

システム集積回路工学論

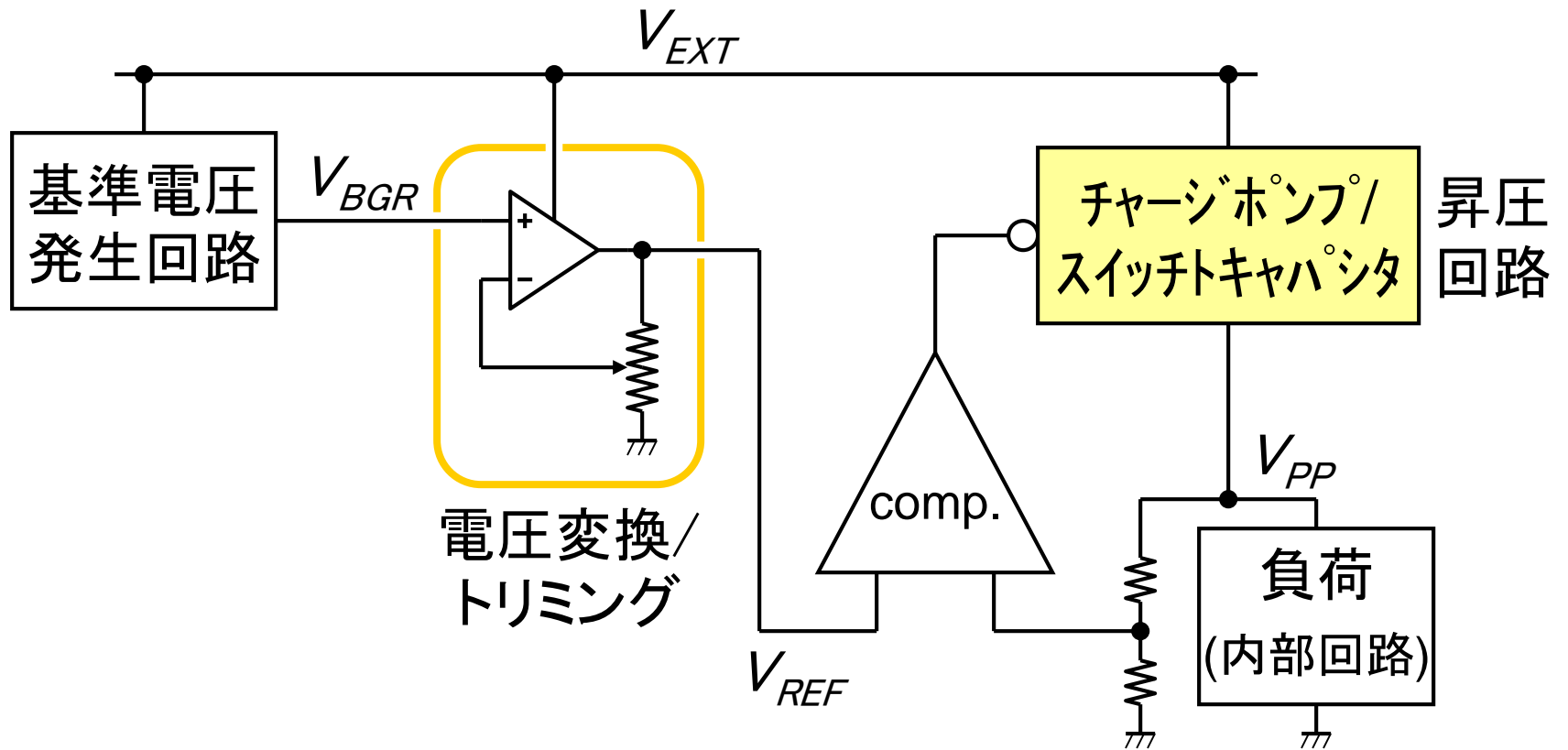
第4回 昇圧回路

群馬大学客員教授 堀口真志

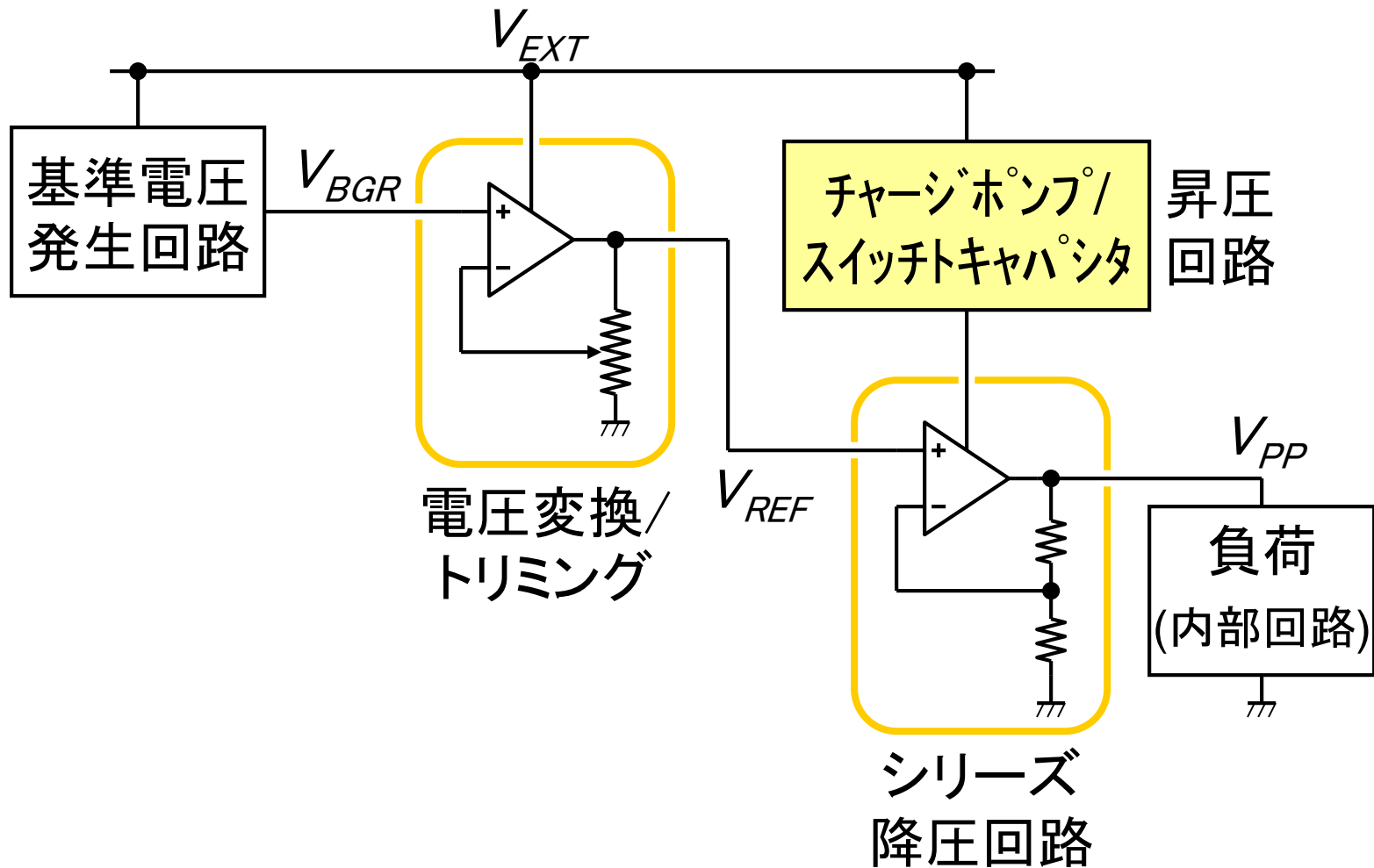
目次

- 1 昇圧回路の種類
- 2 チャージポンプ昇圧回路
 - 2倍昇圧回路
 - n 倍昇圧回路
 - 極性反転回路
- 3 スイッチトキャパシタ昇圧回路
- 4 スイッチング昇圧回路
- 5 レベルモニタ

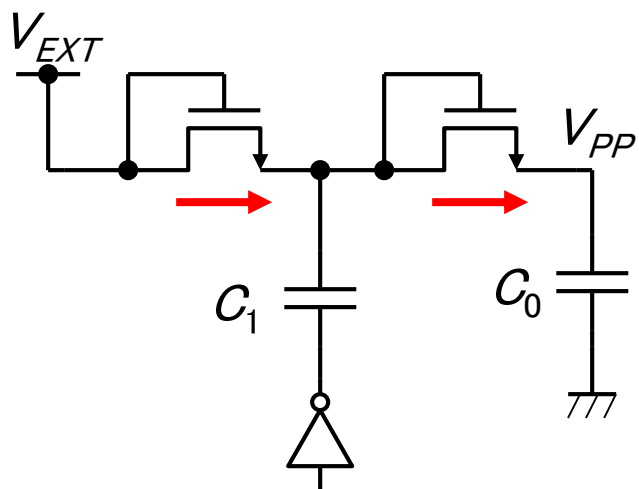
オンチップ電源回路の基本構成(昇圧1)



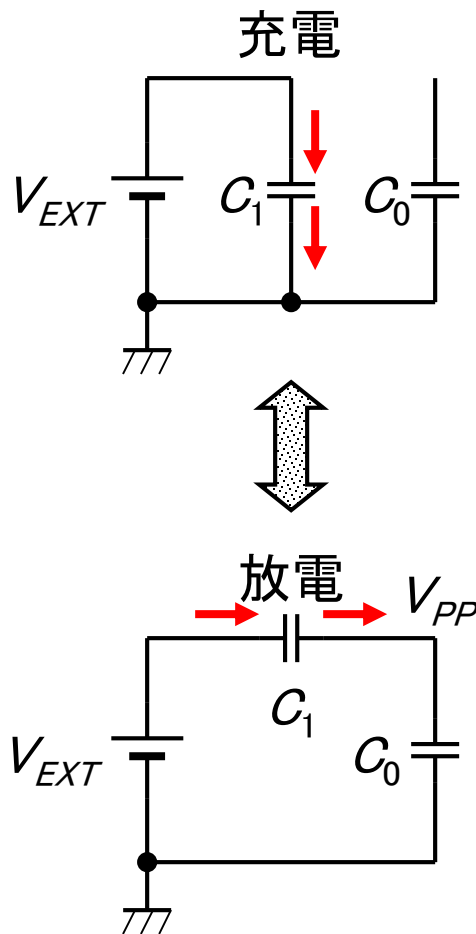
オンチップ電源回路の基本構成(昇圧2)



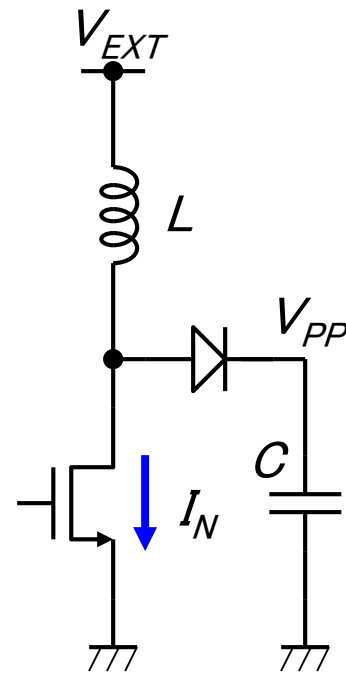
昇圧回路の種類



チャージポンプ

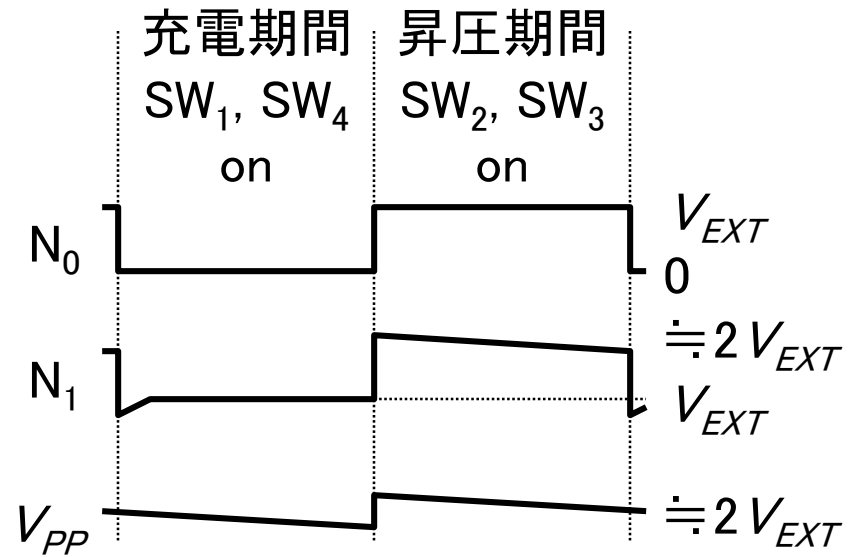
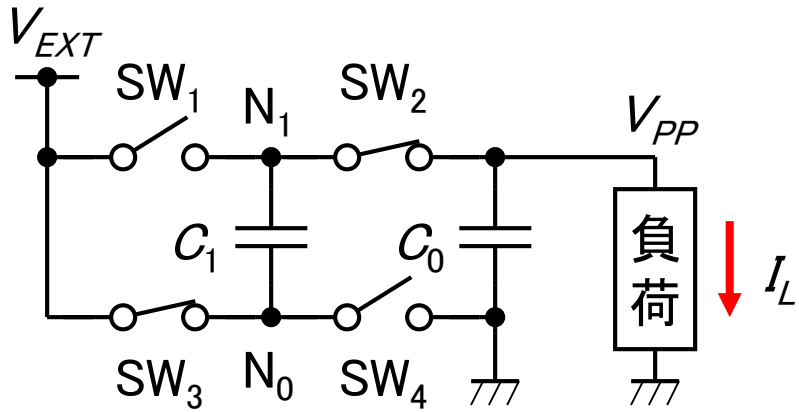


