

電子回路の基礎と産学連携

群馬大学 理工学研究院 電子情報部門

小林春夫

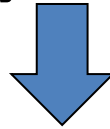
k_haruo@el.gunma-u.ac.jp

講演者は1997年に群馬大学に着任して以来、
産業界との産学連携を行ないながら
自分の技術分野を広げ深めることに
努めてきました。

この講演では地元電機メーカー(三洋電機)との
回路分野での共同研究を通じて理解を深めた
回路の基本的な内容、
「応用」の色彩が強い産学連携で
「基本」が重要であることをご紹介いたします。

お話しする内容

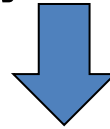
十年程前、チャージポンプ電源回路の
産学連携研究開発に携わった際
「チャージポンプはインダクタを使用していない。
大電流・高効率電源は無理」



- なぜ容量とスイッチの回路で
電力損失が生じるのか
- なぜインダクタを使用すると
大電流・高効率電源が実現できるのか？

お話しする内容

十年程前、チャージポンプ電源回路の
産学連携研究開発に携わった際
「チャージポンプはインダクタを使用していない。
大電流・高効率電源は無理」



- なぜ容量とスイッチの回路で
電力損失が生じるのか

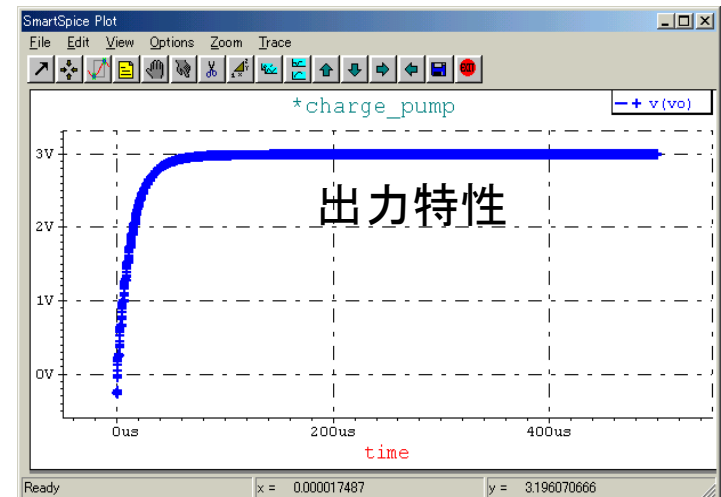
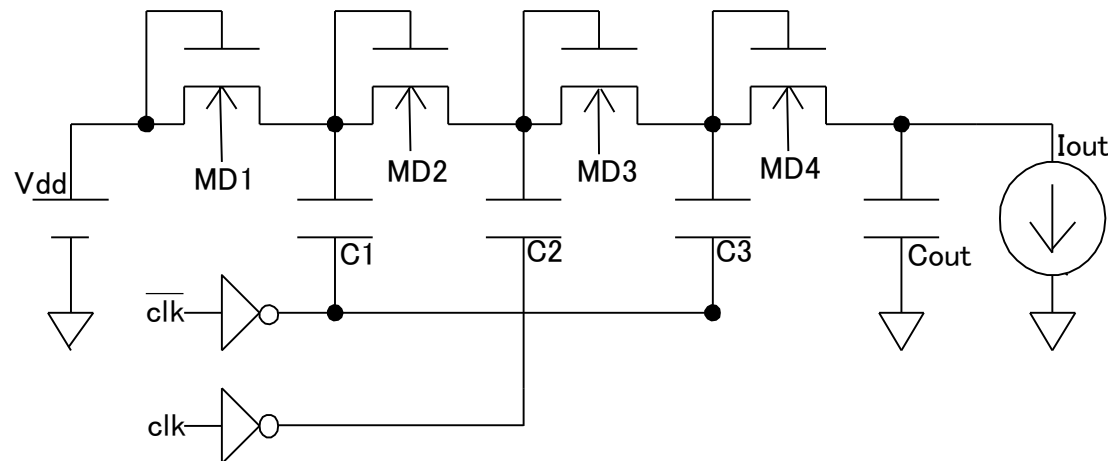
Part I

- なぜインダクタを使用すると
大電流・高効率電源が実現できるのか？

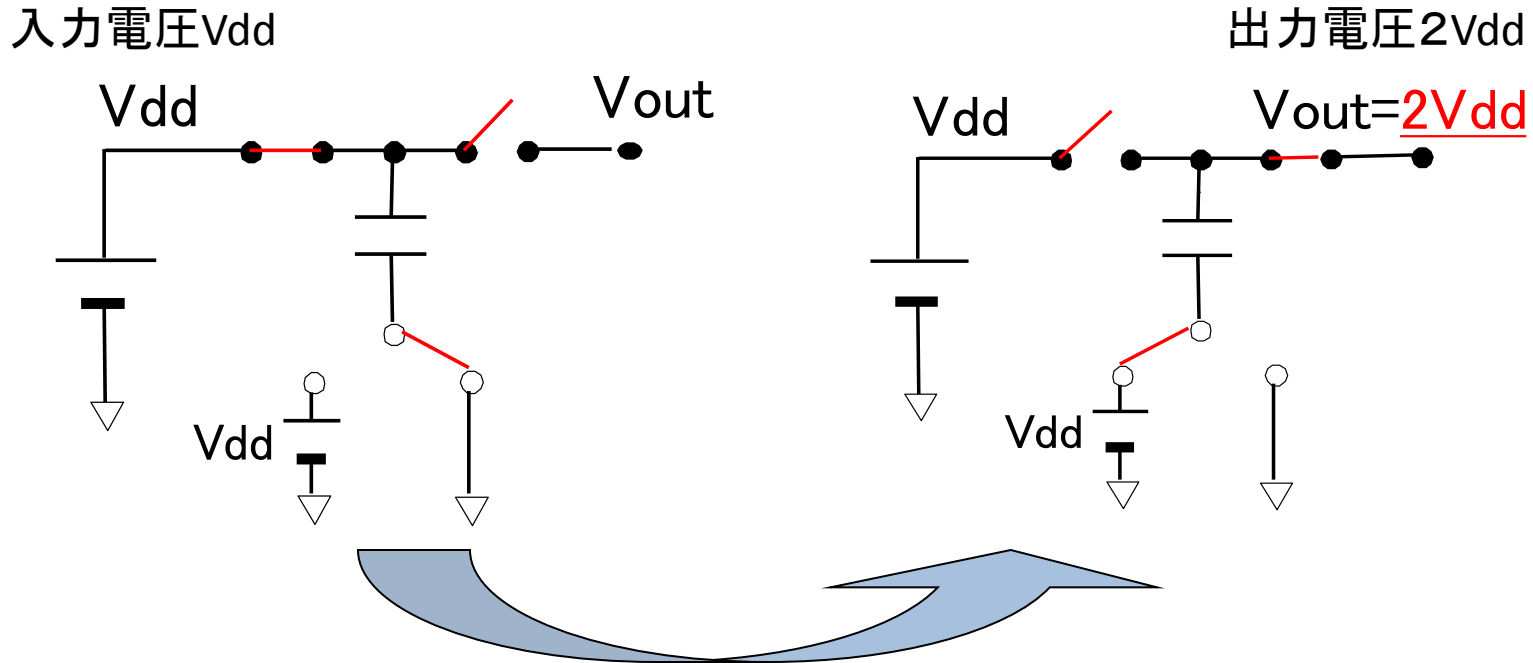
チャージポンプ回路とは

- 供給電源電圧より高い電圧を発生。
(例えば 入力電源電圧3.3V 出力電圧15V)
- 多数のコンデンサによる電荷の積分を、
トランジスタ・スイッチやダイオードで切り替えることで実現。

Dickson charge pump回路(3段)



昇圧の原理



3つのスイッチの切り替えにより $V_{out} = 2V_{dd}$ を実現

3段チャージポンプ回路は昇圧回路4つを組み合わせたもの

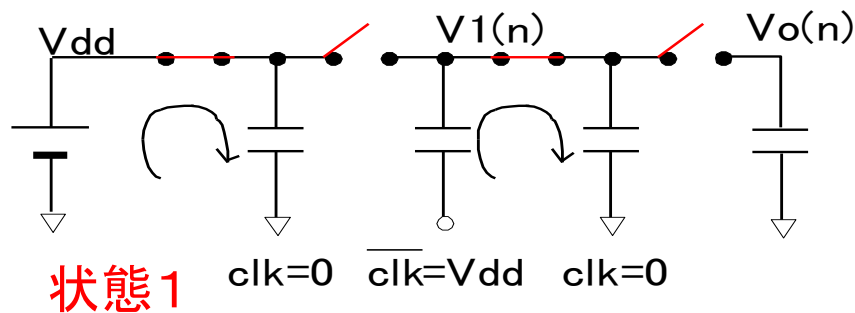


入力電圧 V_{dd} → 出力電圧 $4V_{dd}$ (定常状態)

3段チャージポンプ回路の動作原理

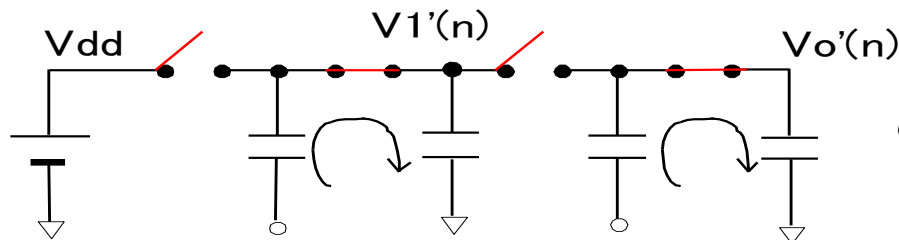
入力: (電源電圧) = (クロック) = V_{dd}

出力: $V_o \rightarrow 4V_{dd}$ (定常状態)



