

論文番号 ECT-022-002

# 電流駆動IGBTゲートドライバ回路の 動作領域判別

山本 颯馬, 阿部 優大(群馬大学),  
岩渕 昭夫(サンケン電気株式会社)

松田 順一, 桑名 杏奈, 杜 浩洋

神尾 崇文, 細野 貴司, 小林 春夫(群馬大学)

# OUTLINE

- **研究背景と目的**
- **従来型電圧駆動回路**
- **電流駆動 IGBT ドライバ回路**
- **電流駆動回路のシミュレーション結果**
- **電流駆動 IGBT の動作領域自動判別**
  - アナログ値
  - デジタル値
- **まとめ**

# OUTLINE

- **研究背景と目的**
- 従来型電圧駆動回路
- 電流駆動 IGBT ドライバ回路
- 電流駆動回路のシミュレーション結果
- 電流駆動 IGBT の動作領域自動判別
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

# 研究背景



パワーエレクトロニクスにIoTやAIを活用



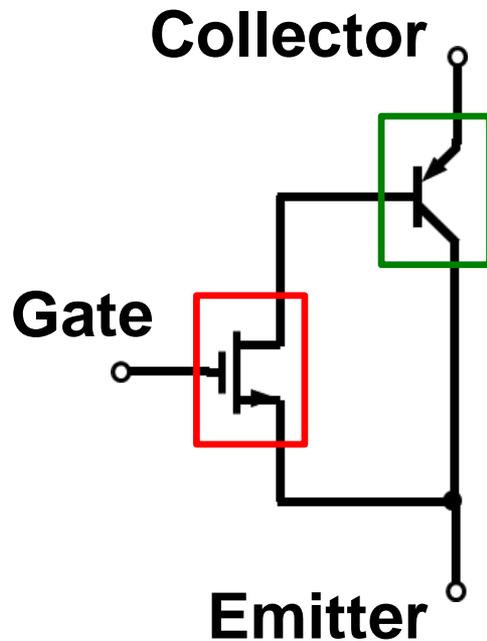
ドライバ回路の高性能化、IC化

# IGBTとは

## IGBT

(Insulated Gate Bipolar Transistor)

(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)



入力: **MOSFET**

出力: **バイポーラトランジスタ**

### メリット

- 動作速度が速い
- 電流増幅率大きい (~1.2kA)
- 高耐圧 (~3.3kV)

### デメリット

ゲート容量が大きい



駆動回路設計が難しい

# 研究目的

## IGBT回路

各端子間の寄生キャパシタンス  
ターンオフ時のテール電流



スイッチング損失

リード線の寄生インダクタンス



過剰なオーバーシュート

スイッチング時の駆動抵抗変更



複雑な制御

## 目的

電流駆動



スイッチング損失とオーバーシュートの  
適切なトレードオフ  
制御設計の簡素化

# OUTLINE

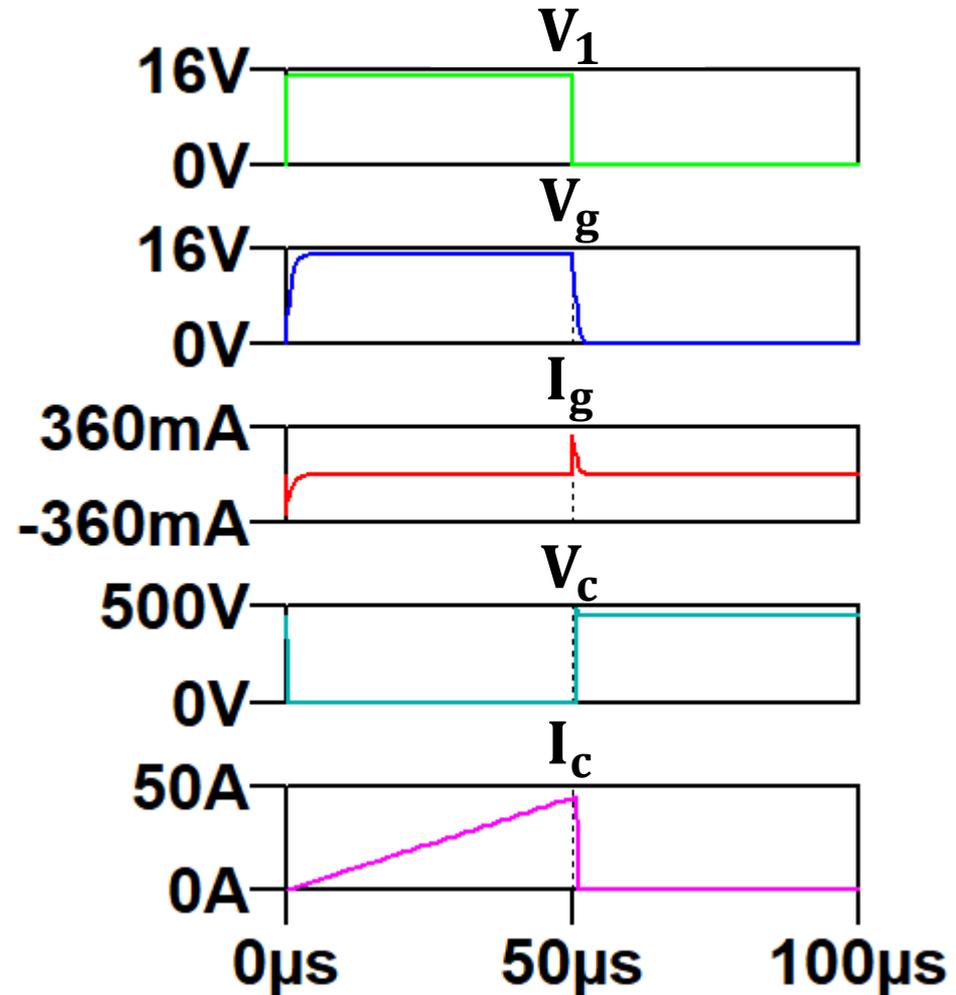
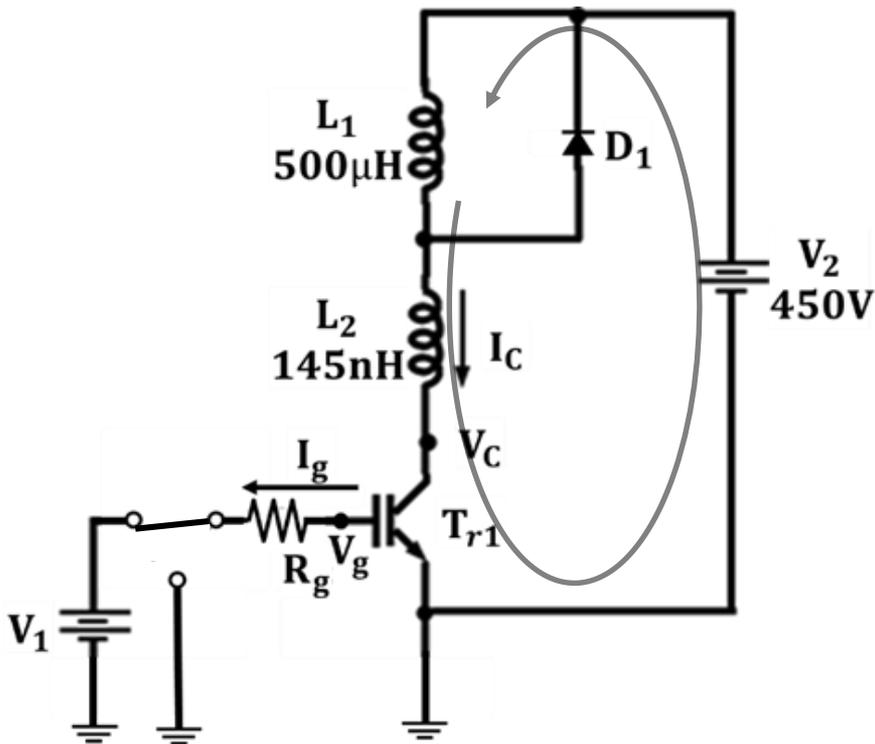
- 研究背景と目的
- **従来型電圧駆動回路**
- 電流駆動 IGBT ドライバ回路
- 電流駆動回路のシミュレーション結果
- 電流駆動 IGBT の動作領域自動判別
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

# 電圧駆動IGBT評価回路(1/2)

入力電圧  $V_1$



$V_g$  によりターンオン  
 $I_c$  が徐々に流れる

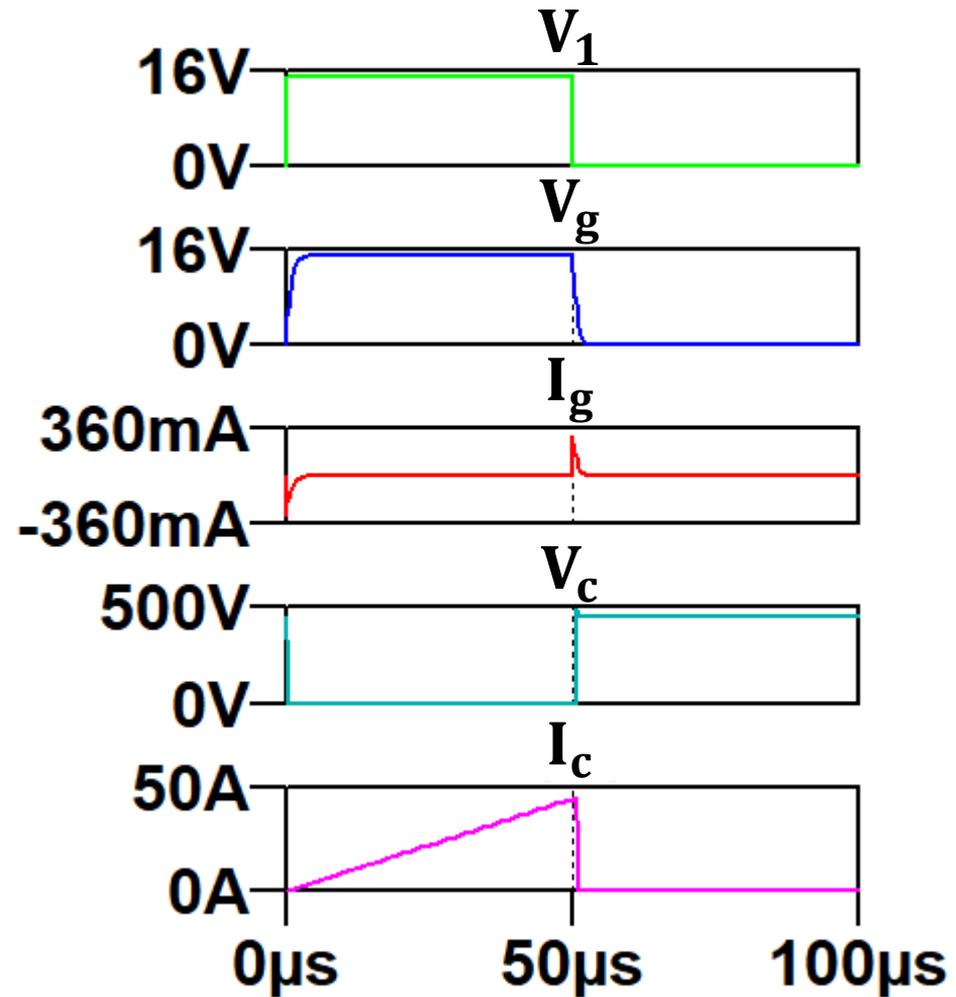
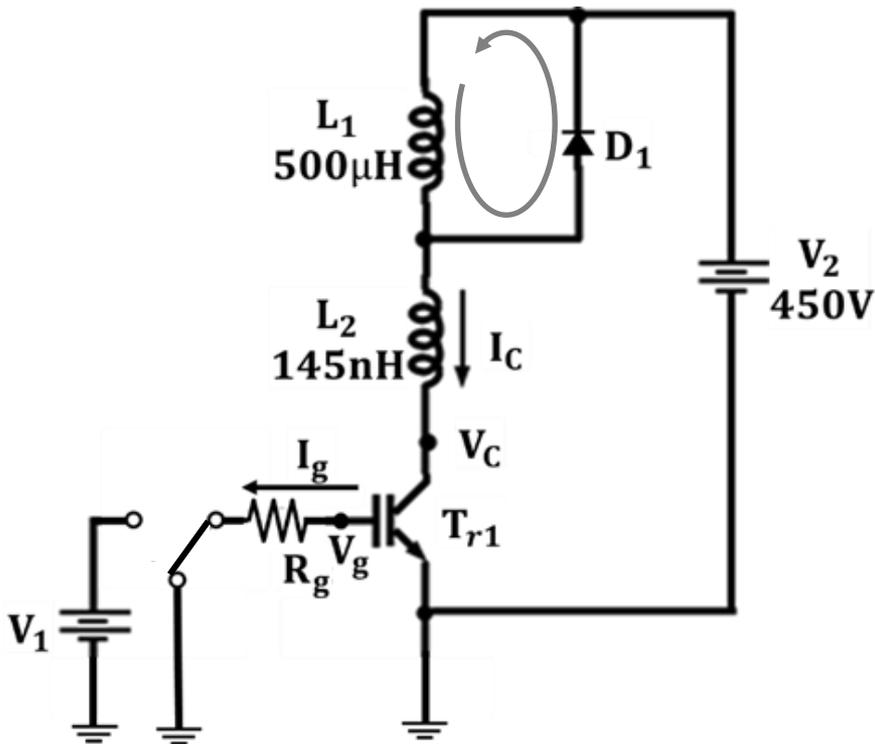


