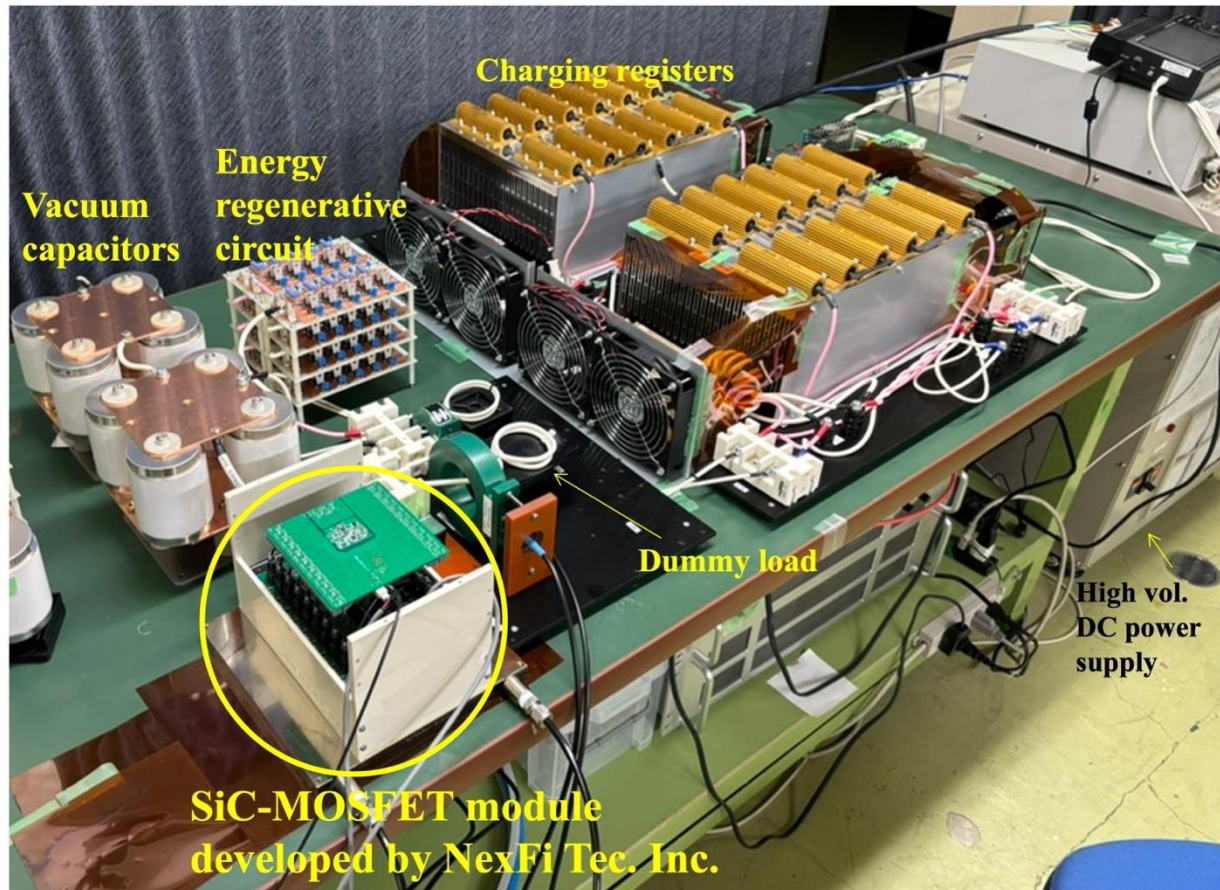
ex.) **ROHM**
SCT2080KE
1200V, 40A, THD, SiC-MOSFET
<https://www.rohm.co.jp/products/sic-power-devices/sic-mosfet/sct2080ke-product>
大きさ: 16×21 (t=5.2)