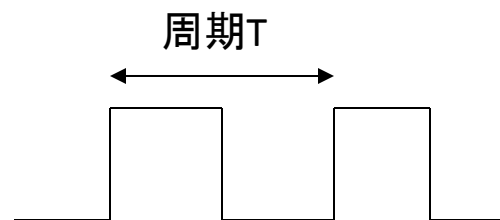
状態1

$clk=0$ $\overline{clk}=V_{dd}$ $clk=0$



状態2

$clk=V_{dd}$ $\overline{clk}=0$ $clk=V_{dd}$



周期T

状態1

状態2

この1サイクルの動作の繰り返しにより
左から右へと電荷を運び昇圧する

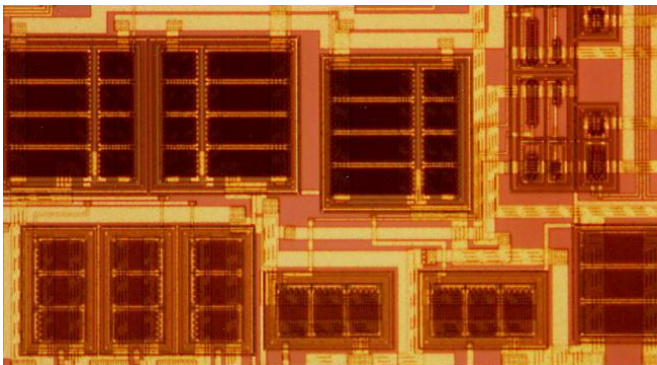
チャージポンプ回路の原理

チャージポンプ回路を電源回路へ

従来は LSI内で不揮発性メモリ回路用の
高い電圧(ただし電流は微小)を
簡単に発生するために使われる



電流を大きくとるためには？
高い効率を得るためには？

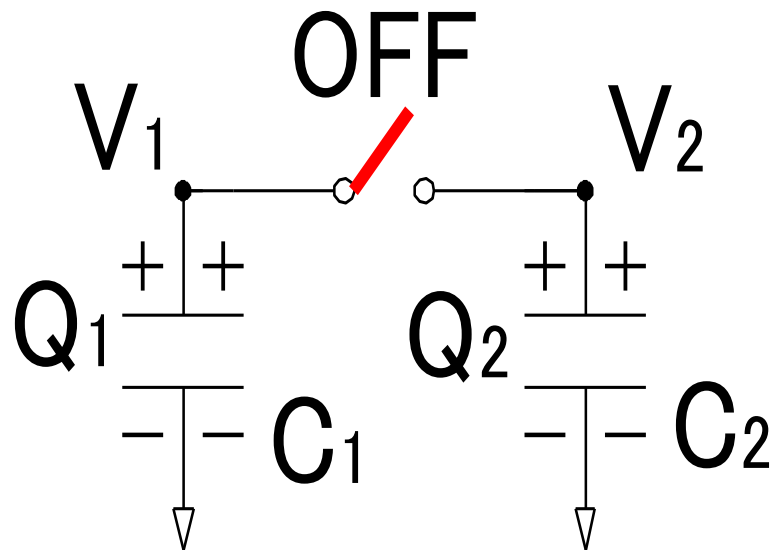


三洋電機で開発した
チャージポンプ電源回路
チップ写真

スイッチ

OFF \longrightarrow ON

● スイッチ OFF 時



電荷：

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1$$

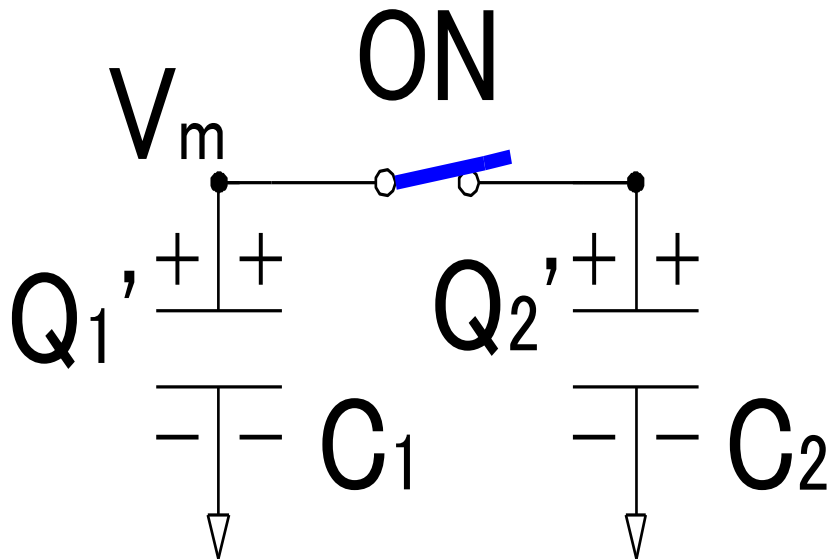
$$Q_2 = C_2 \cdot V_2$$

エネルギー：

$$E = \frac{1}{2} C_1 \cdot V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 \cdot V_2^2$$

スイッチ OFF → ON

● スイッチ ON 時



電荷：

$$Q_1' = C_1 \cdot V_m$$

$$Q_2' = C_2 \cdot V_m$$

エネルギー：

$$E' = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) V_m^2$$

● 電荷保存則

SW OFF 時の電荷 $Q_1 + Q_2$

ON 時の電荷 $Q_1' + Q_2'$

$$\therefore V_m = \frac{1}{C_1 + C_2} (C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2)$$

● SW OFF 時と ON 時の蓄積エネルギーは異なる。

SW ON時のスイッチでのエネルギー・ロス

$$\begin{aligned} E_{loss} &= E - E' \\ &= \frac{1}{2} \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} (V_1 - V_2)^2 \end{aligned}$$

● $V_1 = V_2$ のとき、SW ON \rightarrow ゼロ電圧スイッチング

\rightarrow スイッチ・エネルギー・ロス $E_{loss} = 0$

ゼロ電圧スイッチング (Zero Voltage Switching : ZVS)

