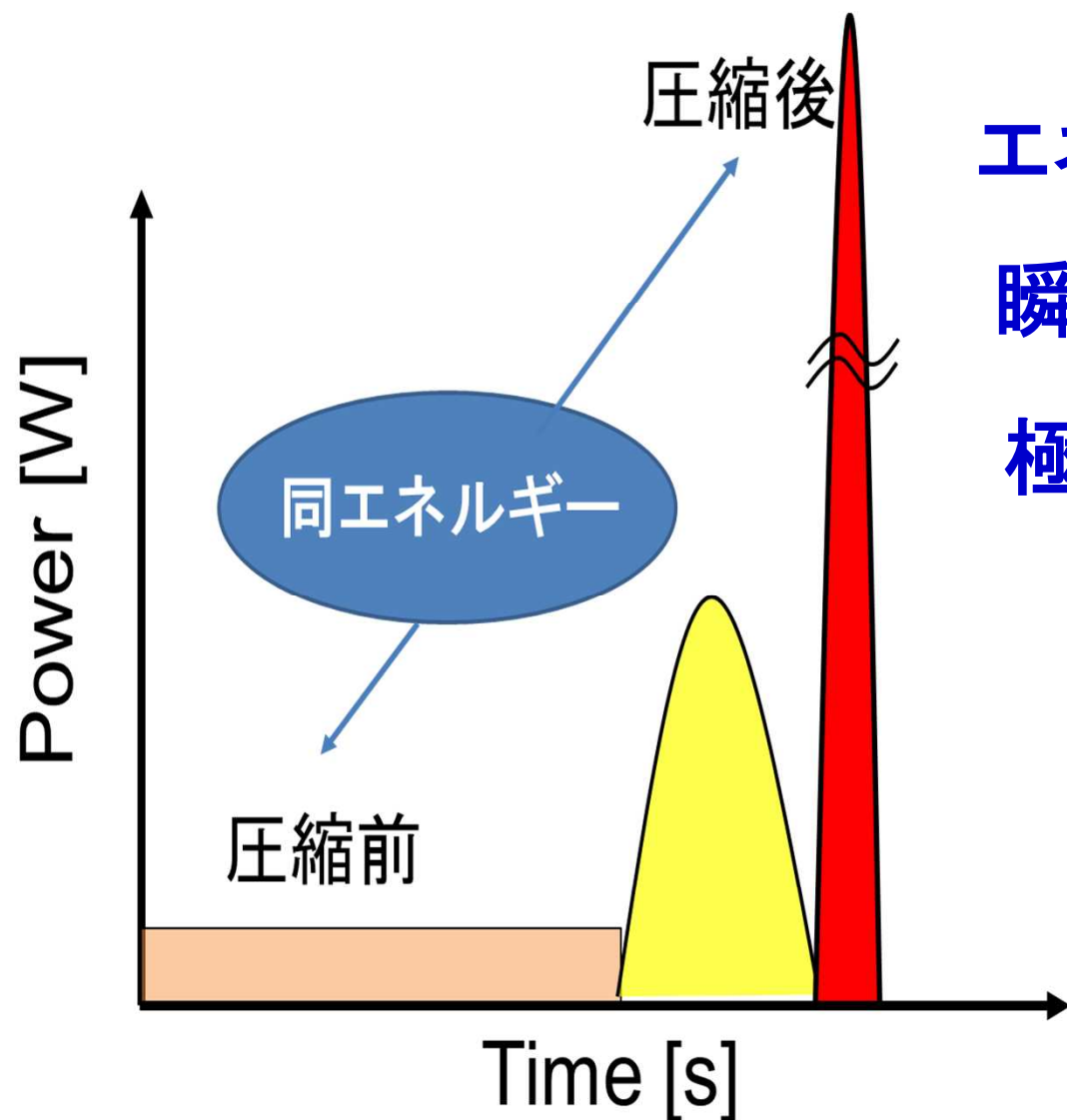


# 新型パワーデバイスを用いた パルス電源の低損失化とエネルギー回生

熊本大学 パルスパワー科学研究所  
パルスパワー基盤部門 (パルスパワー発生制御分野)  
教授 佐久川 貴志

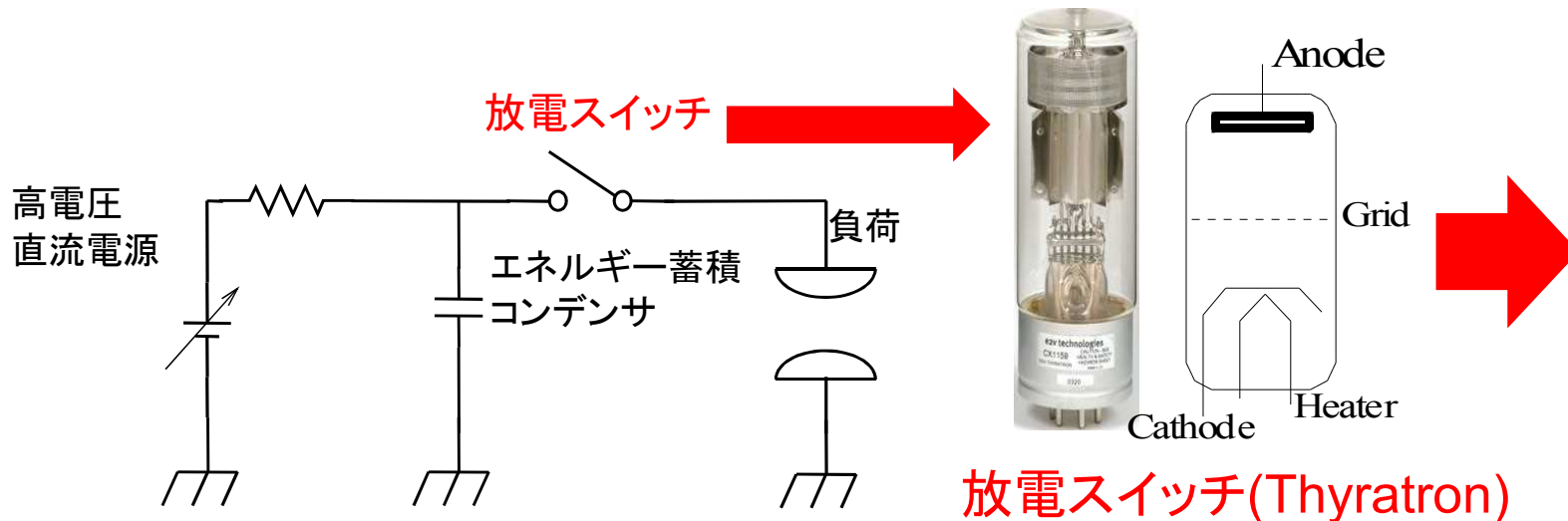




エネルギーを極短時間に圧縮  
瞬間的なMW～TW級電力で  
極限活性場生成可能な技術

$$\begin{matrix} 100\text{W} \\ 100\text{秒} \end{matrix} = \begin{matrix} 1\text{TW} \\ 10\text{ナノ秒} \end{matrix}$$