# 電圧駆動IGBT評価回路(2/2)

$V_1 \rightarrow 0$

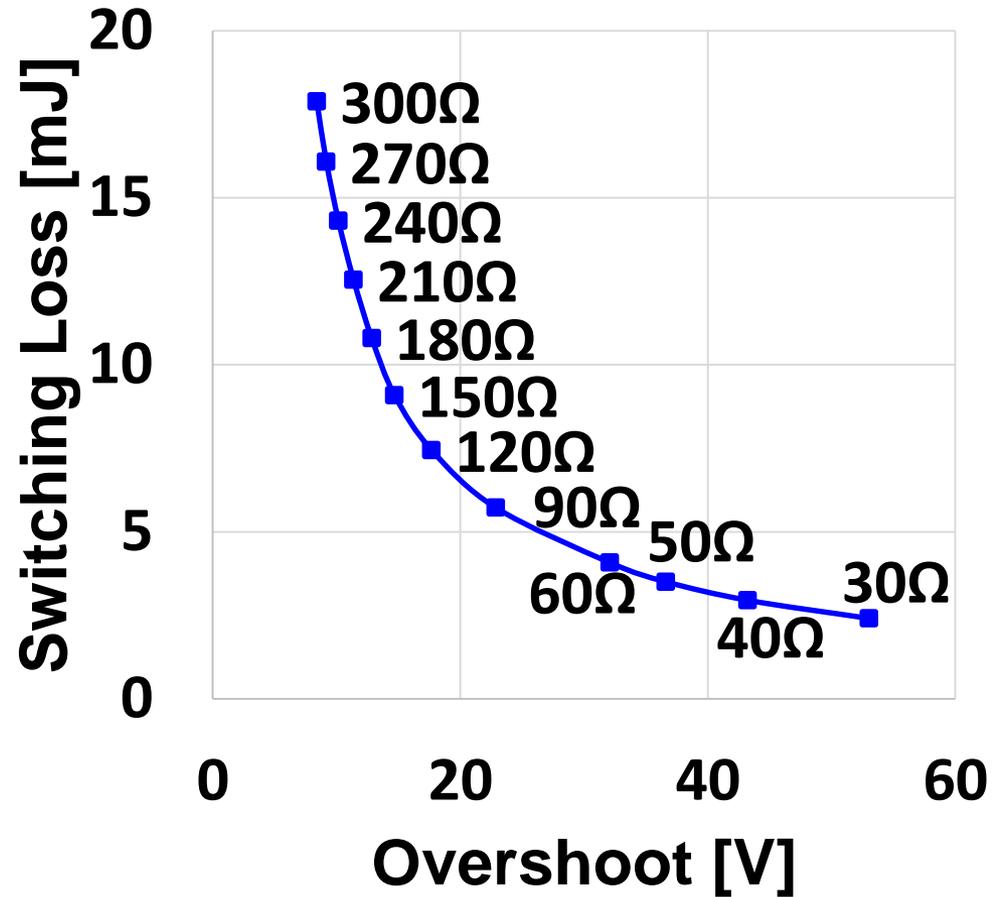
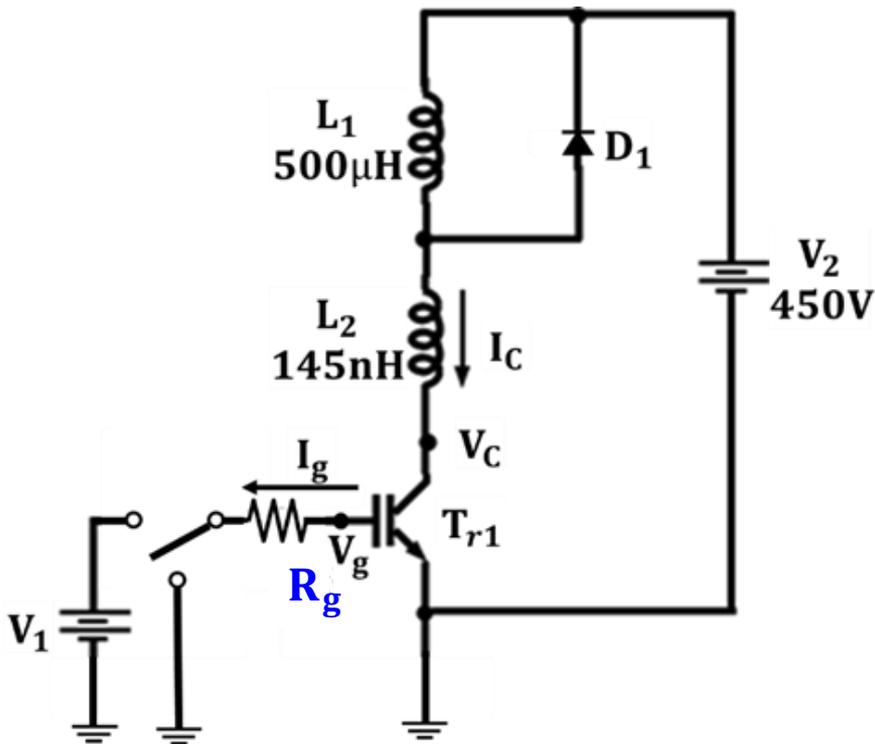


$V_g$  によりターンオフ  
 $I_c$  が急激に減少



# ターンオフ時のオーバーシュートとスイッチング損失

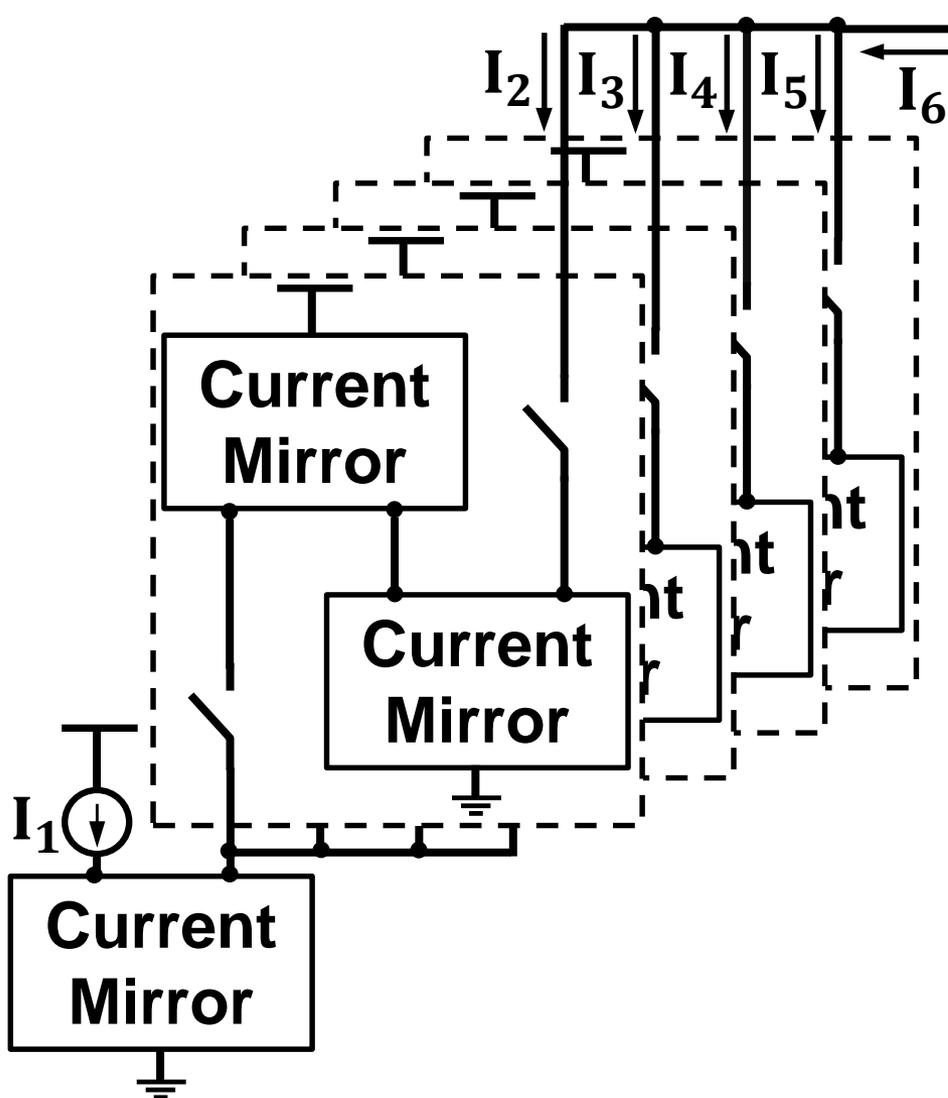
ゲート抵抗  $R_g$   
 $30\Omega \sim 300\Omega$



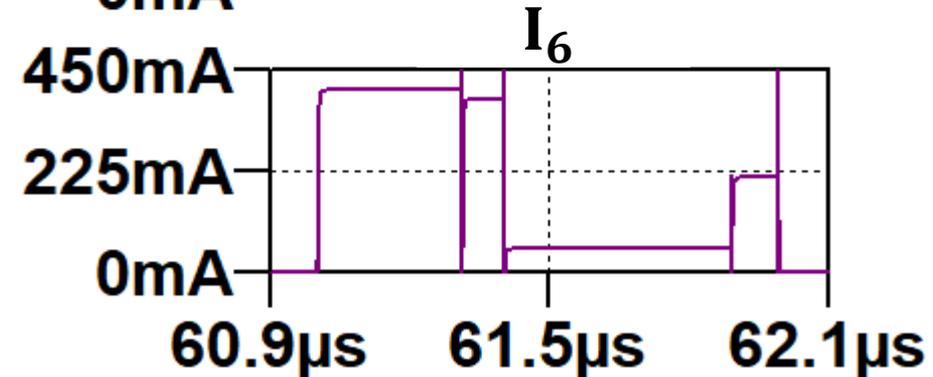
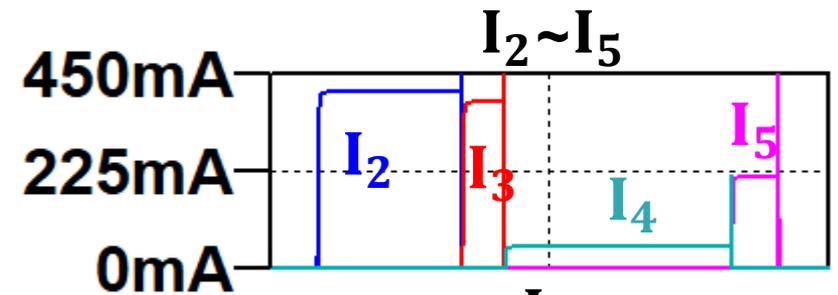
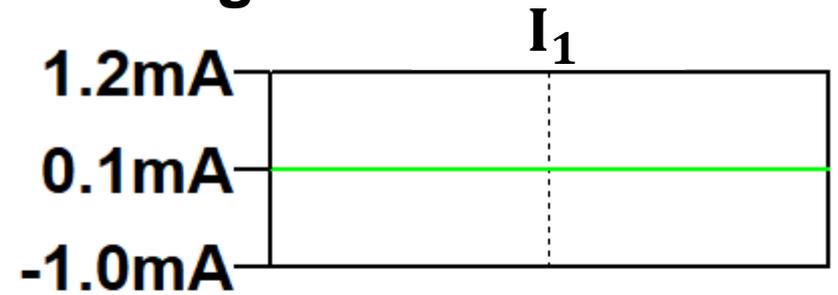
# OUTLINE

- 研究背景と目的
- 従来型電圧駆動回路
- **電流駆動 IGBT ドライバ回路**
- 電流駆動回路のシミュレーション結果
- 電流駆動 IGBT の動作領域自動判別
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

# 電流駆動ゲートドライバ回路(1/2)

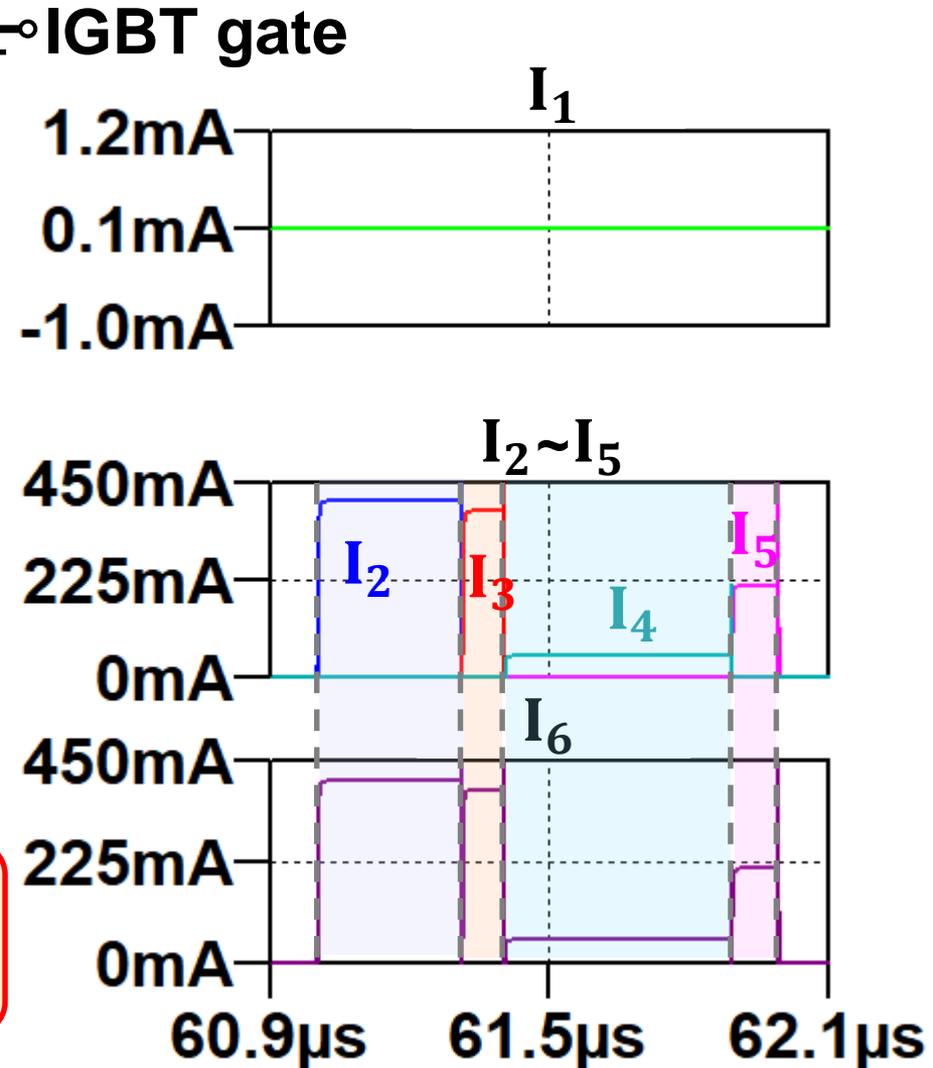
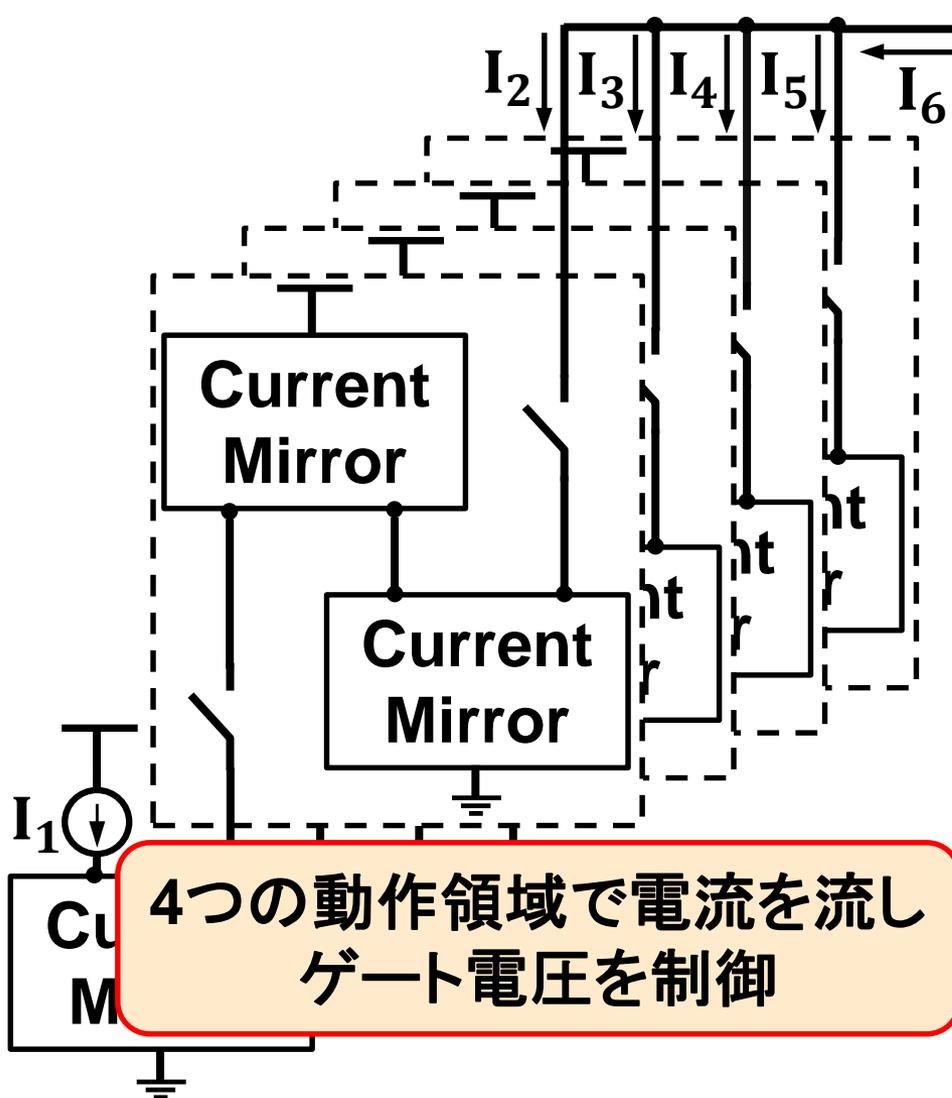