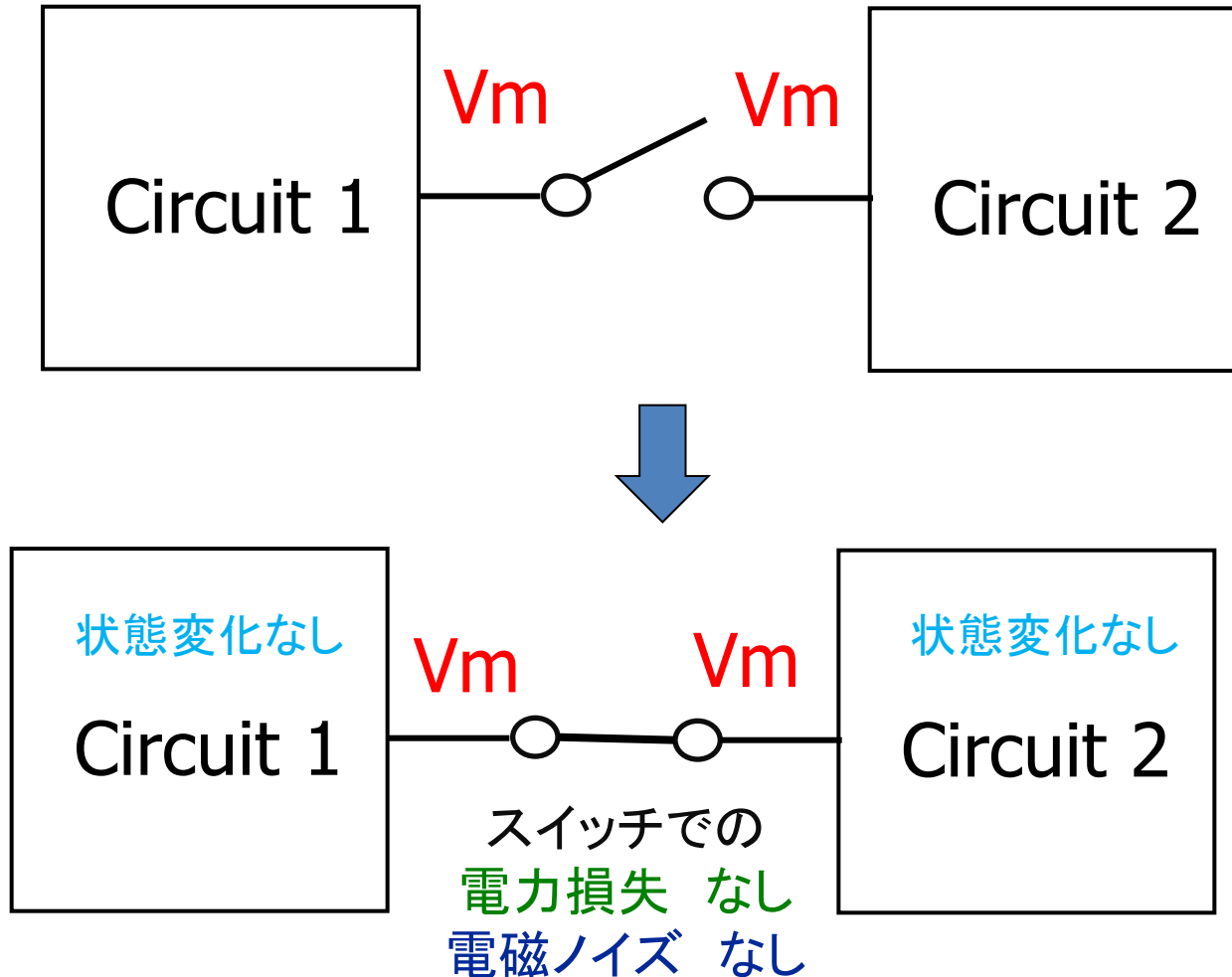
状態を変化せずにスイッチをオン

誰もきがかからないように
ドアを開ける

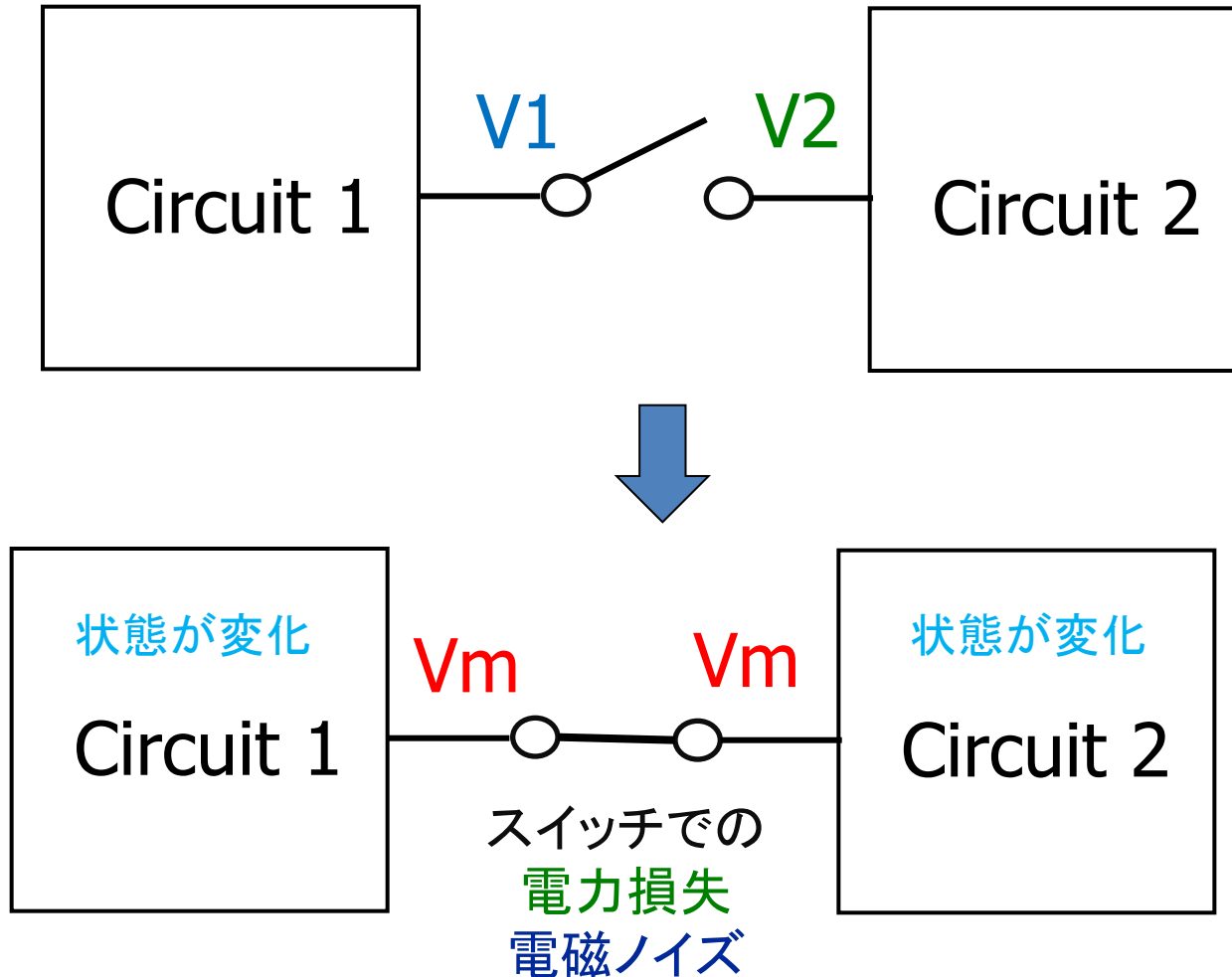
(ドアの前で待ち人なしのときに
ドアを開ける)

ZVS (Zero Volt Switching)

$V_1 = V_2$ で スイッチオン



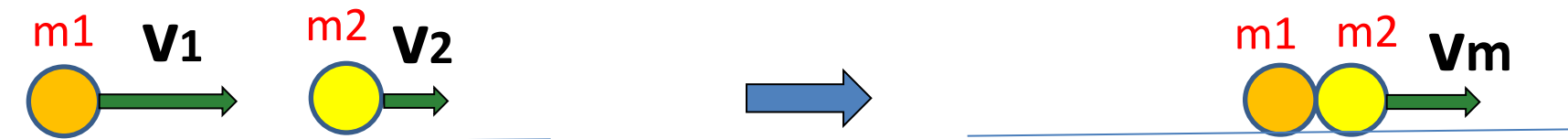
$V1 \neq V2$ で スイッチオン



力学問題との相似性

2つの物質の衝突問題

電荷保存則 \longleftrightarrow 運動量保存則



スイッチオフ時： 電荷エネルギー E_1

スイッチオン時： 電荷エネルギー E_{2a} + 熱エネルギー E_{2b}

$$E_1 = E_{2a} + E_{2b}$$

衝突前： 運動エネルギー E_3

衝突後： 運動エネルギー E_{4a} + 熱エネルギー E_{4b}

$$E_3 = E_{4a} + E_{4b}$$

電荷保存則と運動量保存則の相似性

- キリヒホッフの電流則 $I_1 + I_2 + \dots + I_N = 0$



時間積分

- 電荷保存則 $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N = \text{一定}$

- 多質量系 運動方程式 (外力なし)

$$m_1 \mathbf{a}_1 + m_2 \mathbf{a}_2 + \dots + m_N \mathbf{a}_N = \mathbf{0}$$



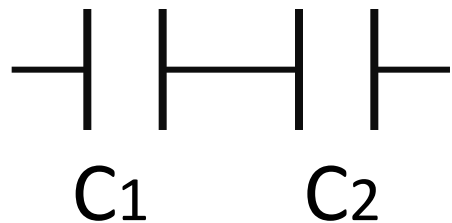
時間積分

- 運動量保存則

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots + \mathbf{p}_N = \text{一定}$$

力学と電気の相似性の必然性はない

- 物体2つ どんな結合でも 全体質量は m_1, m_2 より小さくない
- 容量2つ 直列結合すれば C_1, C_2 より小さい

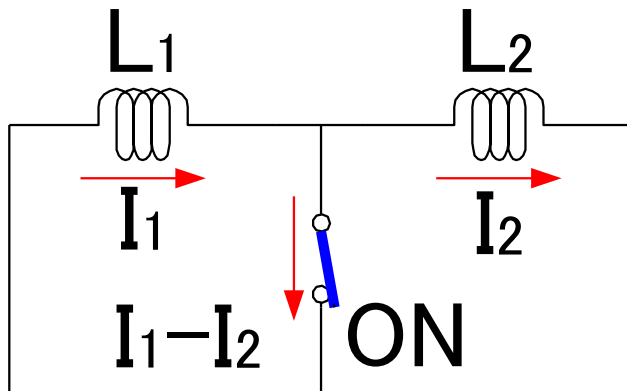


直列結合容量 $< C_1, C_2$

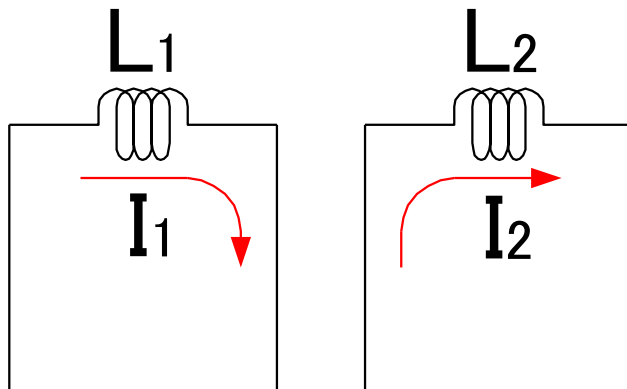
北森俊行 「電気回路論とアナロジー」 応用科学学会誌
特集 電子回路研究 vol.24, no.1, pp.5-7 (2011)

スイッチ

ON \longrightarrow OFF



|||



● スイッチ ON 時

磁束 :

$$L_1 \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2$$

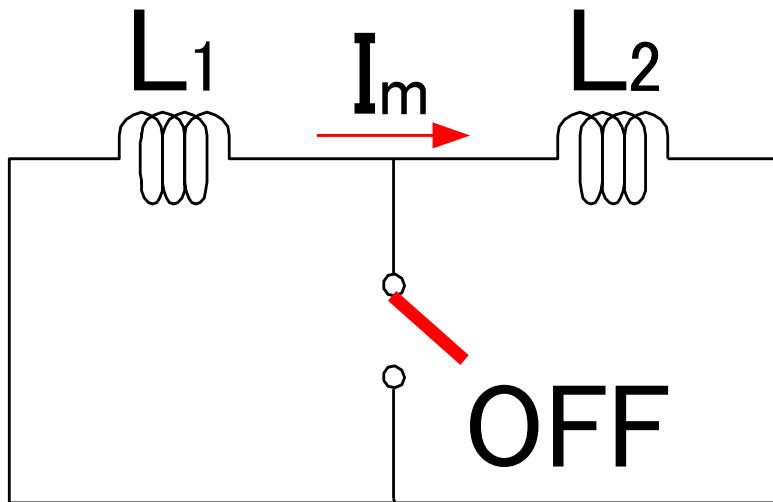
エネルギー :

$$E = \frac{1}{2} L_1 \cdot I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 \cdot I_2^2$$

スイッチ

ON \longrightarrow OFF

● スイッチ OFF 時



磁束：

$$(L_1 + L_2)I_m$$

エネルギー：

$$E' = \frac{1}{2} (L_1 + L_2) I_m^2$$

● 磁束保存則

SW ON 時の磁束 $L_1 \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2$

OFF 時の磁束 $(L_1 + L_2)I_m$

$$\therefore I_m = \frac{1}{L_1 + L_2} (L_1 \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2)$$

● SW ON時と OFF 時の蓄積エネルギーは異なる。

SW OFF時のスイッチでのエネルギー・ロス

$$\begin{aligned} E_{loss} &= E - E' \\ &= \frac{1}{2} \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} (I_1 - I_2)^2 \end{aligned}$$

● $I_1 = I_2$ のとき、SW OFF → ゼロ電流スイッチング

→ スイッチ・エネルギー・ロス $E_{loss} = 0$

ゼロ電流スイッチング (Zero Current Switching: ZCS)