スイッチトキャパシタ

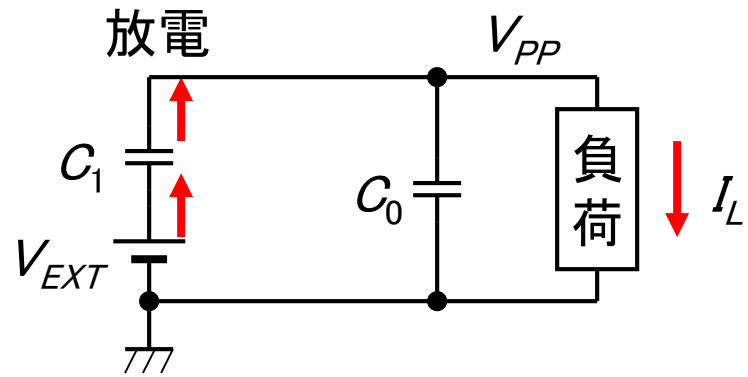
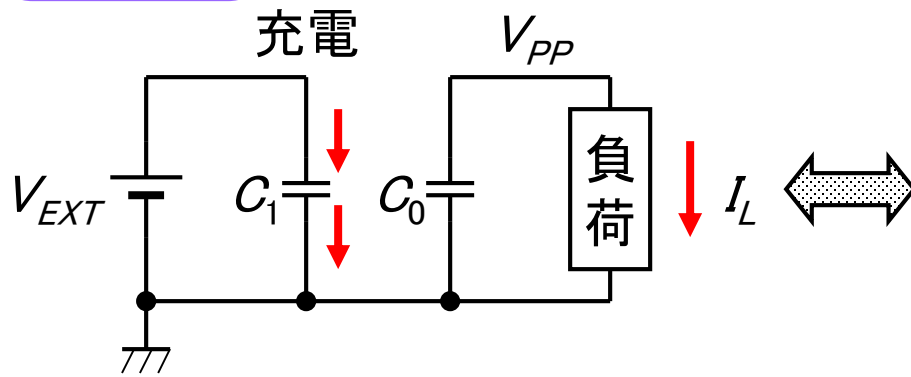


スイッチング

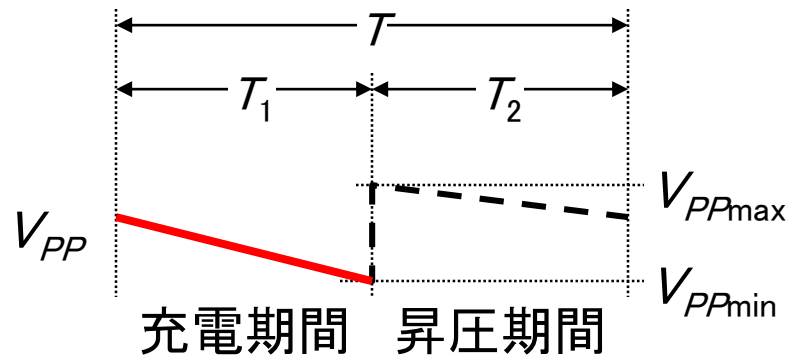
2倍昇圧回路の原理



等価回路



2倍昇圧回路の解析(1)

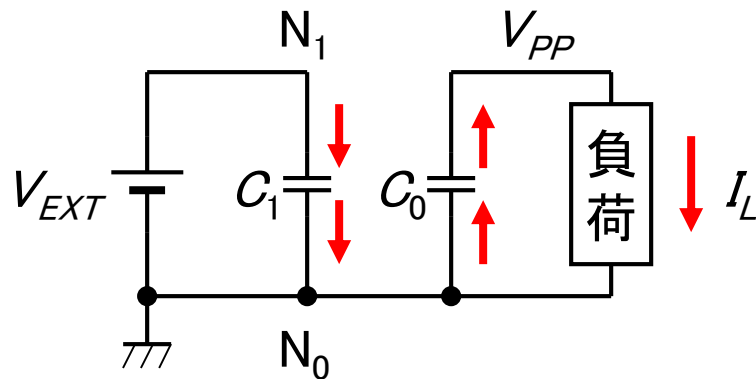


充電期間

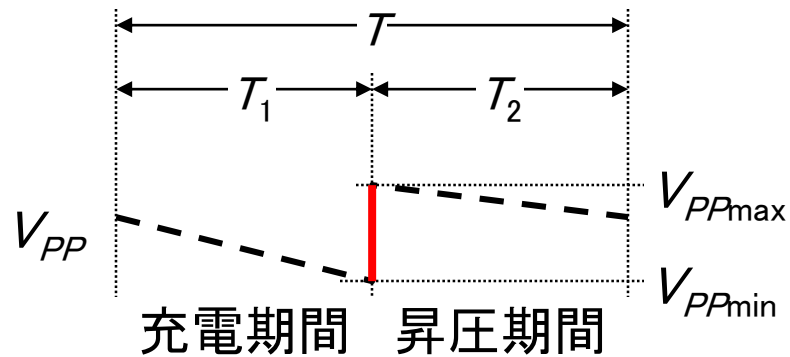
SW₁, SW₄ on, SW₂, SW₃ off

$$C_0 \frac{dV_{PP}}{dt} = -I_L$$

$$V_{N1} = V_{EXT}$$



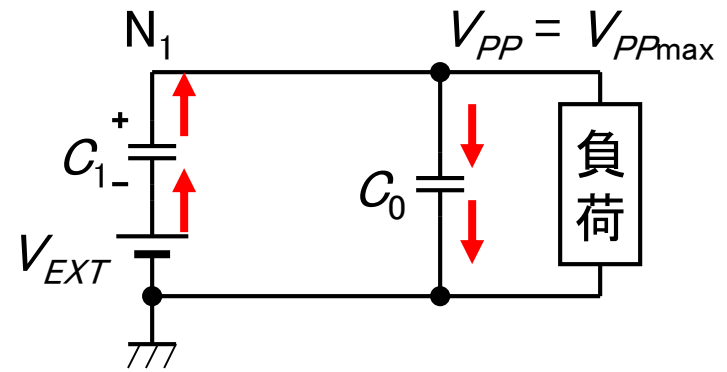
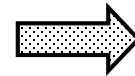
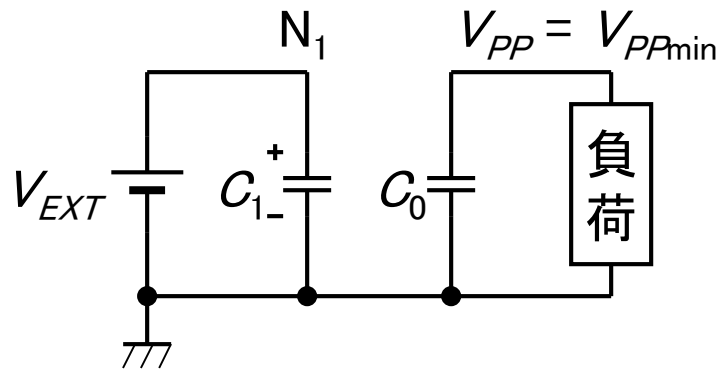
2倍昇圧回路の解析(2)



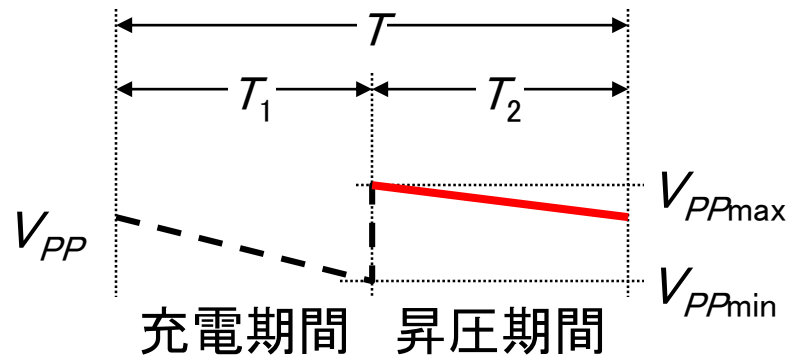
充電→昇圧遷移

N_1 における電荷保存則より

$$C_1 \cdot V_{EXT} + C_0 \cdot V_{PPmin} = C_1 \cdot (V_{PPmax} - V_{EXT}) + C_0 \cdot V_{PPmax}$$



2倍昇圧回路の解析(3)

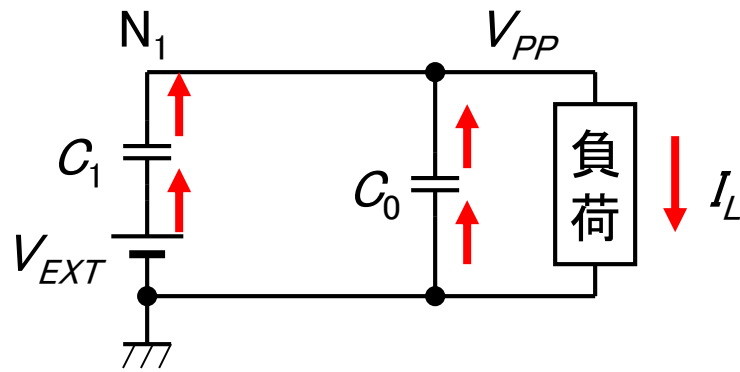


昇圧期間

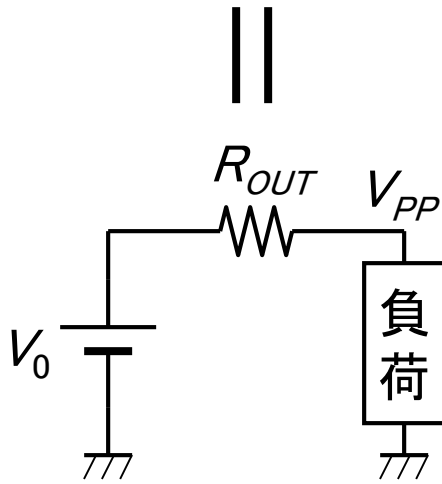
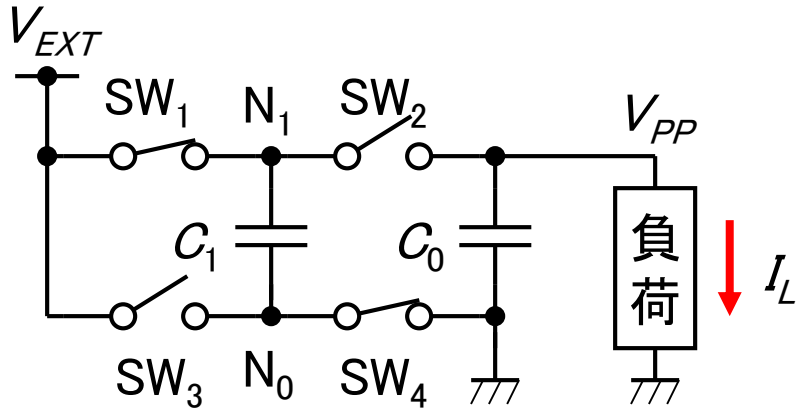
SW₂, SW₃ on, SW₁, SW₂ off

$$(C_0 + C_1) \frac{dV_{PP}}{dt} = -I_L$$

$$V_{N1} = V_{PP}$$



2倍昇圧回路の解析(4)



出力電圧

$$\overline{V_{PP}} \cong \underbrace{2V_{EXT}}_{V_0} - \underbrace{\frac{T}{C_1} \cdot I_L}_{R_{OUT}} \quad (C_0 \gg C_1)$$

リップル

$$V_{PPmax} - V_{PPmin} = \left(\frac{T_1}{C_0} + \frac{T_2}{C_0 + C_1} \right) \cdot I_L$$