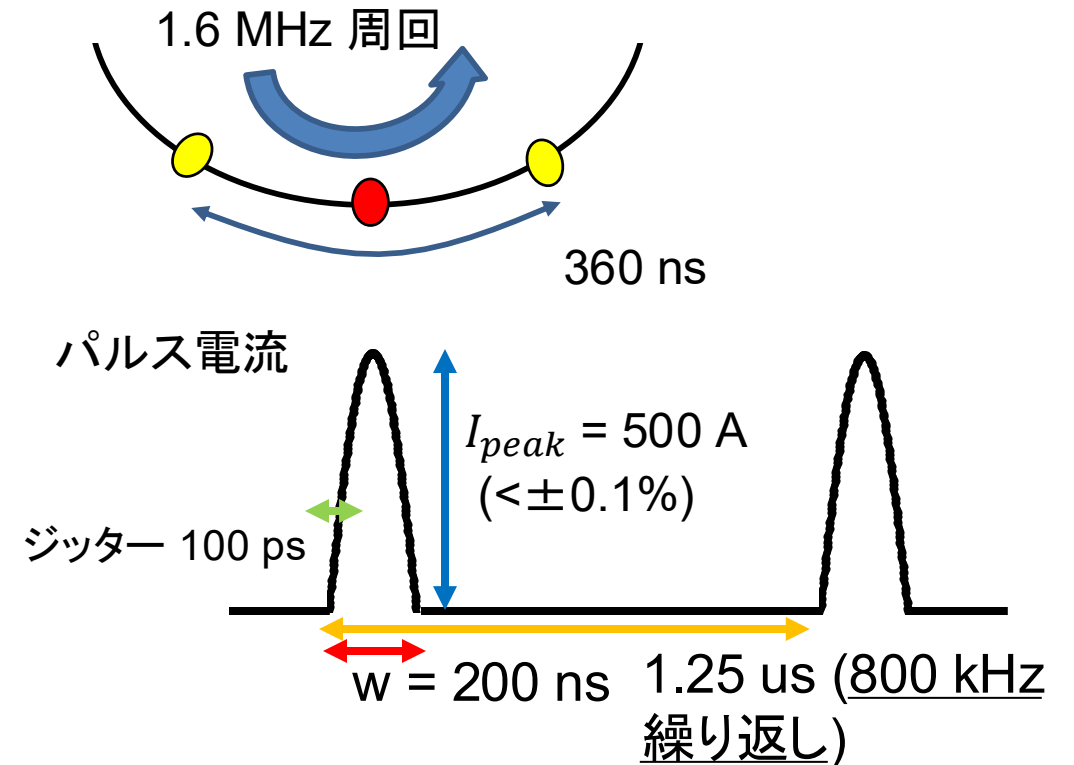
実際の半導体パルス電源の開発例紹介

JST-Astep: KEKにて「SiCスイッチングモジュールの高性能化とその応用開発」

他にも NexFi (中核企業)、別テーマで阪大、京大、鉄道総研

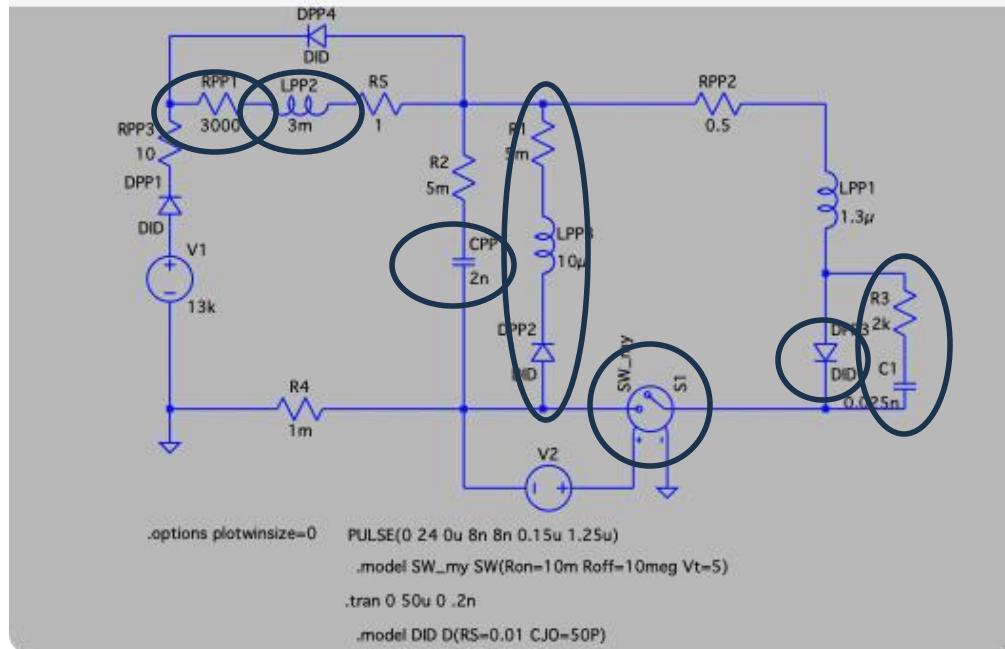


KEK-PF camshaft bunch system用パルス電源



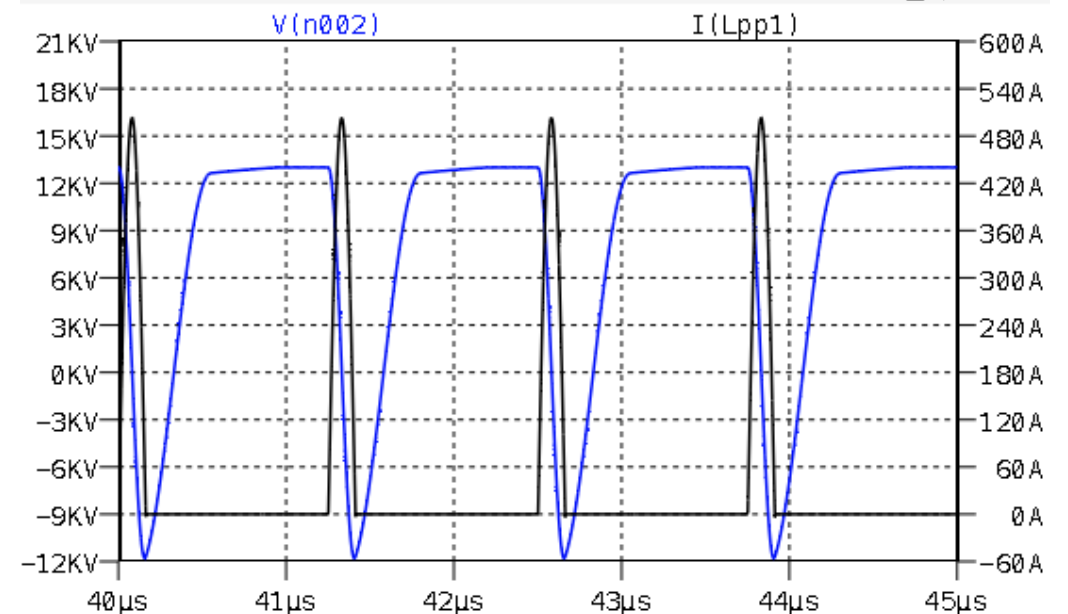
開発パラメータの決定