状態を変化せずにスイッチをオフ

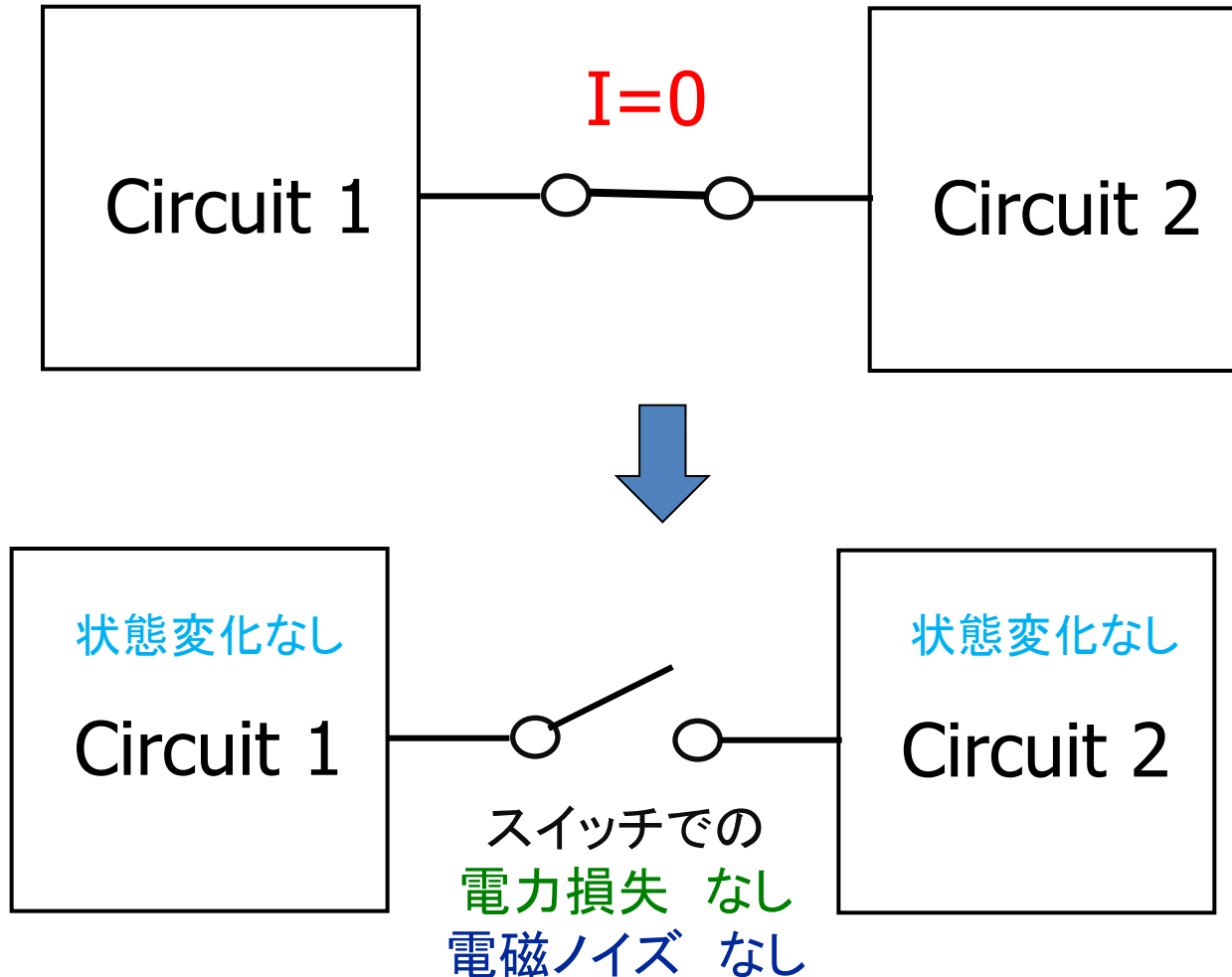
誰も気がつかないように
ドアを閉める

(ドアを通る人がいないときに
ドアを閉める)

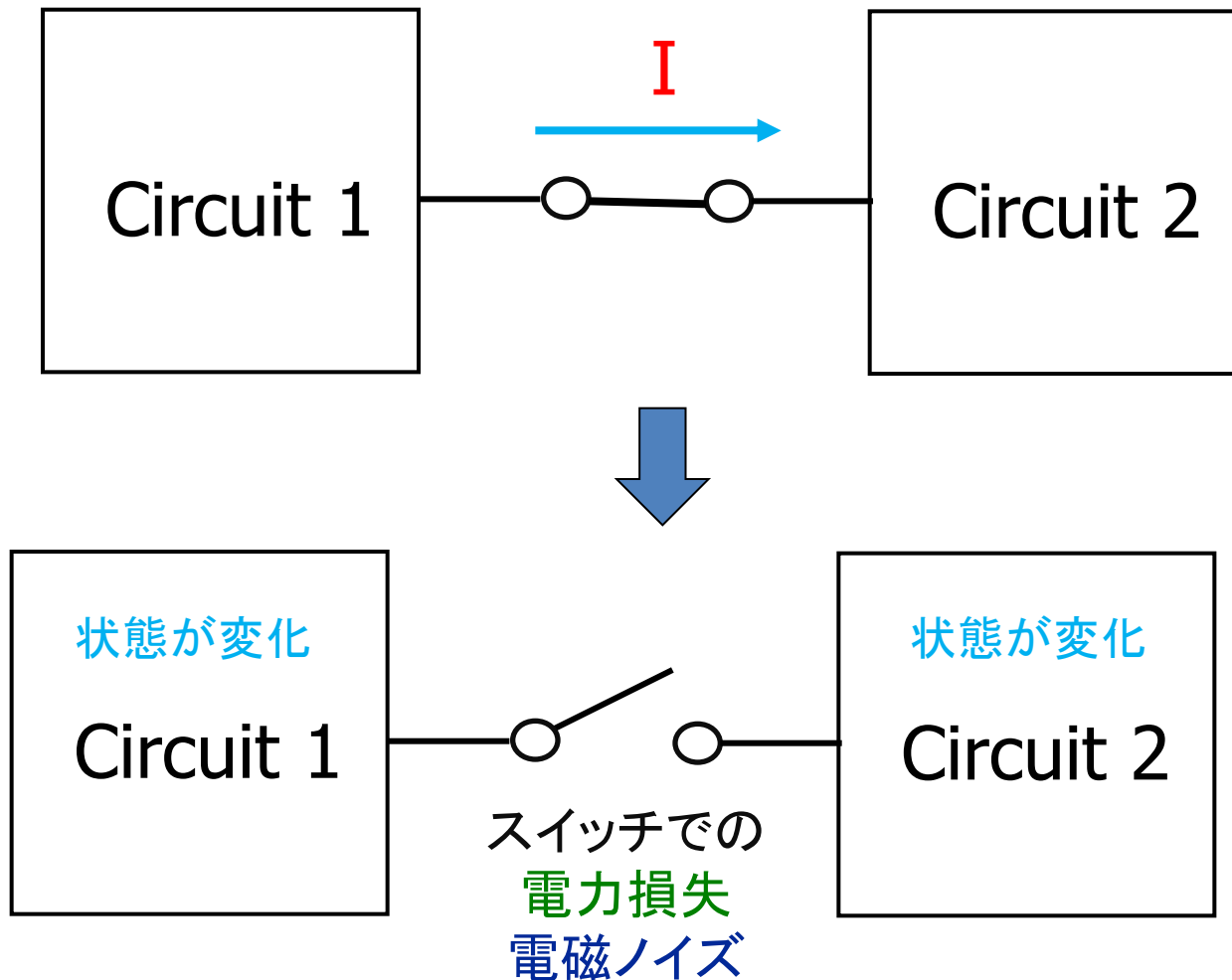
ゼロ電圧スイッチングの双対問題

ZCS (Zero Current Switching)

電流 $I = 0$ で スイッチオフ



電流 $I \neq 0$ で スイッチオフ



「名料理人が牛をさばく」



莊子

牛は さばかれているのも
死んだのも気付かない。

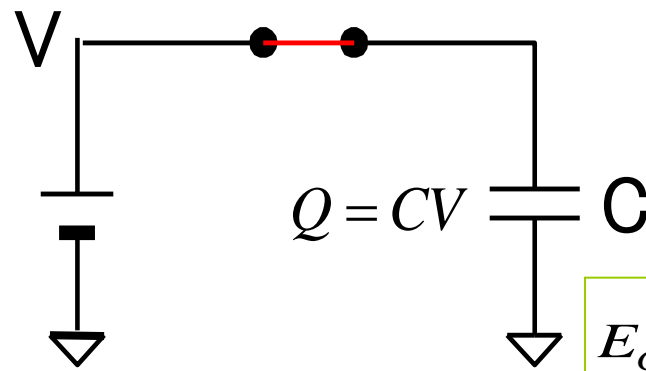
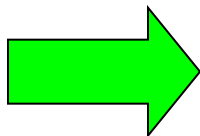
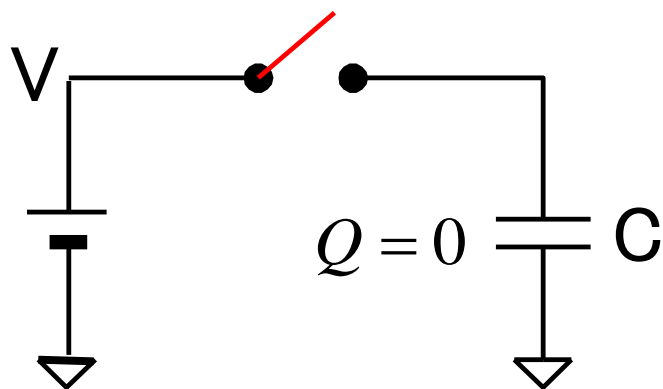
「私は牛の筋や骨の隙間に刀を入れるので
刀が折れたり欠けたりしない。
未熟者は力任せにするから
刀が折れたり欠けたりする。」

ソフトスイッチング = 名料理人

容量Cに充電する場合の エネルギー消費

$$E_V = CV^2$$

$$E_{loss} = \frac{1}{2} CV^2$$



$$E_C = \frac{1}{2} CV^2$$

$$E_V = E_{loss} + E_C$$

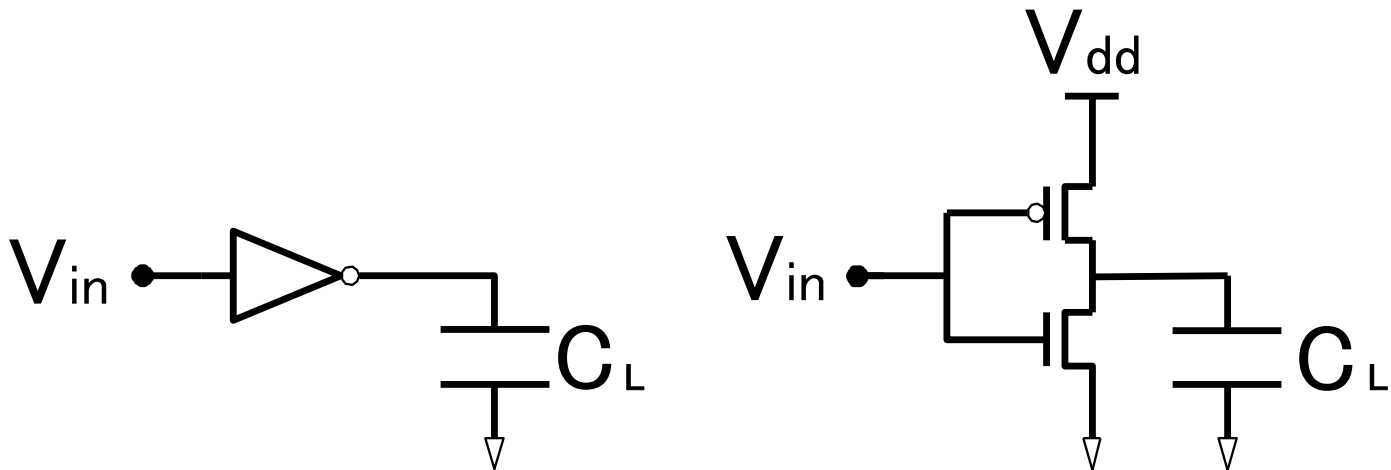
$$E_{loss} = E_C$$

デジタルCMOS回路の電力消費

V_{dd} : 電源電圧

V_{in} : 入力、 V_{out} : 出力

C_L : 負荷容量



論理否定 (NOT)