※ここで、パルス電源は半導体パルスパワー発生装置を指します。



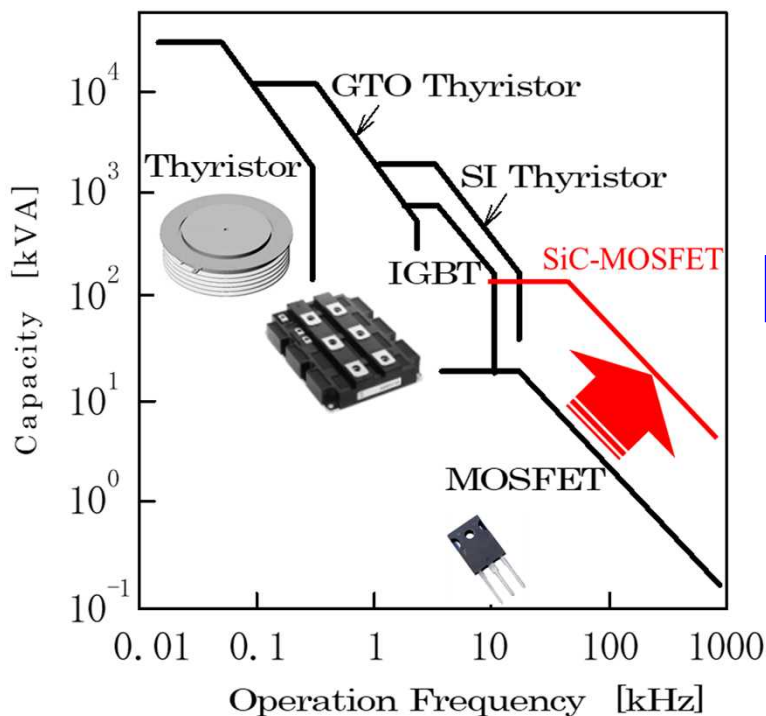
## 産業化への課題

- オンは高速だがオフが出来ない
- 電極消耗で経年で劣化が早い
- 寿命が短い (10<sup>8</sup>パルス程度)
- 安定性が低い

最も簡単な従来型パルスパワー発生回路

## パワーデバイスの進展 + 磁気回路の実用化

- オン/オフ制御性に優れる
- 劣化が無い
- 長寿命 (10<sup>12</sup>パルス以上)
- 高安定動作



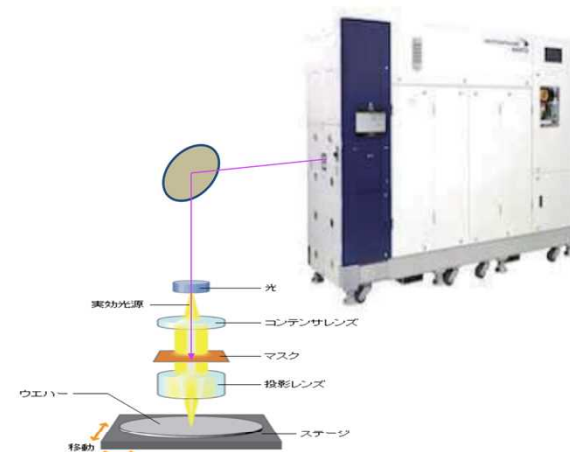
高速サイリスタの開発  
GTOサイリスタの改良

## 産業化成功

半導体製造のフォトリソグラフィ光源  
エキシマレーザの励起パルス電源

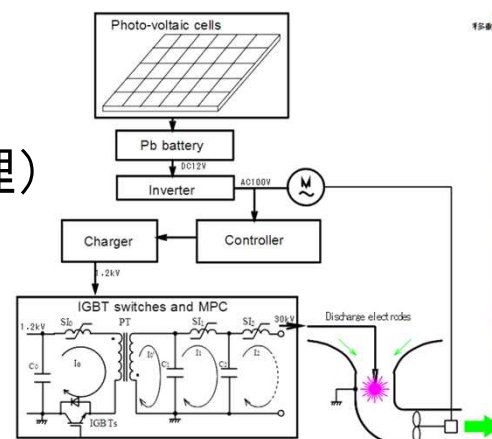
## 光源・ビーム・プラズマプロセス

- ✓ フトリソグラフィー用エキシマレーザ
- ✓ TFT液晶アニールレーザ
- ✓ 大気圧パルスプラズマ発生
- ✓ オゾナイザ



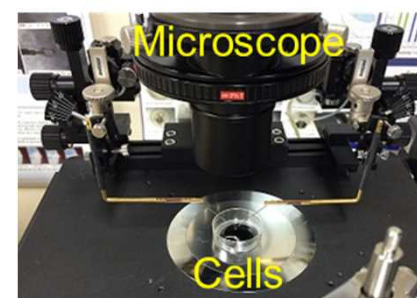
## 水処理・環境改善

- ✓ 水処理装置(衝撃波利用アオコ処理)
- ✓ 殺菌処理
- ✓ プラスチック-金属分離リサイクル
- ✓ 水中放電利用化学活性種生成

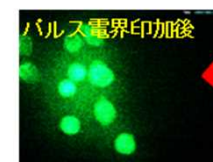
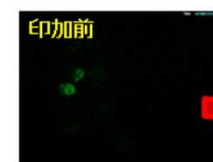


## 医療・バイオ

- ✓ 視力矯正角膜除去エキシマレーザ
- ✓ 顕微鏡組み込み細胞パルス印加装置
- ✓ X線CT用高電圧パルス発生装置



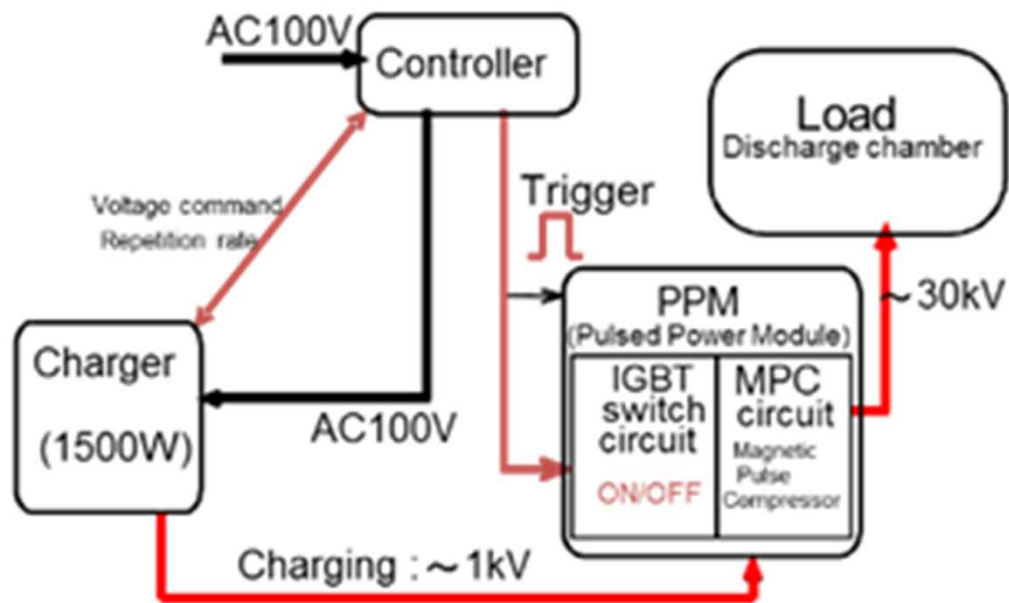
任意波形パルスパワーモジュ  
レータで細胞応答制御



パルス電界印加  
によるCa<sup>2+</sup>増加

## 3つのモジュールから構成

1. コントローラ
2. 充電器
3. パルスパワーモジュレータ

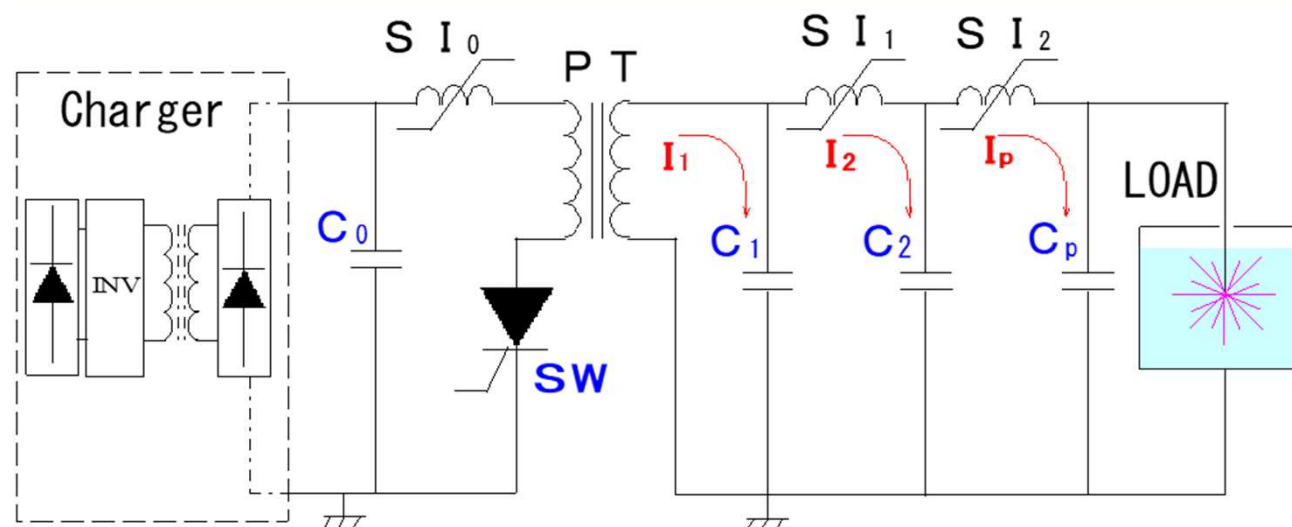


システム構成例



小型パルスパワーシステム外観

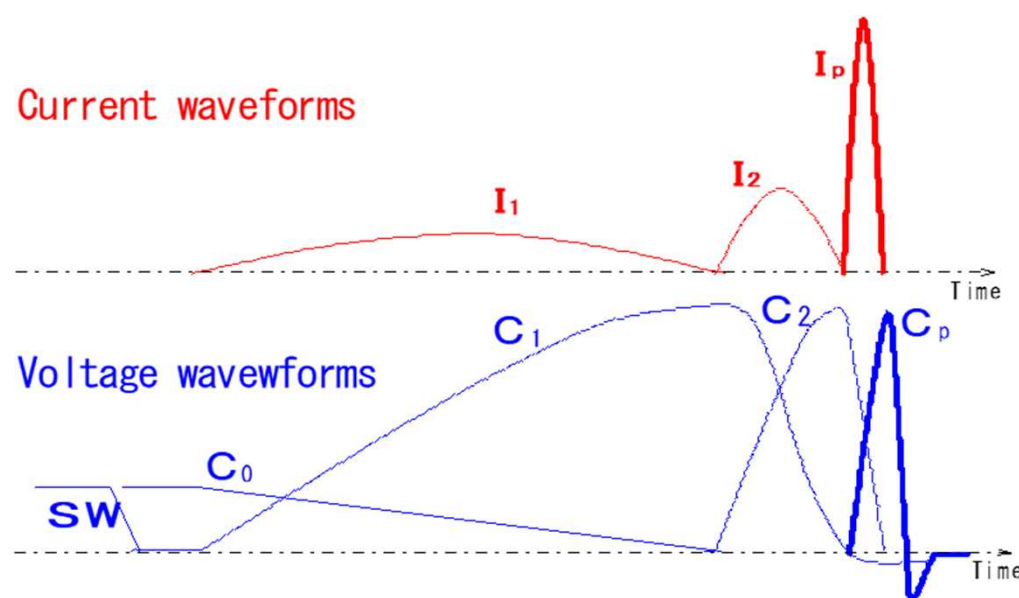
# 従来技術(小型磁気パルス圧縮回路)