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

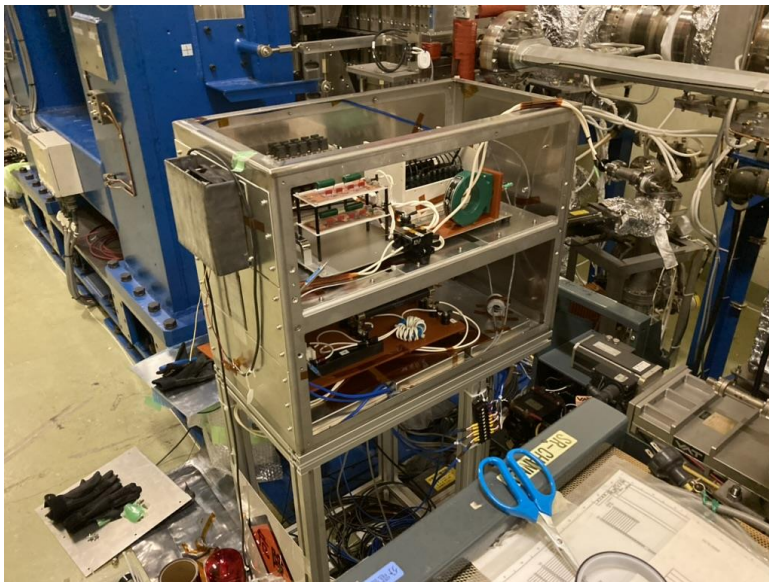


シミュレーション上は目標のパルスが発生可能
ただし、ハードへの要求はかなり厳しい

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

ダメだった例; コンデンサ

パルス電源本体



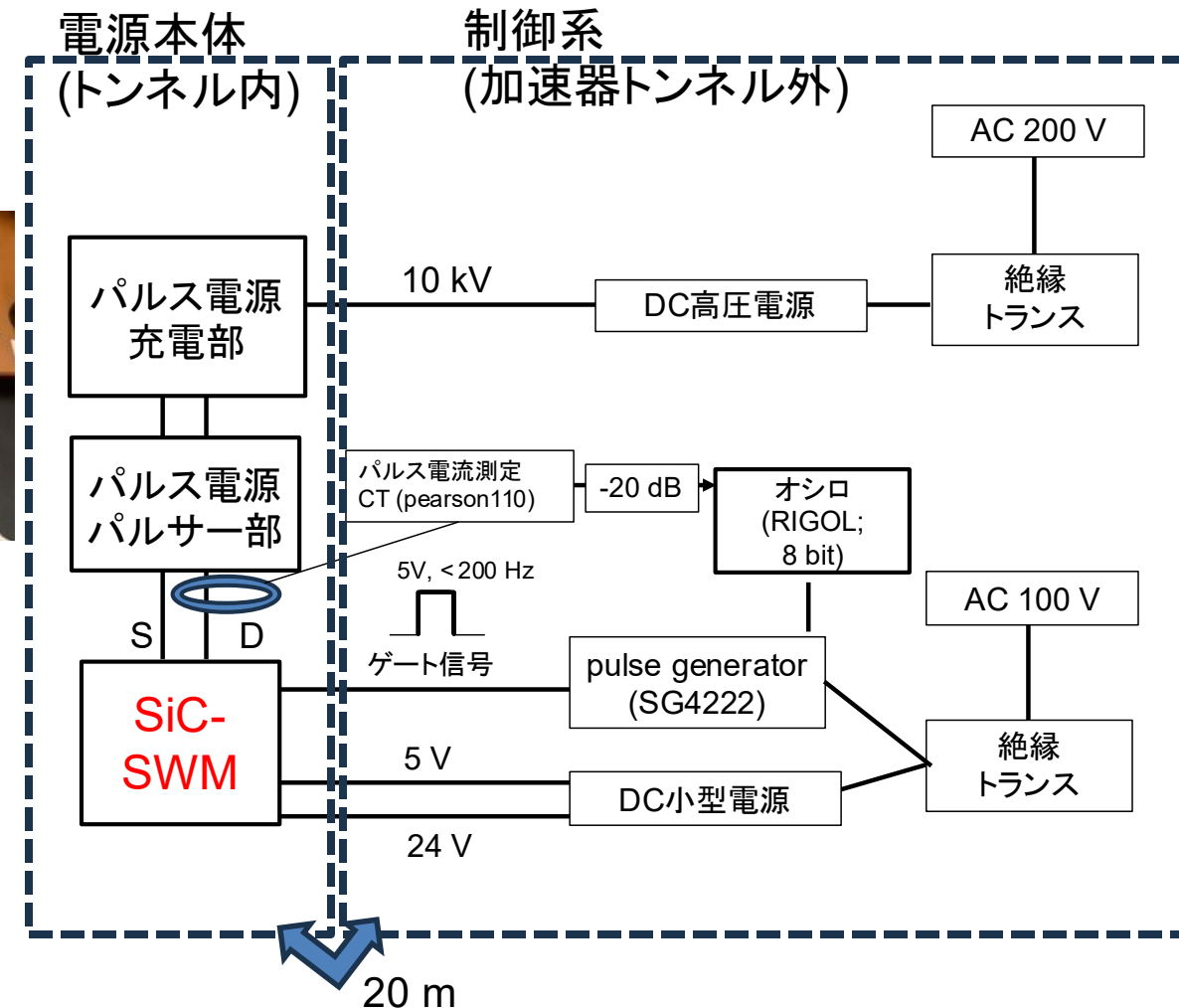
フィルムコンデンサ



16 kV耐圧
特徴: 温度特性が良い

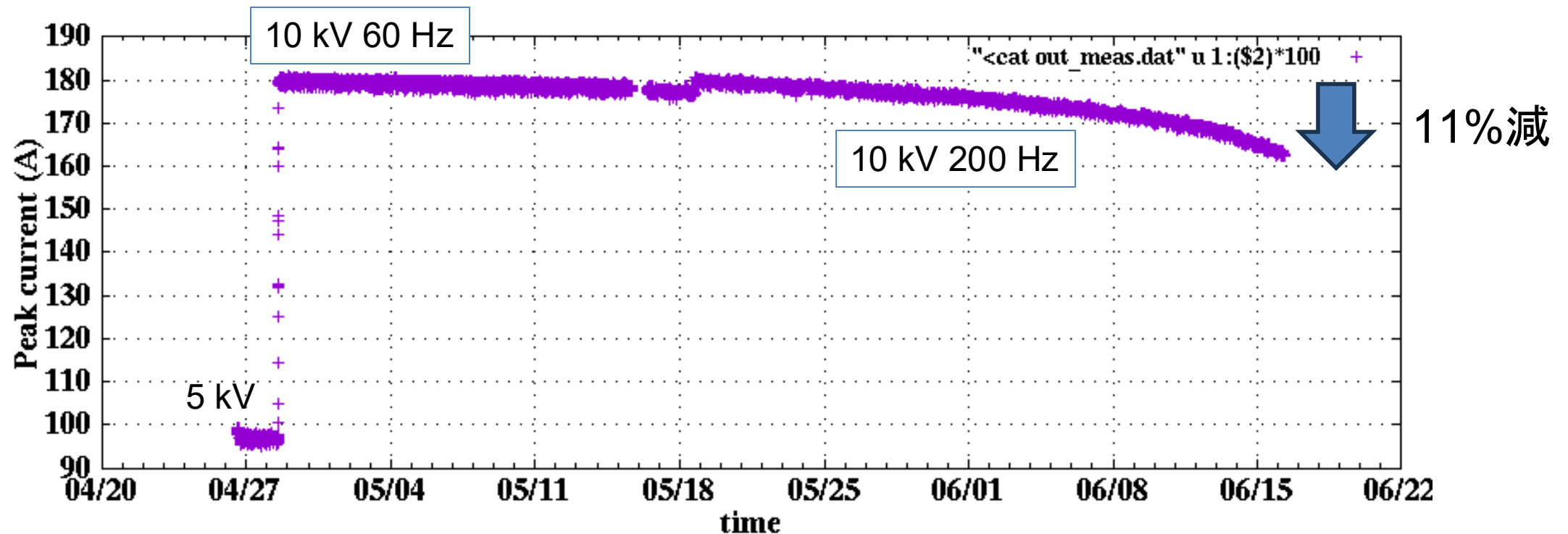