論理変数 A, Z

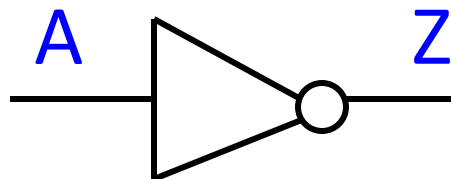
真理値表

A : 入力, Z : 出力

$$Z = \overline{A}$$

A	Z
0	1
1	0

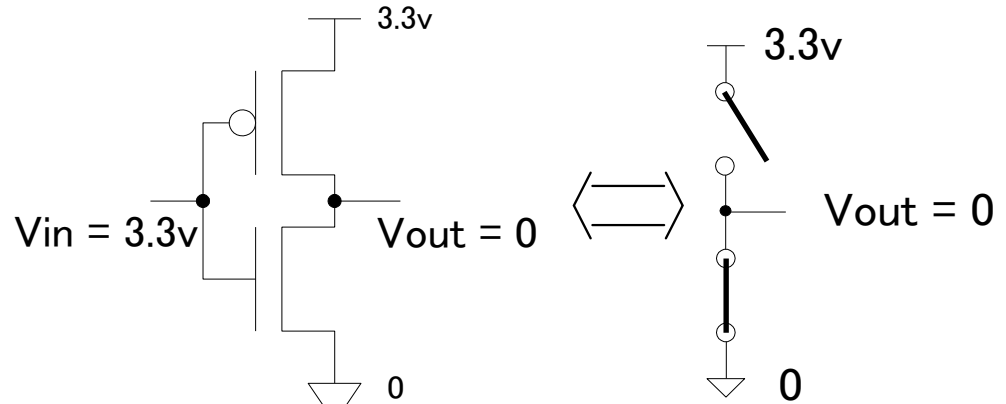
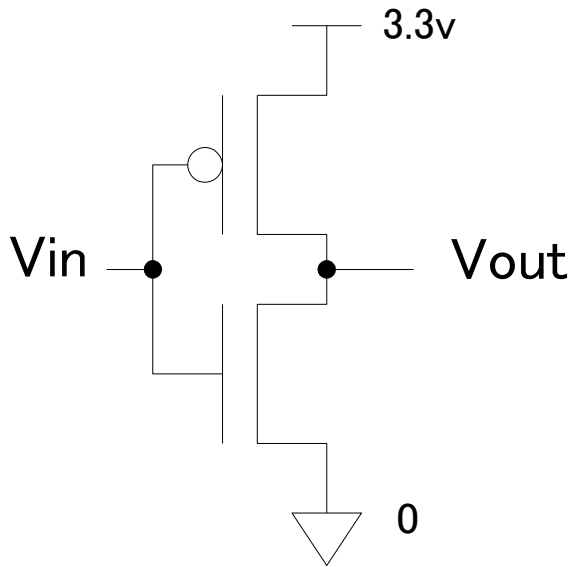
NOT を実現する回路  インバータ回路



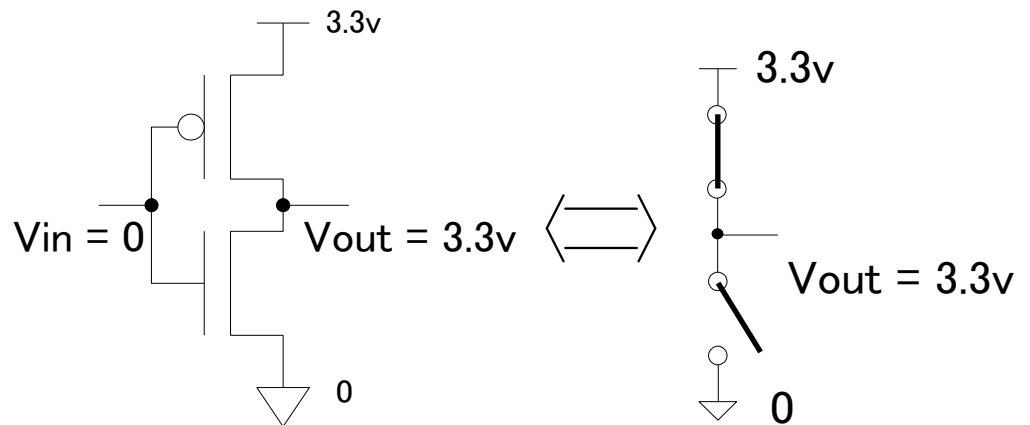
CMOSインバータ回路

a) when $V_{in} = 1$ (3.3v)

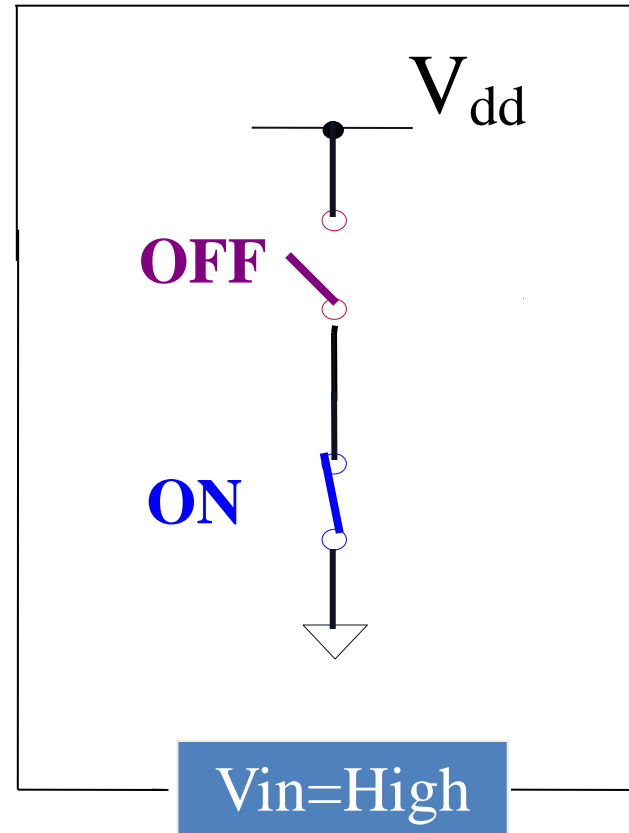
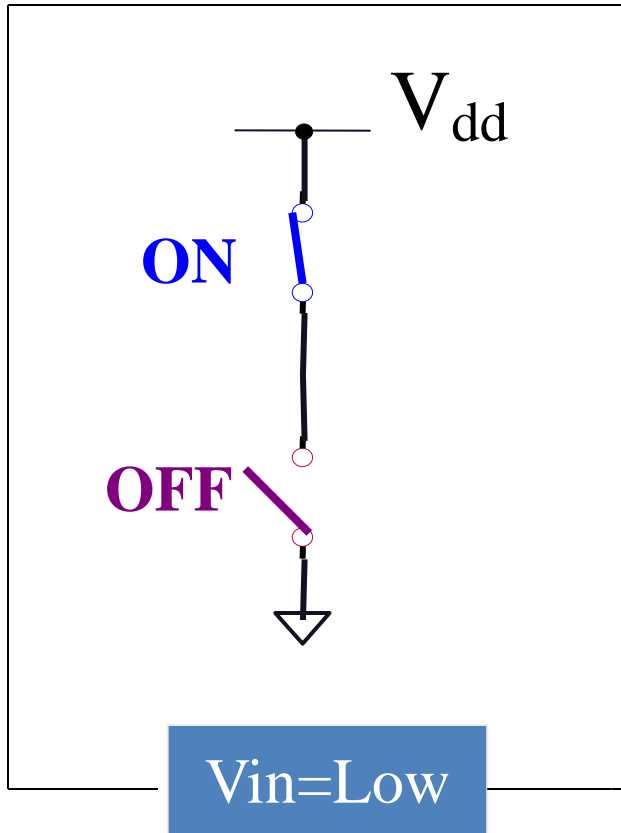
Inverter



