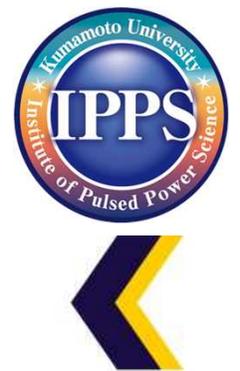
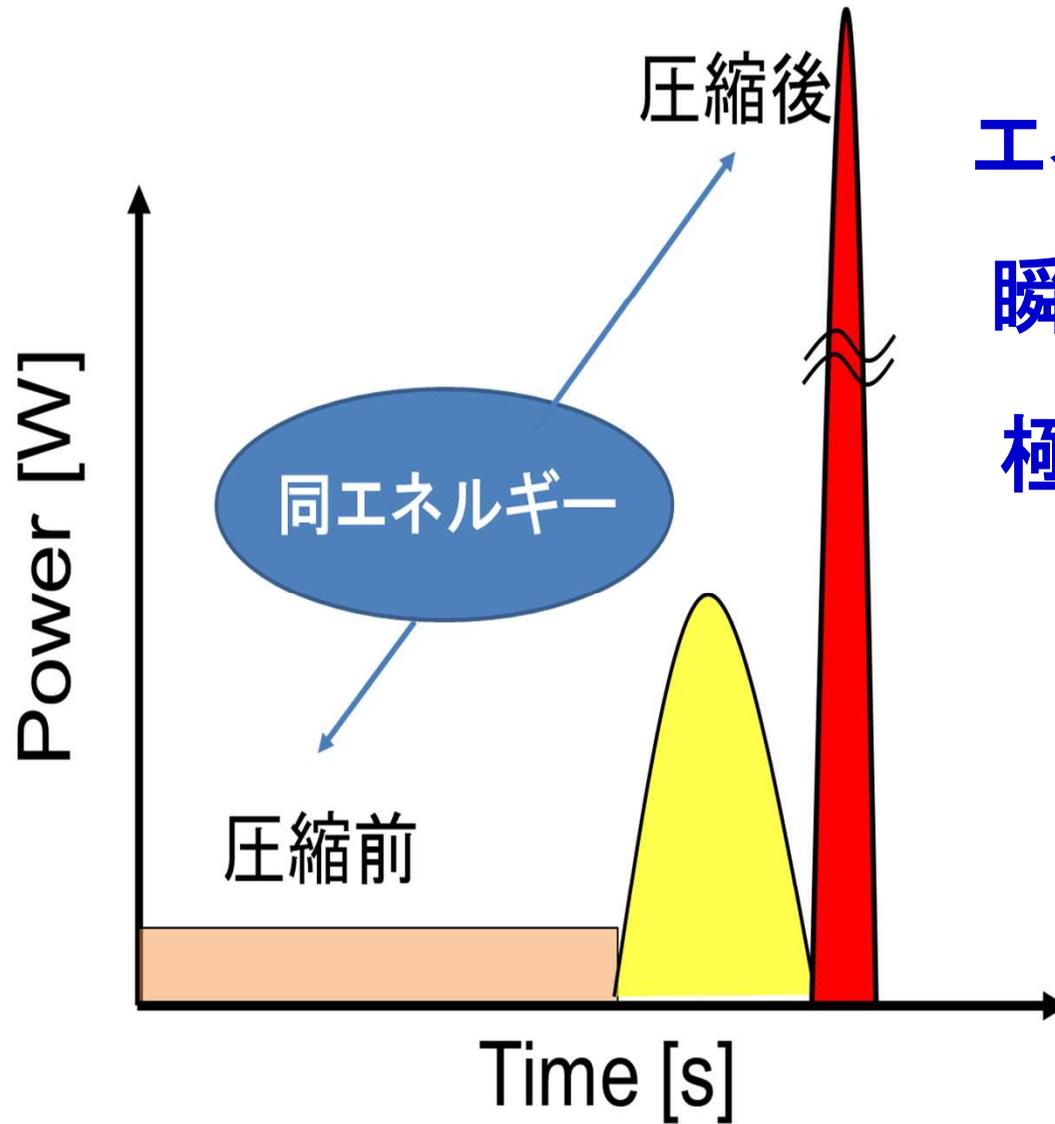


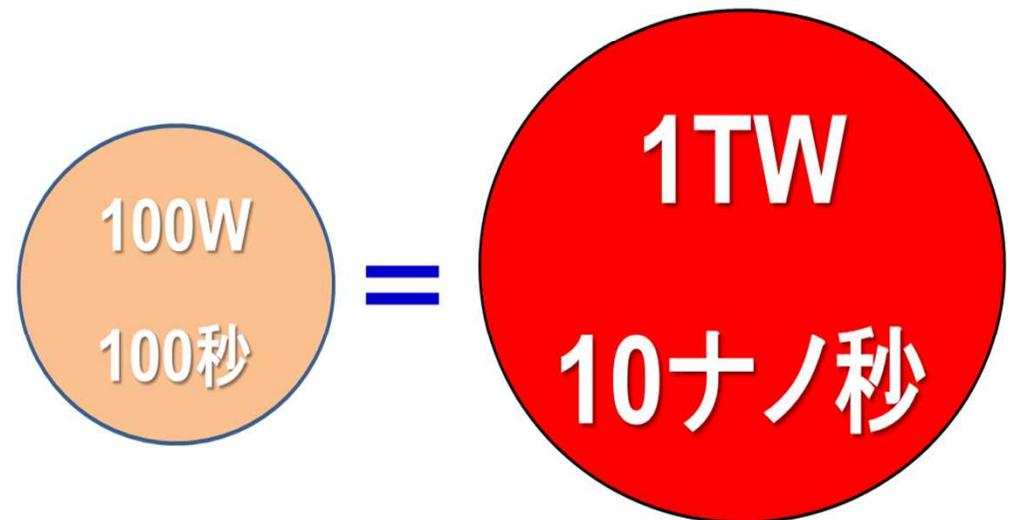
新型パワーデバイスを用いた パルス電源の低損失化とエネルギー回生

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

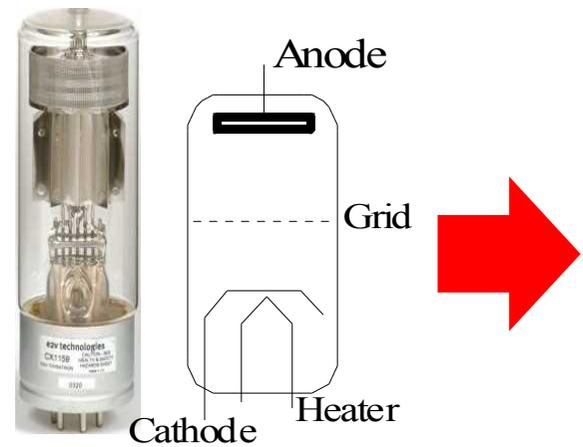
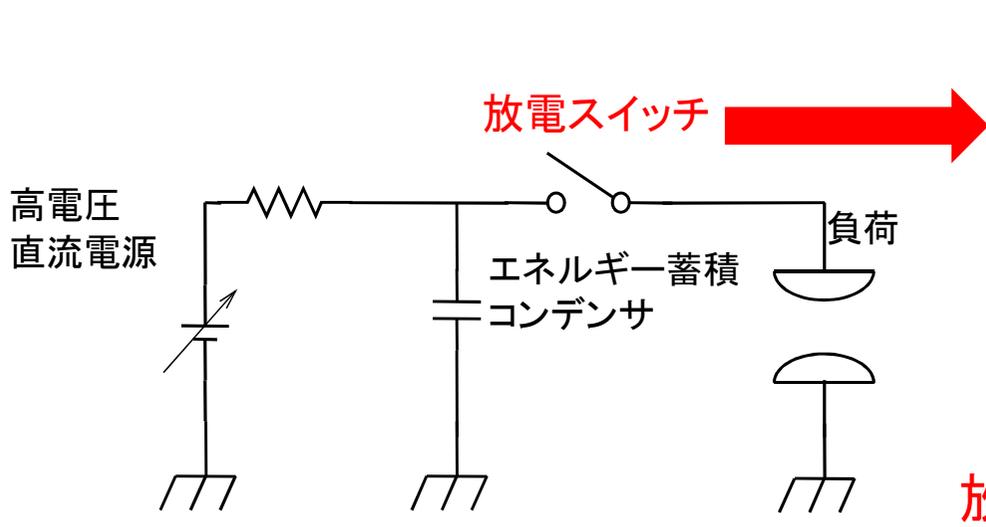




エネルギーを極短時間に圧縮
瞬間的なMW~TW級電力で
極限活性場生成可能な技術



※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。



放電スイッチ(Thyatron)