IGBT gate

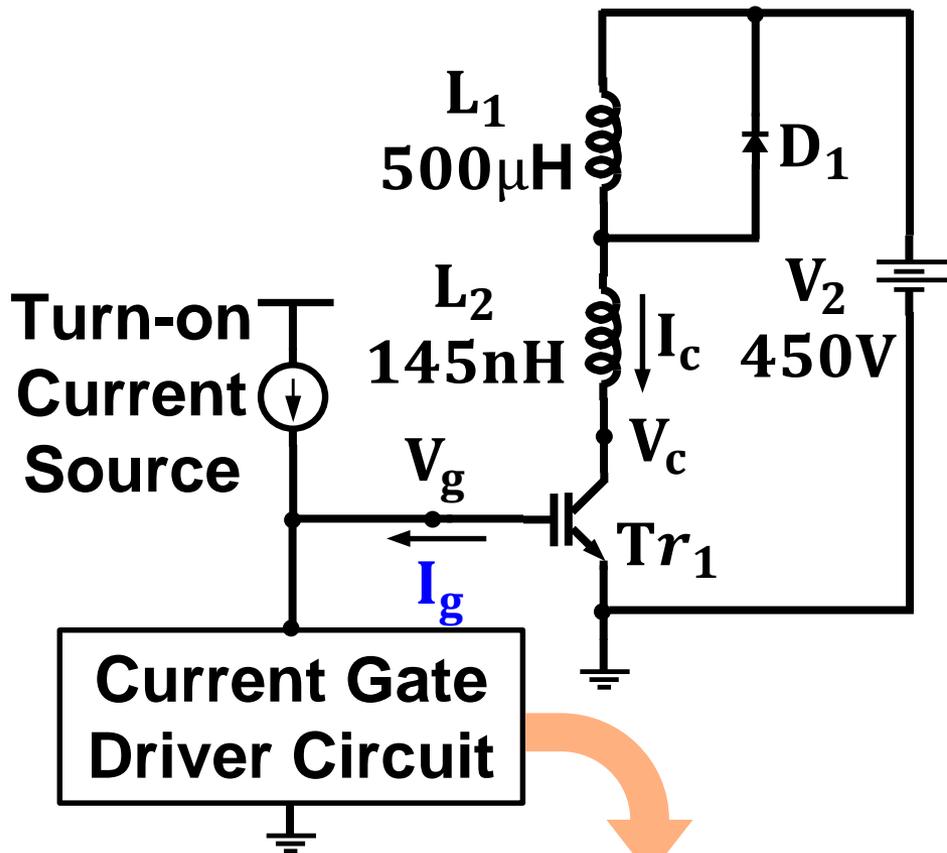


60.9 $\mu$ s 61.5 $\mu$ s 62.1 $\mu$ s

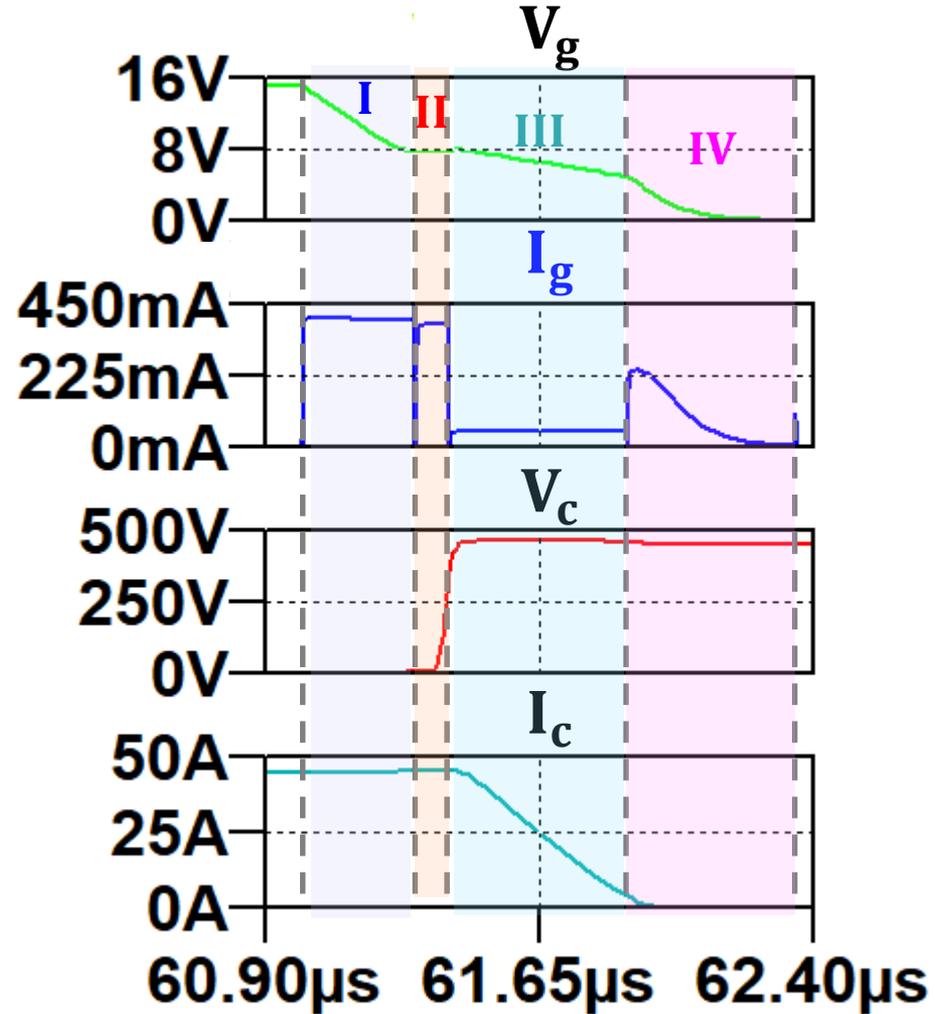
# 電流駆動ゲートドライバ回路(2/2)