2023 4-6月にかけて長期試験を実施

- 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



長期運用による出力減少

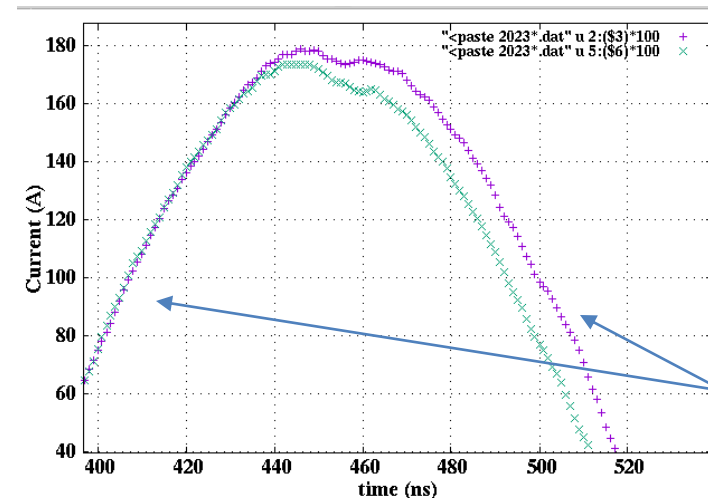
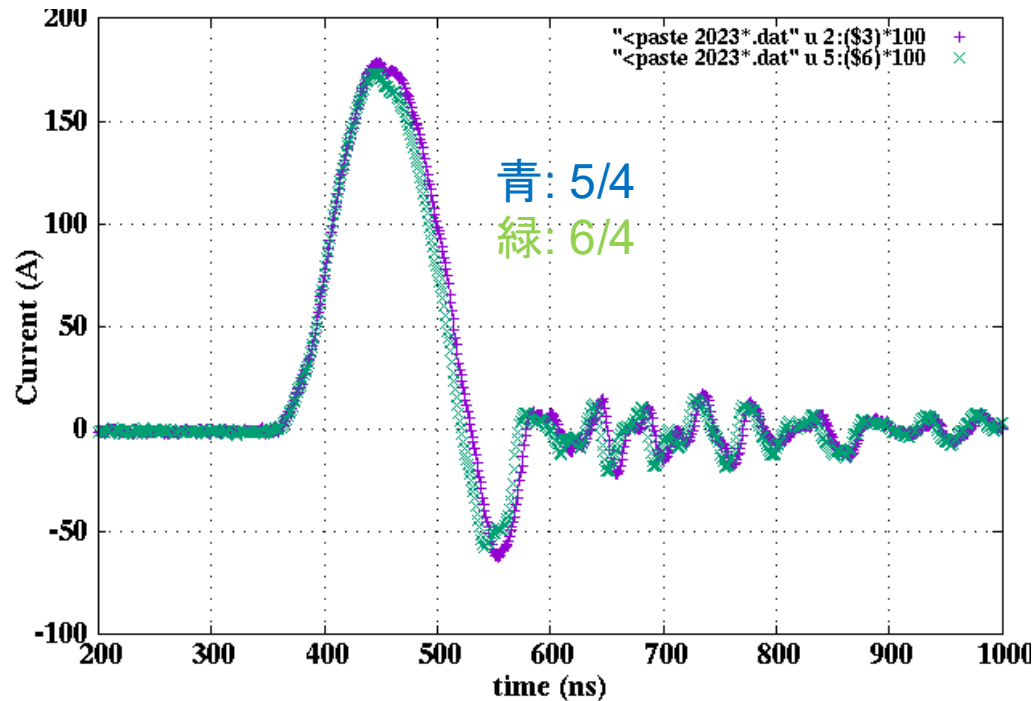
パルス電源2ヶ月長期試験におけるピーク電流推移



- 2ヶ月間の連続試験
 - 総スイッチング回数: 0.9×10^9 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