2段磁気パルス圧縮回路

基本的にエネルギー  
はC-C転送  
 $C_0 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow (C_p + \text{Load})$

LC共振回路による電流  
パルス圧縮

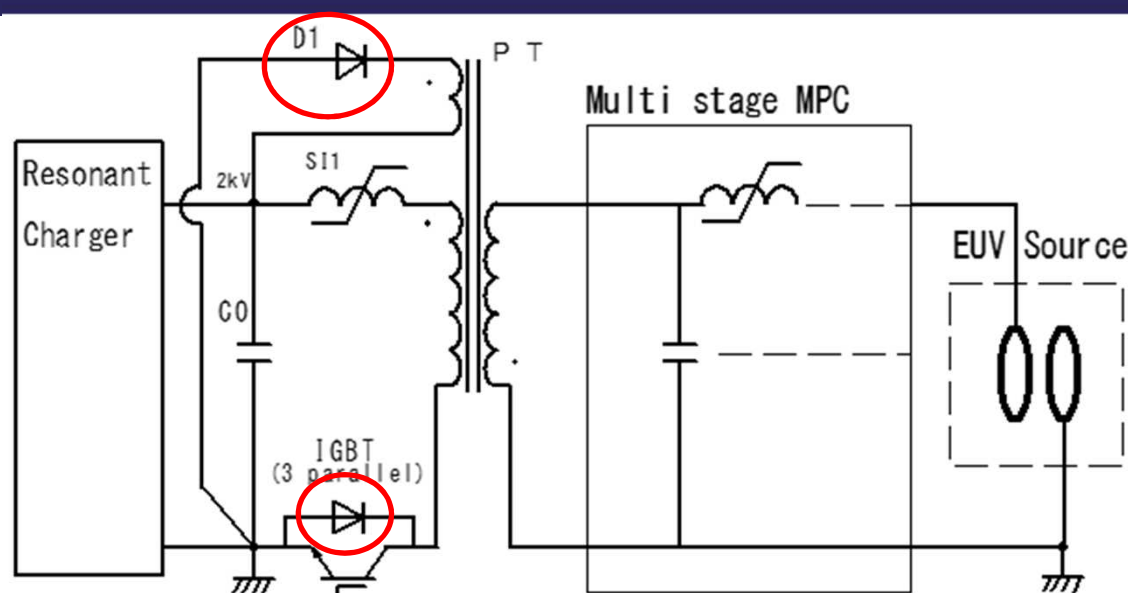


動作電流電圧波形

余剰エネルギーは  
回路内で消費される

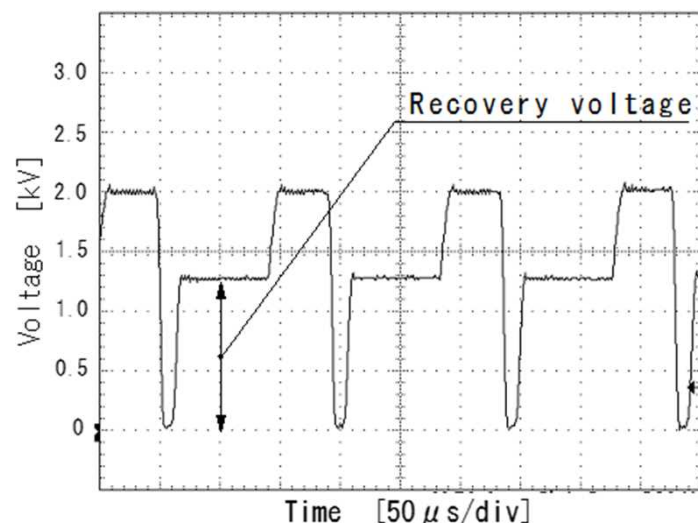
熱となる！





- ✓ IGBTスイッチを使用
- ✓ トランスに3次巻き線
- ✓ 高速ダイオードを利用
- ✓ サージ電圧対策は必要

多段磁気パルス圧縮回路



エネルギー回生動作電圧波形



磁気パルス圧縮を用いた  
EUV光源

## 半導体材料の物理特性

Material	Si	SiC (4H)	GaN	Diamond
Band gap [eV]	1.12	3.26	3.39	5.47
Electron mobility $\mu_e$ [cm <sup>2</sup> /Vs]	1400	1000	900	2200
Breakdown strength $E_c$ [kV/cm]	300	2500	3300	10000
Thermal conductivity $\lambda$ [W/cmK]	1.5	4.9	1.3	20
Relative permittivity $\epsilon_r$	11.8	9.7	9	5.5
Saturated drift velocity $v_{sat}$ [cm/s]	1.0 x10 <sup>7</sup>	2.2 x10 <sup>7</sup>	2.7 x10 <sup>7</sup>	2.7 x10 <sup>7</sup>

➡ スイッチング電圧

➡ オン抵抗(損失)

➡ 絶縁破壊電圧

➡ 冷却

➡ オン抵抗(損失)