# 電流駆動IGBTのターンオフ特性



$I_g$  によりゲート電圧を制御

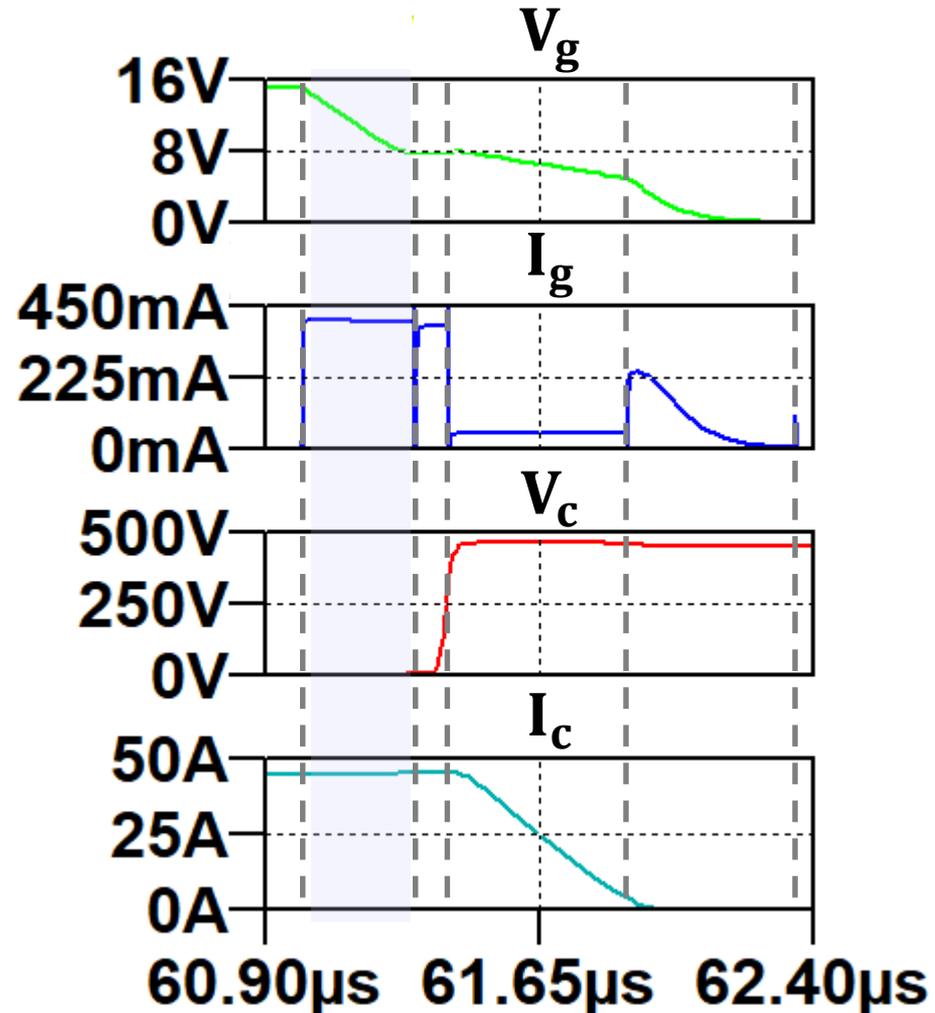


# ゲート電流によるゲート電圧制御 (領域I)

## 領域I

$V_g$  : 飽和電圧からミラー電圧

オーバーシュートと  
スイッチング損失への  
影響なし



# ゲート電流によるゲート電圧制御(領域II)

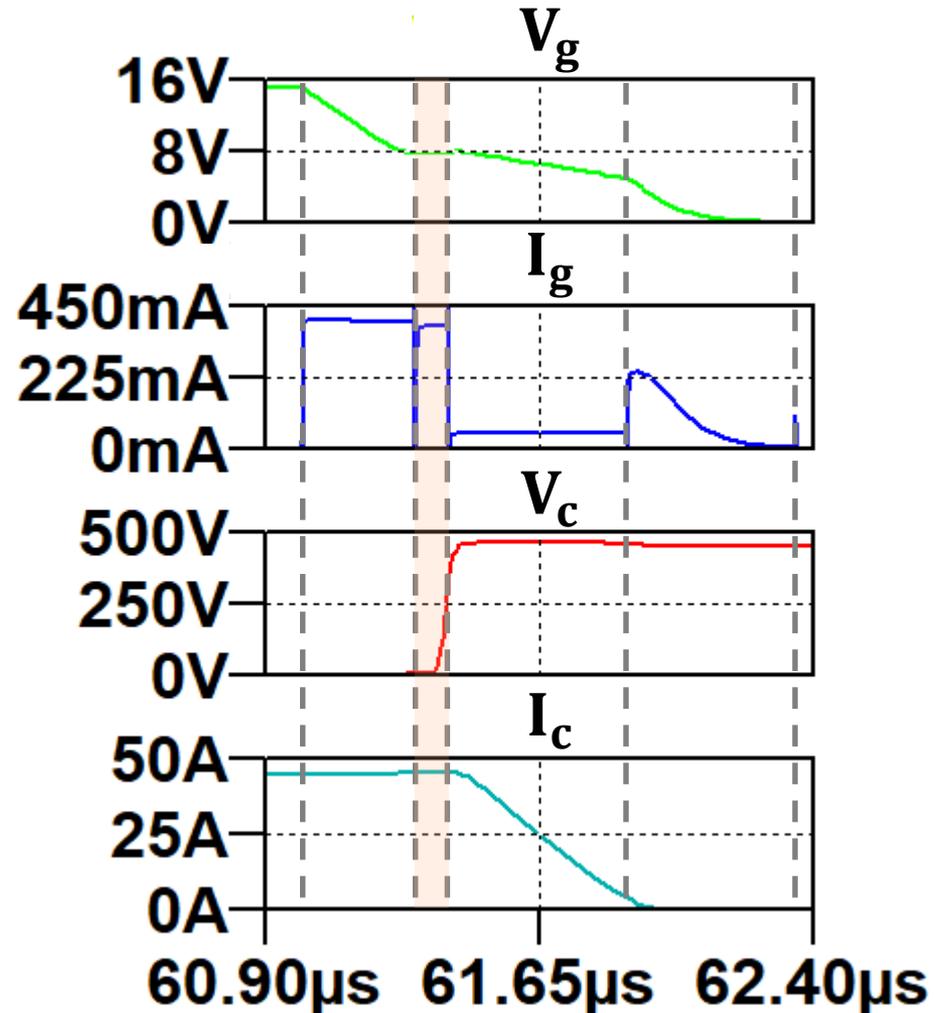
## 領域II

$V_g$  : IGBTのミラー期間

スルーレートと  
スイッチング損失は  
トレードオフ



スイッチング損失の改善可



# ゲート電流によるゲート電圧制御 (領域III)

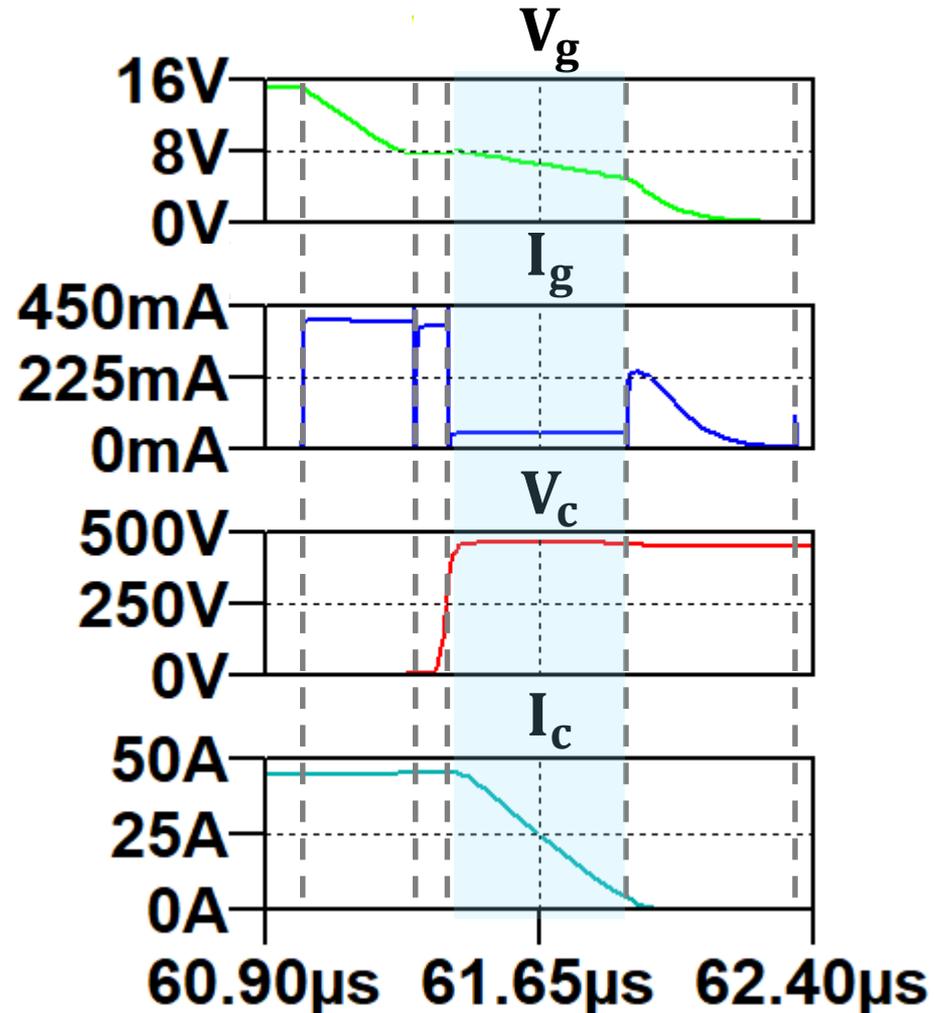
## 領域III

$V_g$  : ミラー電圧から閾値電圧

オーバーシュートと  
スイッチング損失は  
トレードオフ



オーバーシュートと  
スイッチング損失の改善可



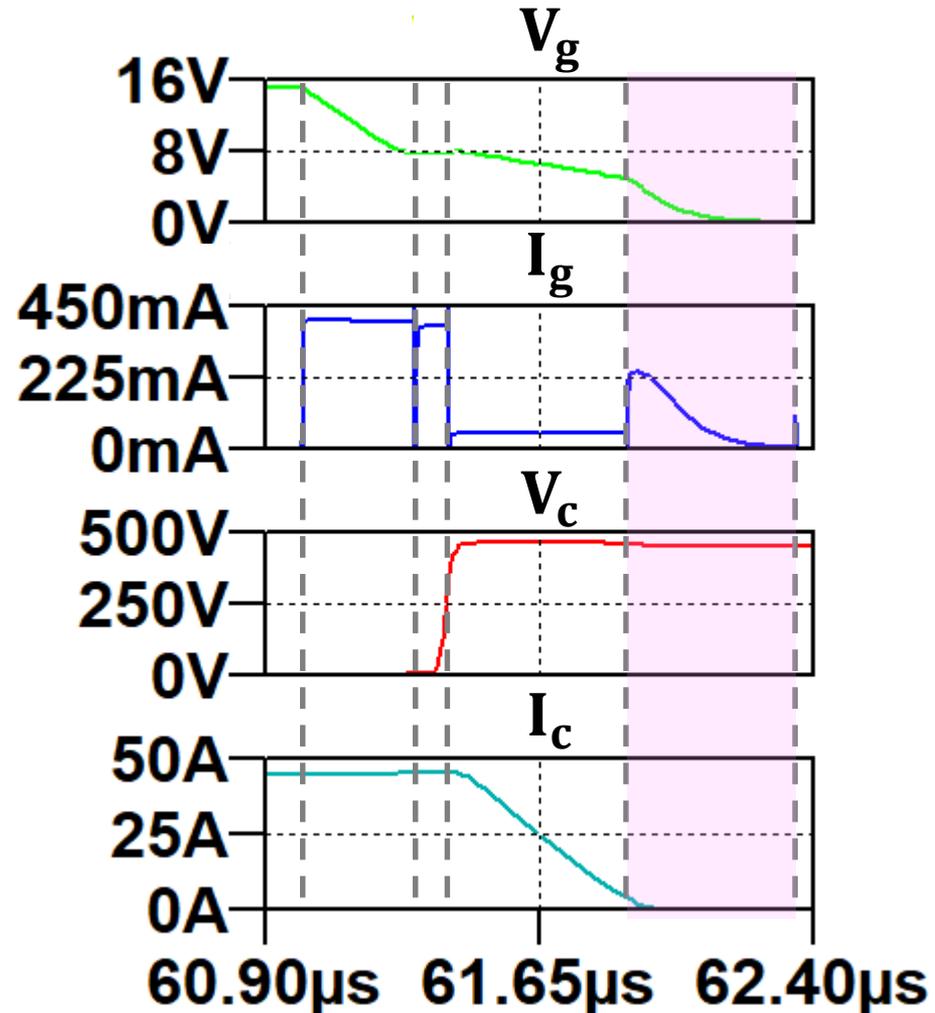
# ゲート電流によるゲート電圧制御（領域IV）

## 領域IV

$V_g$  : 閾値電圧から0

$I_g$  : MOSFETのI-V特性により  
制御が難しい

オーバーシュートと  
スイッチング損失への  
影響はない

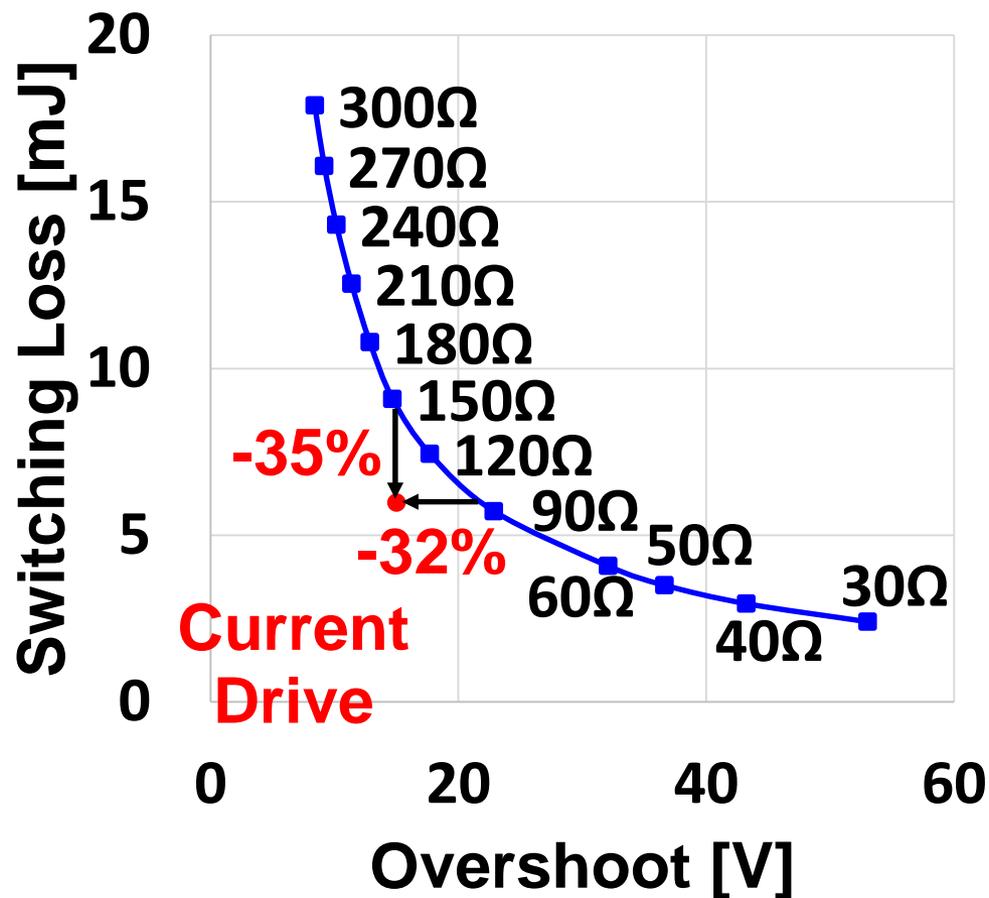


# OUTLINE

- 研究背景と目的
- 従来型電圧駆動回路
- 電流駆動 IGBT ドライバ回路
- **電流駆動回路のシミュレーション結果**
- 電流駆動 IGBT の動作領域自動判別
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

# 電流駆動と電圧駆動の比較

スイッチング損失: **-35%**, オーバーシュート: **-32%**



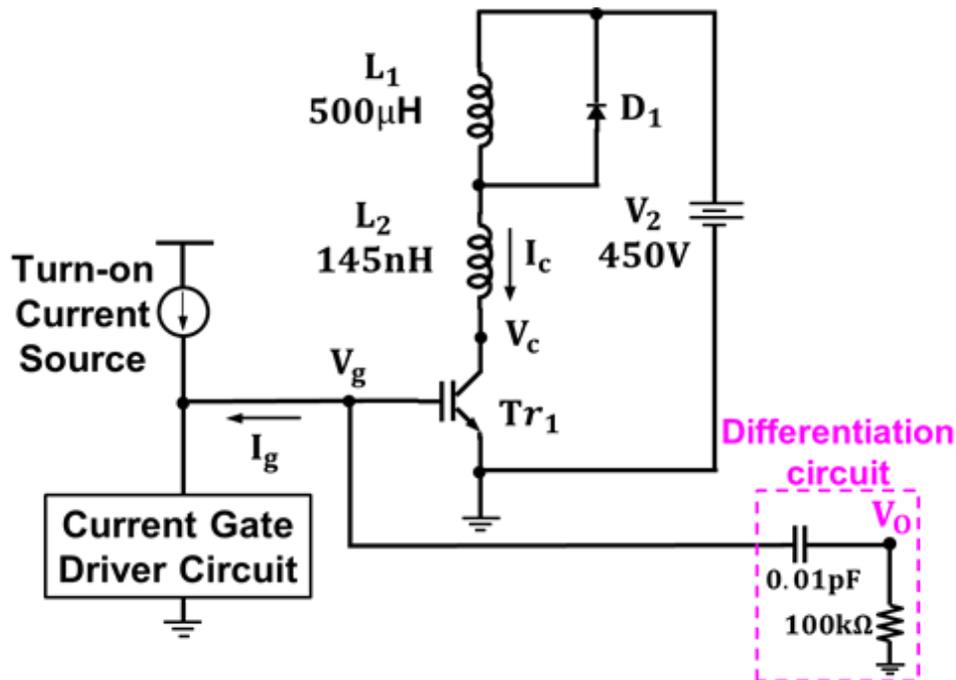
# OUTLINE

- 研究背景と目的
- 従来型電圧駆動回路
- 電流駆動 IGBT ドライバ回路
- 電流駆動回路のシミュレーション結果
- **電流駆動 IGBT の動作領域自動判別**
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

# OUTLINE

- 研究背景と目的
- 従来型電圧駆動回路
- 電流駆動 IGBT ドライバ回路
- 電流駆動回路のシミュレーション結果
- **電流駆動 IGBT の動作領域自動判別**
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

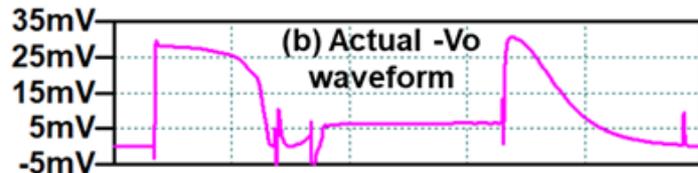
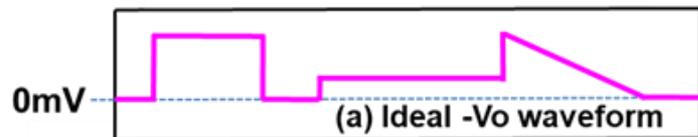
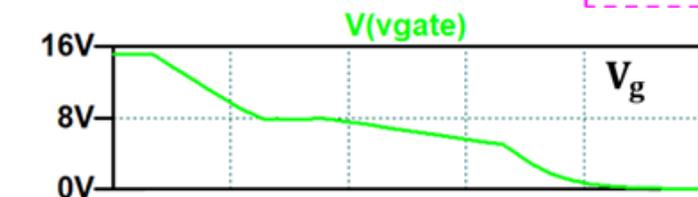
# 動作領域の自動判別(アナログ値)