産業化への課題

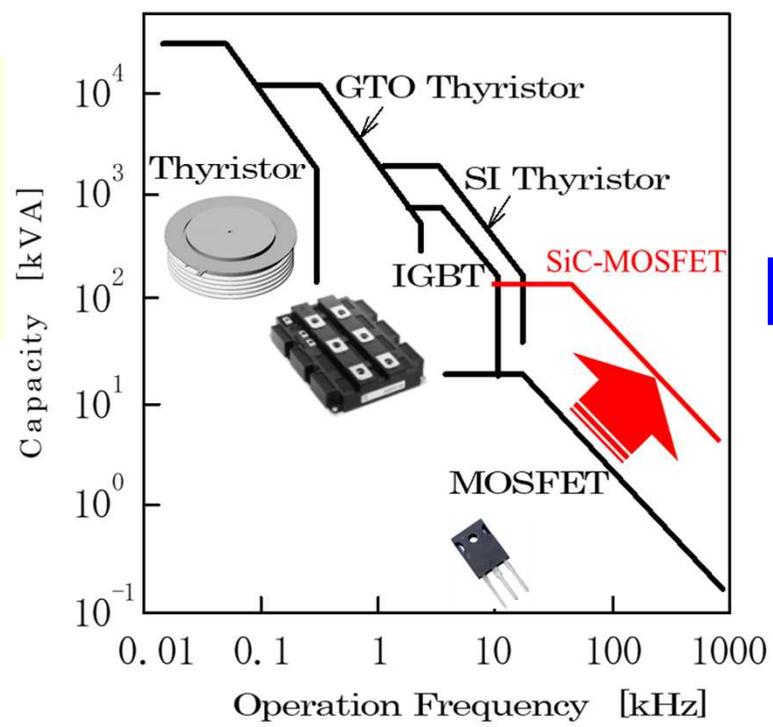
- オンは高速だがオフが出来ない
- 電極消耗で経年で劣化が早い
- 寿命が短い (10⁸パルス程度)
- 安定性が低い

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 (10¹²パルス以上)
- 高安定動作



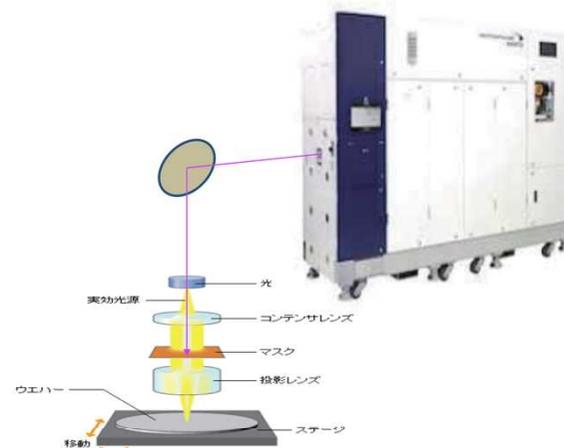
高速サイリスタの開発
GTOサイリスタの改良

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

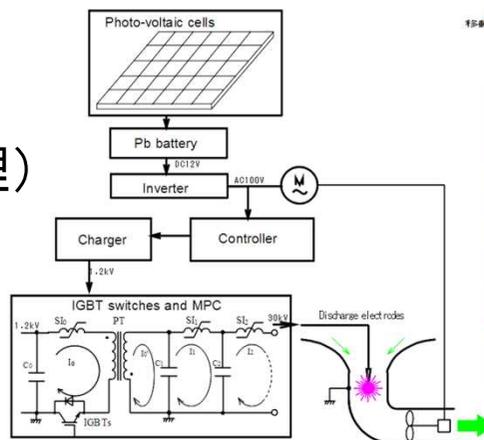
光源・ビーム・プラズマプロセス

- ✓ 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



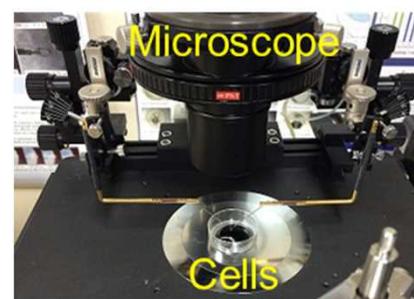
水処理・環境改善

- ✓ 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

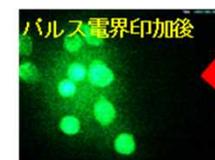
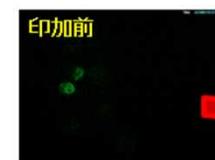