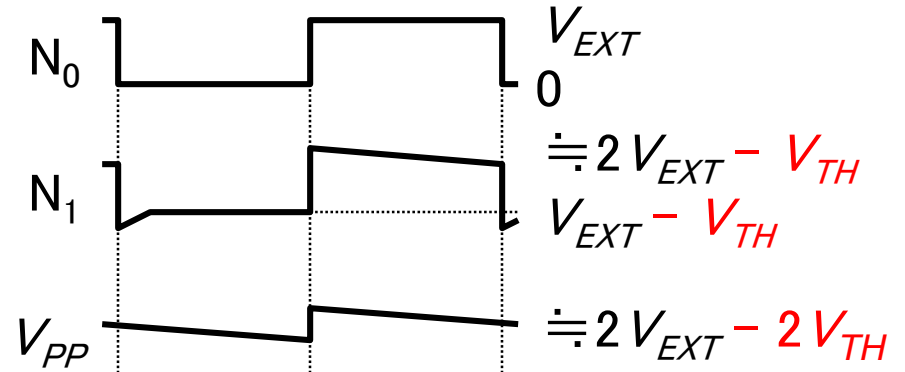
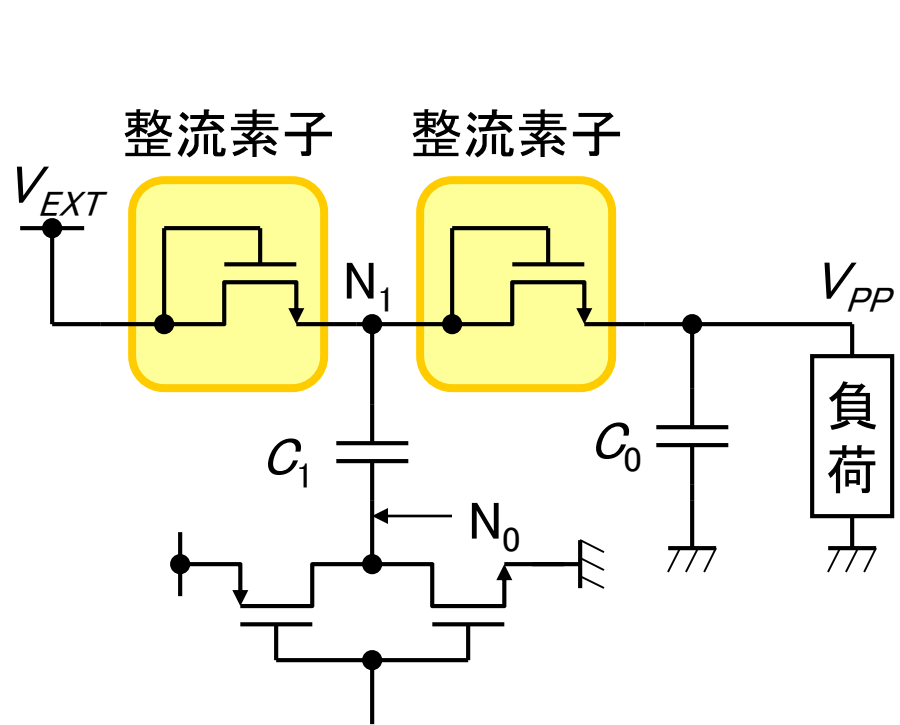
$$\cong \frac{T I_L}{C_0} \quad (C_0 \gg C_1)$$