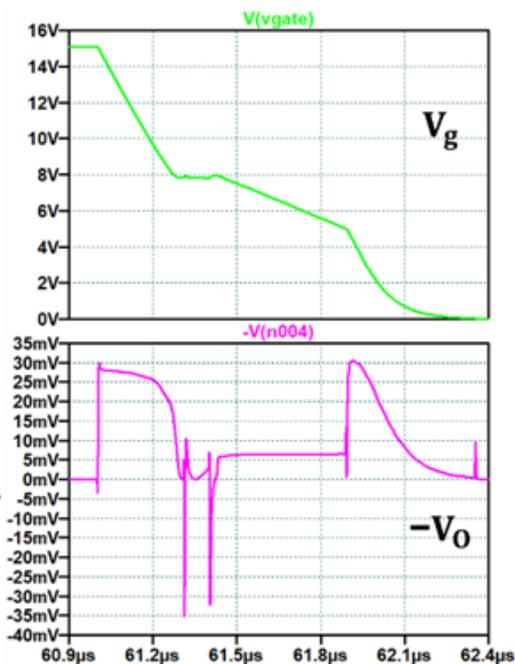
微分回路でIGBTゲート電圧値を観測



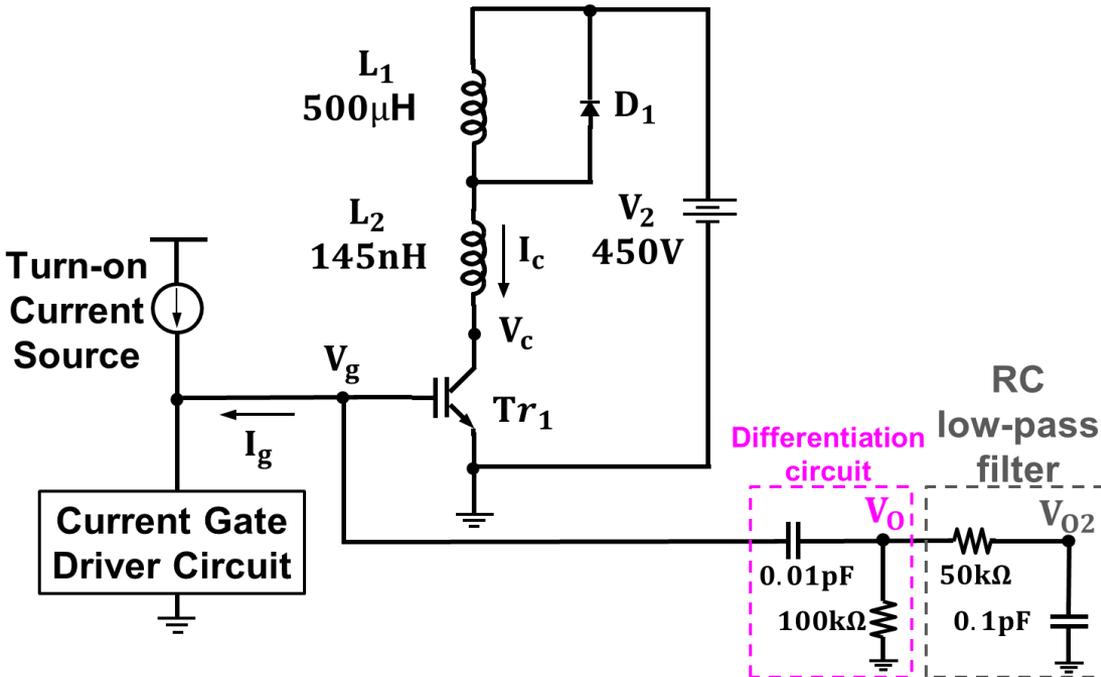
動作領域を自動判別



$-V_o$  Glitch  
(whisker pulse)  
max 35mV



# RCローパスフィルタ追加



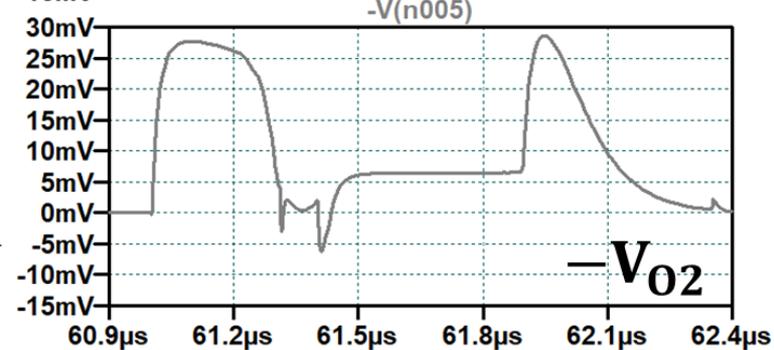
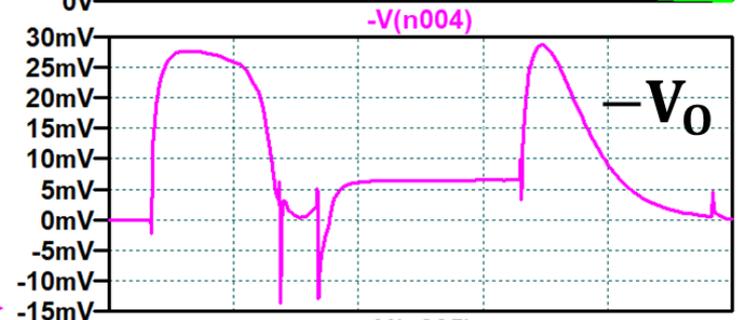
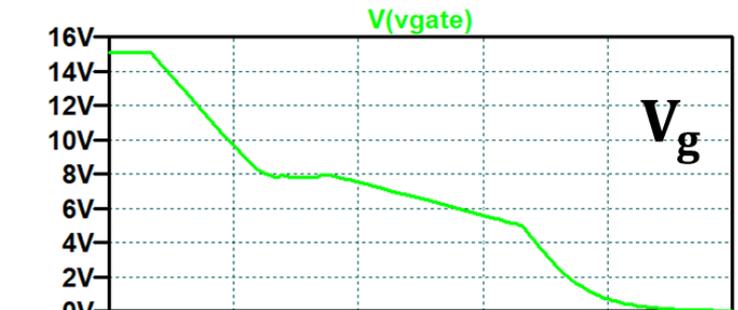
RCローパスフィルタ追加



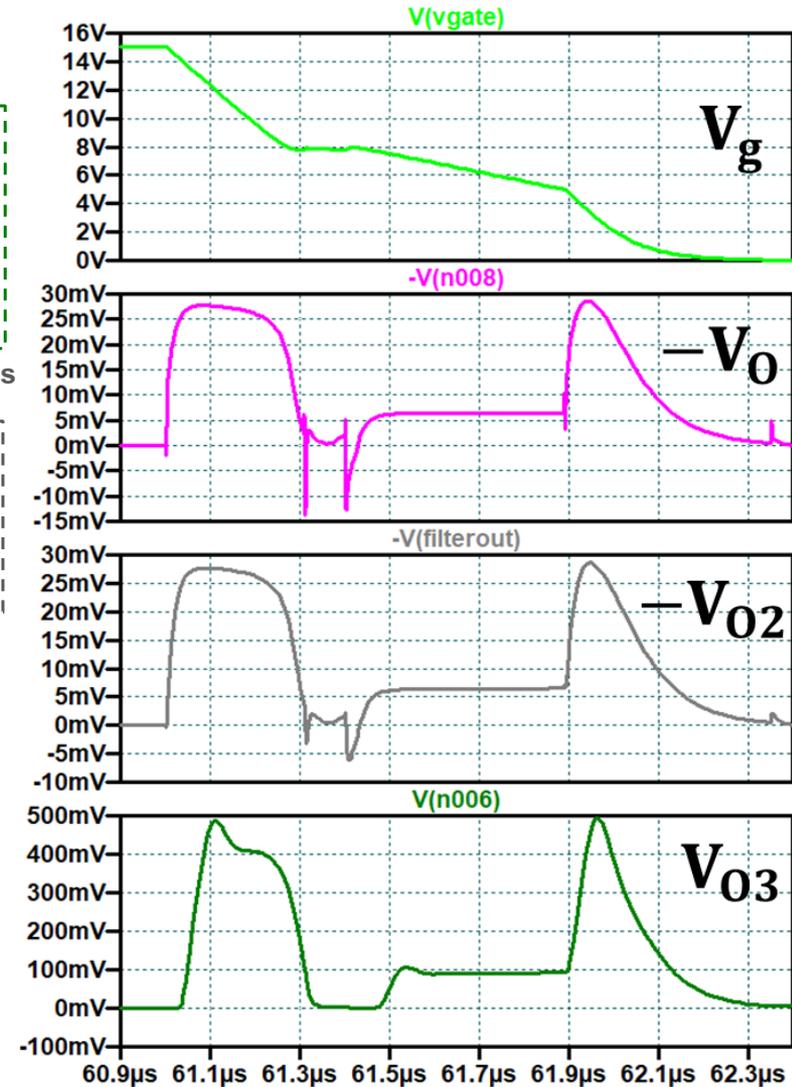
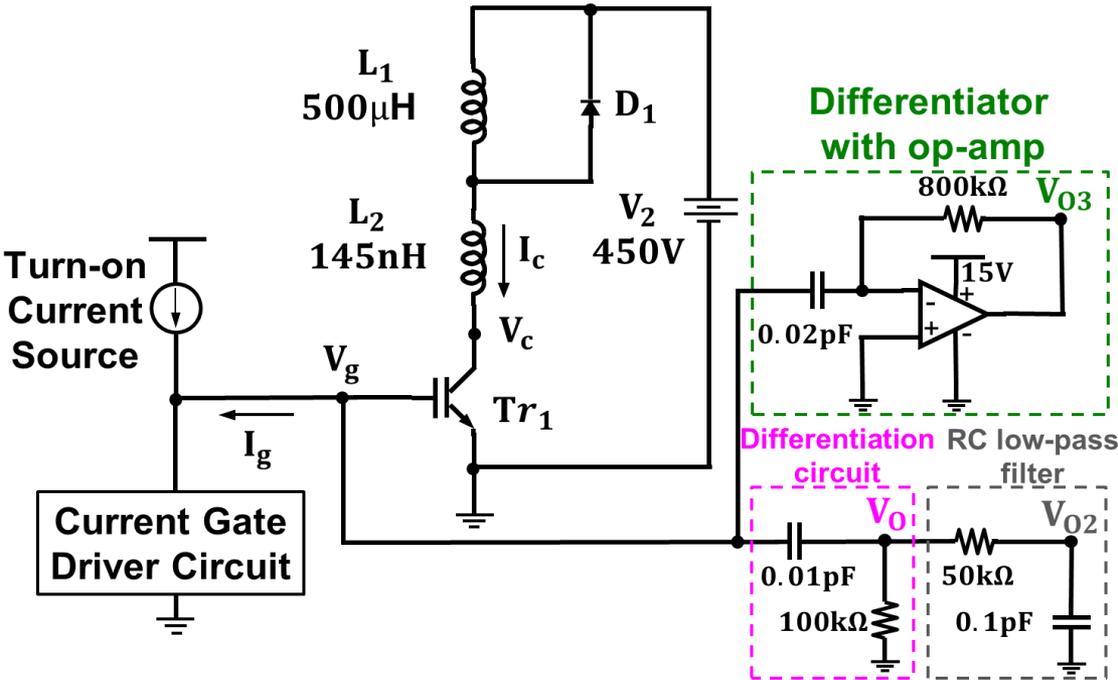
グリッチ低減

$-V_0$  Glitch  
max 14mV

$-V_{02}$  Glitch  
max 6mV



# オペアンプを用いた微分器追加



オペアンプ微分器追加

モデル: UniversalOpamp2 (LTspice提供)

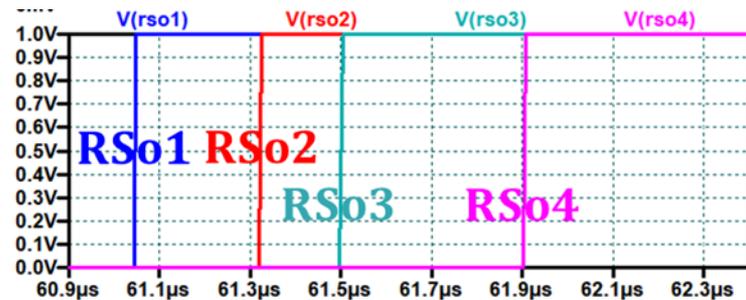
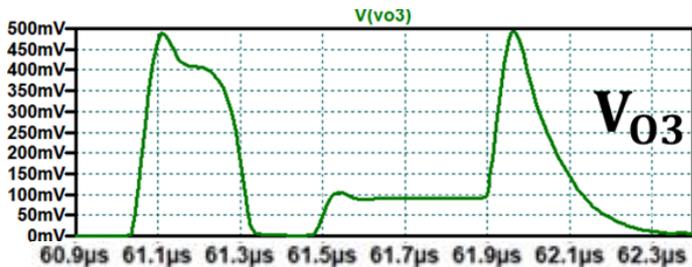


グリッチほぼ0に低減

# OUTLINE

- 研究背景と目的
- 従来型電圧駆動回路
- 電流駆動 IGBT ドライバ回路
- 電流駆動回路のシミュレーション結果
- **電流駆動 IGBT の動作領域自動判別**
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