➡ スイッチング速度

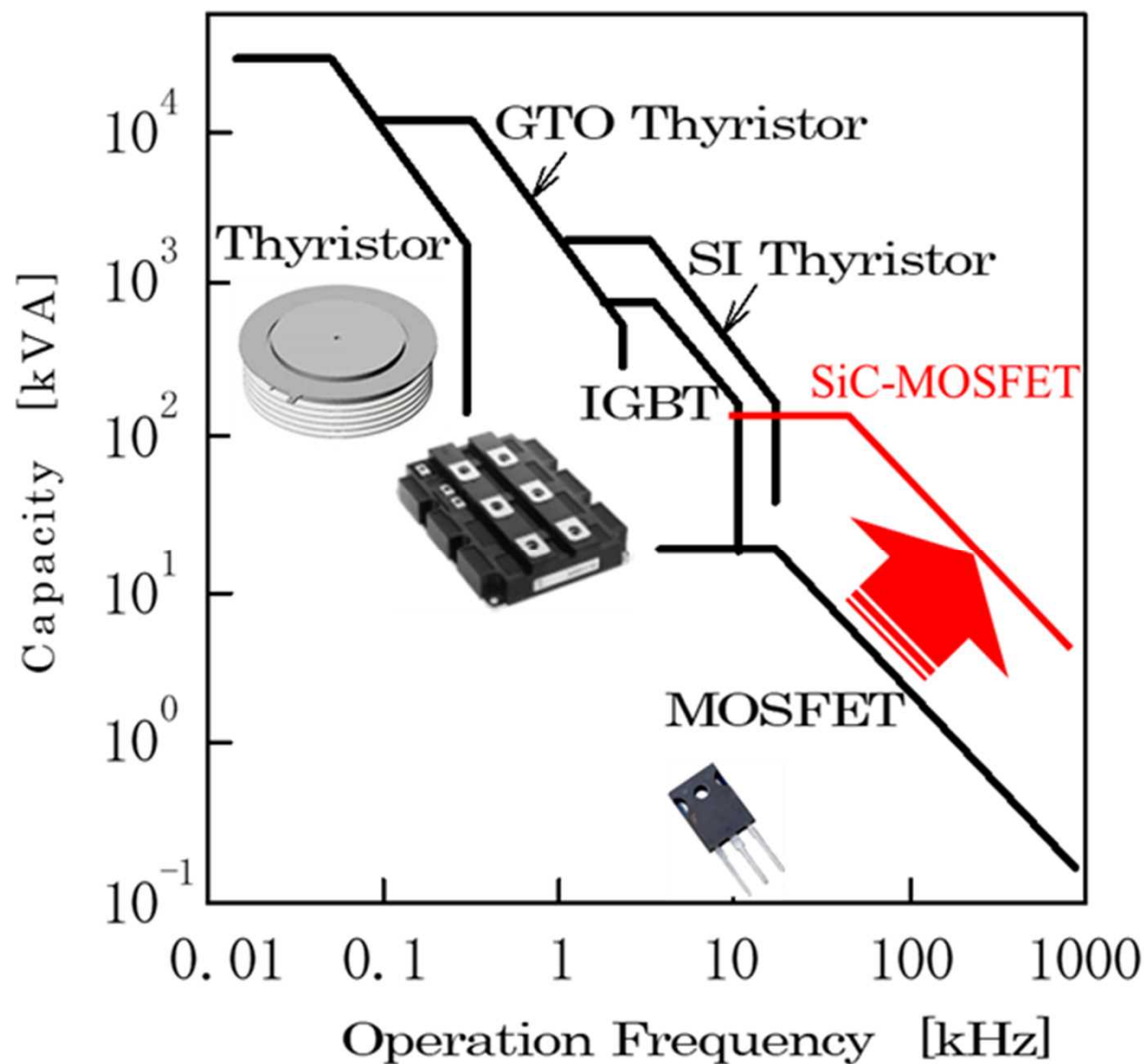
絶縁破壊電圧:  $V_{bd}$

$$V_{bd} = \frac{\epsilon}{2eN_d} E_c^2$$

オン抵抗:  $R_{on}$

$$R_{on} = \frac{4V_{bd}^2}{\mu\epsilon A E_c^3}$$





## 使用デバイスの変遷

サイリスタ

1990年頃

GTOサイリスタ

2000年頃

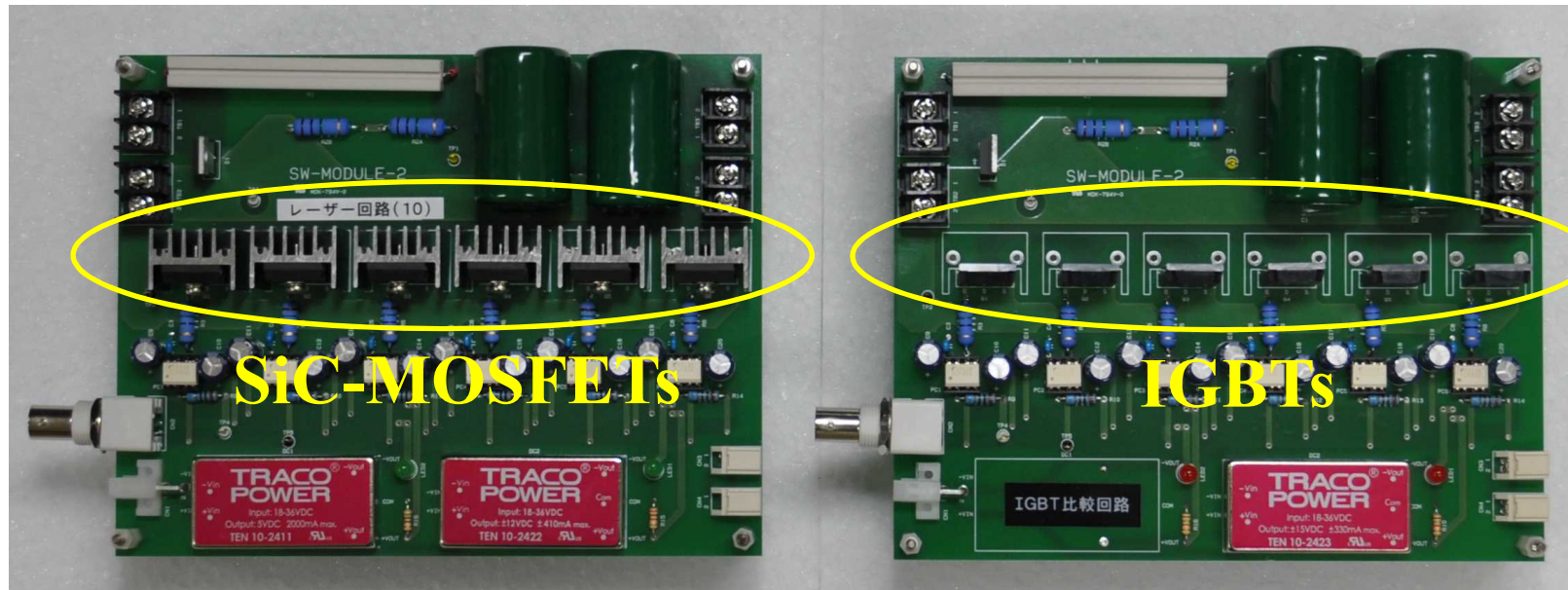
IGBT

現在

SiC-MOSFET?

パワーデバイスのスイッチング容量と動作周波数

# 低損失評価 (SiC-MOSFET vs IGBT)



## 比較評価デバイスの仕様値

評価モジュール  
による性能比較

Switch Device	SiC-MOSFET	IGBT
Device Model	C2M0025120D (CREE)	IRGPS60B120KDP (IR)
Switching Voltage	1200 V	1200 V
Pulse current	250 A x6p	240 A x6p
Storage capacitance	2500 nF	2500 nF

Storage energy : 1 [J/module] at  $V_0=900V$

## 評価パラメータの定義

$$\text{入力エネルギー [J]} = \frac{1}{2} C_0 V^2$$

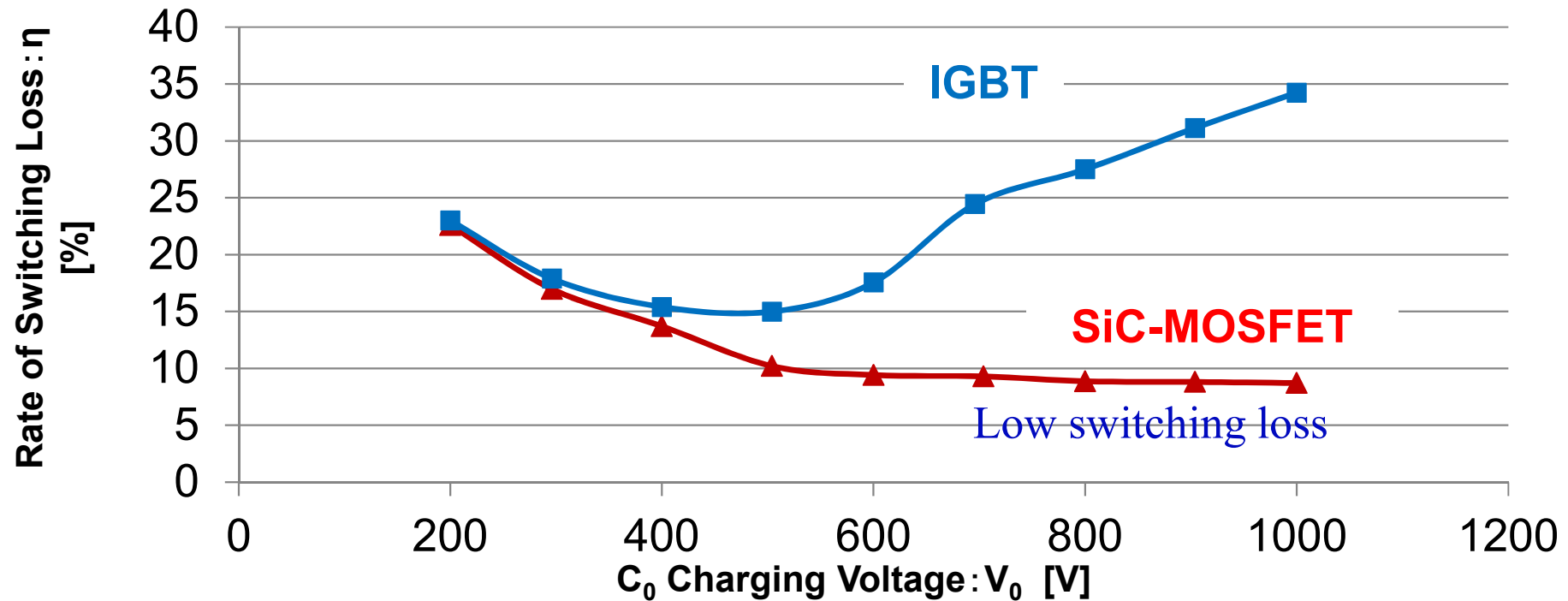
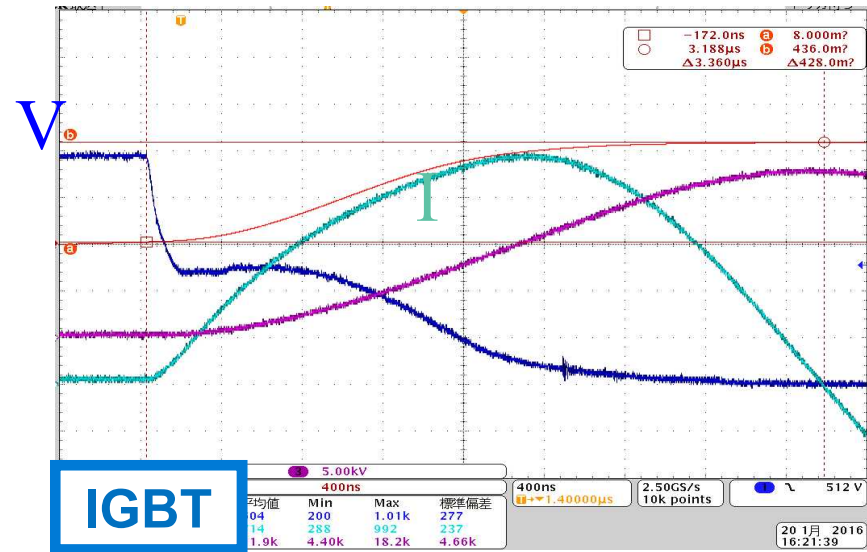
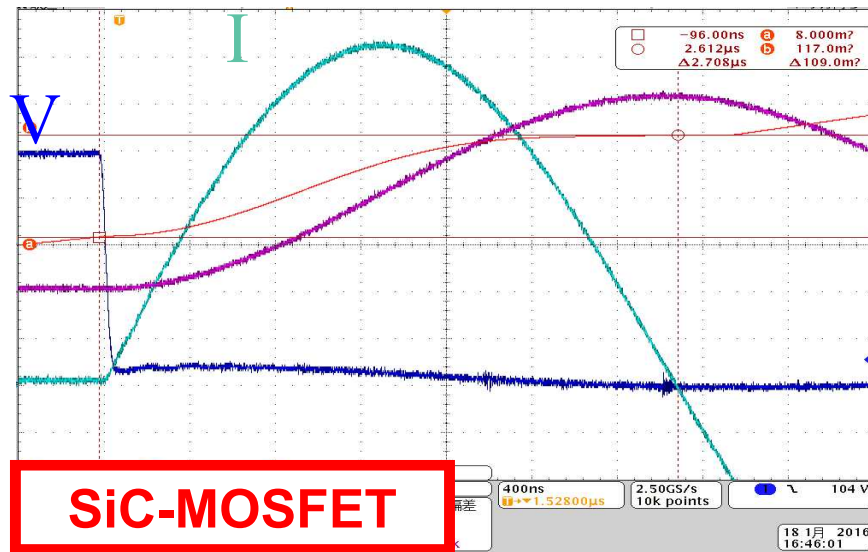
$$\text{スイッチング損失 [J]} = \int_0^T V(t) I(t) dt$$