b) when $V_{in} = 0$

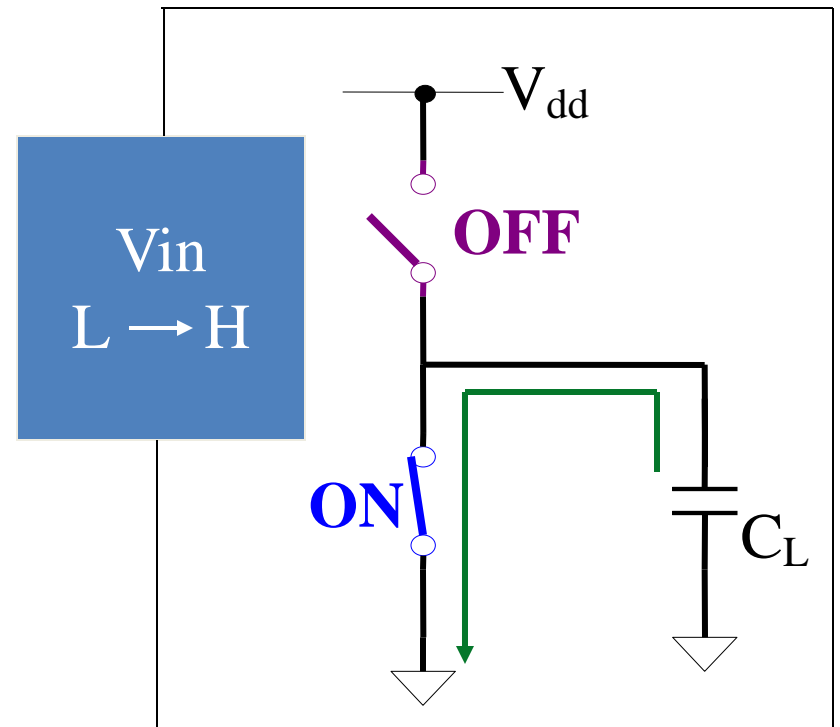
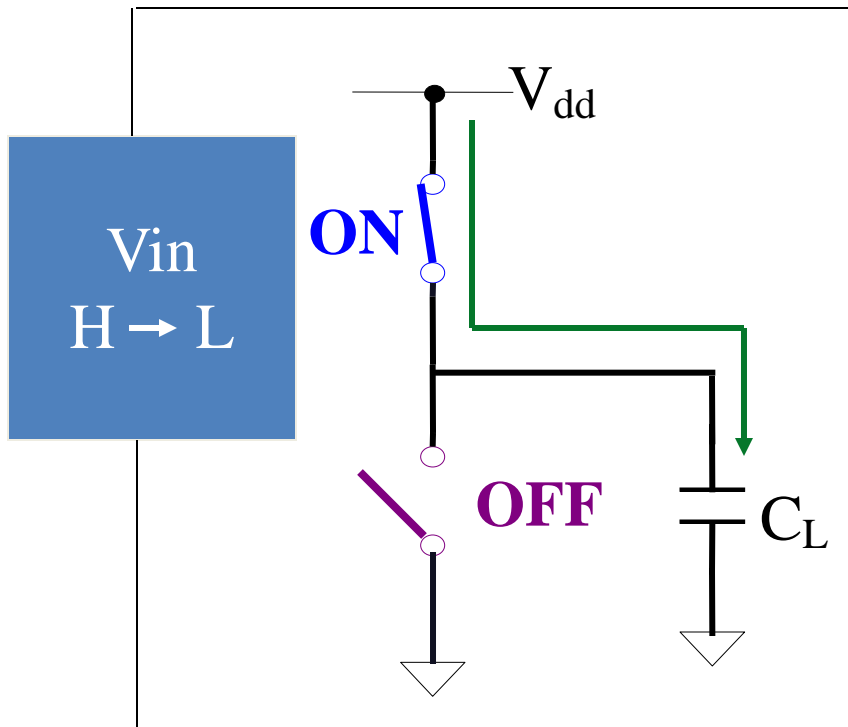


静的電力消費はゼロ

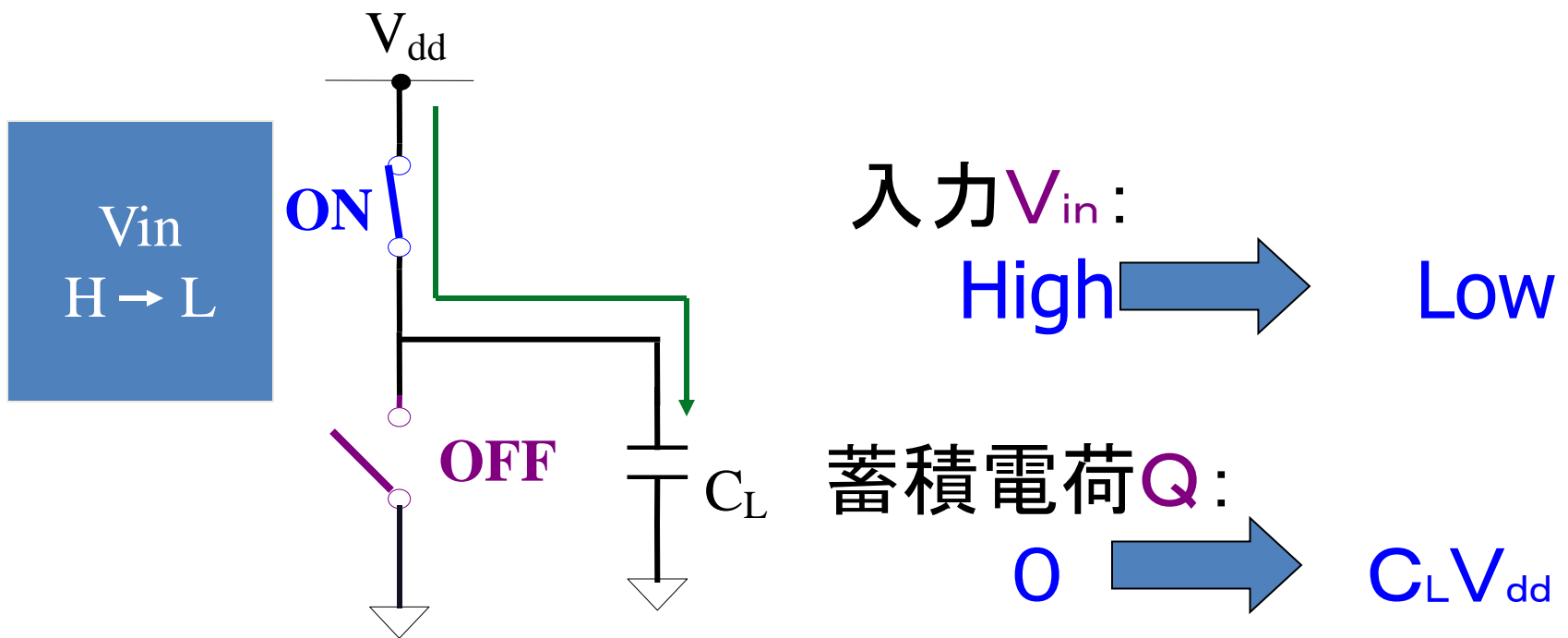


(注) 最近の微細CMOSデジタル回路では リーク電流が大きくなり、静的電力消費の占める割合が増えてきている。

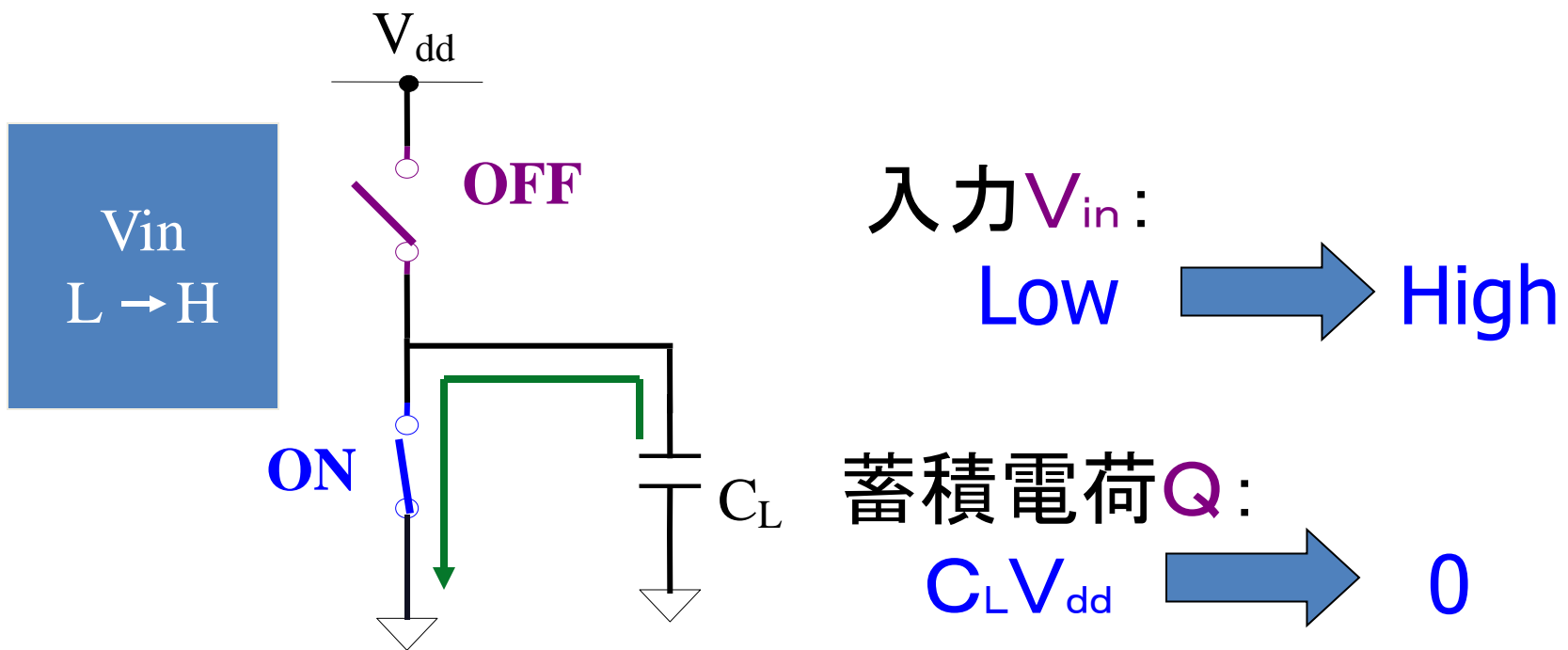
動的消費電力 (1)



動的消費電力 (2)



動的消費電力 (3)



動的消費電力 (4)