電力効率

$$\eta = \frac{\overline{V_{PP}}}{2V_{EXT}}$$

2倍昇圧チャージポンプ回路

$SW_1, SW_2 \rightarrow$ 整流素子で置換え

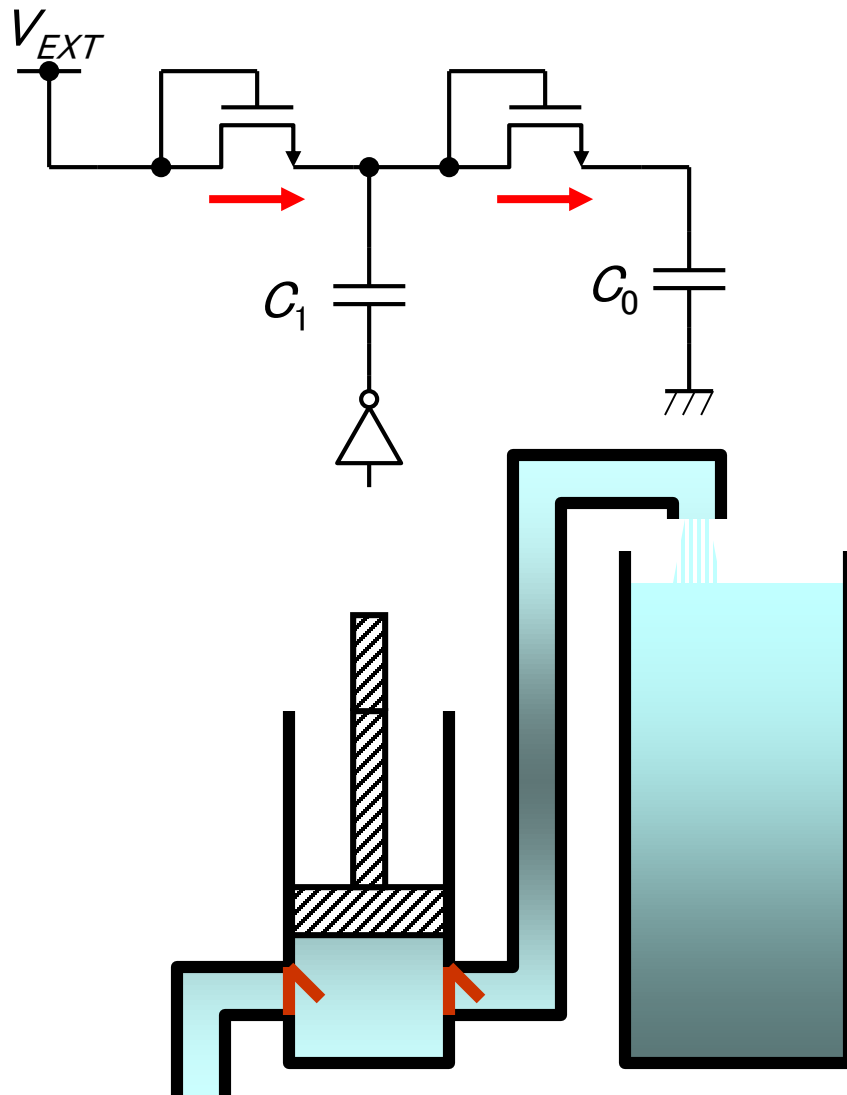


低電圧化のための問題点

整流素子での V_{TH} drop

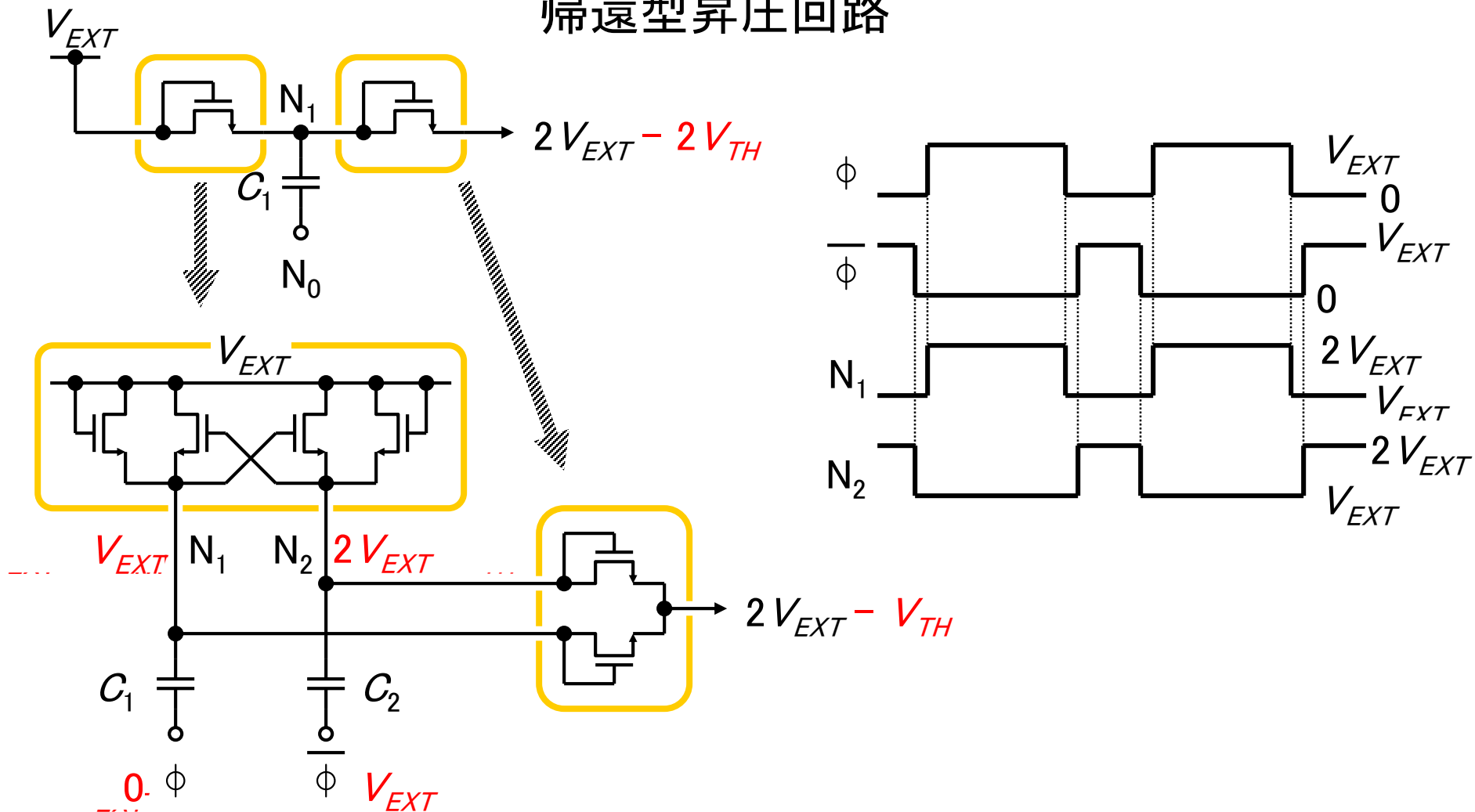
整流素子の基板効果

水の流れに例えると……



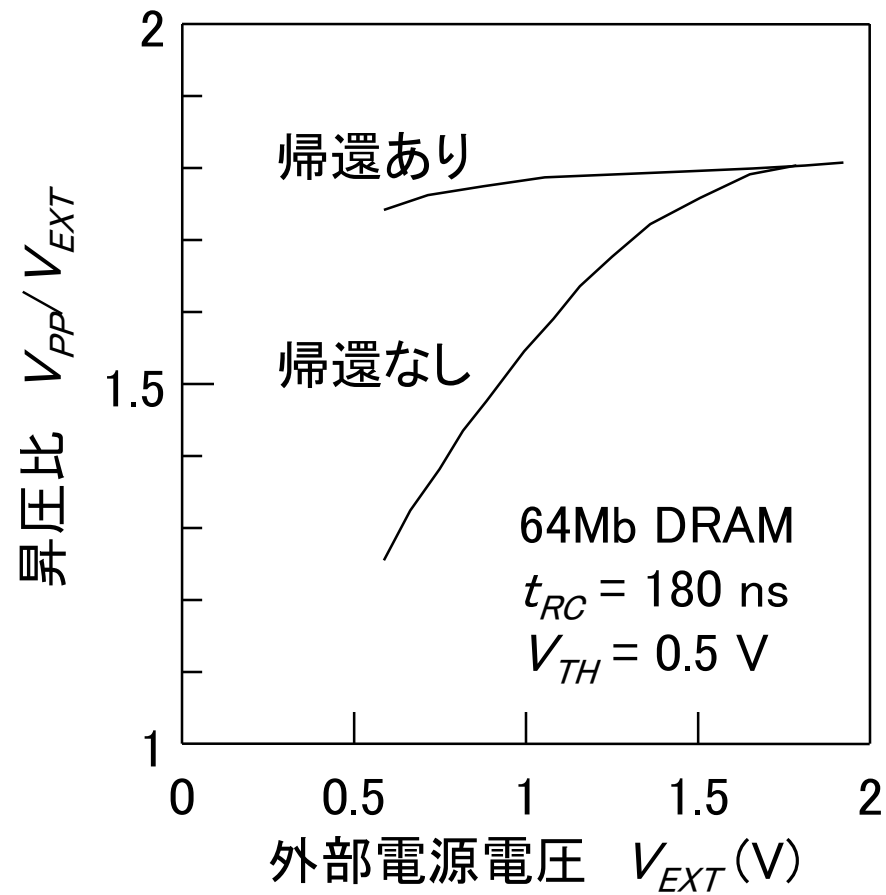
低電圧用2倍昇圧回路

帰還型昇圧回路



Y. Nakagome, IEEE J. SSC p.465, Apr. 1991

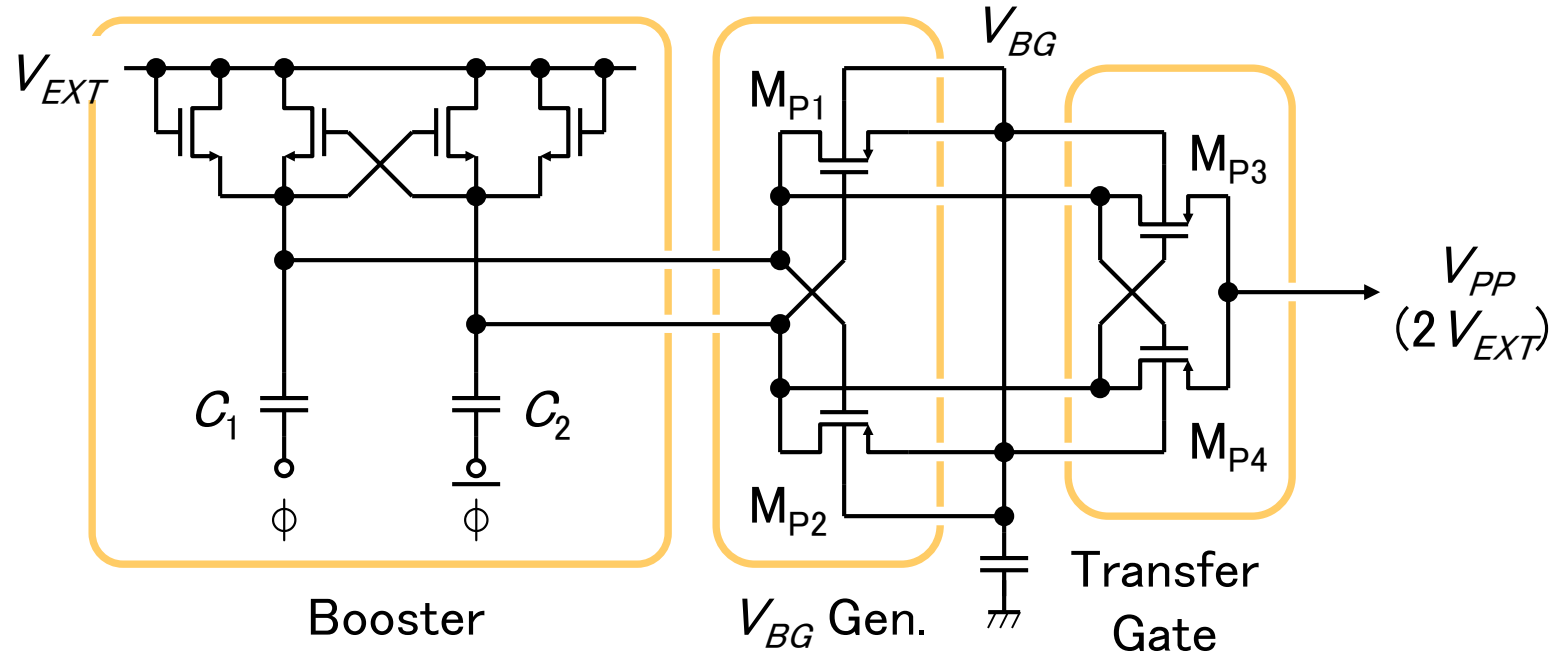
低電圧用2倍昇圧回路



Y. Nakagome, IEEE J. SSC p.465, Apr. 1991

低電圧用2倍昇圧回路

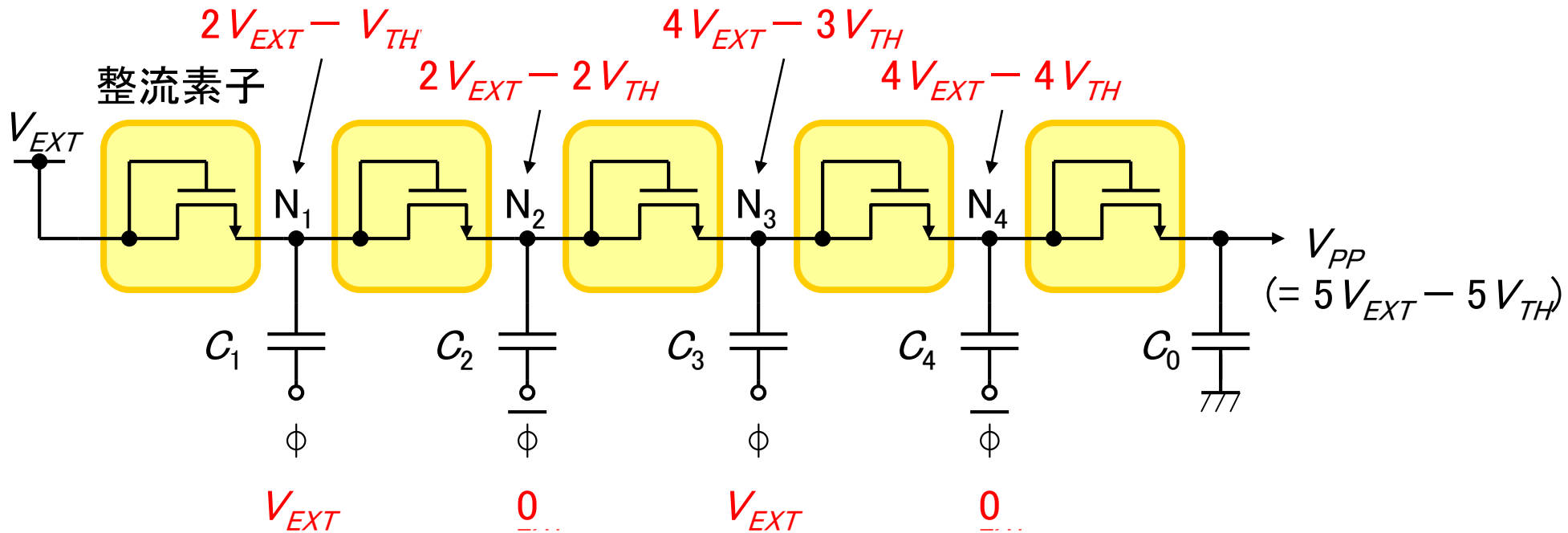
PMOSTランスファスイッチ



nウェル電位 $V_{BG} \geq V_{PP}$

n 倍昇圧チャージポンプ回路

Dickson型チャージポンプ



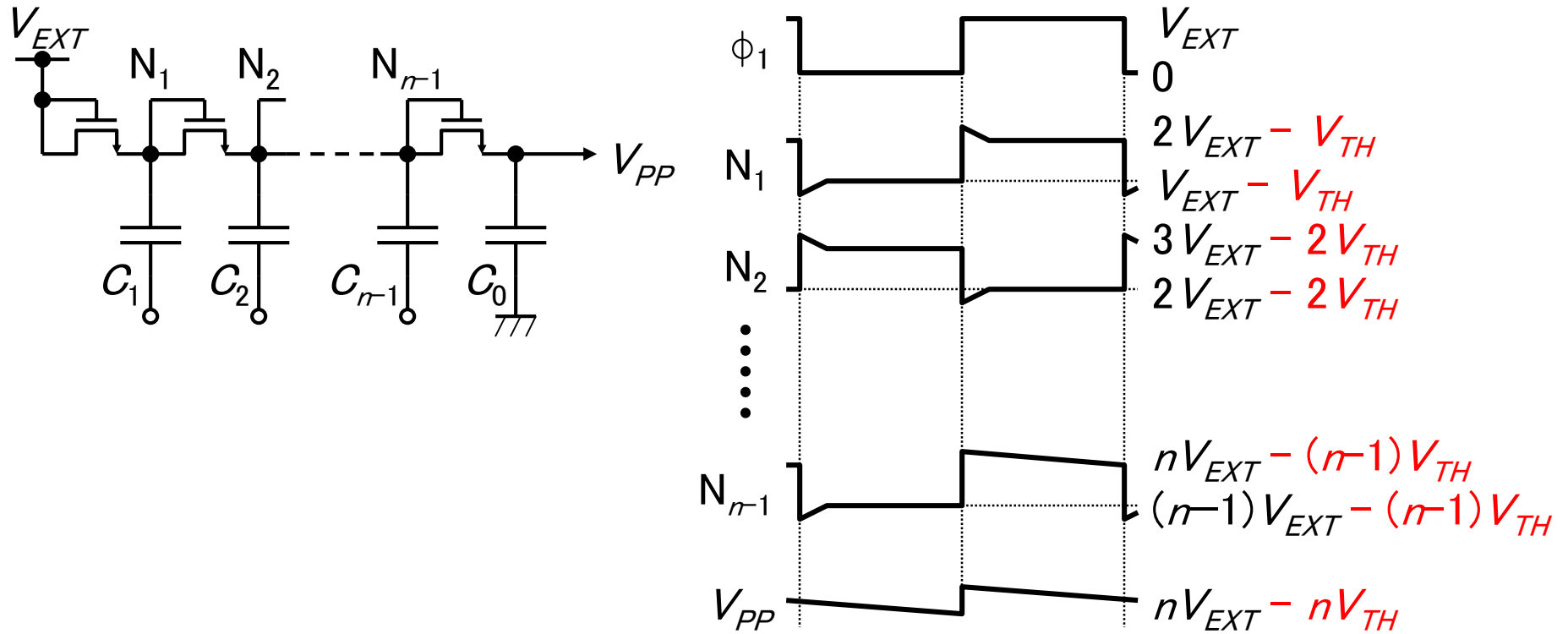
低電圧化のための問題点

整流素子での V_{TH} drop

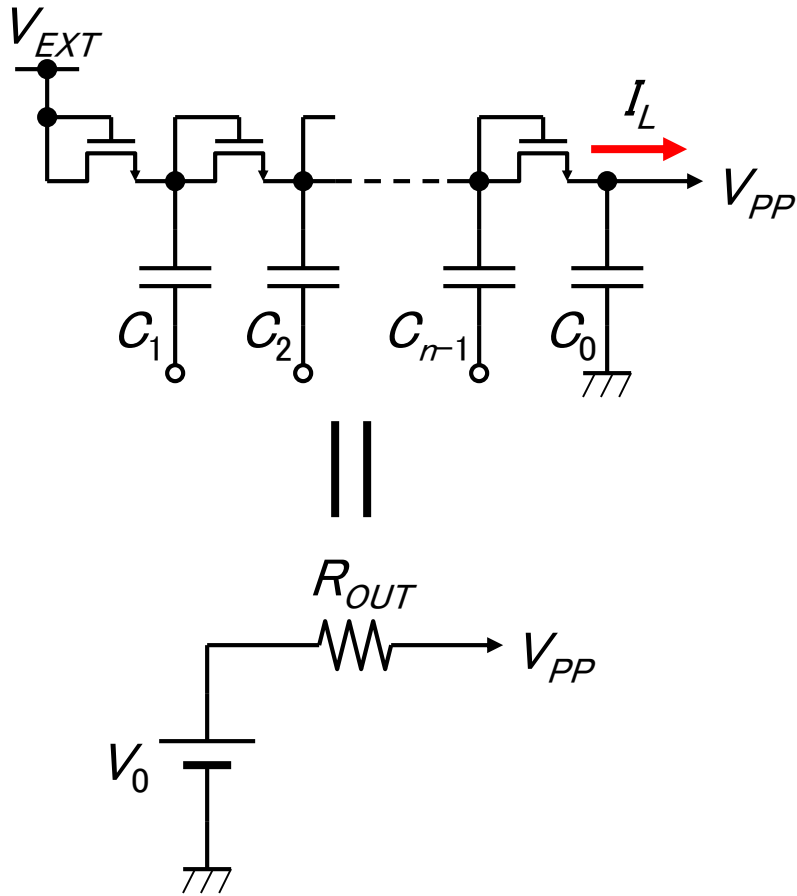
整流素子の基板効果

n 倍昇圧チャージポンプ回路

Dickson型チャージポンプ



n 倍昇圧チャージポンプ回路の解析(1)



出力電圧

$$V_{PP} = \overbrace{nV_{EXT} - nV_{TH}}^{V_0} - \overbrace{\frac{R_{OUT}}{C}}^{(n-1)T} \cdot I_L$$

$$C_1 = C_2 = \dots = C_{n-1} = C \ll C_0$$

リップル

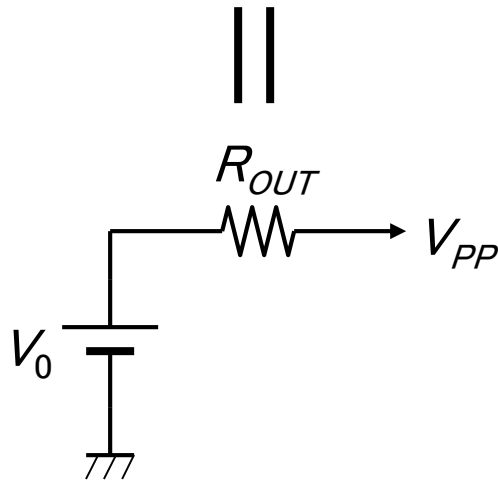
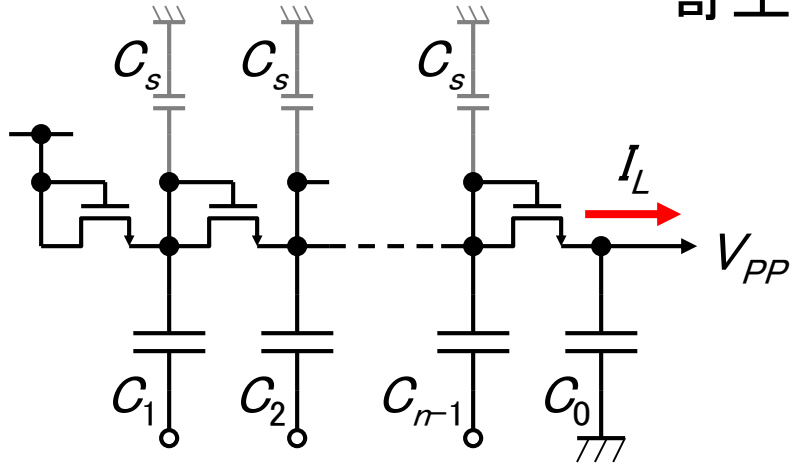
$$v = \frac{I_L T}{C_0}$$

電力効率

$$\eta = \frac{V_{PP}}{nV_{EXT}}$$

n 倍昇圧チャージポンプ回路の解析(2)

寄生容量の影響



出力電圧

$$V_{PP} = \overbrace{\frac{nC + C_S}{C + C_S} \cdot V_{EXT} - nV_{TH}}^{V_0} - \overbrace{\frac{(n-1)T}{C + C_S}}^{R_{OUT}} \cdot I_L$$