# 動作領域の自動判別(デジタル値)

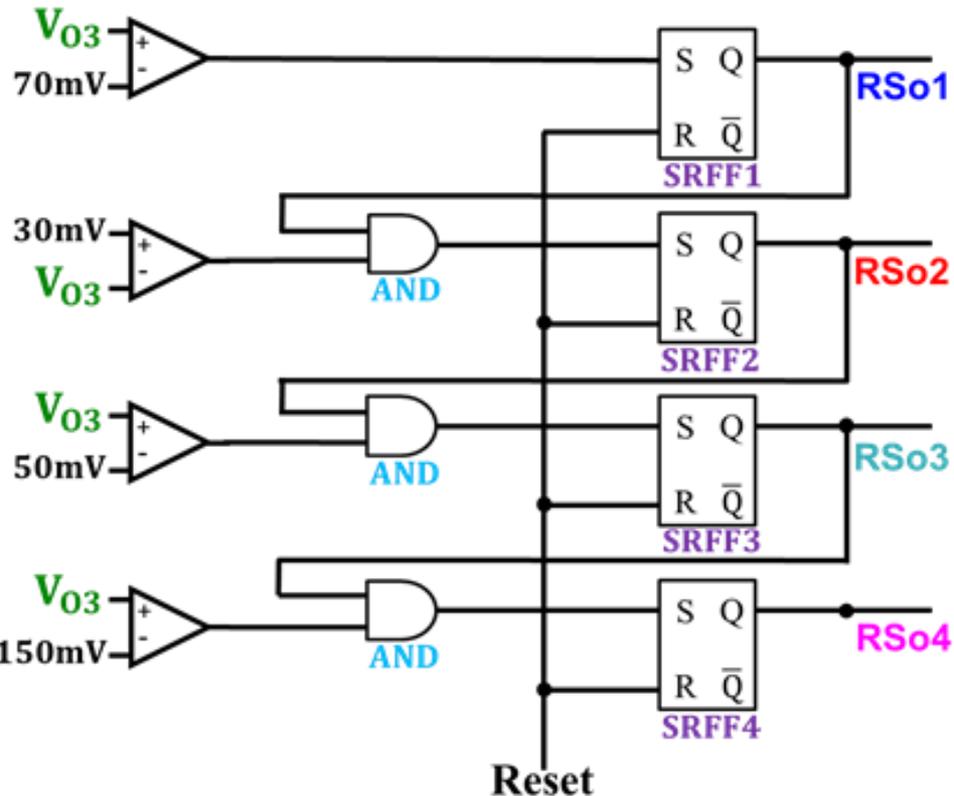


**Comparator1(Cp1)**  
If  $V_{03} > 70\text{mV}$   
Output Cp1 = 1

**Comparator2(Cp2)**  
If  $30\text{mV} > V_{03}$   
Output Cp2 = 1

**Comparator3(Cp3)**  
If  $V_{03} > 50\text{mV}$   
Output Cp3 = 1

**Comparator4(Cp4)**  
If  $V_{03} > 150\text{mV}$   
Output Cp4 = 1

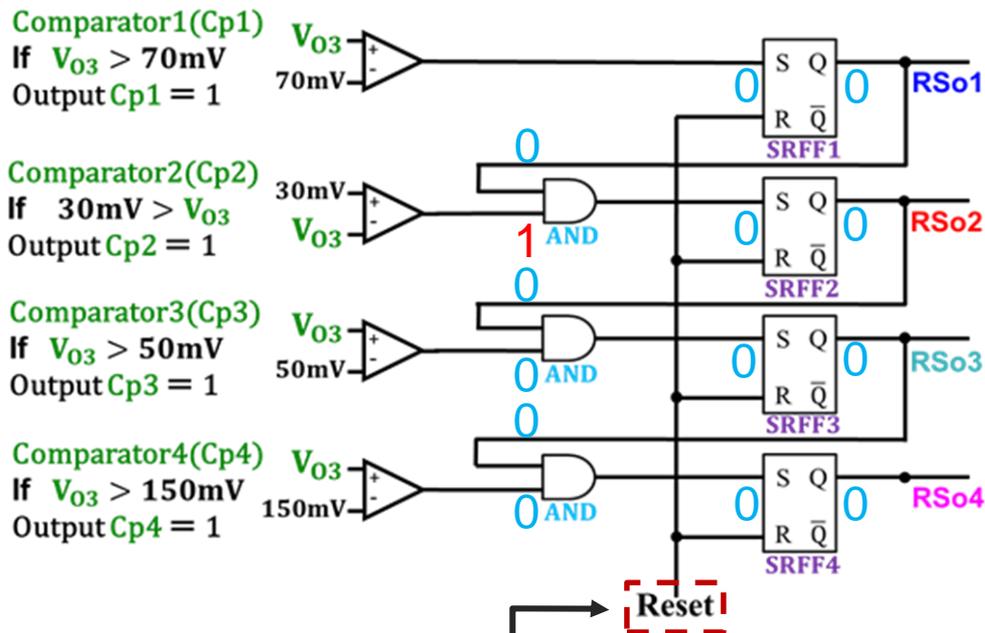


アナログ値

デジタル値

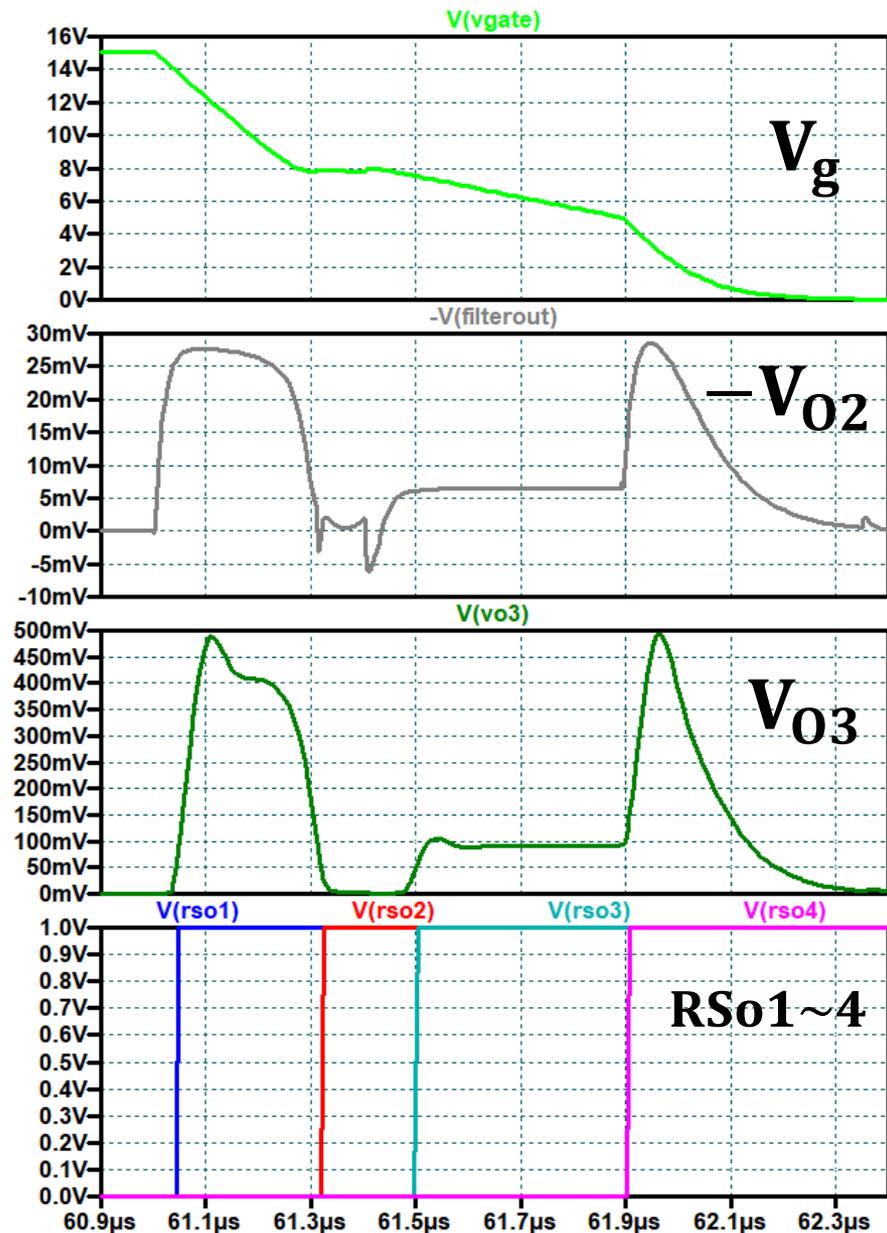
検出した値( $V_{03}$ )を利用して、コンパレータとSRFFを用いた動作領域判別を検討

# 初期状態

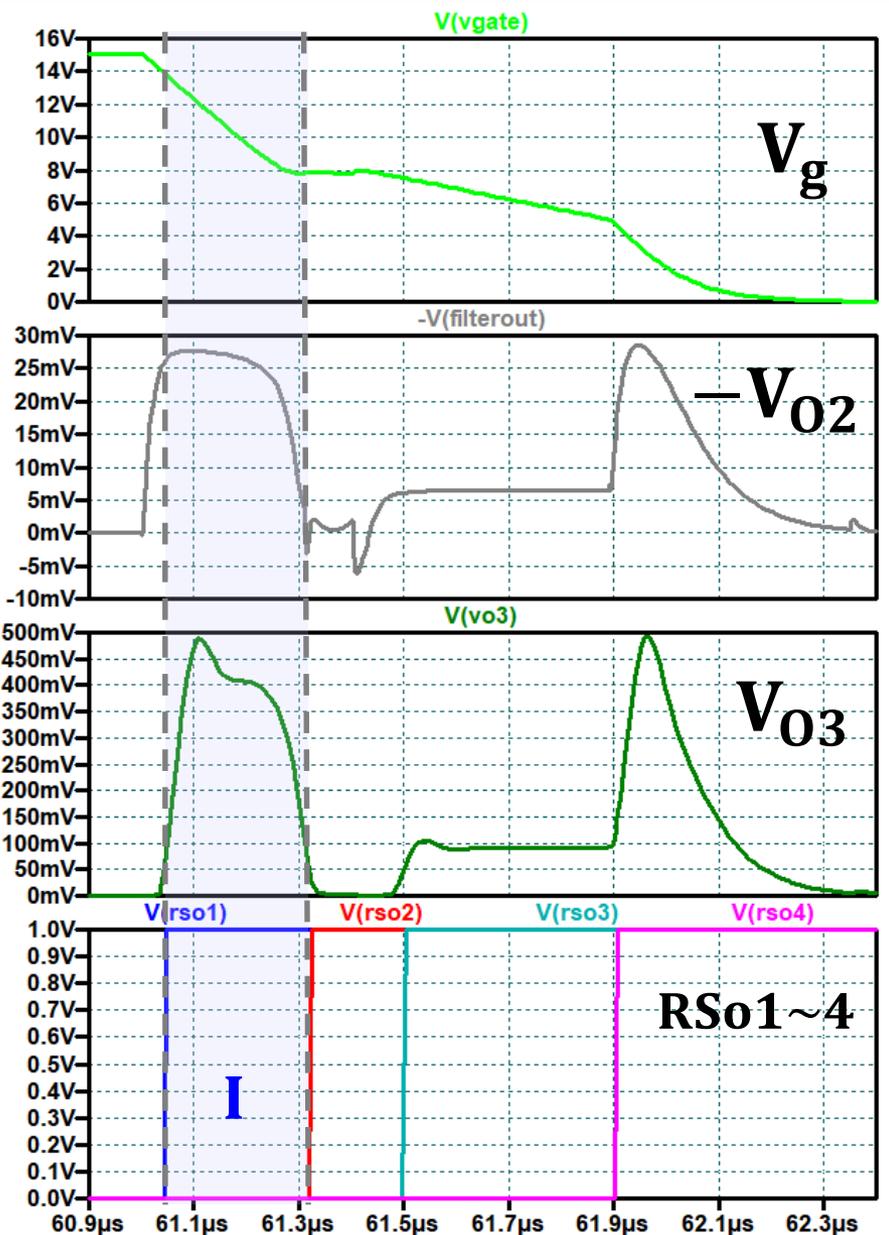
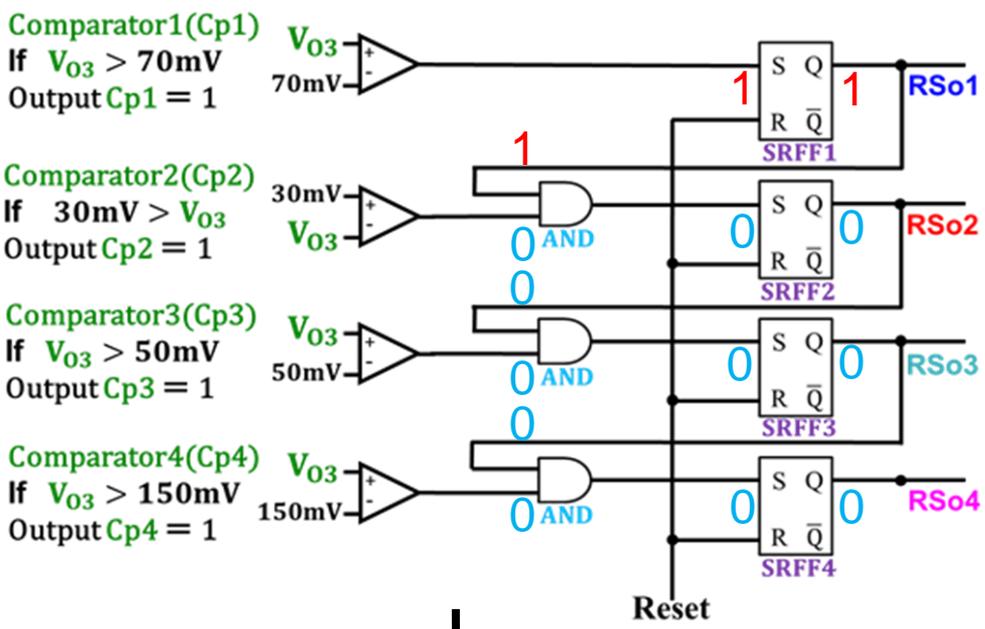


最初にReset信号をかけて、  
全SRFFの出力 $Q=0$ にしておく

以降Reset信号はかけない



# コンパレータとSRFFで判別した領域I



$V_{O3} > 70mV$

↓

Cp1の出力1

↓

SRFF1の出力1

↓

RSO1の出力1

RSO1の出力1

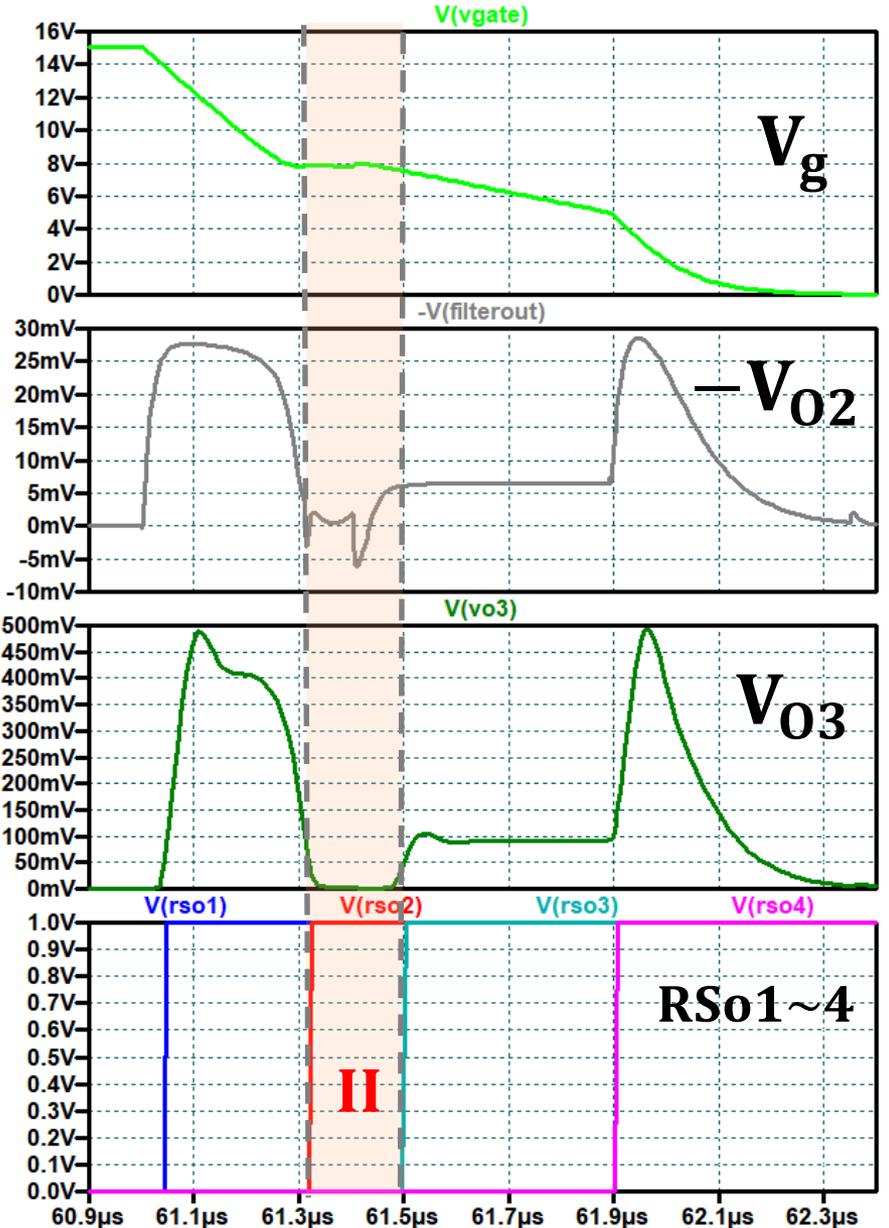
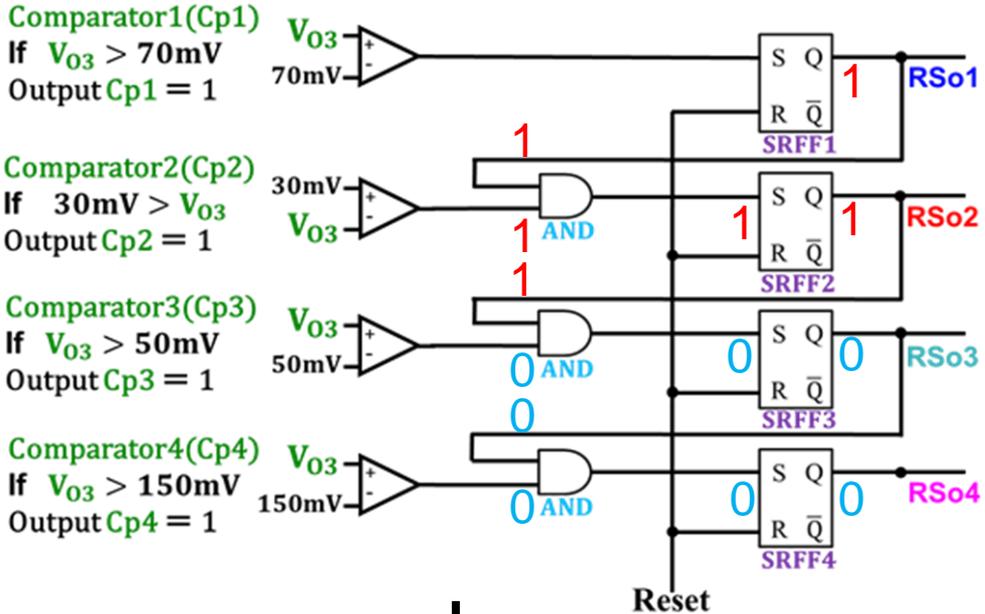
RSO2の出力0