$$\text{損失率 [\%]} = \frac{\text{スイッチング損失}}{\text{入力エネルギー}} \times 100$$

# 低損失評価(SiC-MOSFET vs IGBT)

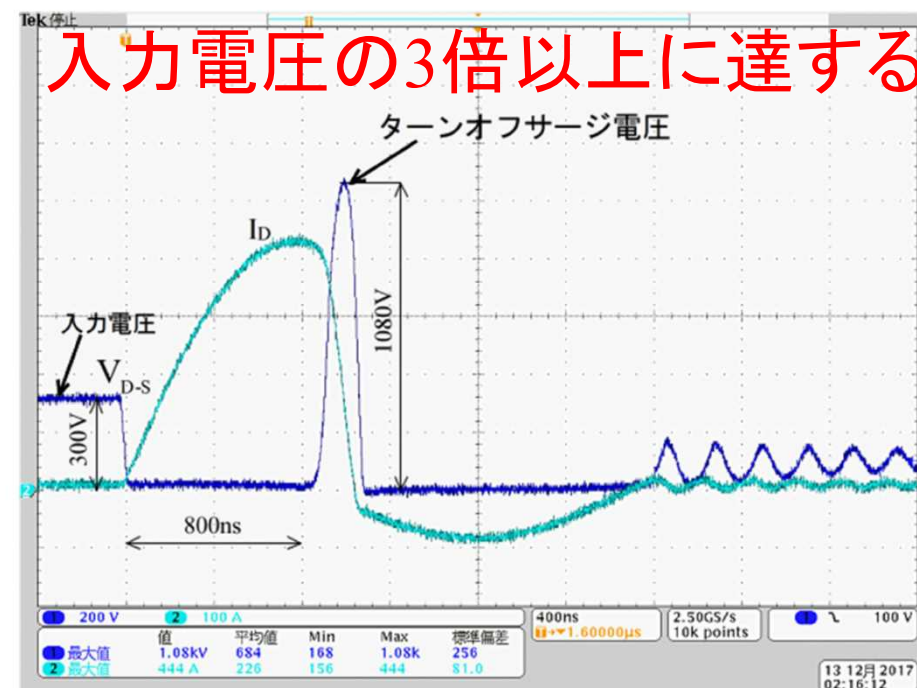
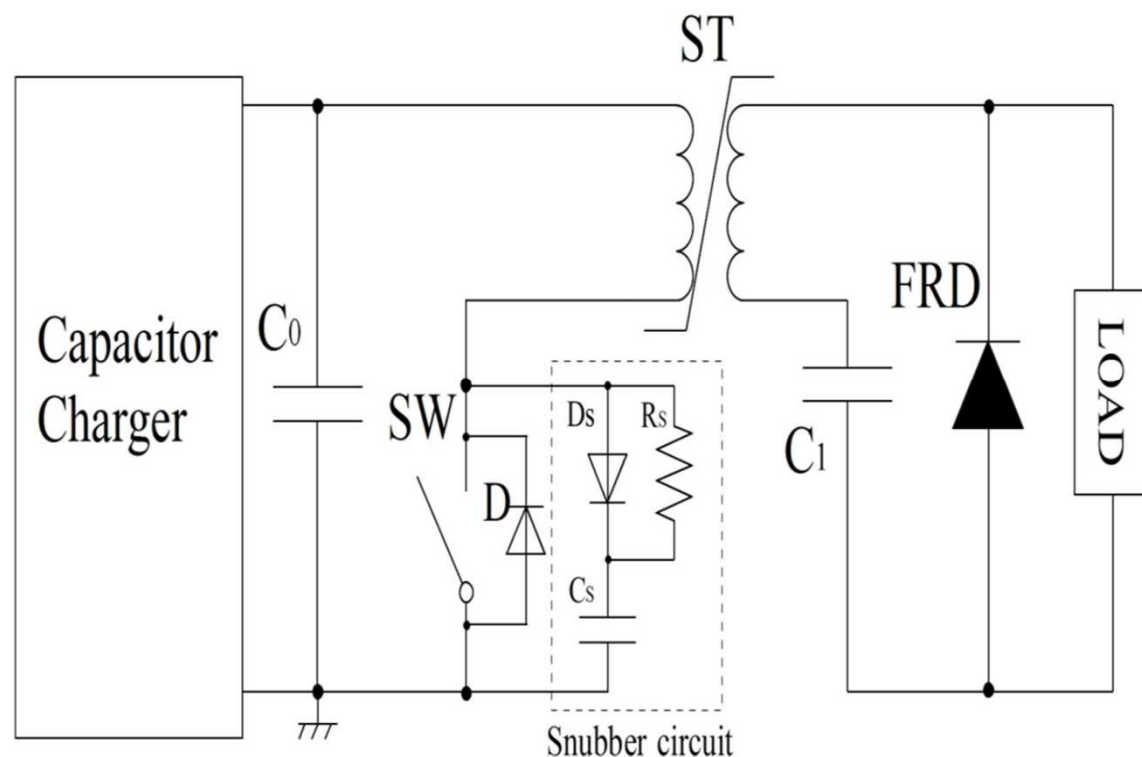


Kumamoto University



SiC-MOSFETとIGBTの損失率比較

# ターンオフサージ(通常方式)



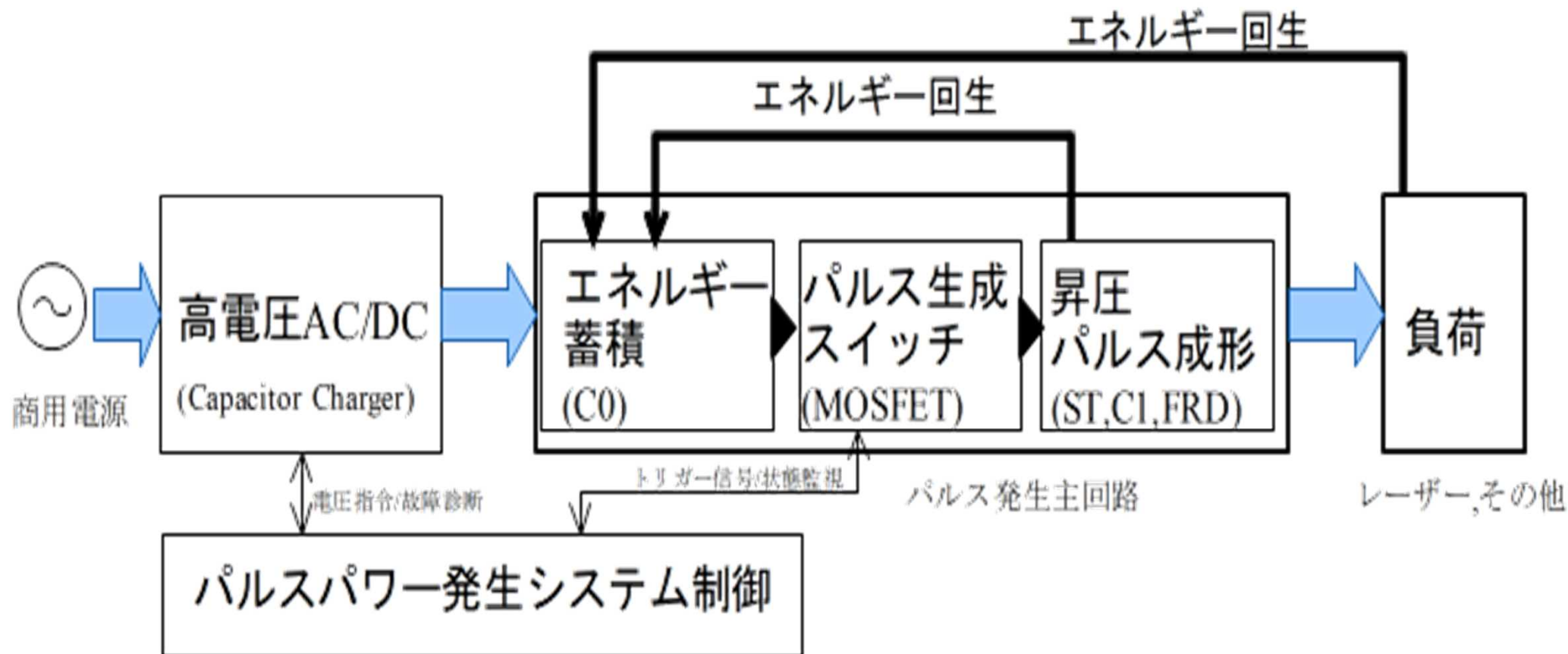
ターンオフサージ電圧波形  
(オフタイミング考慮無し)