リップル

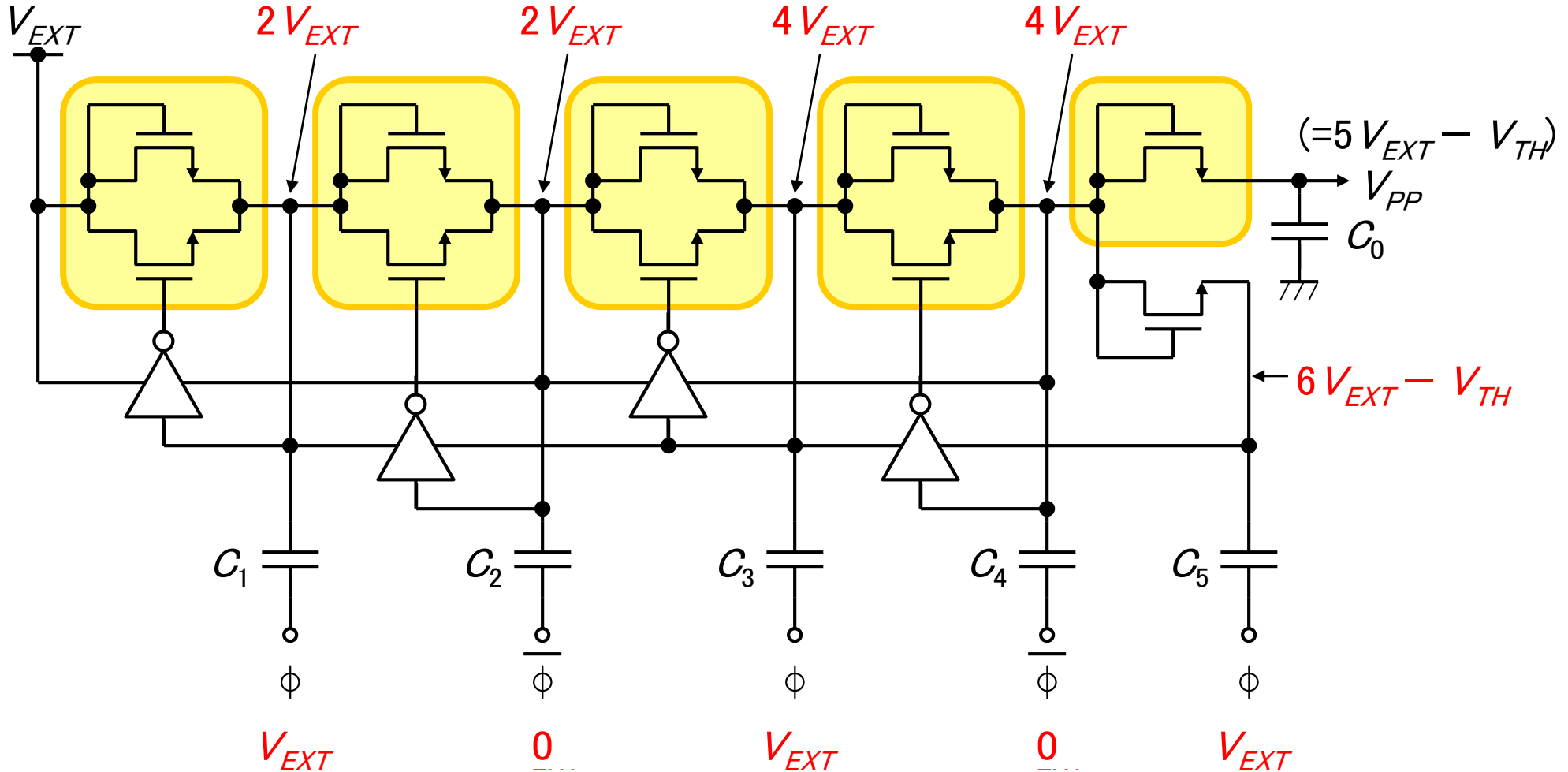
$$v = \frac{I_L T}{C_0}$$

電力効率

$$\eta = \frac{V_{PP}}{nV_{EXT}}$$

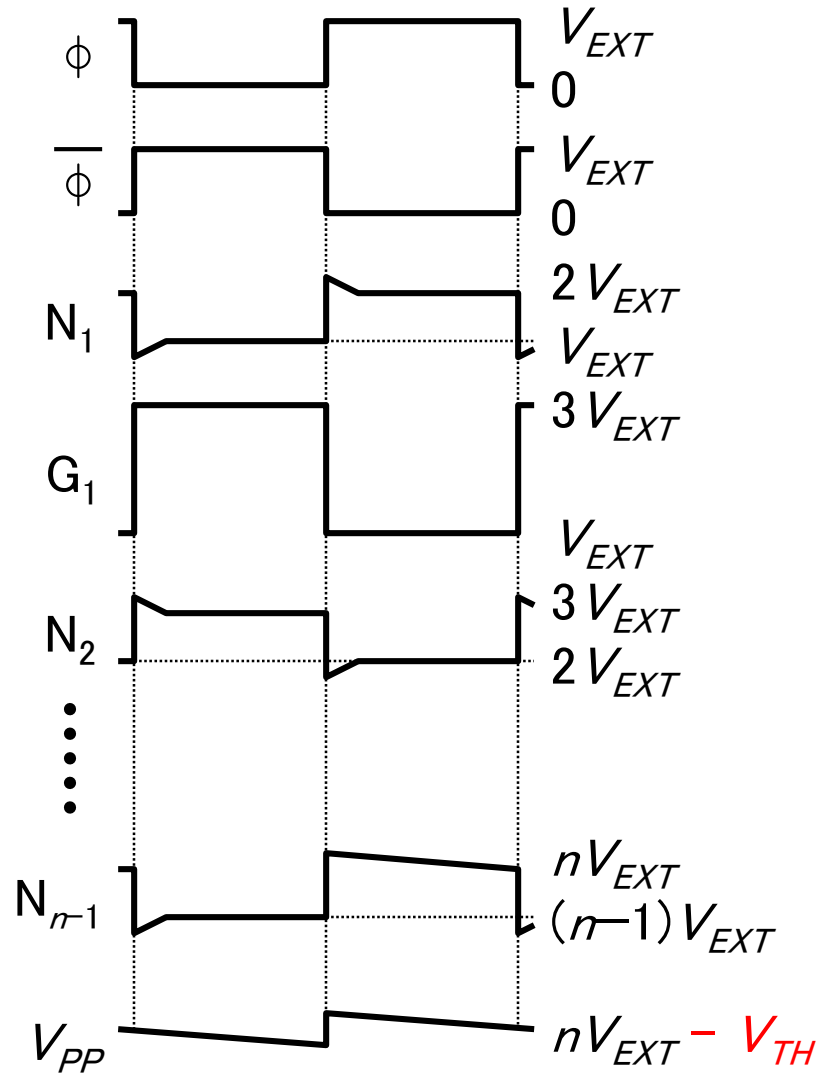
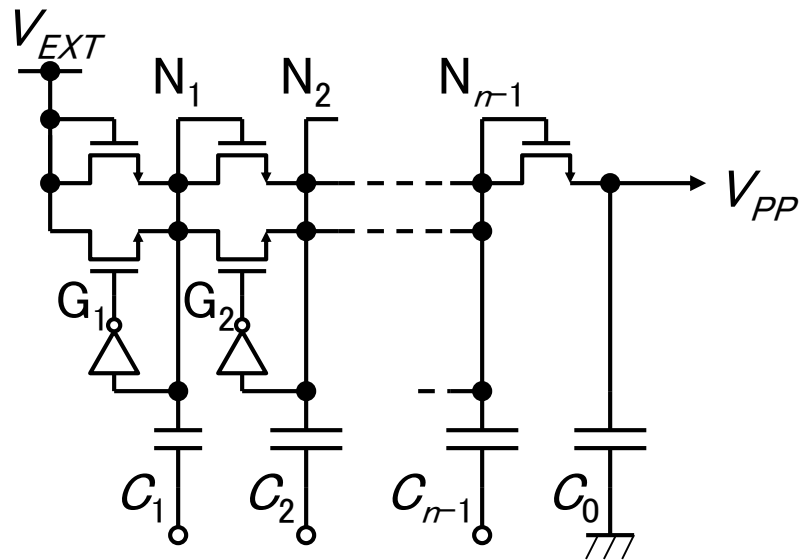
V_0 低下 \rightarrow η 低下

低電圧用 n 倍昇圧チャージポンプ回路



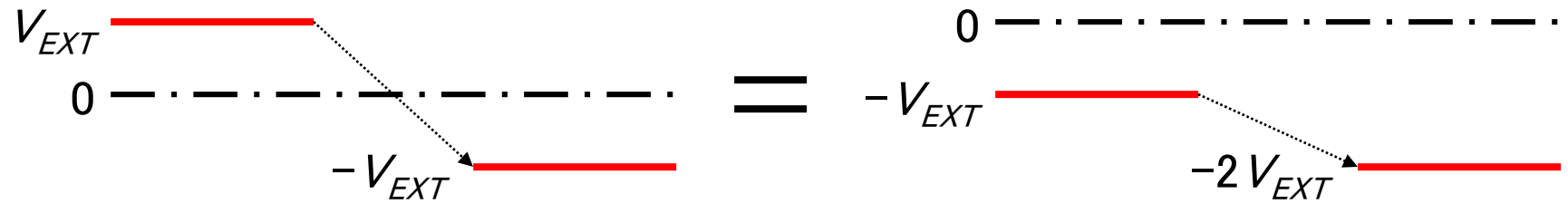
J.-T. Wu, IEEE J. SSC, p. 592, Apr. 1998.