医療・バイオ

- ✓ 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



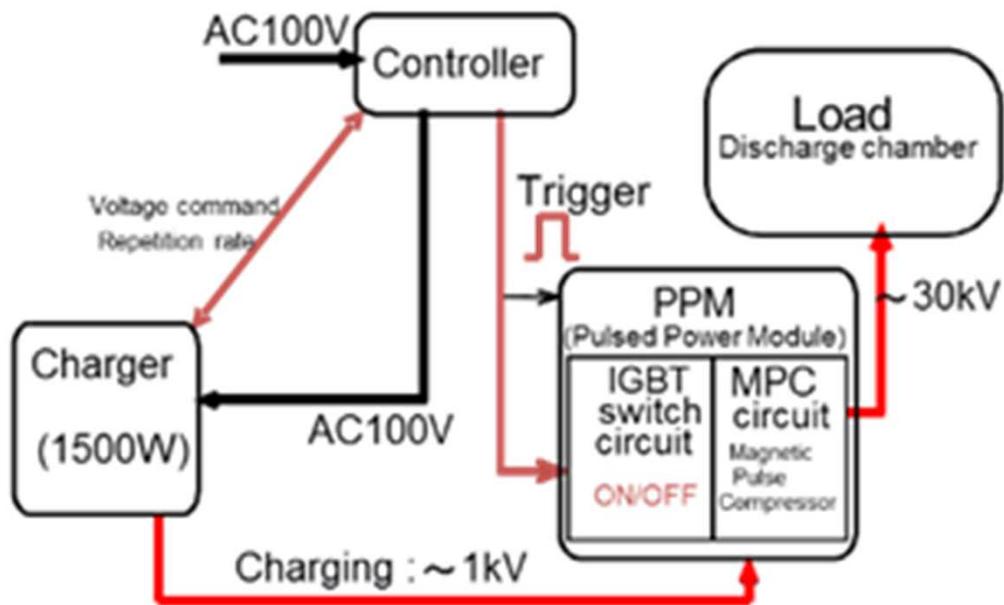
任意波形パルスパワーモジュ
レータで細胞応答制御



パルス電界印加
によるCa²⁺増加

3つのモジュールから構成

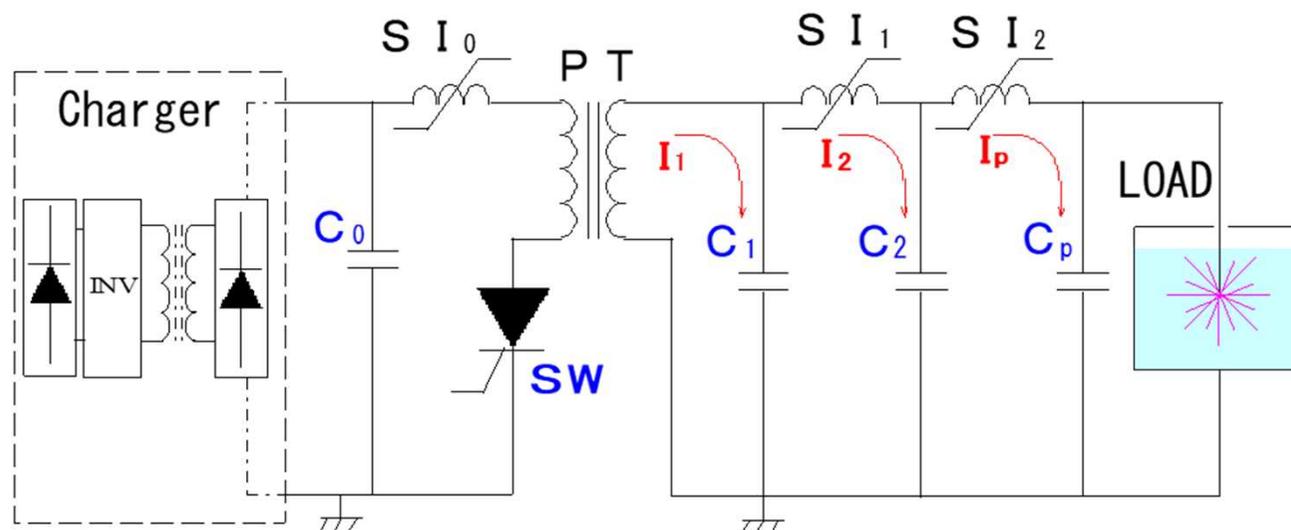
1. コントローラ
2. 充電器
3. パルスパワーモジュレータ



システム構成例



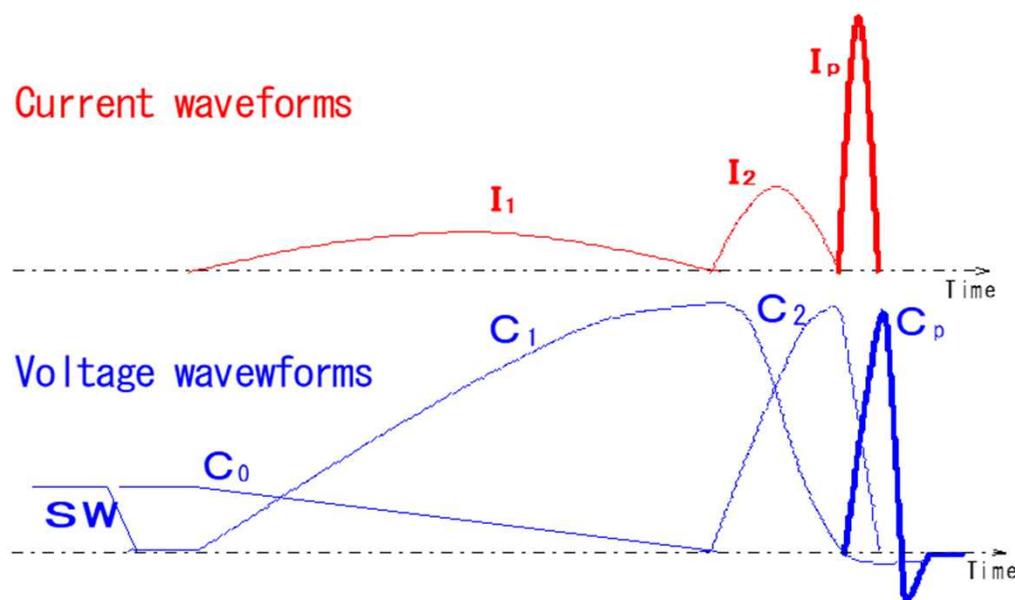
小型パルスパワーシステム外観



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

2段磁気パルス圧縮回路

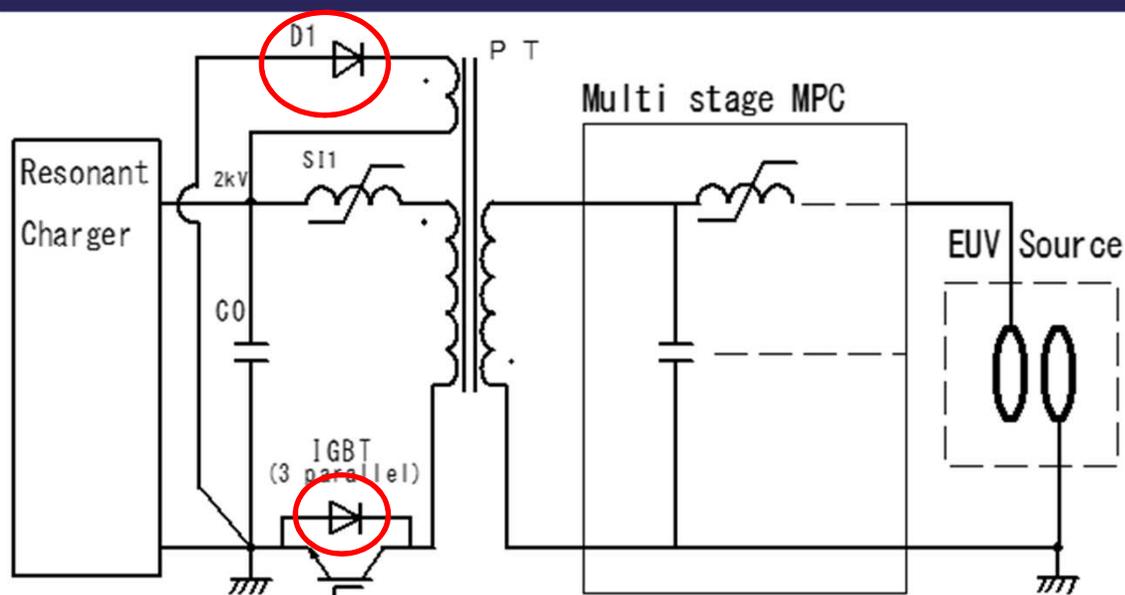
LC共振回路による電流
パルス圧縮



動作電流電圧波形

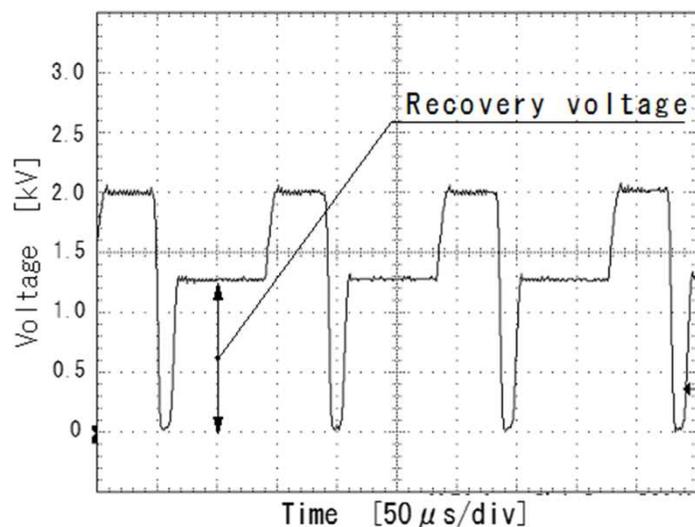
余剰エネルギーは
回路内で消費される

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 μ_e [cm ² /Vs]	1400	1000	900	2200
Breakdown strength E_c [kV/cm]	300	2500	3300	10000
Thermal conductivity λ [W/cmK]	1.5	4.9	1.3	20
Relative permittivity ϵ_r	11.8	9.7	9	5.5
Saturated drift velocity v_{sat} [cm/s]	1.0 x10 ⁷	2.2 x10 ⁷	2.7 x10 ⁷	2.7 x10 ⁷

➡ 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)