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

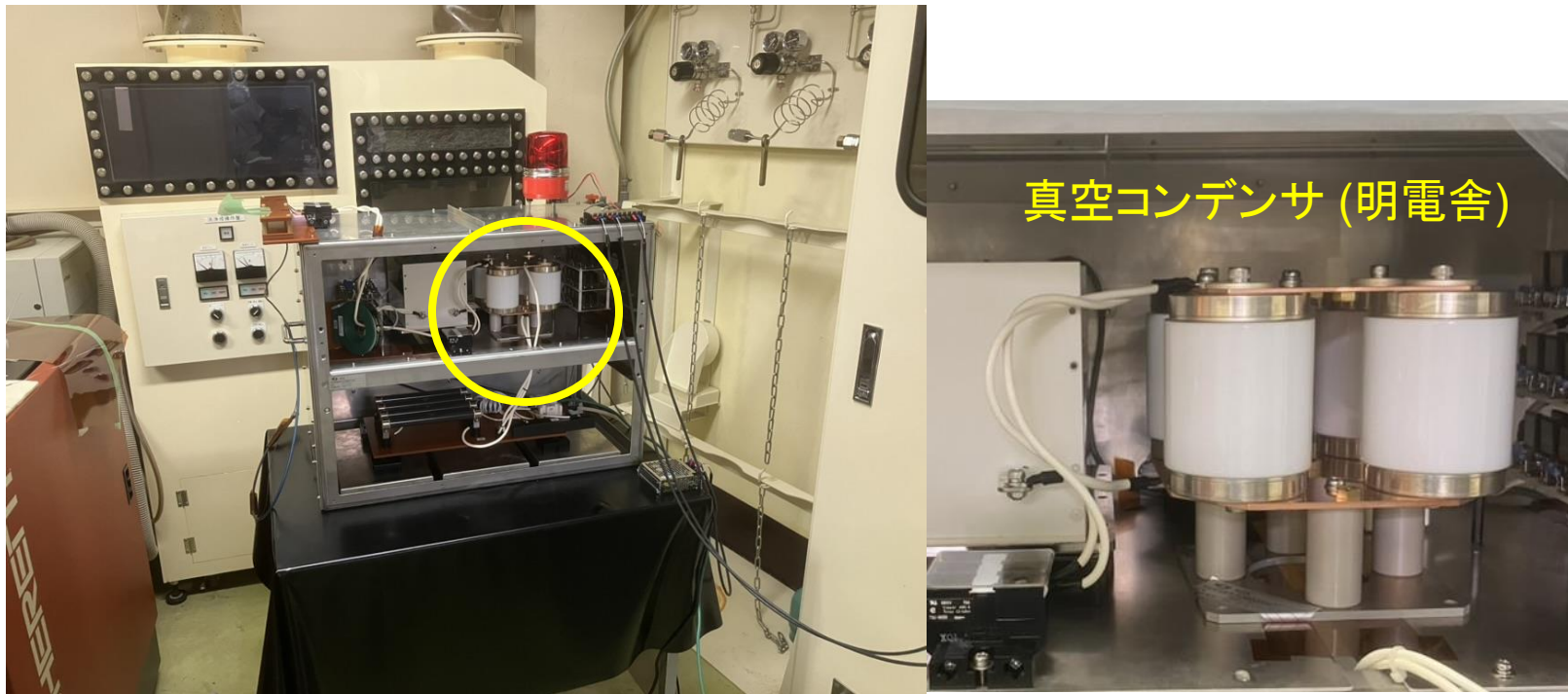
$$I_{peak} = \sqrt{\frac{C}{L}} V_{DC} \quad \text{パルス電流: } I(t) = V_{dc} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)$$

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”



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)

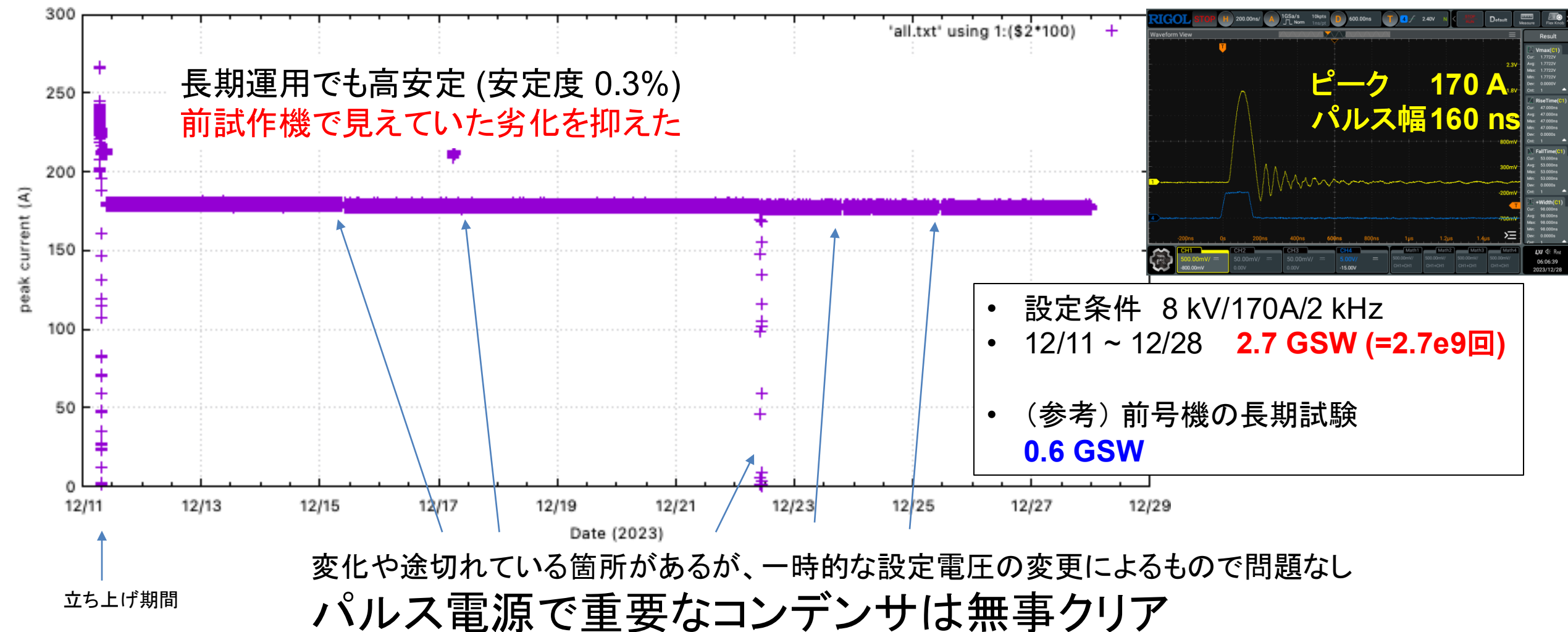
デメリット:

- 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

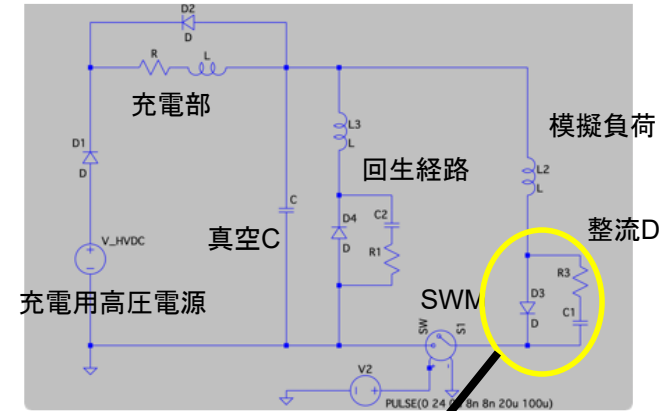
真空コンデンサ (250 pF) 4並列にした特注コンデンサバンクを製作
→ 長期試験で耐久性を確認