C0 : 初段コンデンサ, C1 : 2次側コンデンサ  
SW: 半導体スイッチ, D : 逆並列ダイオード  
ST : 可飽和トランス, FRD : 高速逆回復ダイオード  
Ds : スナバダイオード, Cs : スナバコンデンサ  
Rs : スナバ抵抗

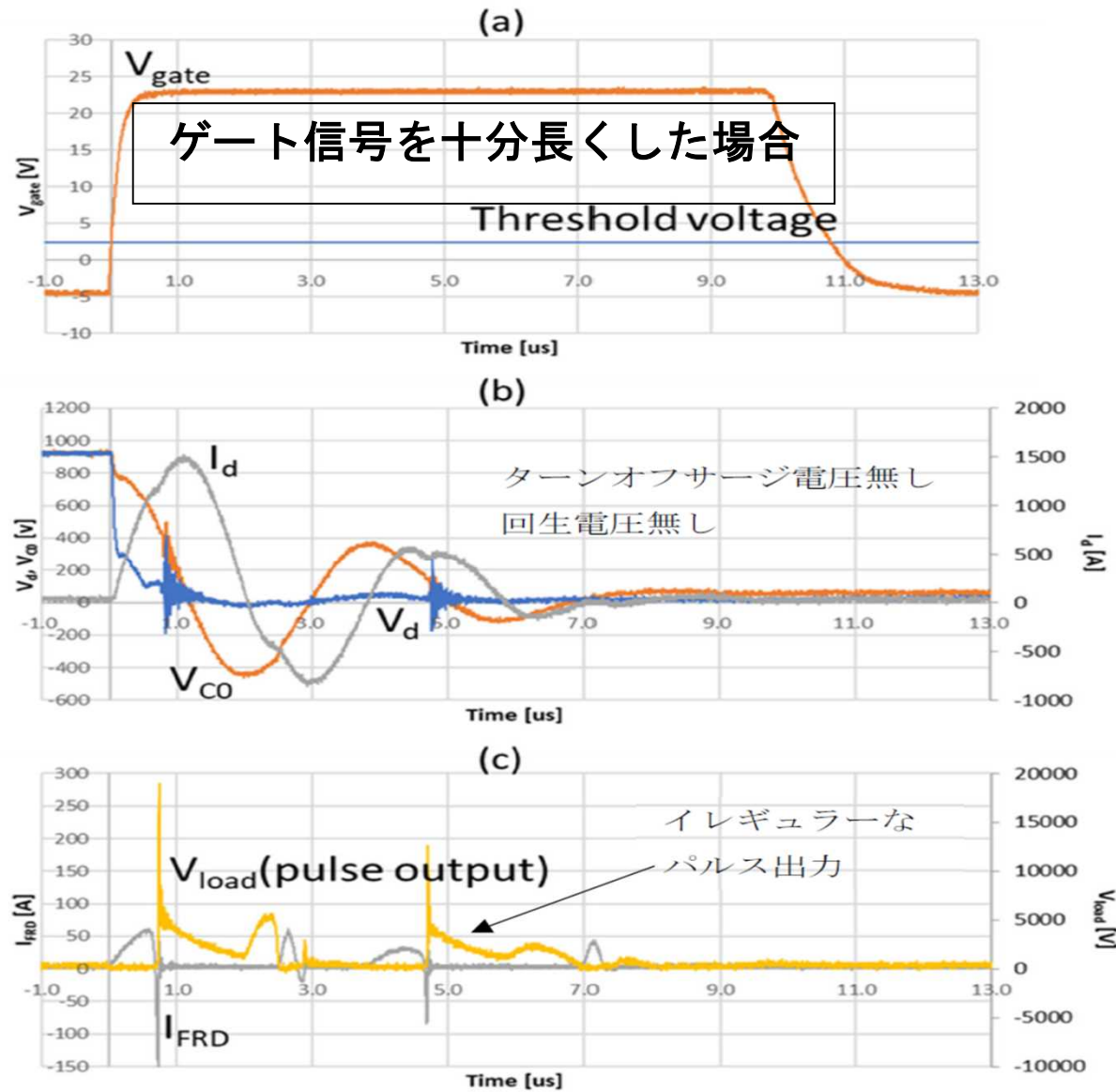
スナバを付加したパルス発生基本回路



# エネルギー回生の流れ



※高速ゲートターンオフのタイミング制御が重要！

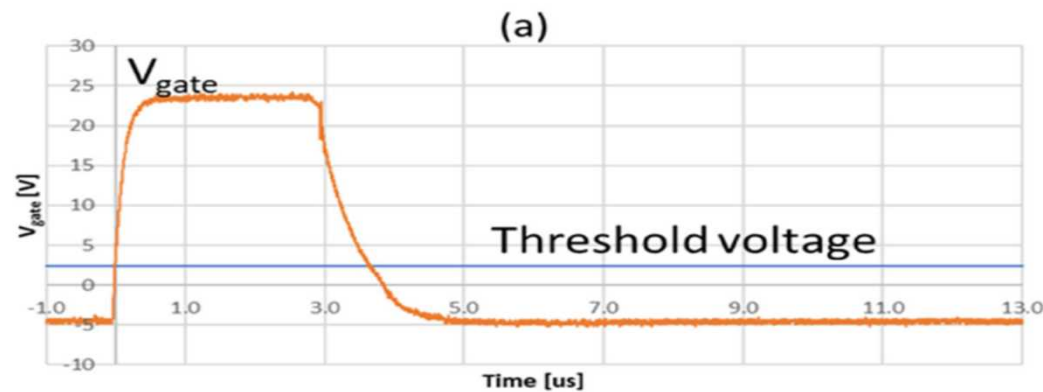


ゲート電圧

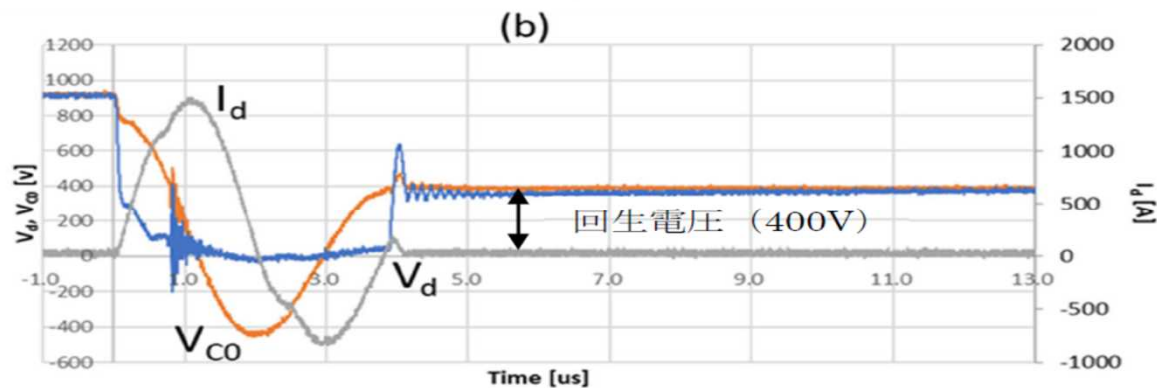
スイッチング  
電流電圧波形

出力電圧波形

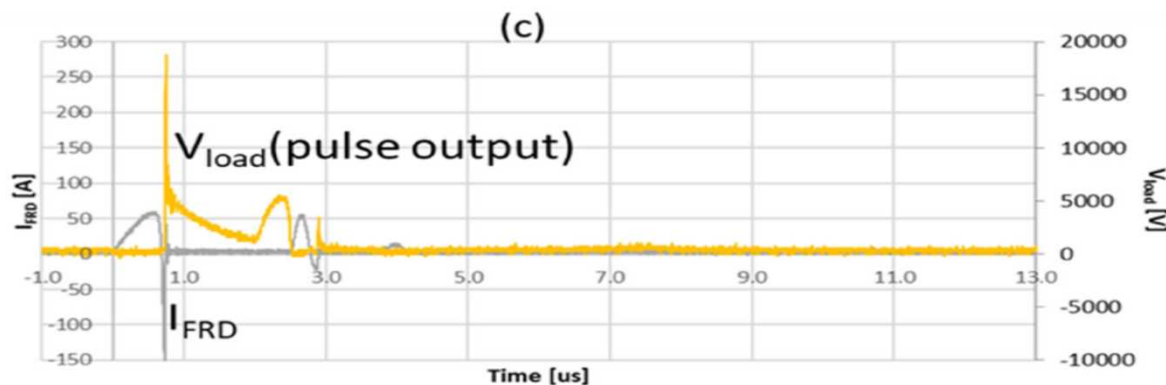
トリガ信号(TTL)10  $\mu$ s 時の各電圧電流波形



ゲート電圧



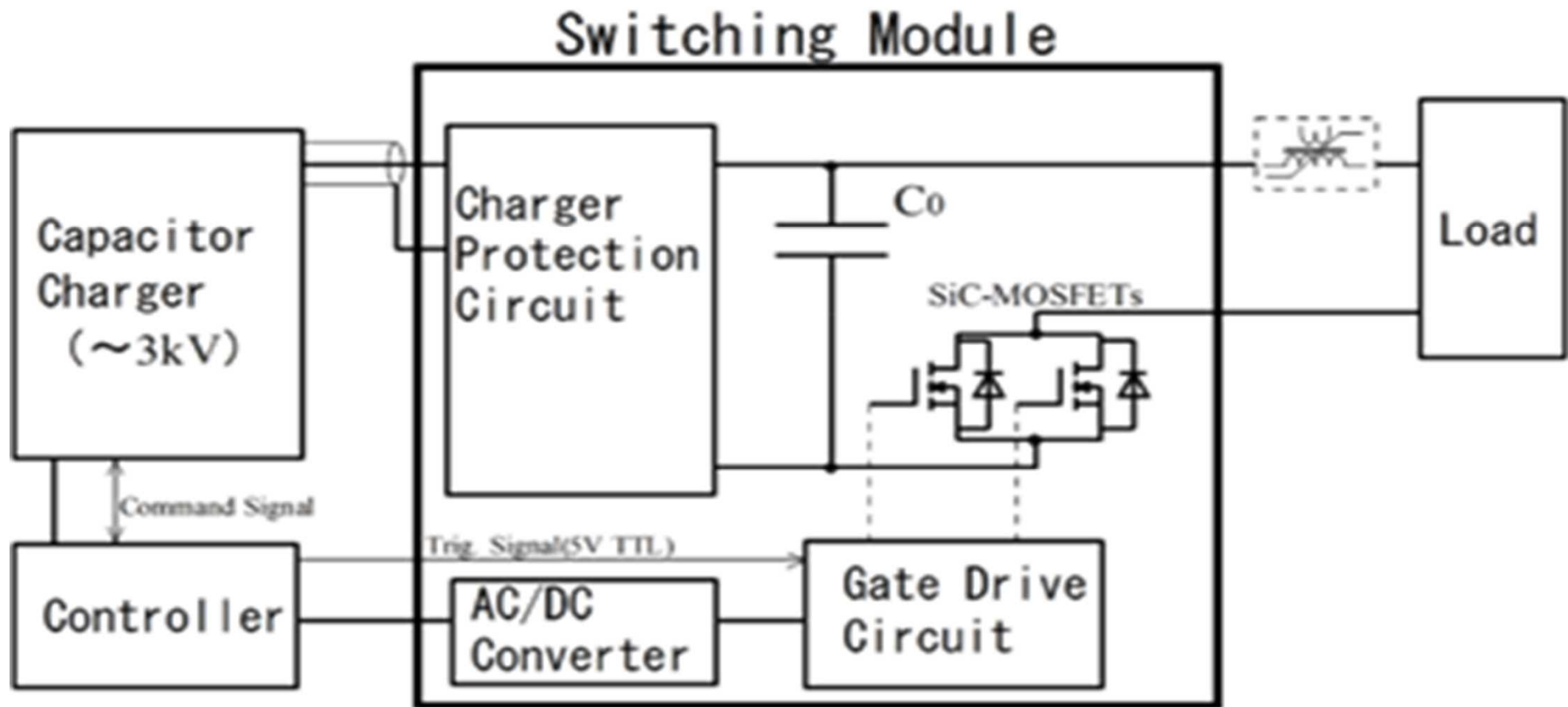
スイッチング  
電流電圧波形



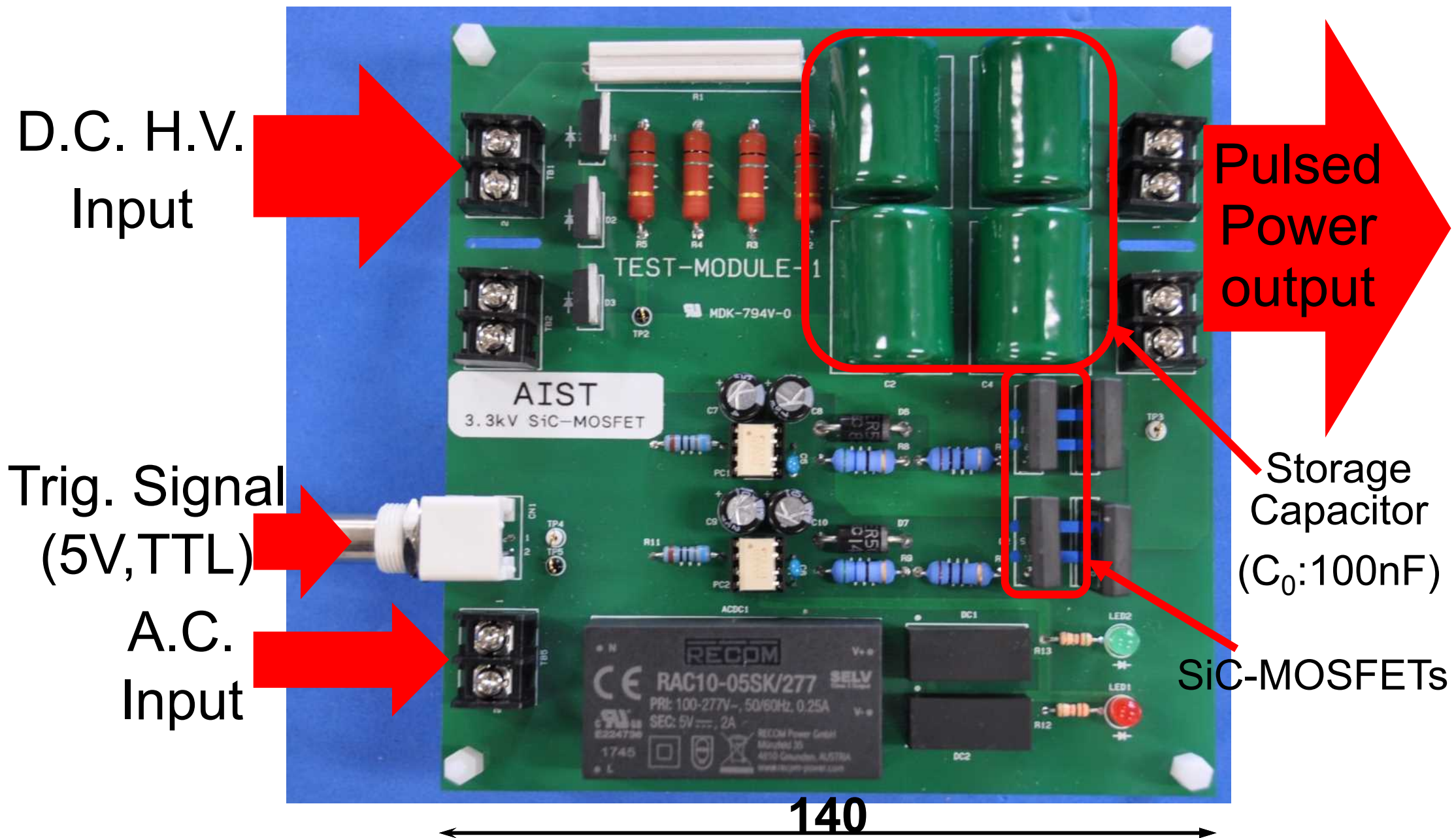
出力電圧波形

トリガ信号(TTL)3  $\mu$ s( $I_d$  の反転タイミング)時の各電圧電流波形