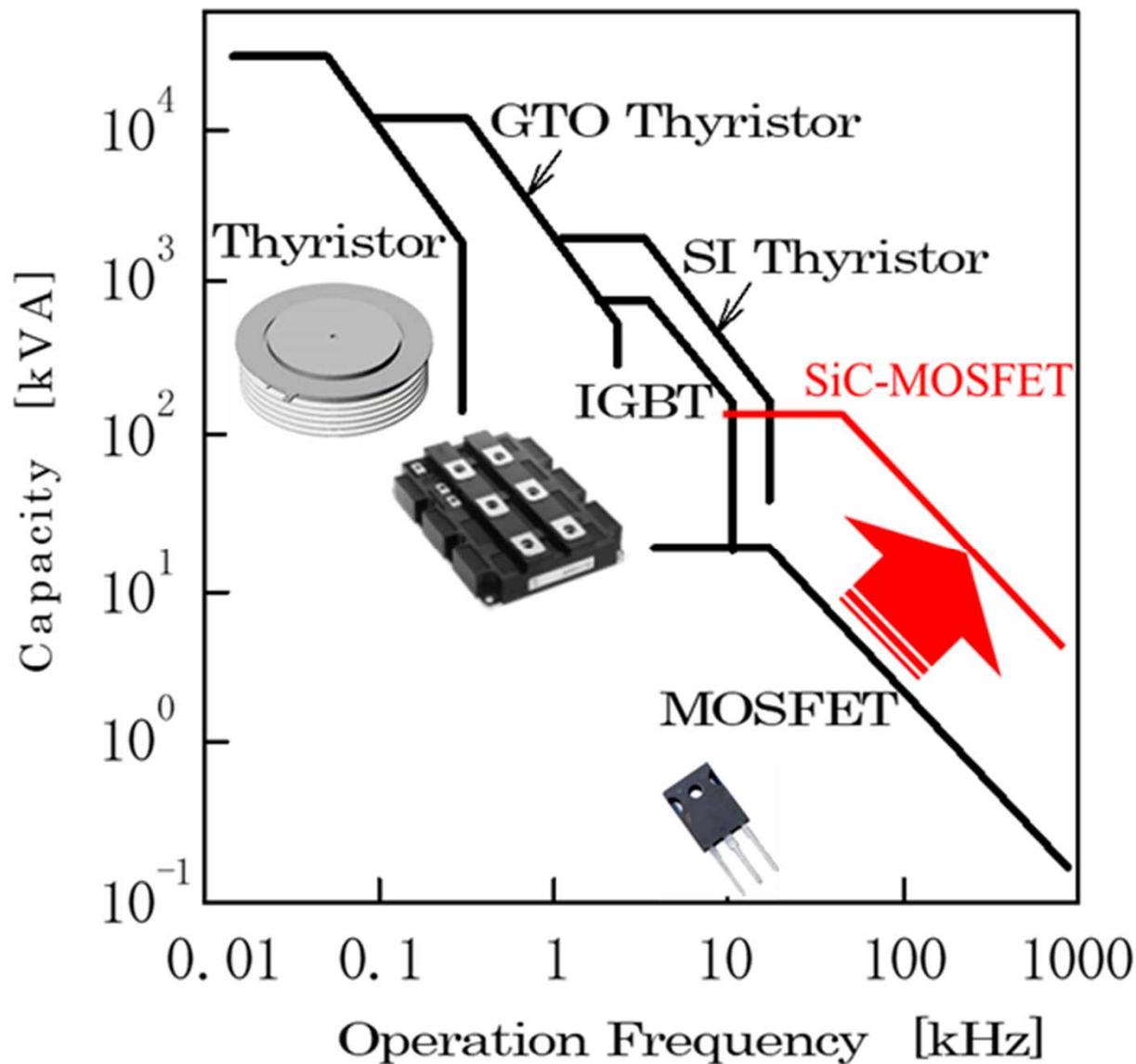
➡ スイッチング速度

絶縁破壊電圧: V_{bd}

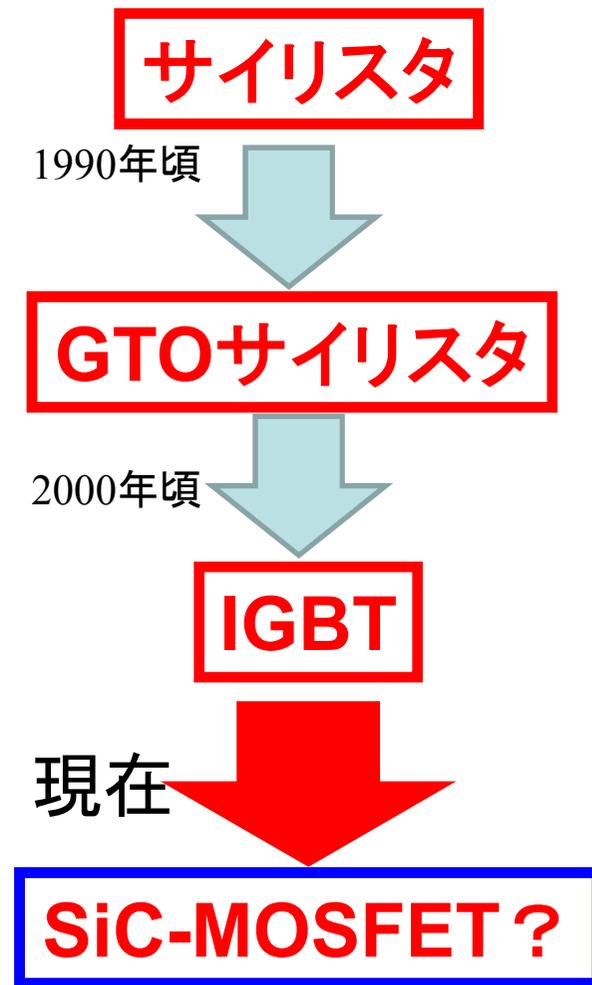
$$V_{bd} = \frac{\epsilon}{2eN_d} E_c^2$$

オン抵抗: R_{on}

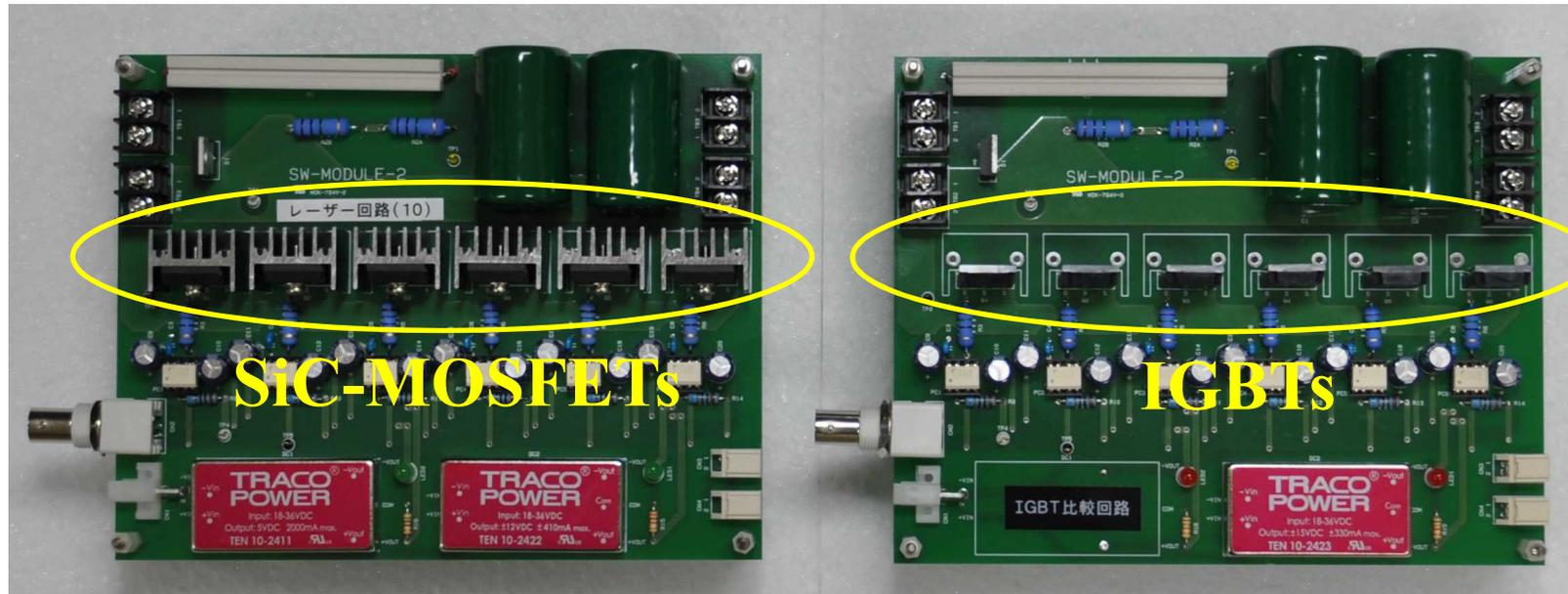
$$R_{on} = \frac{4V_{bd}^2}{\mu\epsilon A E_c^3}$$



使用デバイスの変遷



パワーデバイスのスイッチング容量と動作周波数



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)	IRG6S60B120KDP (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 $V_0=900V$