低電圧用 n 倍昇圧チャージポンプ回路

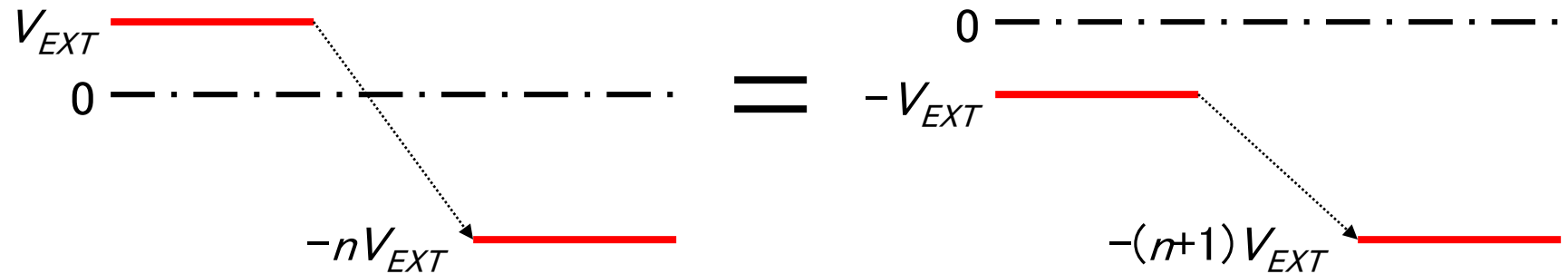


極性反転の原理

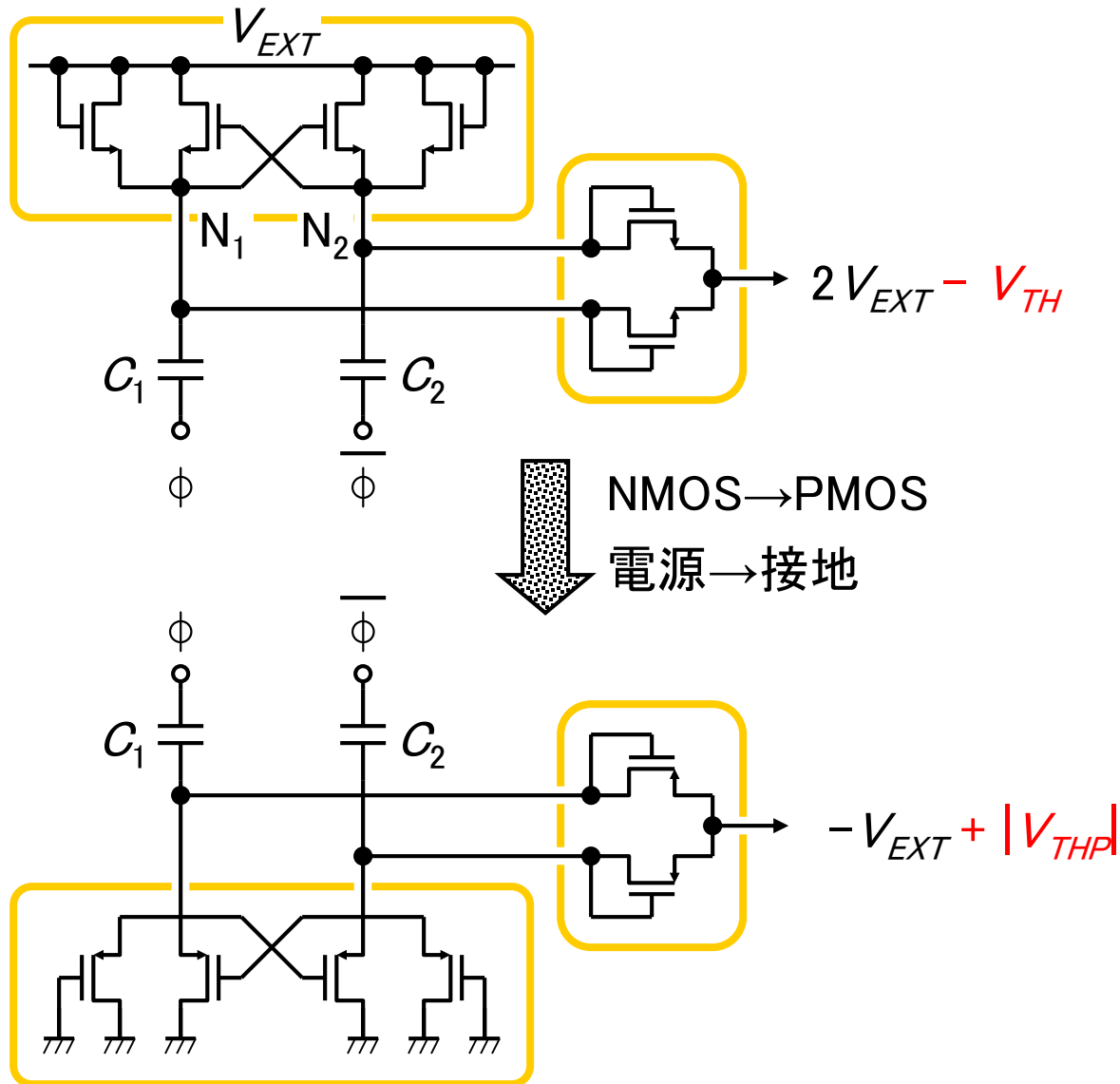
極性反転 = 負の2倍昇圧



極性反転 + n 倍昇圧 = 負の $(n+1)$ 倍昇圧

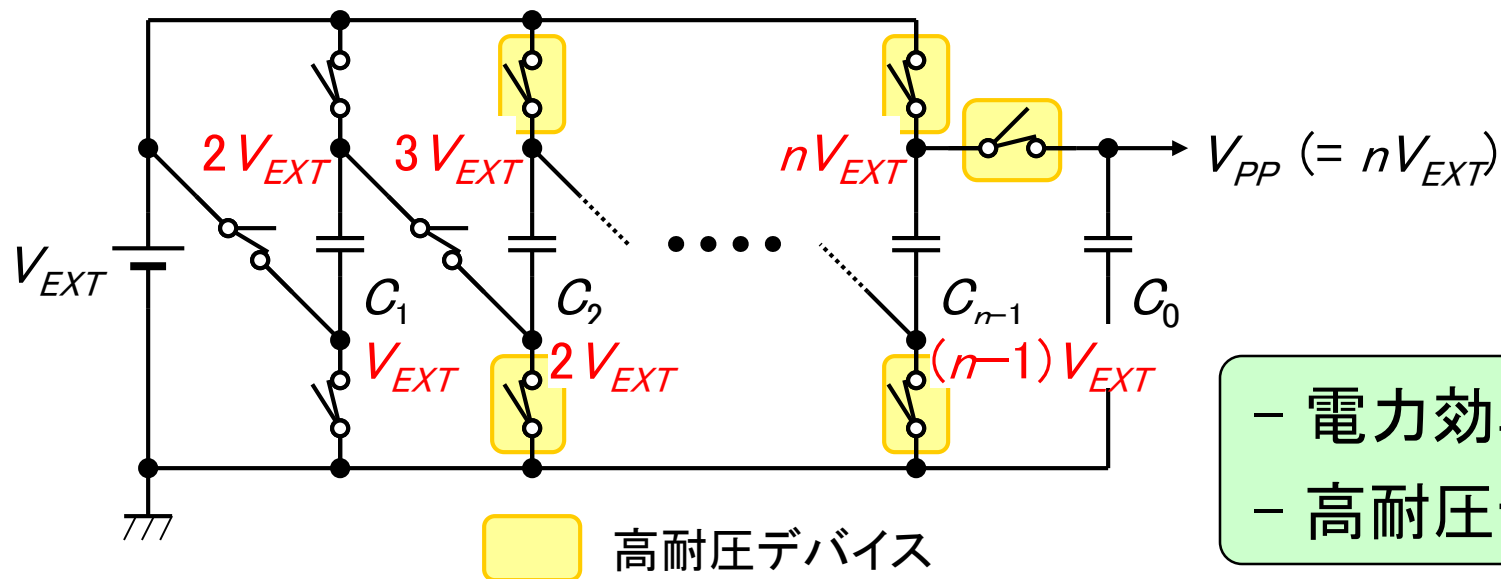


負電壓發生回路



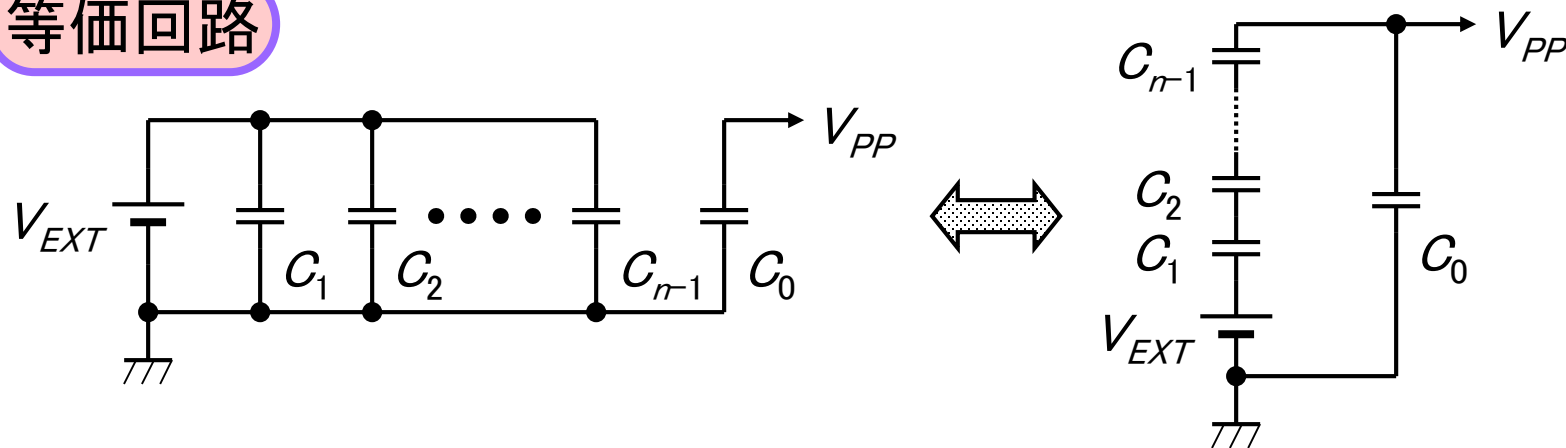
スイッチトキャパシタ昇圧回路

スイッチトキャパシタ降圧回路の入力と出力を入れ替え

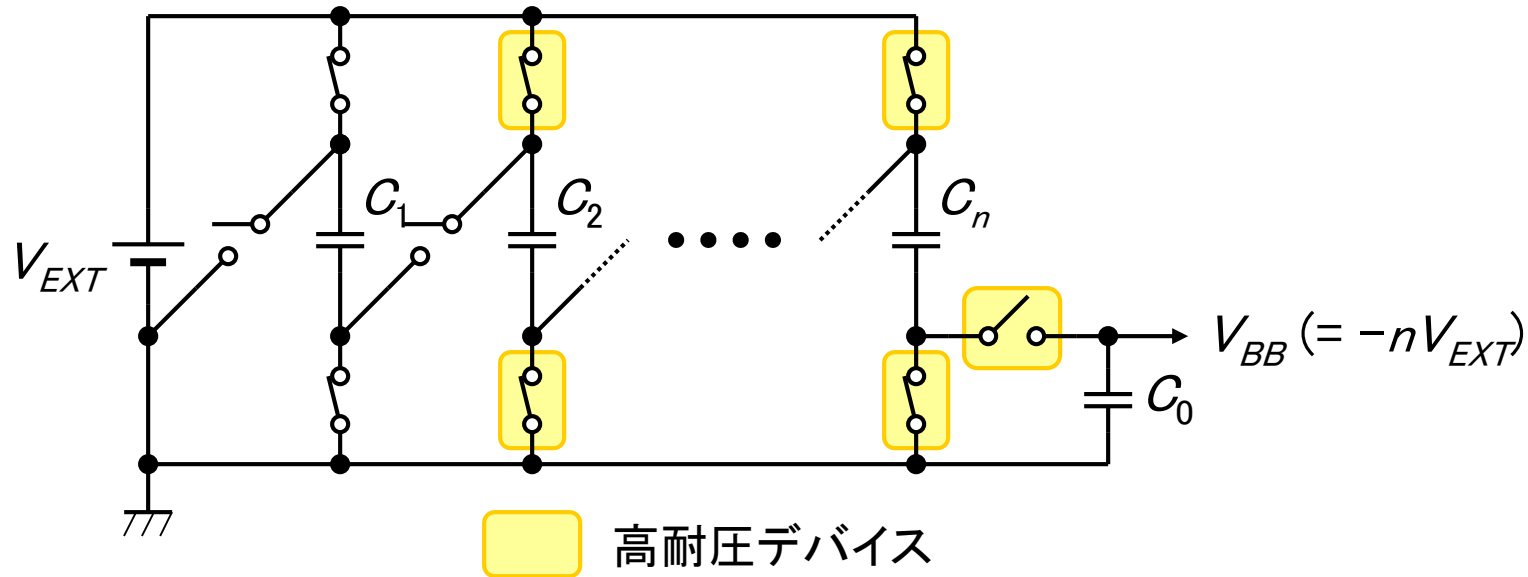


- 電力効率 > 80%
- 高耐圧デバイス必要

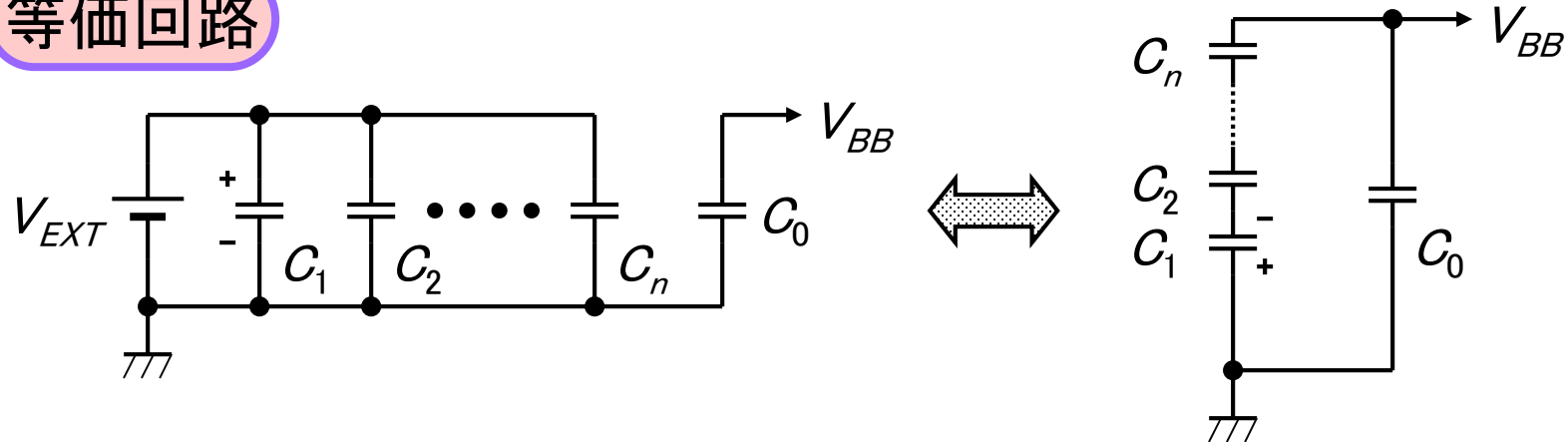
等価回路