真空コンデンサ搭載機の長期試験

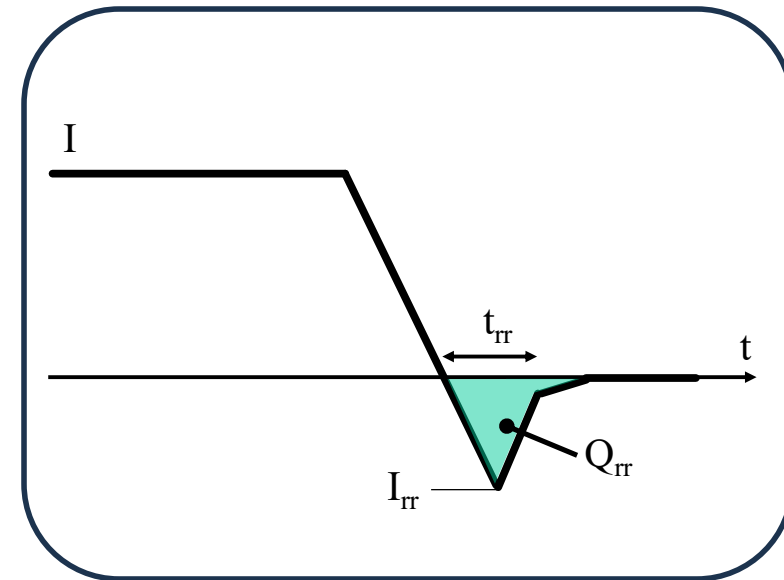


他、パルス電源でよくよくある問題

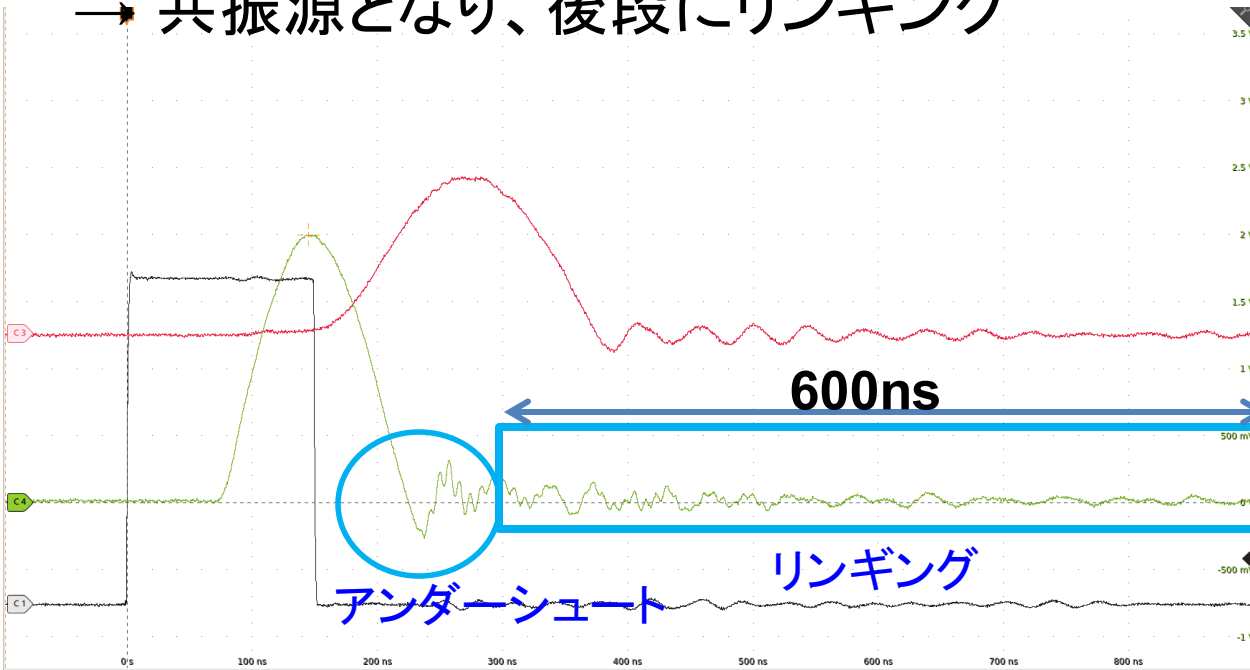
- ダイオードには逆回復時間が存在する
- パルスがアンダーシュート
- 共振源となり、後段にリンギング



整流ダイオードの特性イメージ

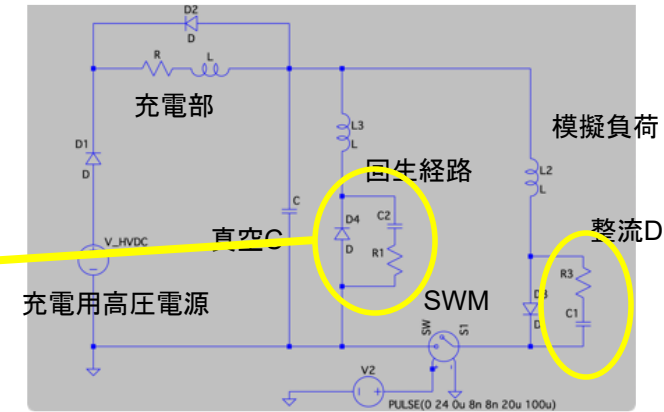
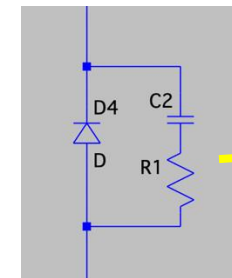