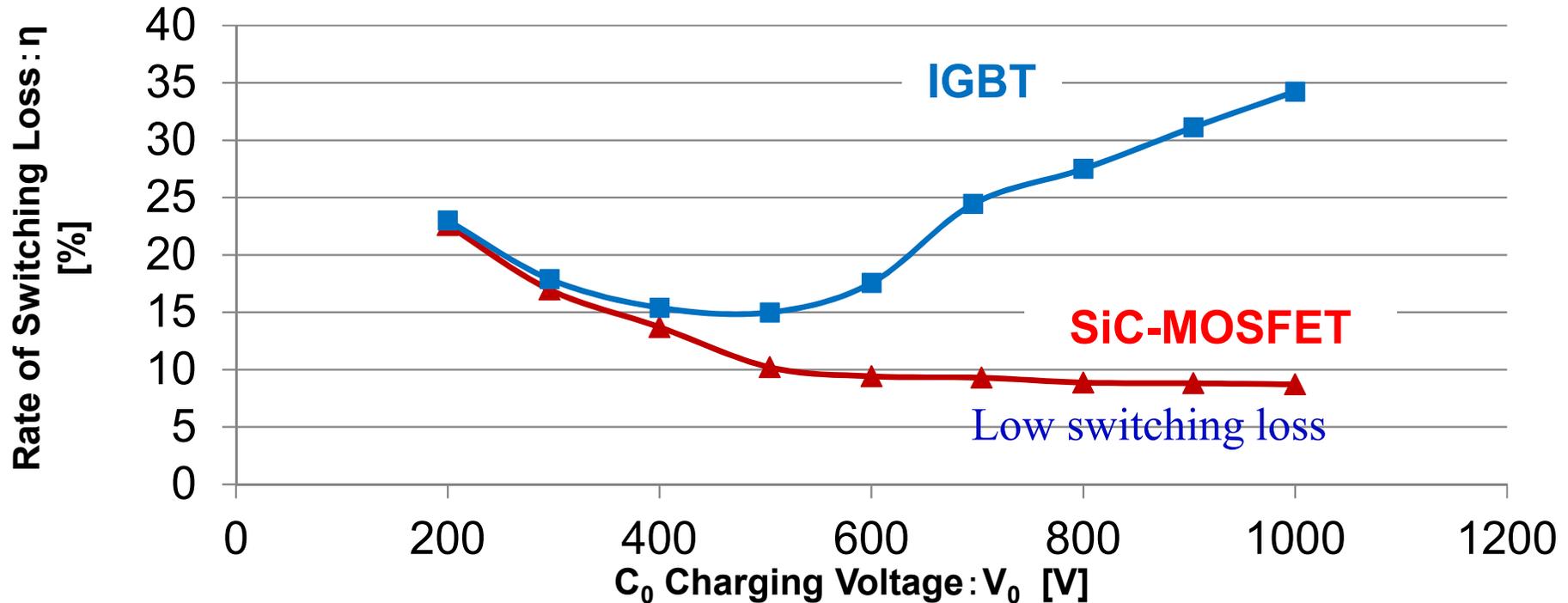
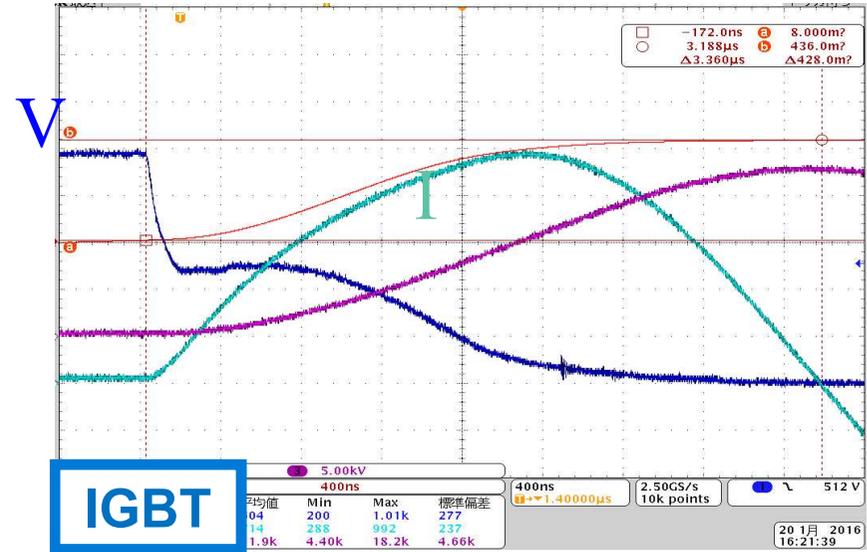
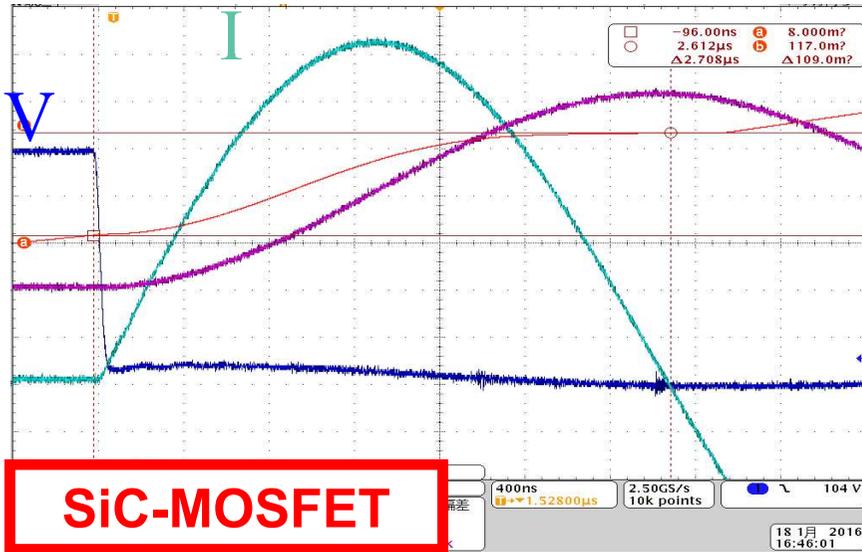
評価パラメータの定義

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

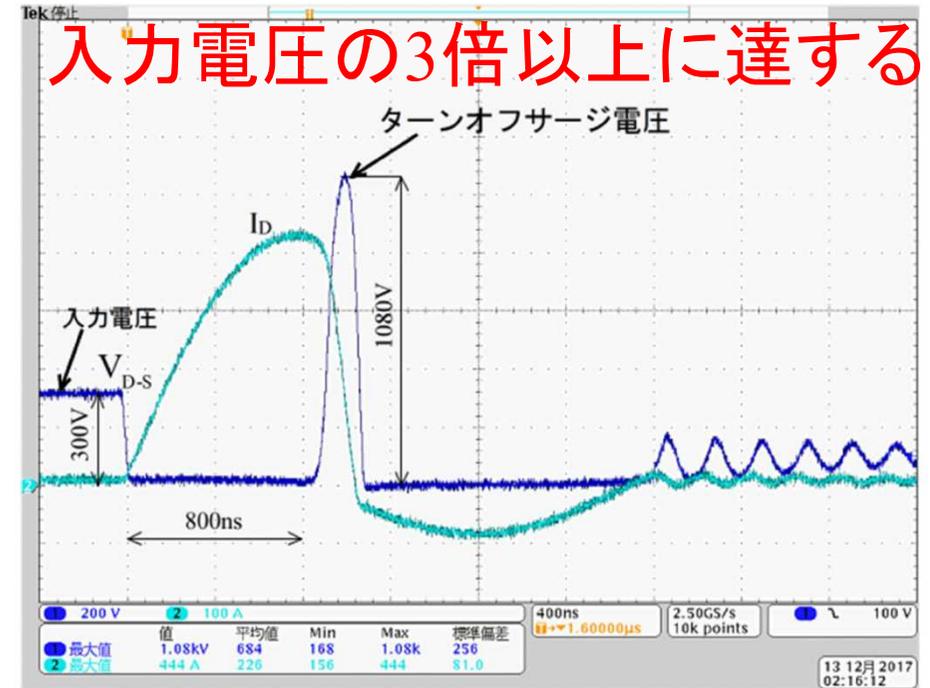
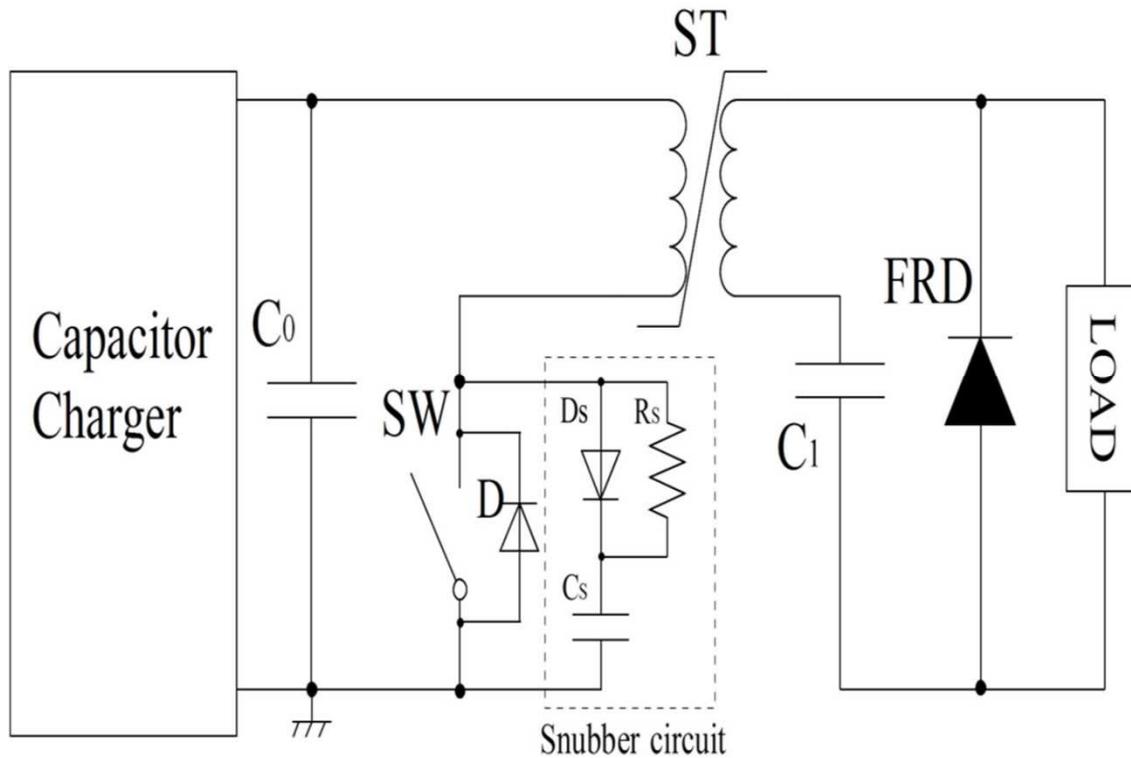
$$\text{スイッチング損失 [J]} = \int_0^T V(t) I(t) dt$$

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

低損失評価 (SiC-MOSFET vs IGBT)