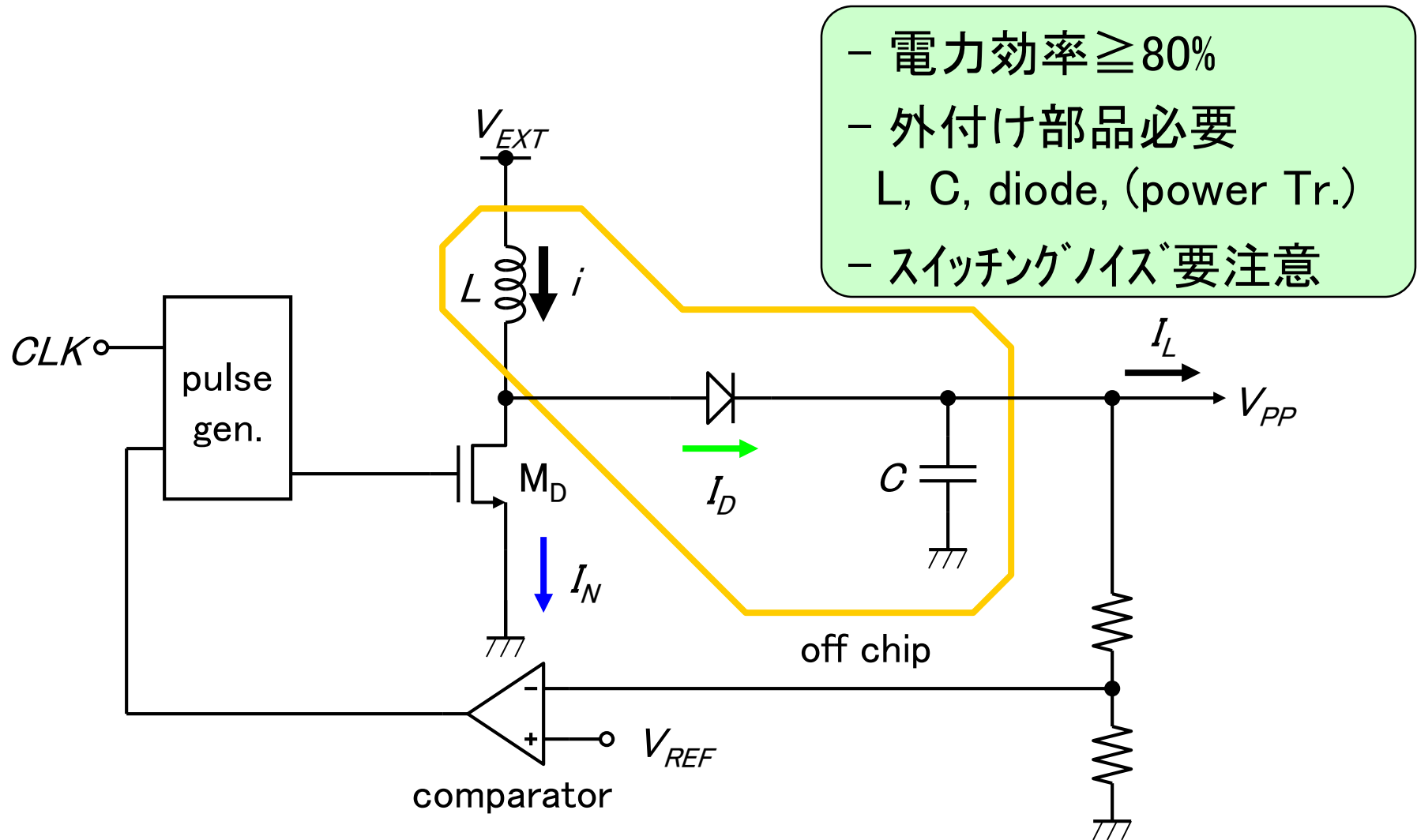
スイッチトキャパシタ極性反転回路



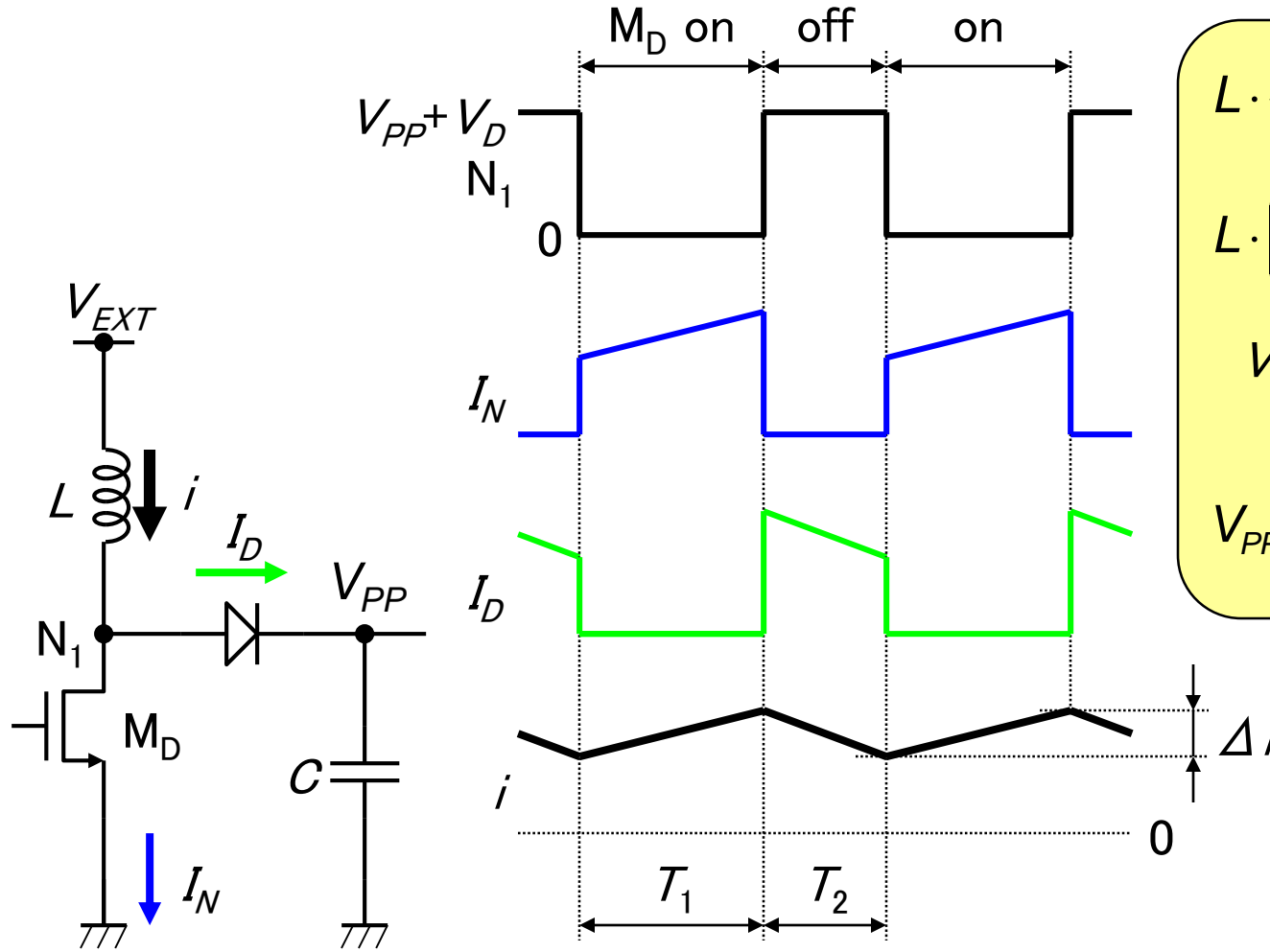
等価回路



スイッチング昇圧回路



スイッチング昇圧回路の動作波形



$$L \cdot \frac{\Delta i}{T_1} = V_{EXT}$$

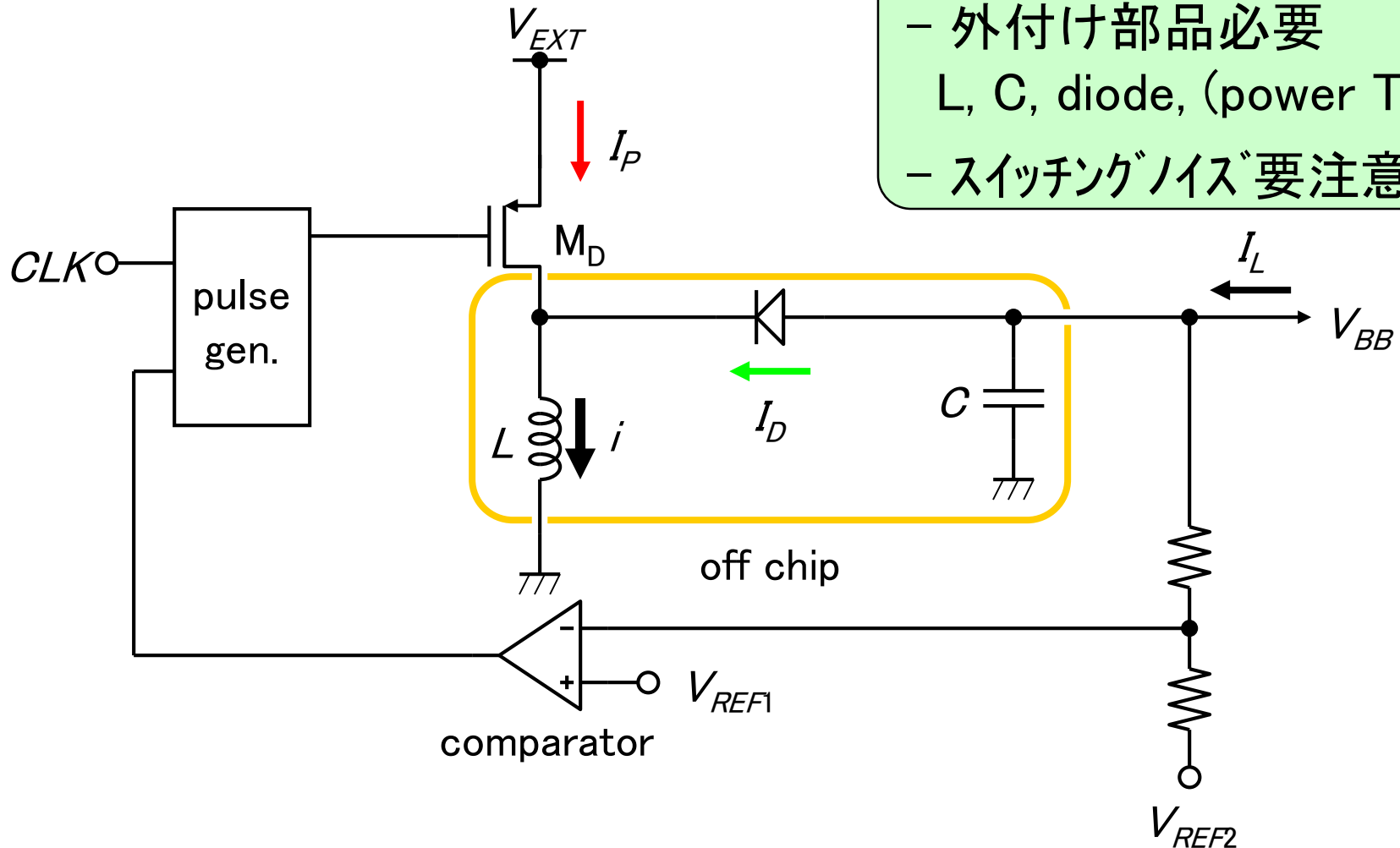
$$L \cdot \left(-\frac{\Delta i}{T_2} \right) = V_{EXT} - V_{PP} - V_D$$

V_D : ダイオード順方向
電圧降下

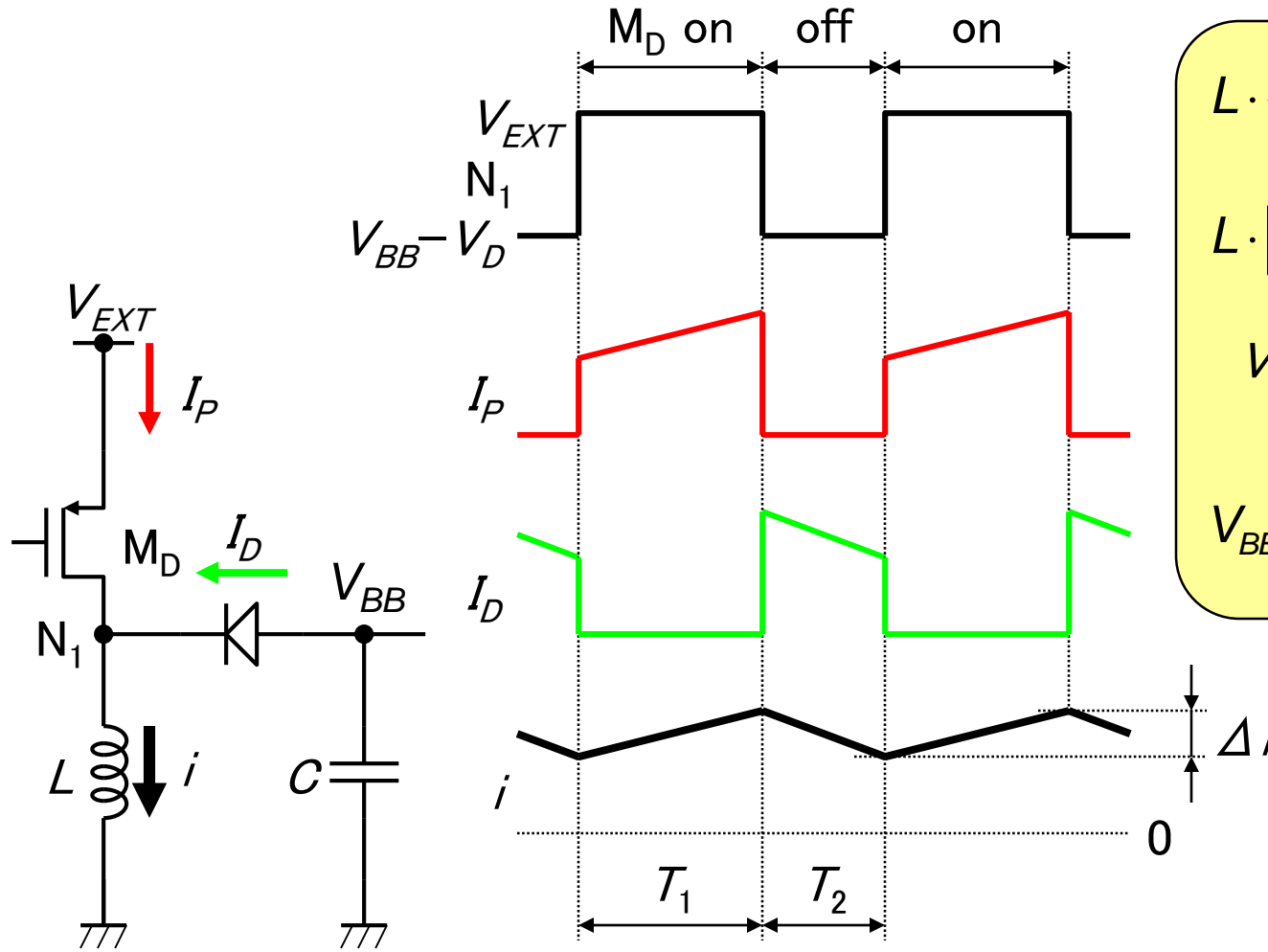
$$V_{PP} = \frac{T_1 + T_2}{T_2} \cdot V_{EXT} - V_D$$