Qrrの小さいダイオードの選定が重要
それでもゼロにすることは難しい

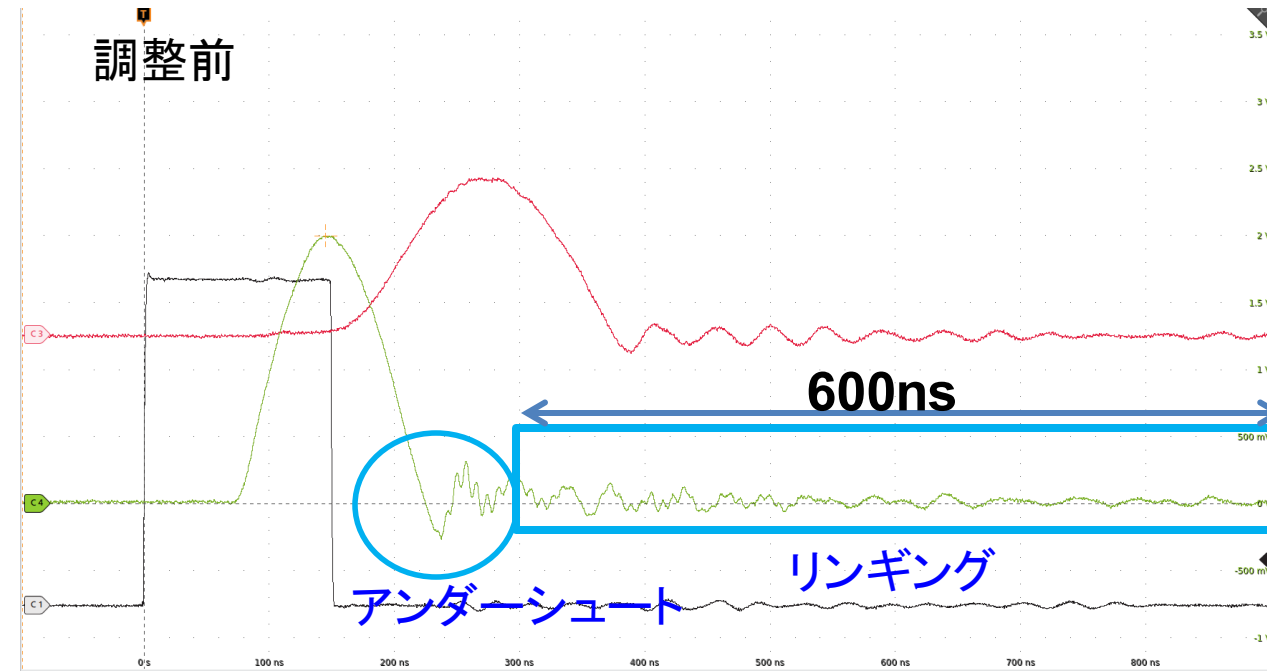


ノイズ吸収回路による対策

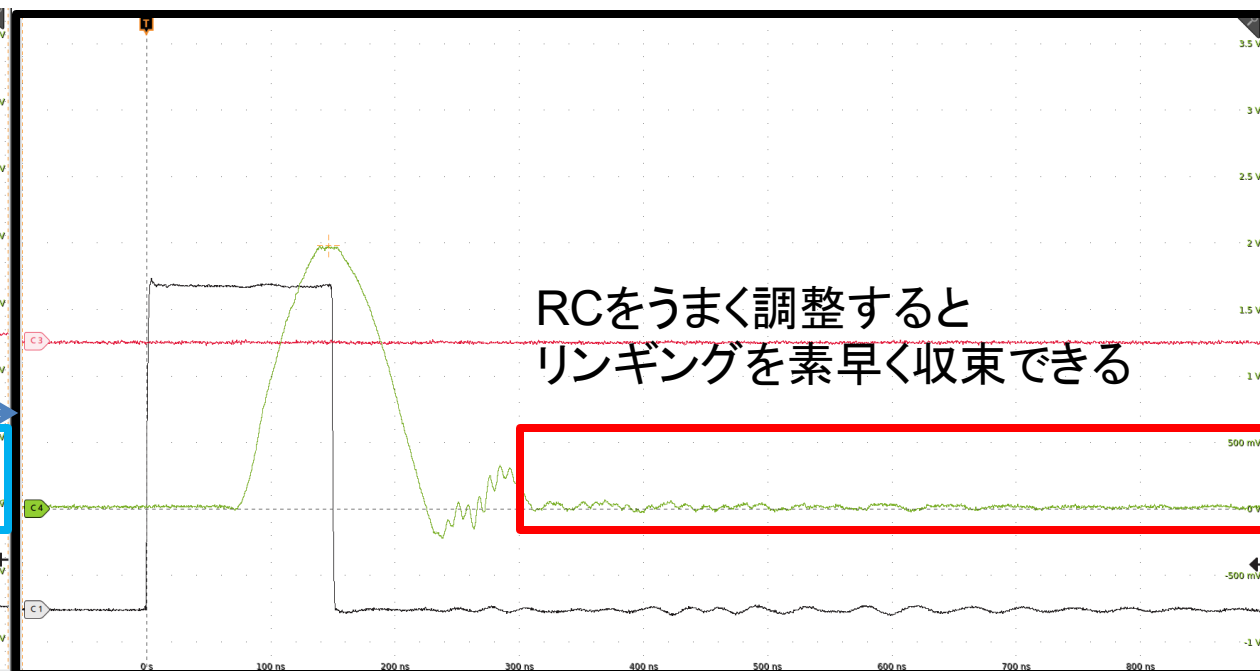
CRで構成する**スナバ回路**と呼ぶノイズ吸収回路を用いる



調整前



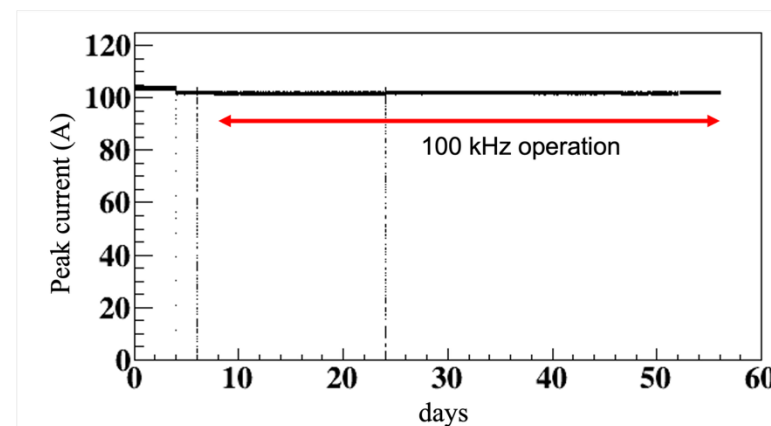
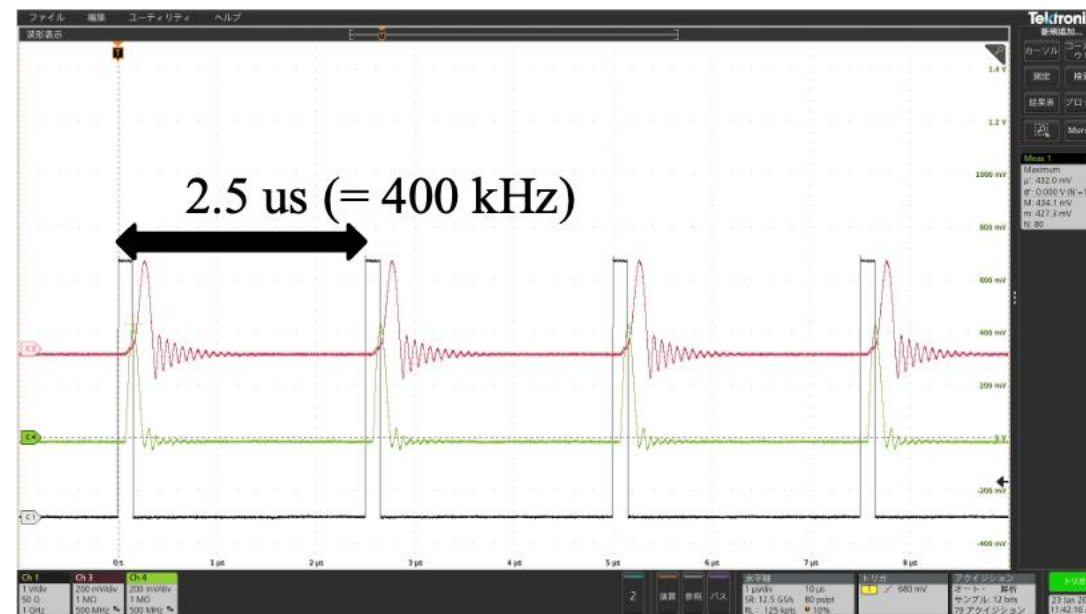
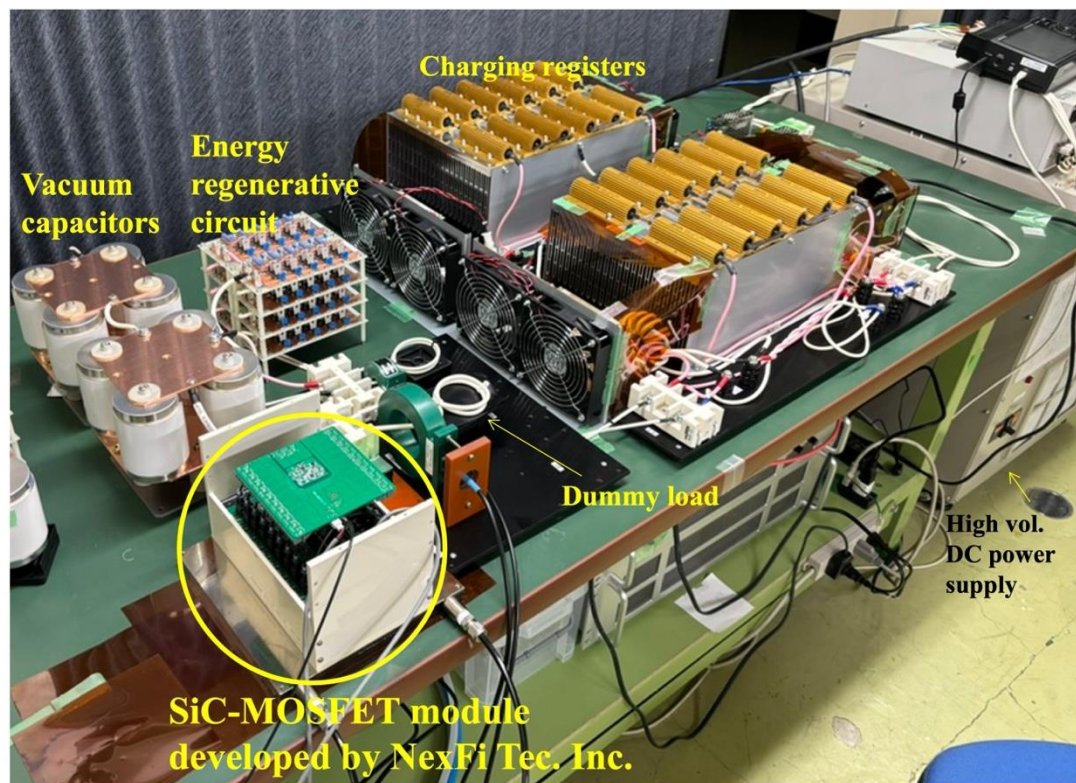
RCをうまく調整すると
リングングを素早く収束できる



考え方: スナバ回路の時定数 ($\tau = RC$) を T_{noise} 以下となるよう調整 $\leftrightarrow$ ただしCが大きい方がノイズの吸収量は大きく、Rが大きい方が減衰速度が速い

ノイズ周期が事前に分かることはあまりないため、調整スペースを確保しておく設計が重要

開発中様子



SW回数
5500億回
(10 Hzで運転すると1700年間分)

半導体パルス電源の開発はいまとても
HOT

まとめ

- 放射光加速器で用いる「パルス電磁石電源」について講義
- 電子蓄積リング入射キッカー用のパルス電源を例にパラメータ設計方法を解説
 - 必要な蹴り角、パルス幅から usオーダー & 数kAクラスのパルス電源が必要
 - 必要電圧も求めることができ 20~30 kVクラスの電源が必要
 - 回路浮遊成分はパルス電源回路に悪影響を及ぼすため、よく考慮に入れて設計
- KEK-PFで進めている半導体パルス電源を例に製作上必要な要素も紹介
 - パルス電源はスイッチ部の半導体化が積極的に進んでいる
 - 開発例: SiC-MOSFETベースのパルス電源
 - 超高繰り返し可能なので、置き換えが進めばかなり堅牢なシステムに
 - サイラートロン電源の置き換えや、次世代加速器でも使用可能なパルス電源構築を進めている

END