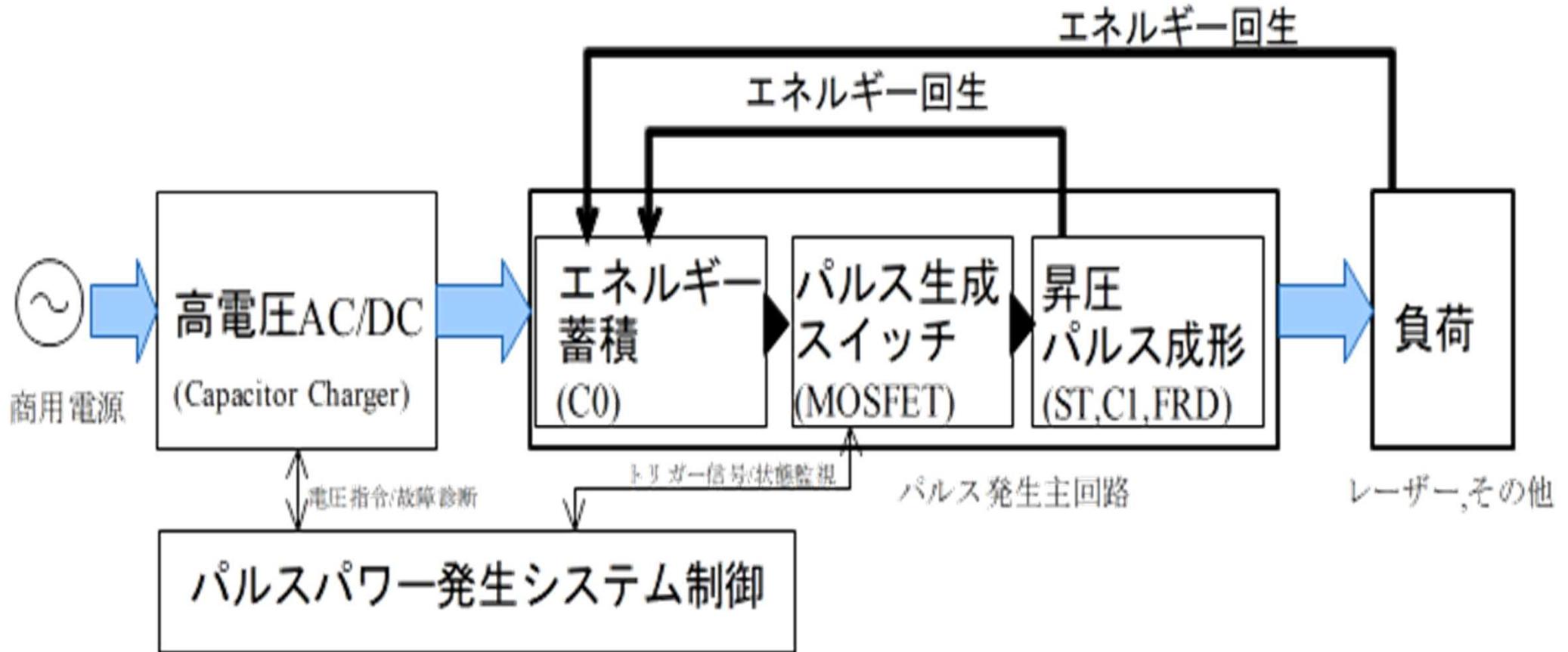
SiC-MOSFETとIGBTの損失率比較



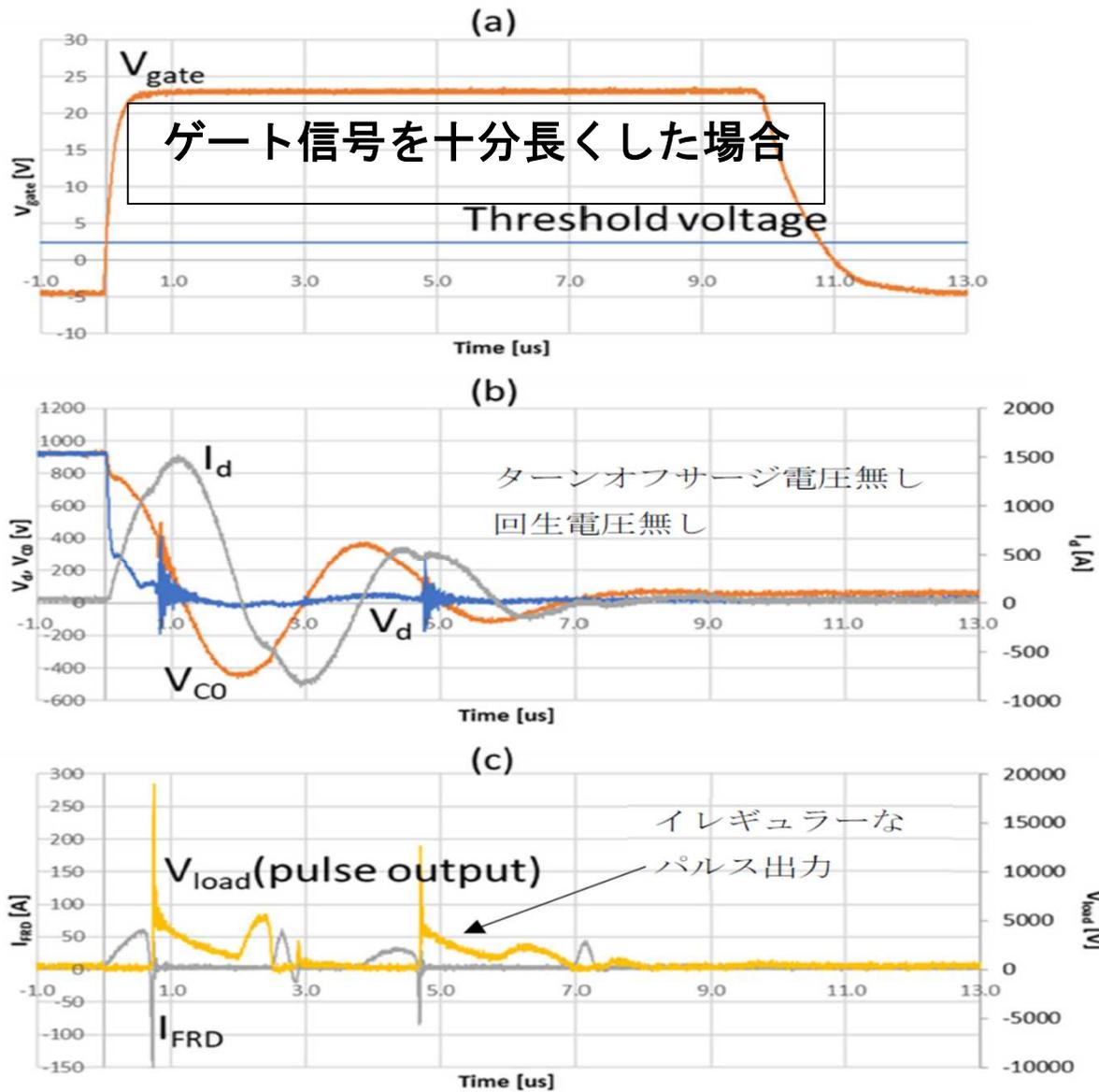
ターンオフサージ電圧波形
(オフタイミング考慮無し)