スイッチング極性反転回路

- 電力効率 $\geq 80\%$
- 外付け部品必要
L, C, diode, (power Tr.)
- スwitchングノイズ`要注意



スイッチング極性反転回路の動作波形



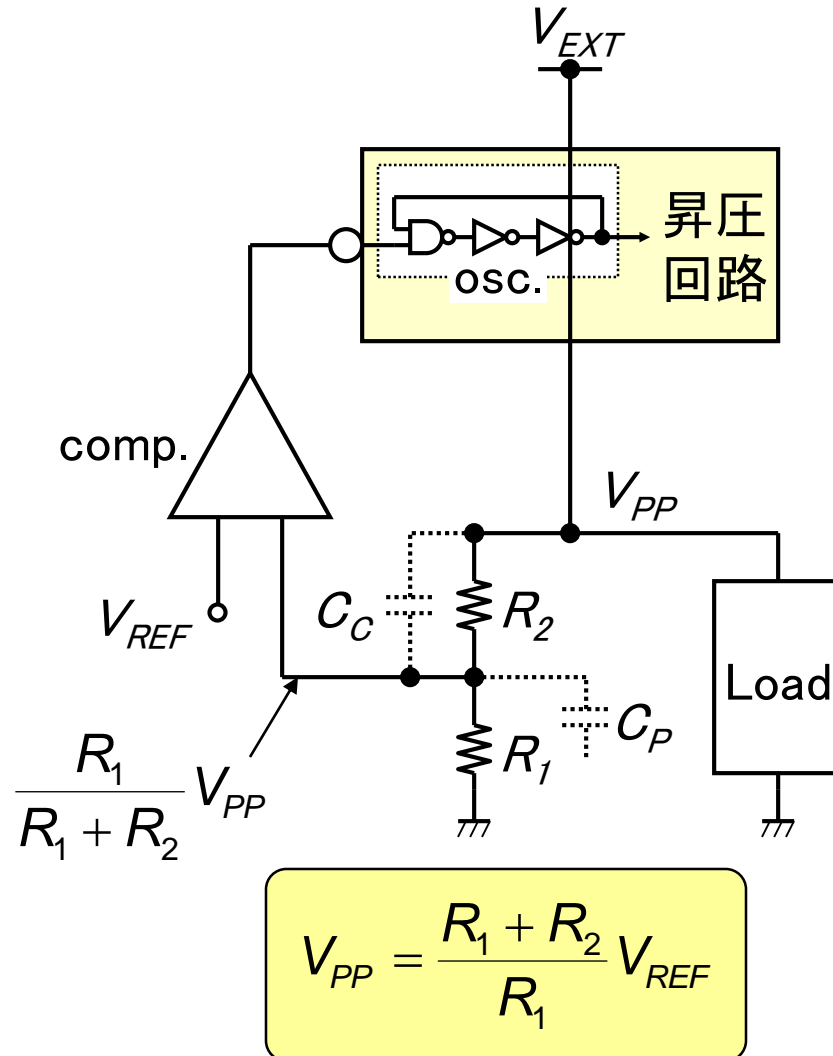
$$L \cdot \frac{\Delta i}{T_1} = V_{EXT}$$

$$L \cdot \left(-\frac{\Delta i}{T_2} \right) = V_{BB} - V_D$$

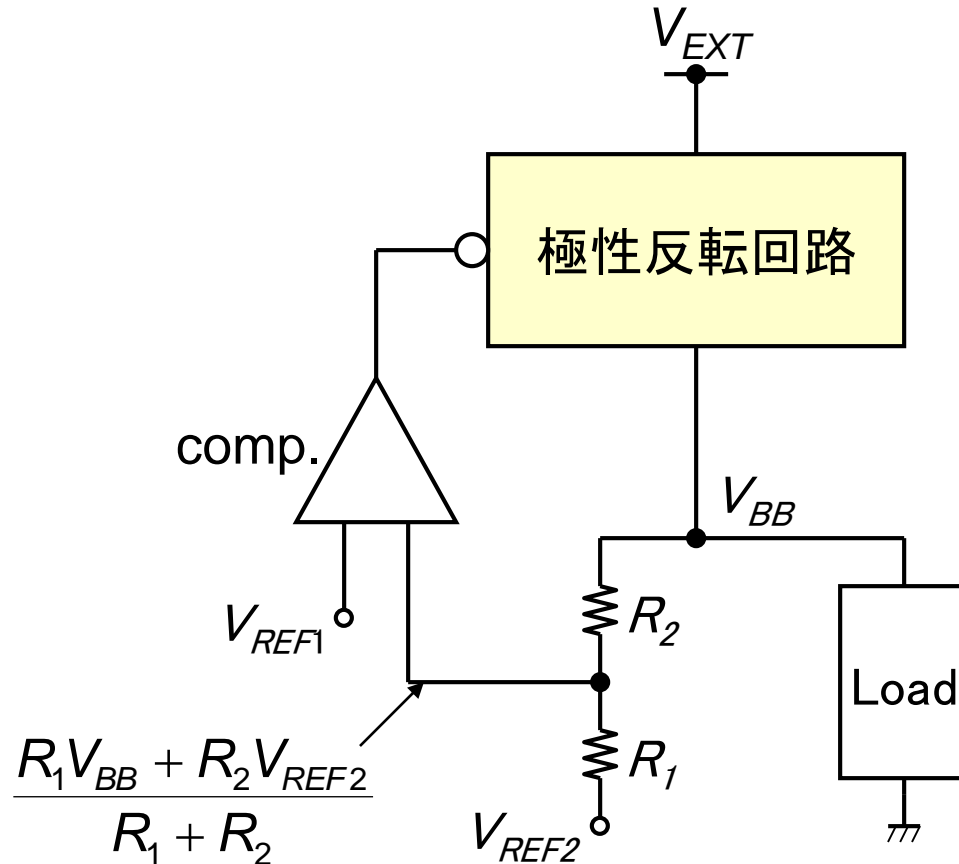
V_D : ダイオード順方向
電圧降下

$$V_{BB} = -\frac{T_1}{T_2} \cdot V_{EXT} + V_D$$

レベルモニタ(昇圧回路用)



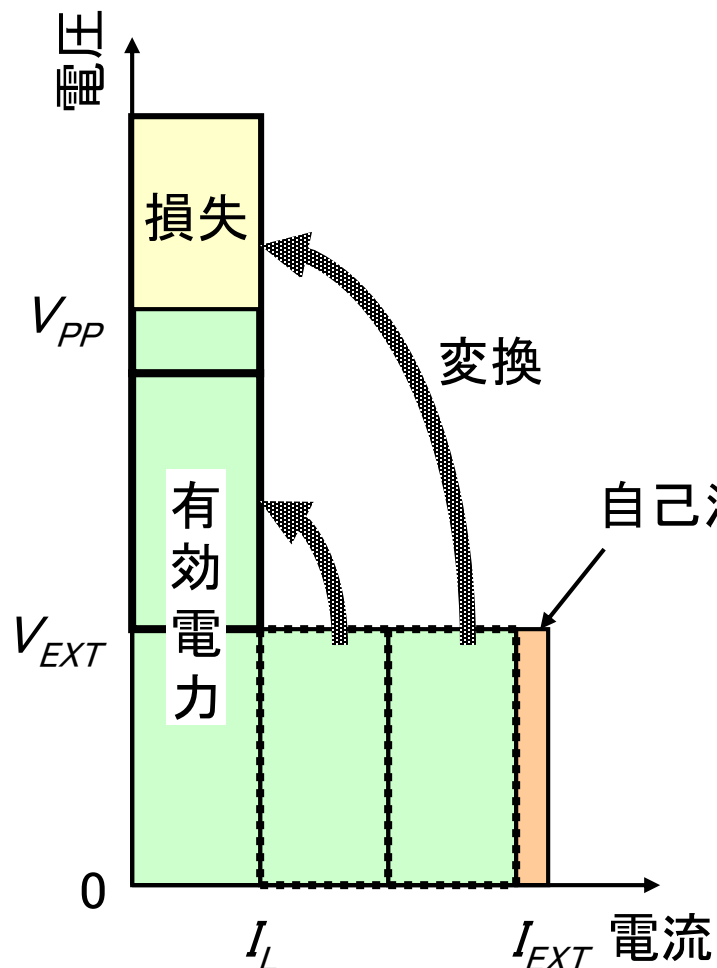
レベルモニタ(極性反転回路用)



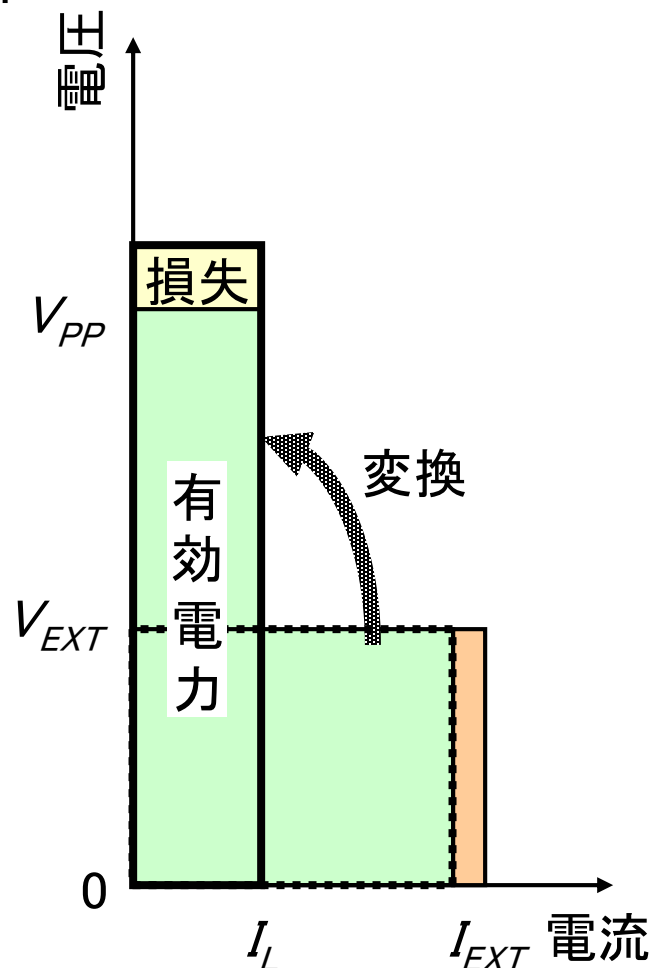
$$V_{REF1} < V_{REF2}, \quad V_{BB} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{REF1} - \frac{R_2}{R_1} V_{REF2}$$

昇圧回路方式比較

電力変換効率



チャージポンプ
スイッチトキャパシタ



スイッチング

昇圧回路方式比較

	チャージポンプ [°]	スイッチトキャパシタ	スイッチング [°]
昇圧方式	$V_{EXT} \rightarrow 2V_{EXT} \rightarrow \dots \rightarrow nV_{EXT}$	$V_{EXT} \rightarrow nV_{EXT}$	$V_{EXT} \rightarrow nV_{EXT}$
変換比	整数倍	整数比	任意
電力変換効率	> 80%	> 80%	> 80%
外付け部品	なし(1~nC)	なし(1~nC)	1C, 1L, 1Diode (+MOSFET)
MOSFET耐圧	$2V_{EXT}$	$(n-1)V_{EXT}$	nV_{EXT}
キャパシタ耐圧	$(n-1)V_{EXT}$	V_{EXT} (昇圧用) nV_{EXT} (平滑用)	nV_{EXT} (平滑用)

2倍昇圧の場合は、チャージポンプ≒スイッチトキャパシタ

問題

図1の状態と図2の状態を交互に繰り返すスイッチトキャパシタ昇圧回路において、無負荷時の出力電圧 V_{OUT} は入力電圧 V_{IN} の何倍になるか？

ヒント： C_1 , C_2 , C_3 の端子間電圧をそれぞれ V_1 , V_2 , V_3 として、方程式を立てる。

図1の状態のときは、 $V_1 = V_{IN}$, $V_3 = V_1 + V_2$

図2の状態のときは……

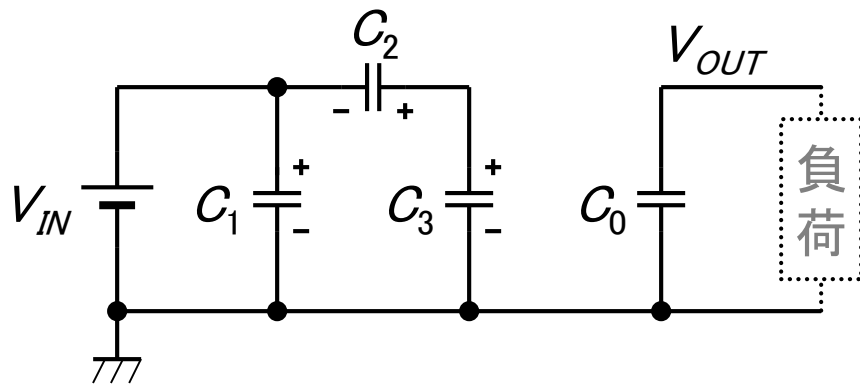


図1

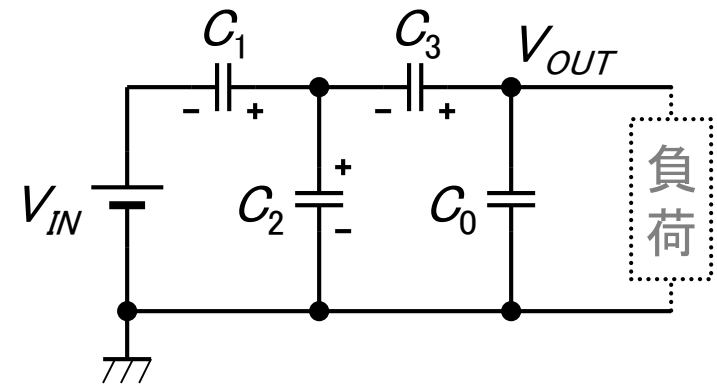
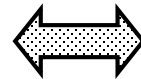


図2