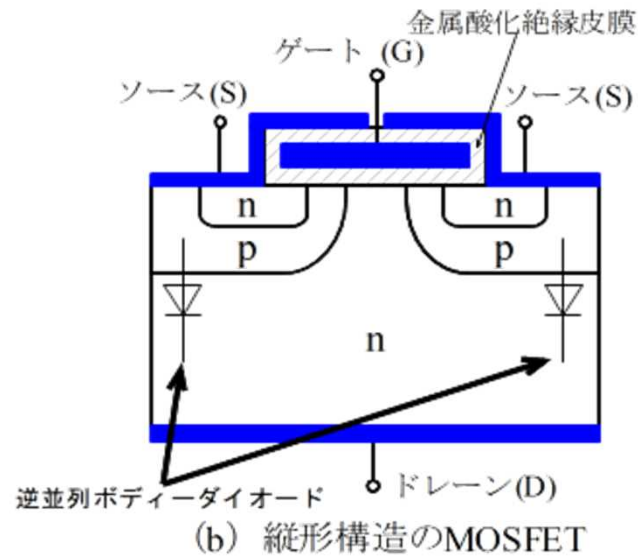
# 高耐圧(3kV)テストモジュール開発



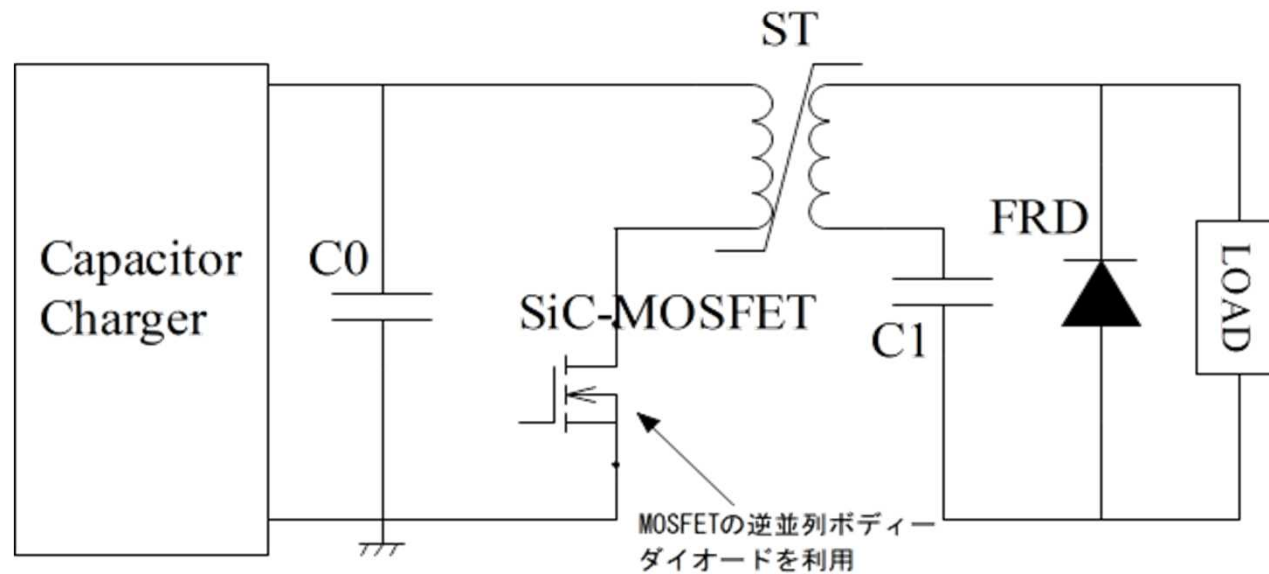
# 高耐圧テストモジュール外観







縦型構造のMOSFET (VMOS)  
内蔵のボディダイオードを利用



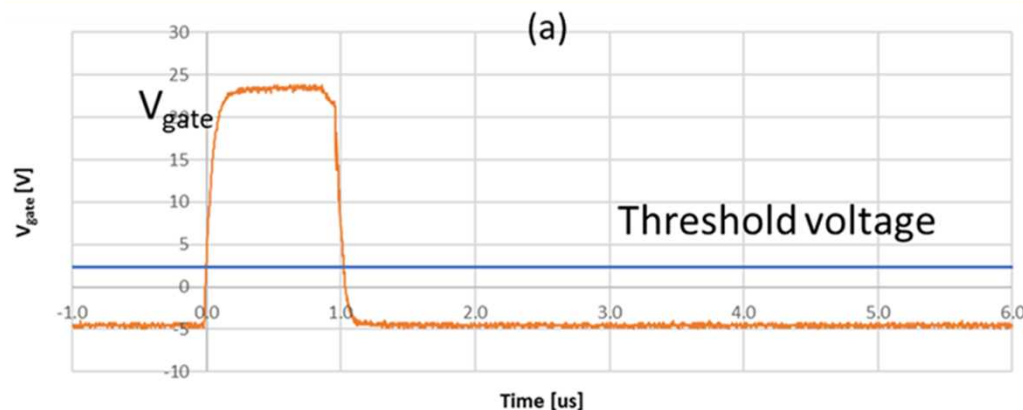
シンプルな回路構成！

スナバレス高機能パルス発生回路

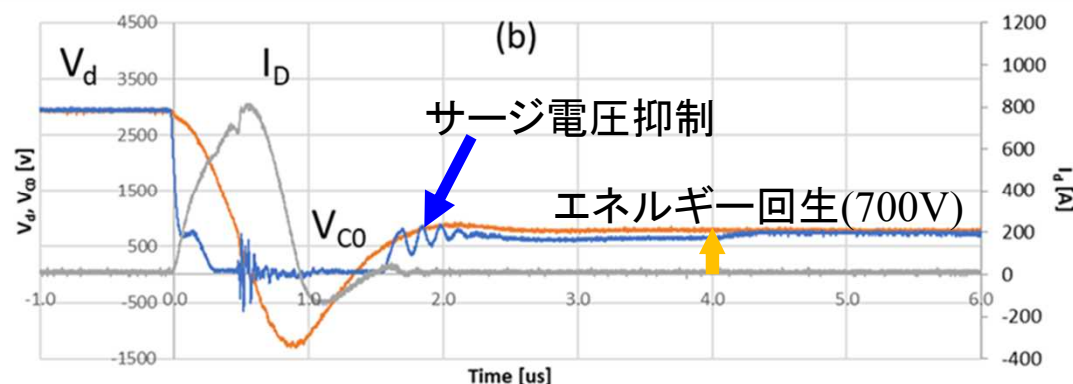
# 高耐圧(3kV)SiC-MOSFET試験



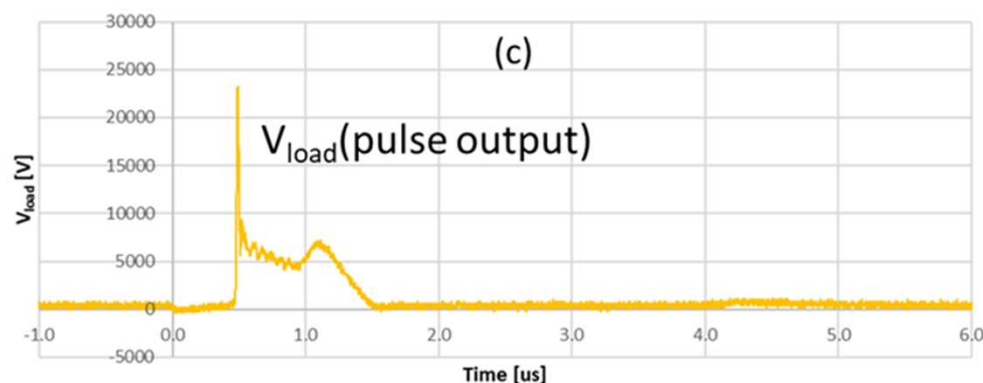
Kumamoto University



← 高速ターンオフ  
ゲート電圧



← 3kVスイッチング  
電流電圧波形



← 出力電圧波形

トリガ信号(TTL)1 $\mu$ s高速ターンオフ時の各電圧電流波形

- ディスクリート型SiC-MOSFETを用いて3000Vの高速スイッチング(高 $di/dt$ 化)を達成。
- IGBTに比べ損失率半減 (1700V動作時)。
- ターンオフタイミングの最適化でエネルギー回生を実現。
- スナバレスでターンオフサージ電圧フリーを達成。
- SiCデバイスの導入により、パルスパワー電源の高性能化が加速、理想的なスイッチングの実現に近づく。

- エキシマレーザーの励起装置（フォトリソグラフィ、液晶アニール、視力矯正用など）
- パルスプラズマ発生装置
- 高繰り返しパルス電源装置
- 蓄電機器のエネルギー回生回路
- 移動体のモバイル蓄電装置のエネルギー-回生の可能性

- パルスレーザ、パルスプラズマ、パワーエレクトロニクスの技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、電気自動車などのモバイル蓄電機器を開発中の企業、高機能電気エネルギー応用分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。
- エキシマレーザには即導入が可能な技術である。



- 発明の名称 : スナバレスターンオフサージ抑制回路、エネルギー回収方法及びプログラム
- 出願番号 : 特願2019-115930
- 出願人 : 国立大学法人熊本大学
- 発明者 : 佐久川 貴志

**熊本大学 熊本創生推進機構**

**主任リサーチ・アドミニストレーター**

**和田 翼**

**TEL 096-342-3247**

**FAX 096-342-3300**

**e-mail [liaison@jimu.kumamoto-u.ac.jp](mailto:liaison@jimu.kumamoto-u.ac.jp)**