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



※高速ゲートターンオフのタイミング制御が重要！

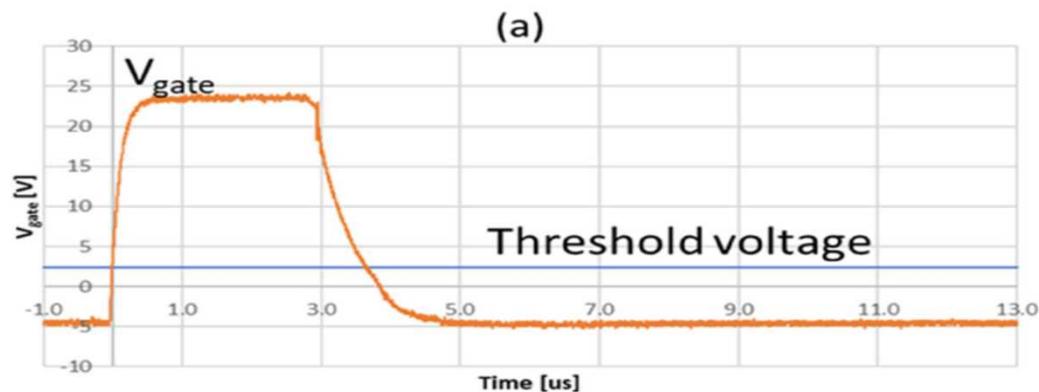


← ゲート電圧

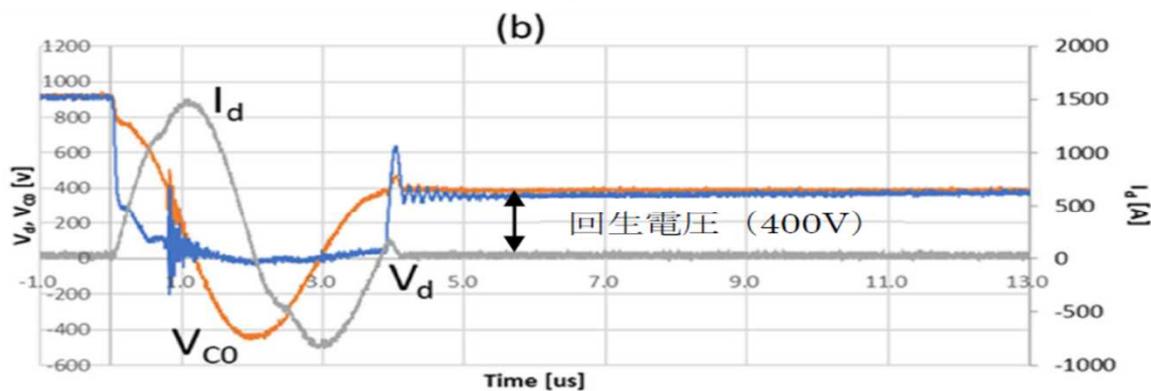
← スイッチング
電流電圧波形

← 出力電圧波形

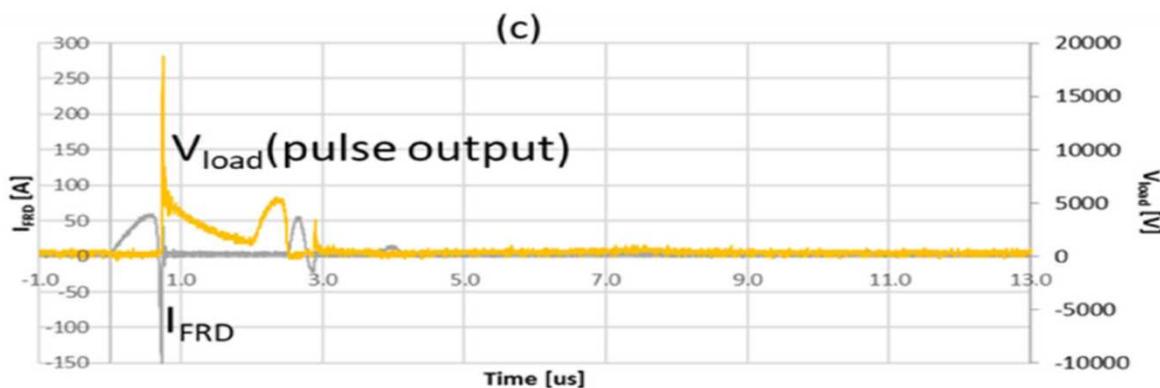
トリガ信号(TTL)10 μ s 時の各電圧電流波形



← ゲート電圧

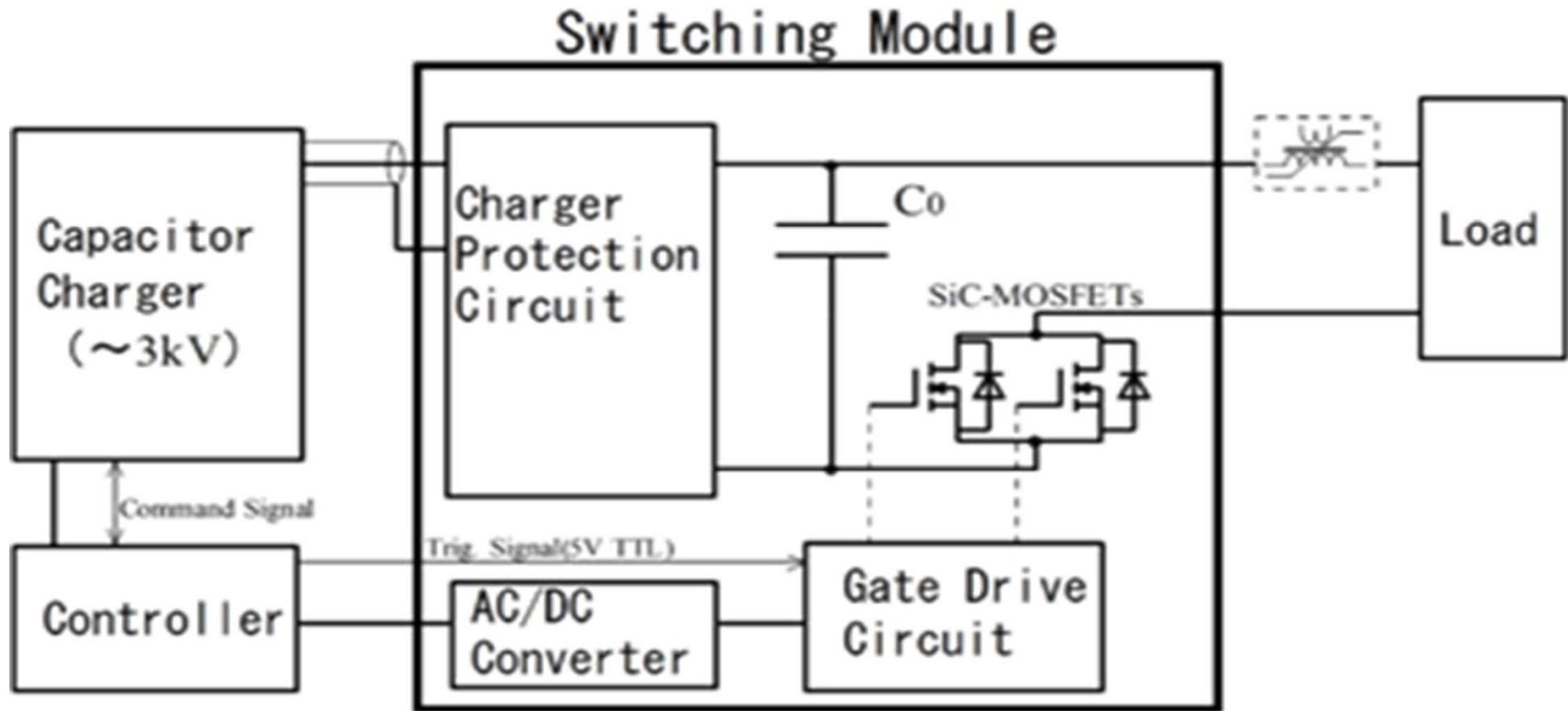


← スイッチング
電流電圧波形

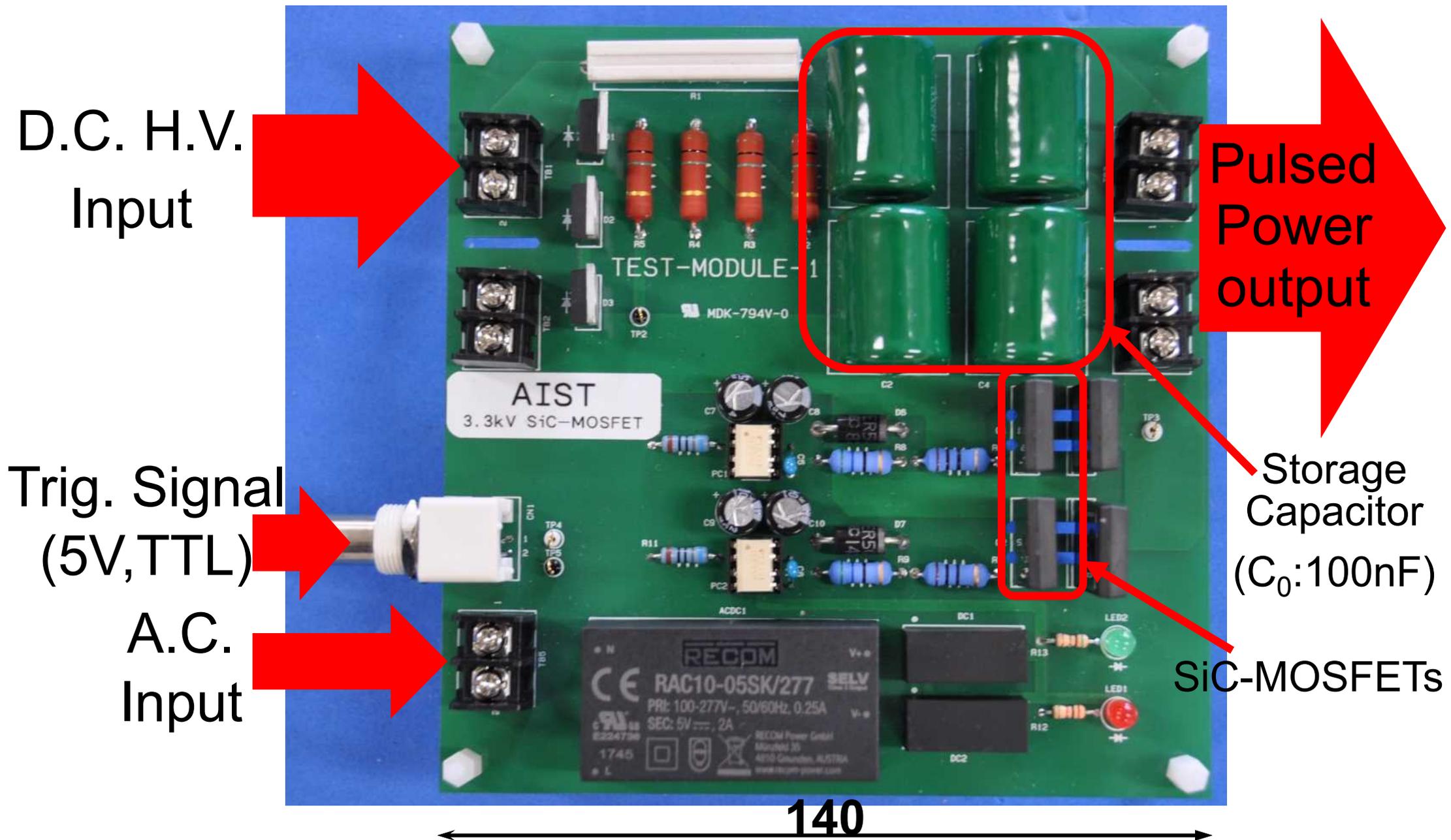


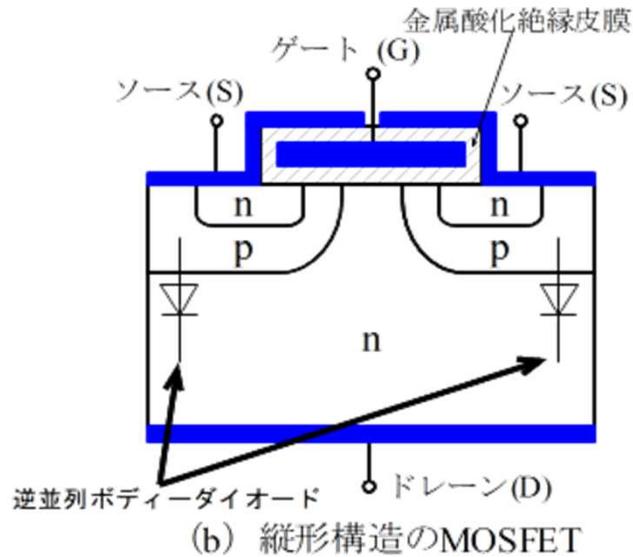
← 出力電圧波形