RSO3の出力0

RSO4の出力0

領域Iを表す

# コンパレータとSRFFで判別した領域II



$30\text{mV} > V_{O3}$

Cp2の出力1

SRFF2の出力1

RSO2の出力1

RSO1の出力1

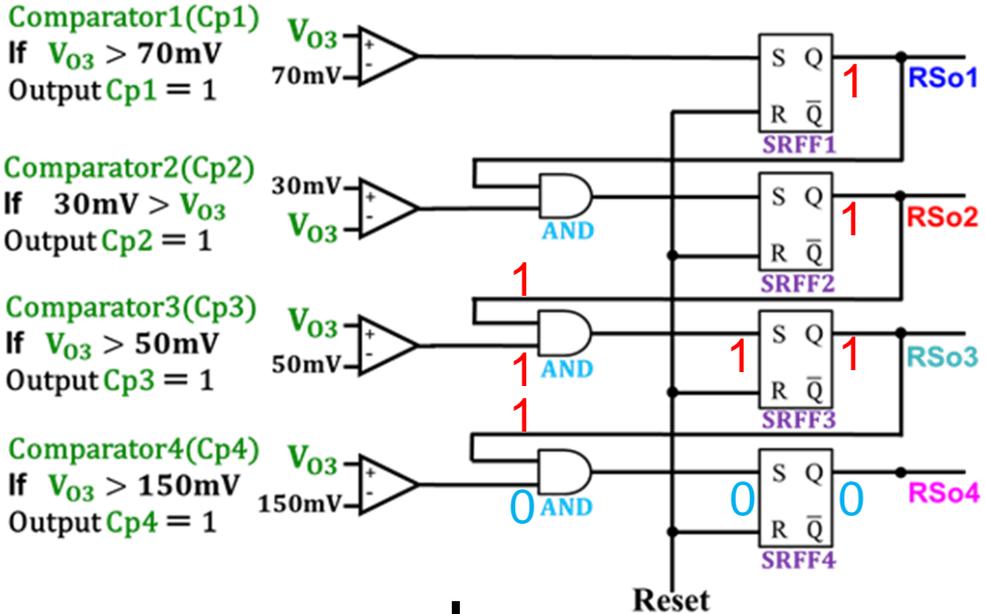
RSO2の出力1

RSO3の出力0

RSO4の出力0

領域IIを表す

# コンパレータとSRFFで判別した領域III



$V_{O3} > 50\text{mV}$

↓

Cp3の出力1

↓

SRFF3の出力1

↓

RSO3の出力1

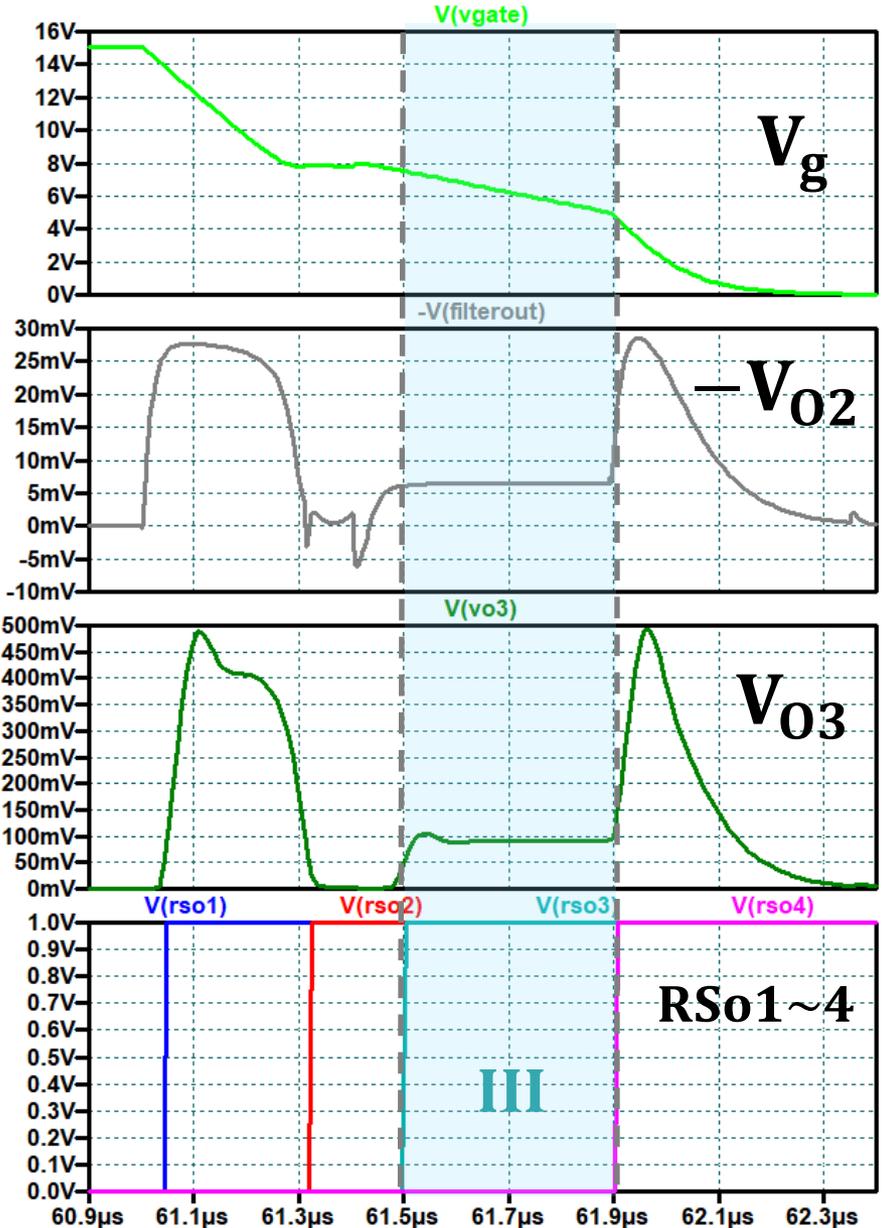
RSO1の出力1

RSO2の出力1

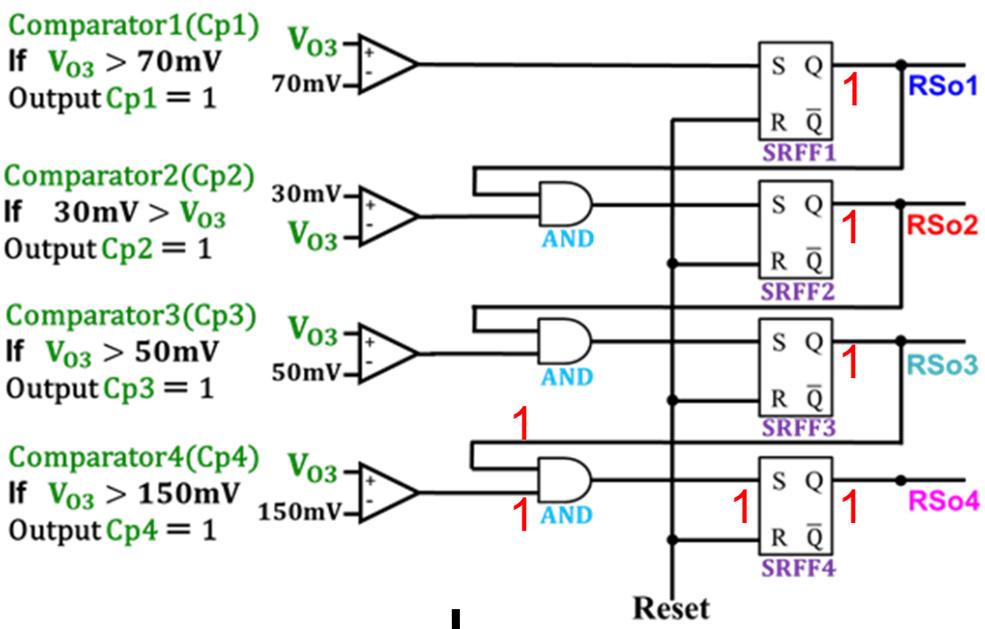
RSO3の出力1

RSO4の出力0

領域IIIを表す



# コンパレータとSRFFで判別した領域IV



$V_{O3} > 150\text{mV}$

↓

Cp4の出力1

↓

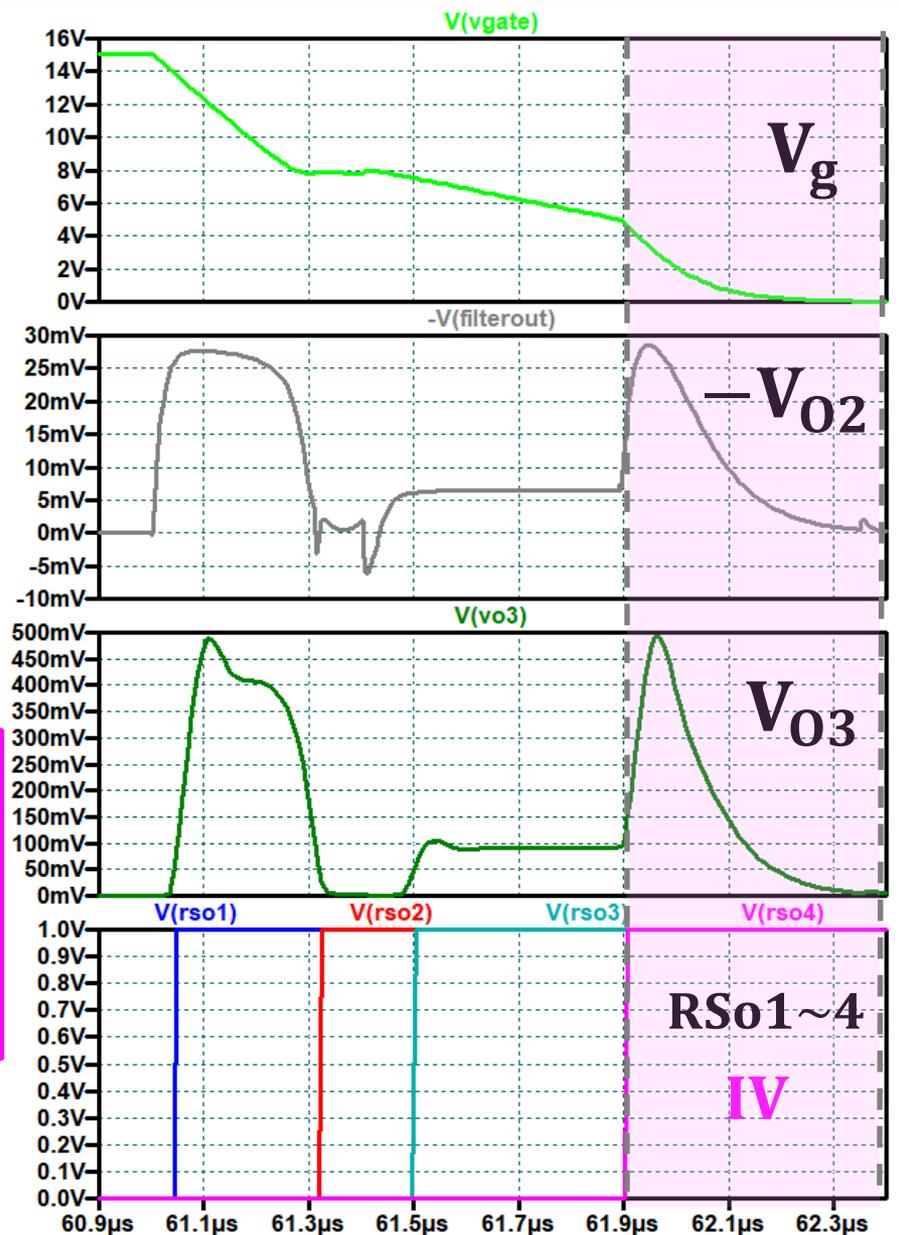
SRFF4の出力1

↓

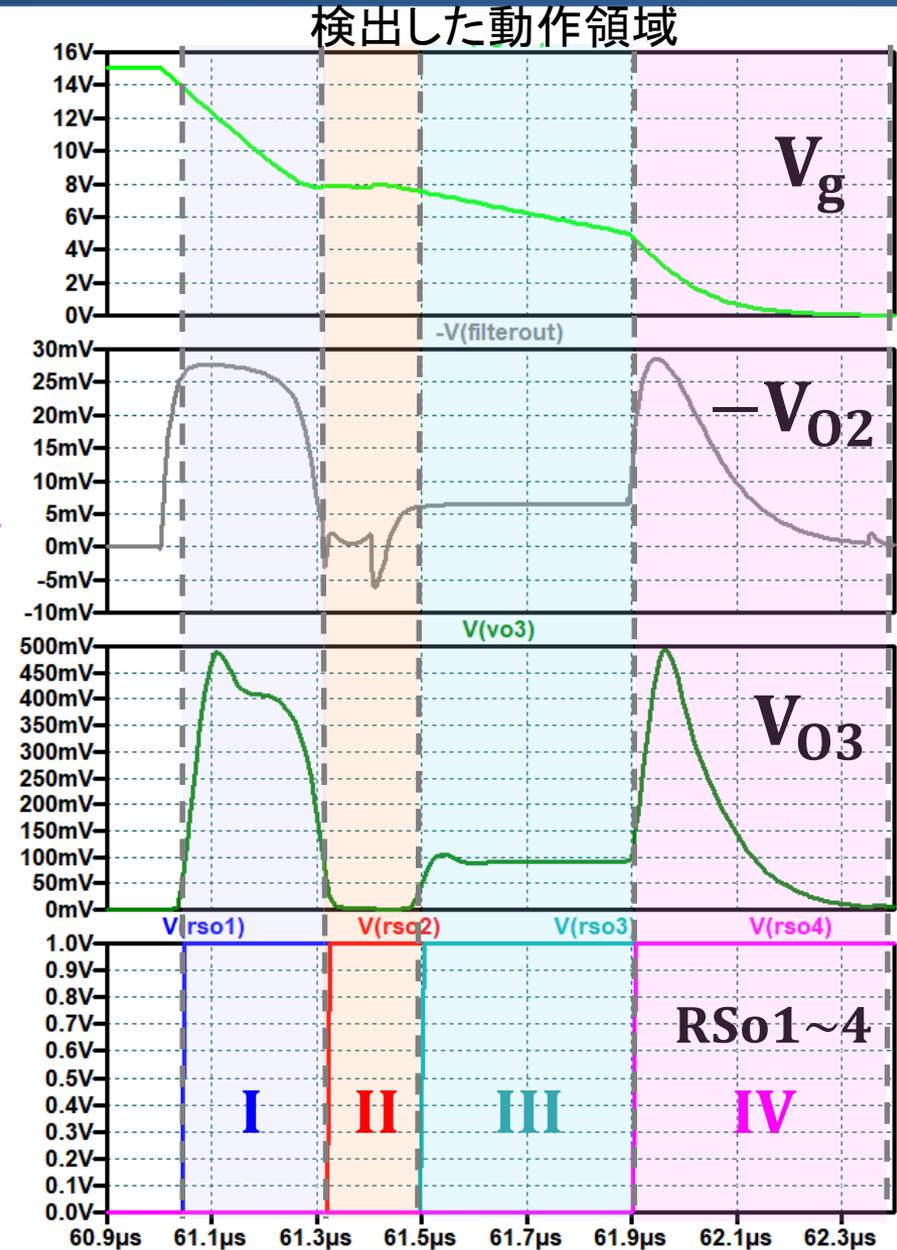
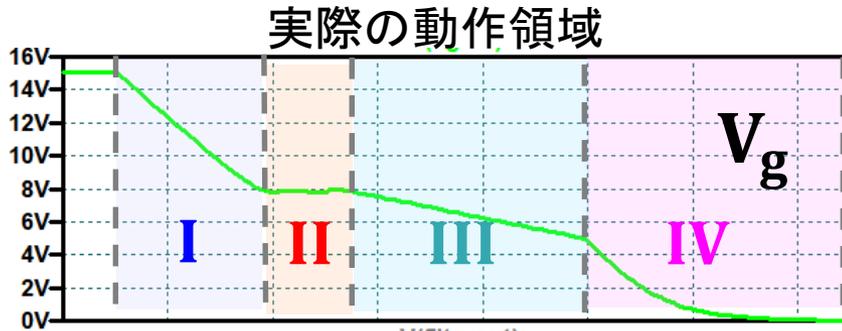
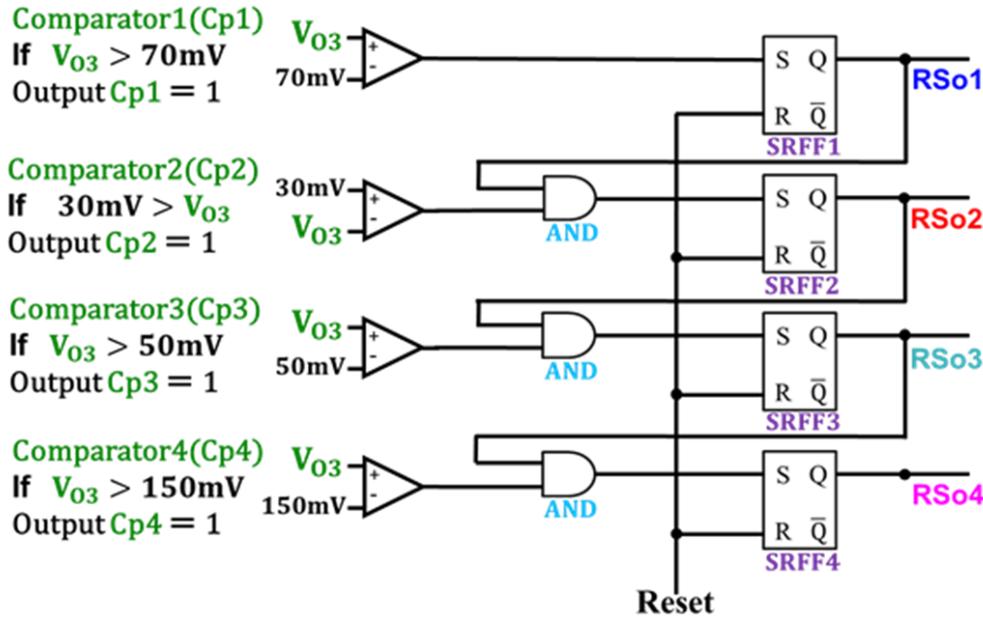
RSO4の出力1

RSO1の出力1  
RSO2の出力1  
RSO3の出力1  
RSO4の出力1

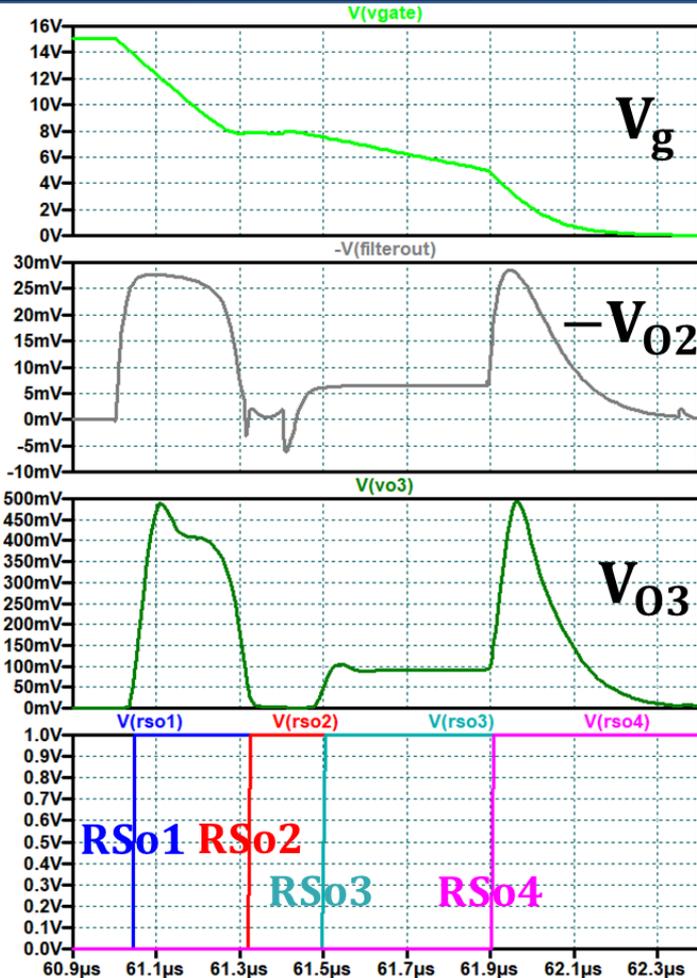
領域IVを表す



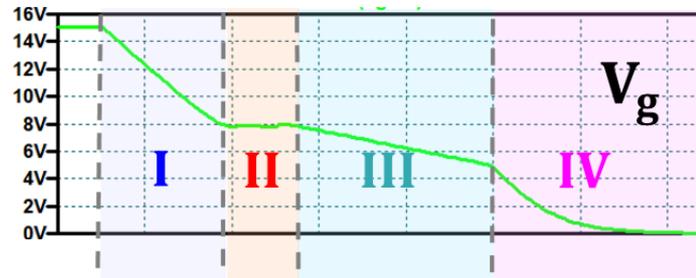
# 電圧変動検出の遅れ



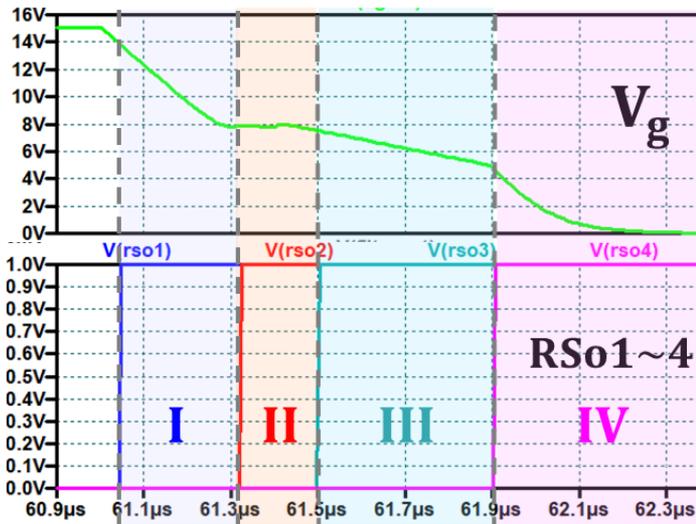
# デジタル値⇒動作領域への変換



(a) Digital values RSo1~RSo4



(b) Actual operating region



(c) Detected operating region

$V_g$ 変動に対する  
 $V_{03}$ 応答速度遅



検出した動作領域は  
実際の動作領域より  
やや遅

動作領域

デジタル値

	RSo1	RSo2	RSo3	RSo4
領域I	1	0	0	0
領域II	1	1	0	0
領域III	1	1	1	0
領域IV	1	1	1	1

# OUTLINE

- 研究背景と目的
- 従来型電圧駆動回路
- 電流駆動 IGBT ドライバ回路
- 電流駆動回路のシミュレーション結果
- 電流駆動 IGBT の動作領域自動判別
  - アナログ値
  - デジタル値
- まとめ

# まとめ

- **4つの動作領域で異なる電流を引き抜く  
電流駆動IGBTゲートドライバ回路を紹介した**
- **従来型電圧駆動に比べてオーバーシュート-32%、  
スイッチング損失-35%に改善した**
- **電流駆動IGBTゲートドライバ回路の  
動作領域の自動判別を可能とした**
- **動作領域変化の検出の遅れによる  
スイッチング損失とオーバーシュートへの影響を  
検証することが課題**

# 質疑応答(Q & A)

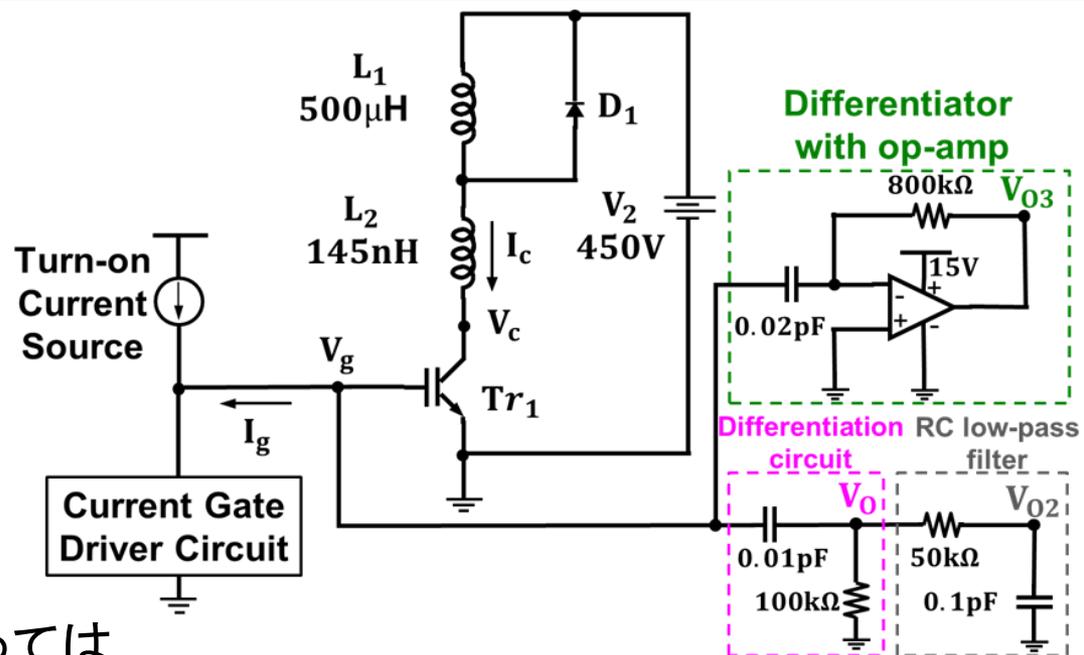
## Q&A

Q. 電流駆動IGBTの動作領域の自動判別を行った目的は何か。

A. 動作領域の自動判別をした結果を用いて、IGBTのゲートから引き抜く電流量やタイミングを自動制御することを考えることで、IoTやAI技術との親和性を高めることを目的としている。