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

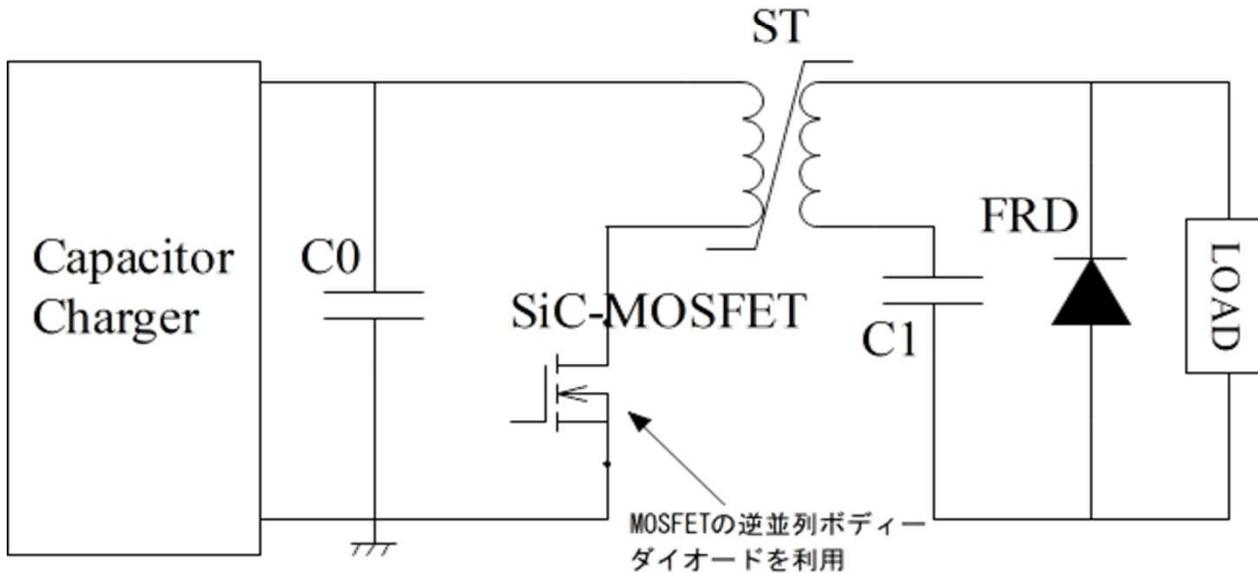


高耐圧テストモジュール外観





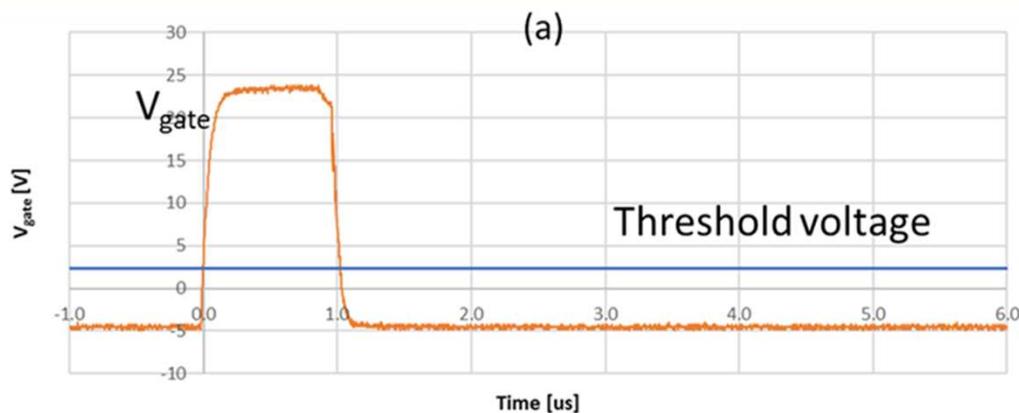
縦型構造のMOSFET (VMOS)
内蔵のボディダイオードを利用



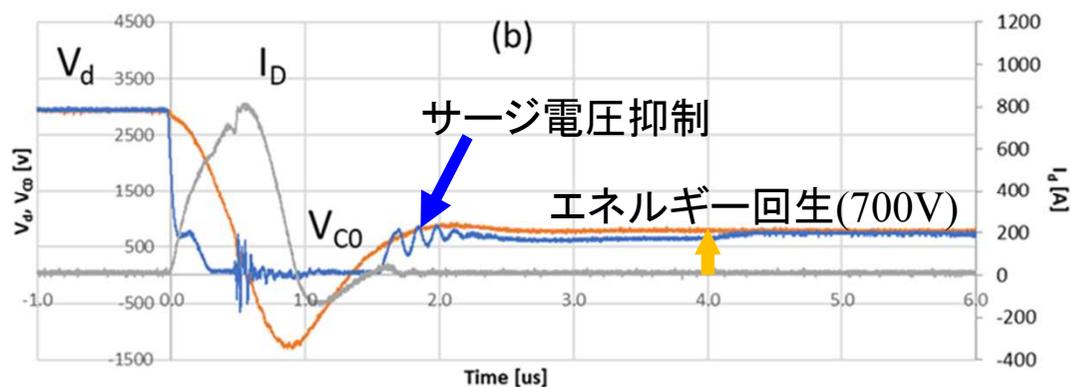
(a) エネルギー回生機能を持つパルス発生回路

シンプルな回路構成！

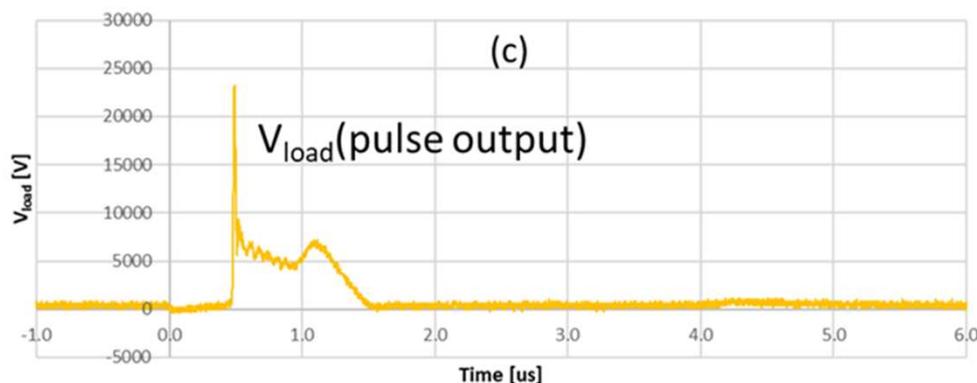
スナバレス高機能パルス発生回路



← 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 μ 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