## 頂いたコメント

IGBTのゲート電圧観測に使われているオペアンプ微分器の  $C=0.02\text{pF}$  はかなり小さい値であり、オペアンプ微分器周波数特性によっては発振してしまう可能性があるのではないか。



# ターンオフ特性評価回路MOSFET使用モデル



Innovating Energy Technology

## FGW50N65WD

<http://www.fujielectric.com/products/semiconductor/>

Discrete IGBT

### Discrete IGBT (High-Speed W series) 650V / 50A

#### ■ Features

- Low power loss
- Low switching surge and noise
- High reliability, high ruggedness (RBSOA, SCSOA etc.)

#### ■ Applications

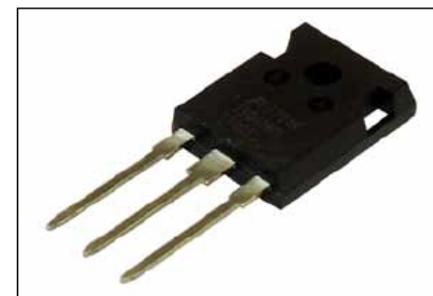
- Uninterruptible power supply
- PV Power conditioner
- Inverter welding machine

#### ■ Maximum Ratings and Characteristics

##### ● Absolute Maximum Ratings (at $T_c=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Items	Symbols	Characteristics	Units	Remarks
Collector-Emitter Voltage	$V_{CE0}$	650	V	
Gate-Emitter Voltage	$V_{GE0}$	$\pm 20$	V	
Transient Gate-Emitter Voltage		$\pm 30$	V	$T_p < 1\mu\text{s}$
DC Collector Current	$I_C@25$	70	A	$T_c=25^\circ\text{C}$
	$I_C@100$	50	A	$T_c=100^\circ\text{C}$
Pulsed Collector Current	$I_{CP}$	200	A	Note *1
Turn-Off Safe Operating Area	-	200	A	$V_{CE} \leq 650\text{V}$ $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
Diode Forward Current	$I_{F@25}$	38	A	
	$I_{F@100}$	25	A	
Diode Pulsed Current	$I_{FP}$	200	A	Note *1
IGBT Max. Power Dissipation	$P_{D,IGBT}$	330	W	$T_c=25^\circ\text{C}$
FWD Max. Power Dissipation	$P_{D,FWD}$	95	W	$T_c=25^\circ\text{C}$
Operating Junction Temperature	$T_J$	-40 ~ +175	$^\circ\text{C}$	
Storage Temperature	$T_{stg}$	-55 ~ +175	$^\circ\text{C}$	

Note \*1 : Pulse width limited by  $T_{Jmax}$ .



#### ■ Equivalent circuit