$V_{in} : H \rightarrow L \rightarrow H$ のとき

電荷 $Q = C_L V_{dd}$ が電源 V_{dd} から GND へ流れる。

一秒間に出力が f 回のトグルするとき

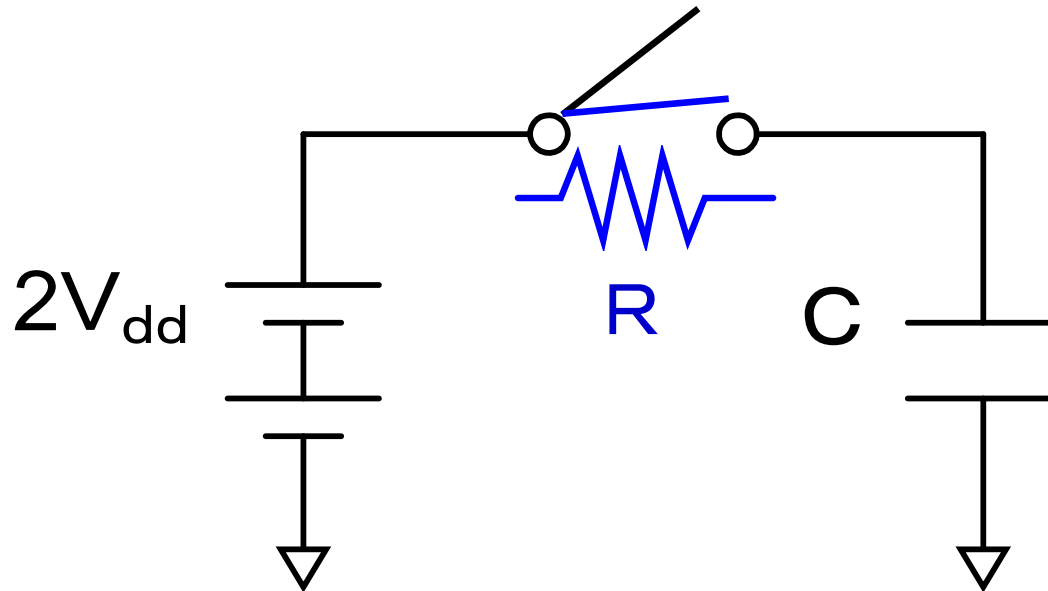
V_{dd} から GND へ流れるトータルの電荷 $Q_{total} = f C_L V_{dd}$

$$\begin{aligned} \therefore \text{消費電力} \quad P &= V_{dd} \cdot I \\ &= V_{dd} (f \cdot C_L \cdot V_{dd}) \\ &= f \cdot C_L \cdot V_{dd}^2 \end{aligned}$$

f : 出力トグル周波数 C_L : 負荷容量

V_{dd} : 電源電圧

容量への単純な充電法



供給するエネルギー

蓄えられるエネルギー

$$E_{total} = 2V_{dd} \int_0^{\infty} i(t) dt = V_{dd} Q = 4CV_{dd}^2$$

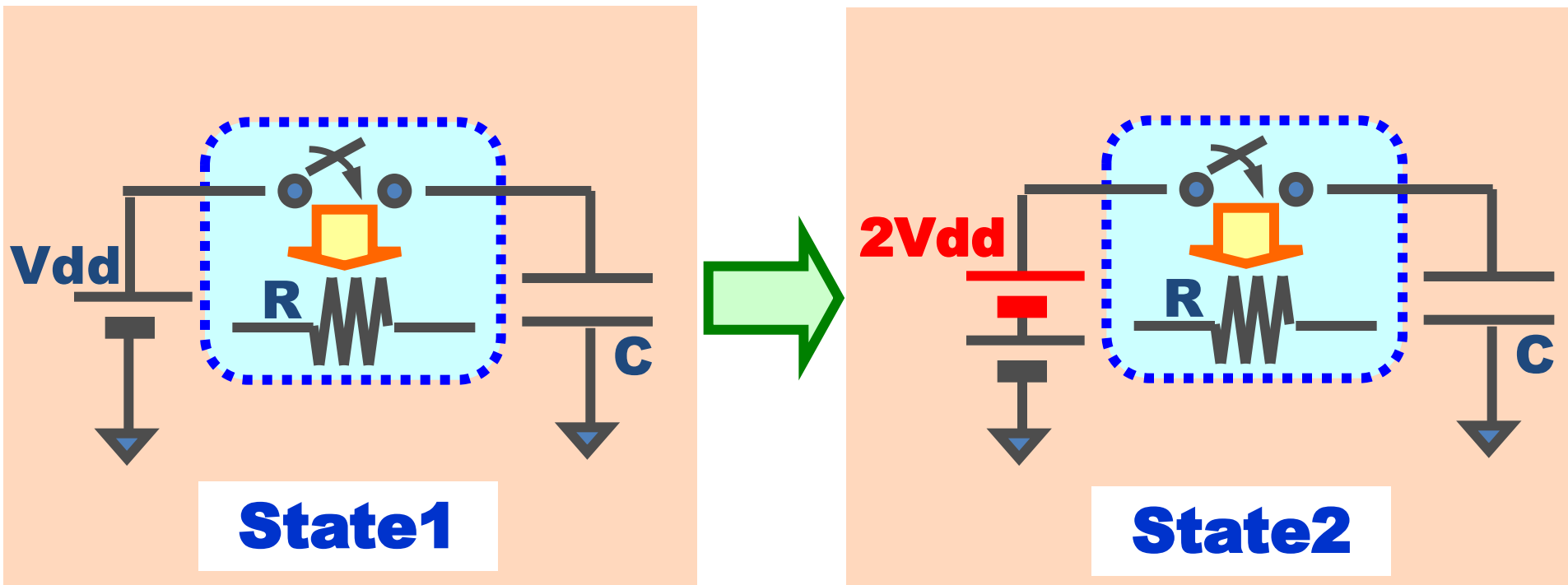
$$E_c = \frac{1}{2} C (2V_{dd})^2 = 2CV_{dd}^2$$

損失するエネルギー = 蓄えられるエネルギー

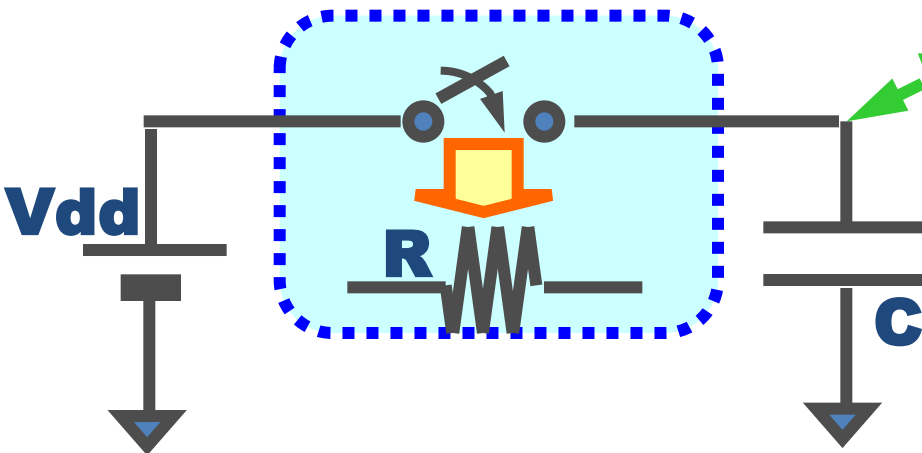
$$E_R = 2CV_{dd}^2$$

容量への高効率 充電法

- 徐々に電圧を上げる→スイッチング損失が抑えられる



ステップ1



$$V_{out1}(t) = V_{dd} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

$$i(t) = \frac{V_{dd}}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$(\tau = RC)$$

$$\begin{aligned} E_{R1} &= \int_0^{\infty} i(t)(V_{dd} - V_{out1}(t))dt \\ &= \frac{1}{R} \int_0^{\infty} (V_{dd} - V_{out1}(t))^2 dt \\ &= \frac{1}{2} CV_{dd}^2 \end{aligned}$$

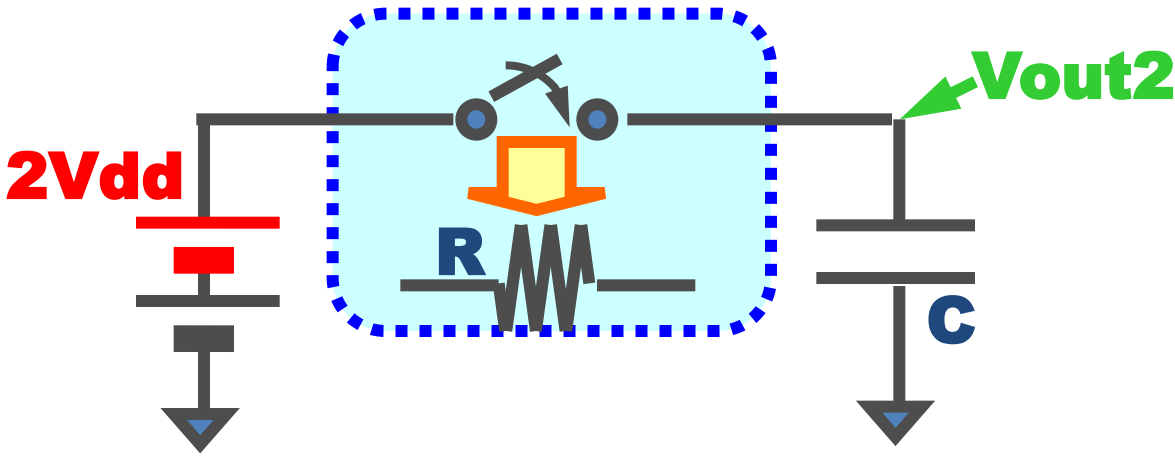
$$\begin{aligned} E_{C1} &= \int_0^{\infty} i(t)V_{out1}(t)dt \\ &= \frac{1}{2} CV_{dd}^2 \end{aligned}$$

ステップ1

Sw損失: $E_{R1} = \frac{1}{2} CV_{dd}^2$

**蓄積
エネルギー:** $E_{C1} = \frac{1}{2} CV_{dd}^2$

ステップ2



$$V_{out2}(t) = V_{dd} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) + V_{dd}$$

$$= V_{dd} \left(2 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

$$i(t) = \frac{2V_{dd} - V_{out2}(t)}{R}$$

$$= \frac{V_{dd}}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (\tau = RC)$$

$$E_{R2} = \int_0^{\infty} i(t)(V_{dd} - V_{out2}(t))dt$$

$$= \frac{1}{R} \int_0^{\infty} (V_{dd} - V_{out2}(t))^2 dt$$

$$= \frac{1}{2} CV_{dd}^2$$

$$E_{C2} = \int_0^{\infty} i(t)V_{out2}(t)dt$$

$$= \frac{3}{2} CV_{dd}^2$$

ステップ2

Sw損失: $E_{R2} = \frac{1}{2} CV_{dd}^2$

**蓄積
エネルギー:** $E_{C2} = \frac{3}{2} CV_{dd}^2$

全体のロス & 蓄積エネルギー

スイッチ損失:

$$E_{Total_R} = E_{R1} + E_{R2}$$
$$= CV_{dd}^2$$

蓄積
エネルギー

$$E_{Total_C} = E_{C1} + E_{C2}$$
$$= 2CV_{dd}^2$$

2つの充電方法の効率比較

高効率
充電方法

Sw損失: $E_{Total_R} = CV_{dd}^2$

蓄積エネルギー: $E_{Total_C} = 2CV_{dd}^2$

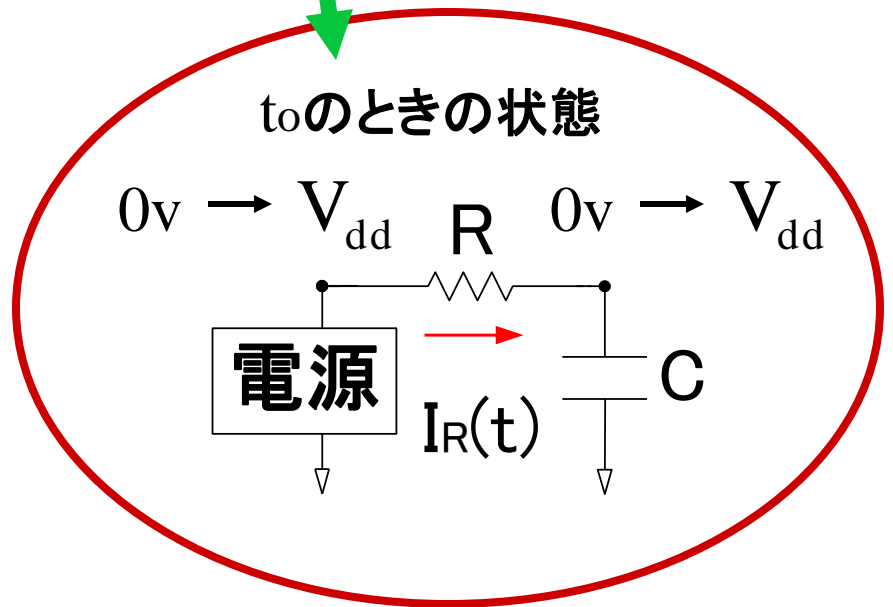
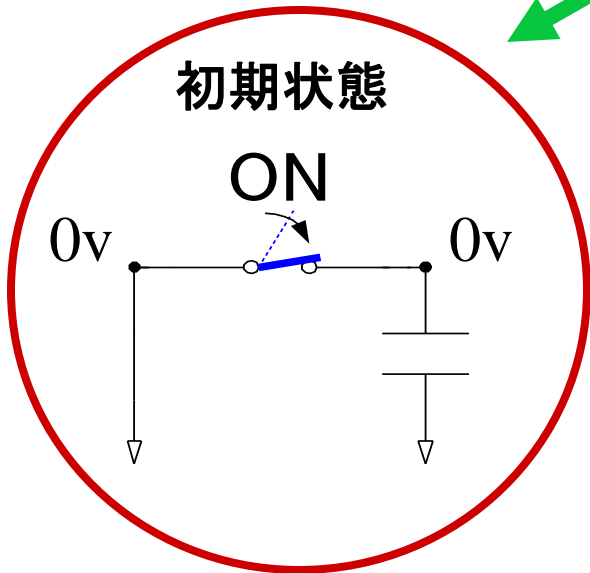
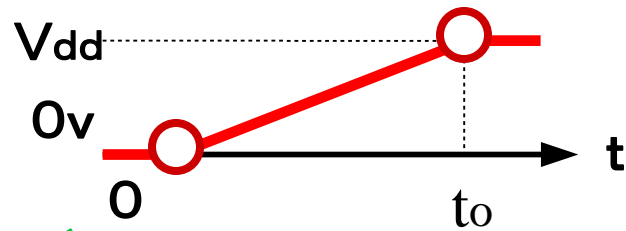
改善

単純な
充電方法

Sw損失: $E_{Total_R} = 2CV_{dd}^2$

蓄積エネルギー: $E_{Total_C} = 2CV_{dd}^2$

断熱的CMOS論理回路の原理

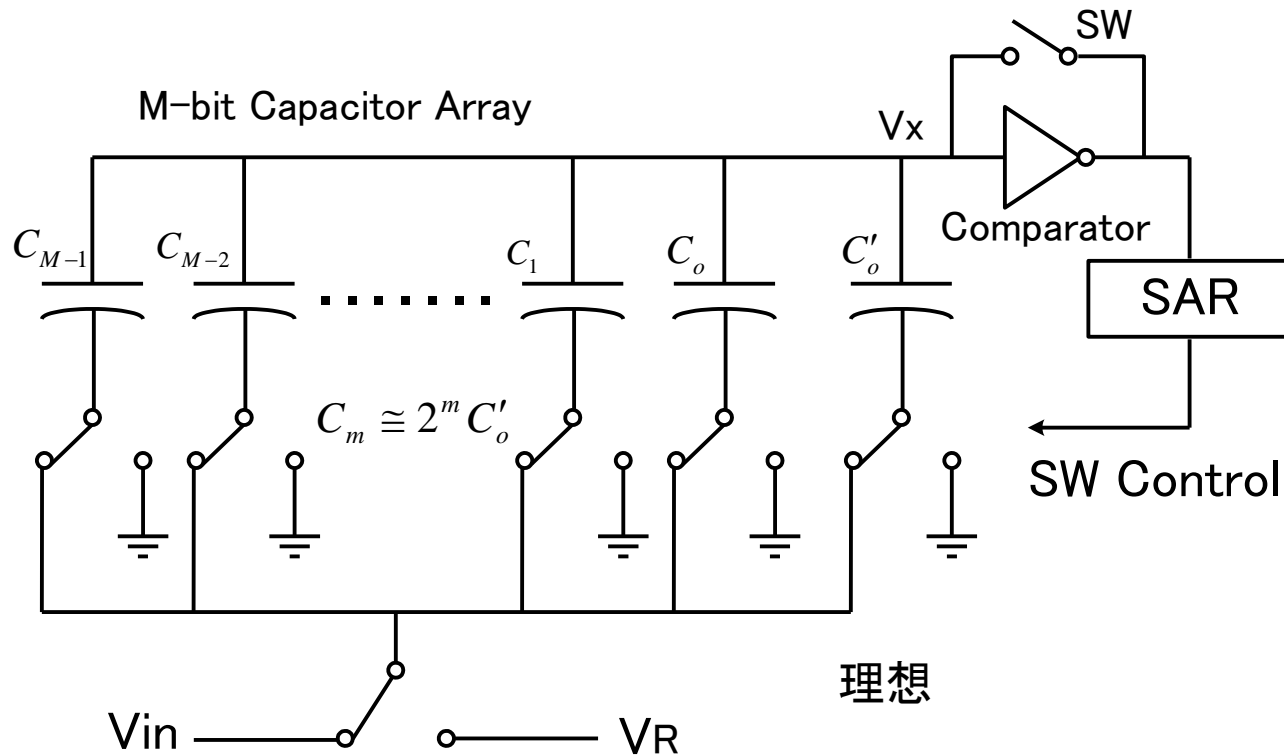


ゼロ電圧スイッチング
→ 消費エネルギー: ゼロ

電流: 小 $\Rightarrow E_R = R \int I(t)^2 dt$
→ 消費エネルギー: 小

逐次比較形AD変換器の低消費電力化

電荷再分配回路方式



電荷の容量への充放電で信号処理

➡ その消費エネルギーが問題

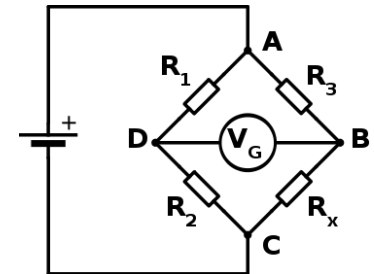
測定の方法

零位法と偏位法

● 零位法

測定量が基準値と等しいかを調べる

天秤、ブリッジ回路



● 偏位法

測定量の結果として生じる

計器の指示値を読む

体重計、電圧計

零位法

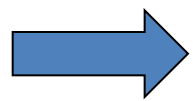
(ゼロ位法、Zero Method, Null Method)

- 利点:

平衡の検知は高精度可能

測定対象からエネルギーをとることがない。

基準量の精度で測定可能



高精度測定では零位法を使用

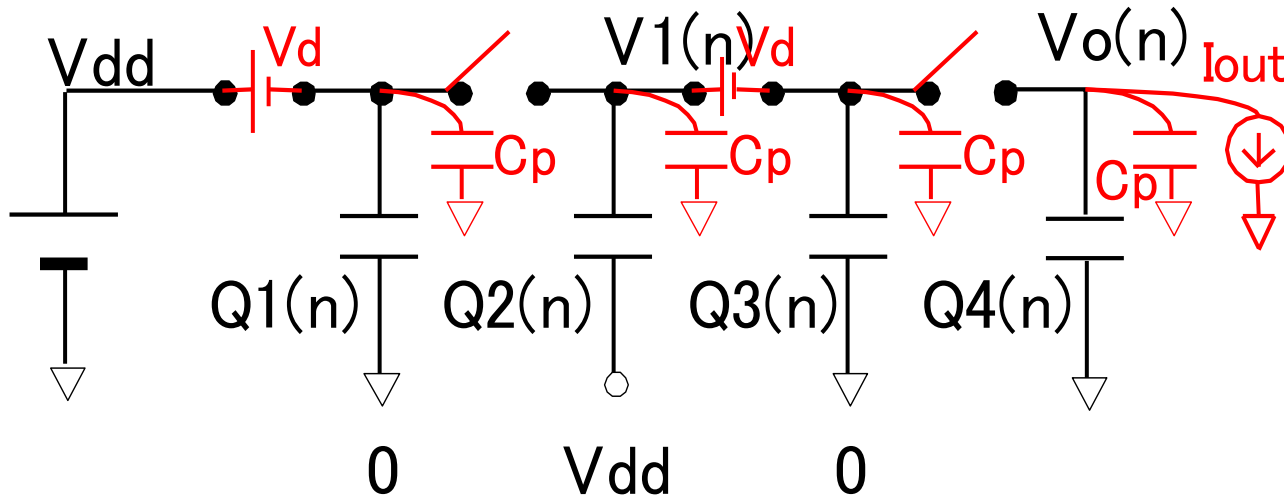
- 欠点:

測定量と基準量が等しくなるまで調整要

逐次比較近似ADC

チャージポンプ回路の効率を計算

寄生容量 C_p , ダイオードドロップ V_d , 負荷電流 I_{out}



(n 段チャージポンプ回路の効率)

$$= 1 - \frac{nCC_pV_{dd}^2 + (2n+2)(C+C_p)V_dT I_{out} + 4nT^2 I_{out}^2}{nCC_pV_{dd}^2 + (2n+2)CV_{dd}T I_{out} + 2C_pV_{dd}T I_{out}}$$

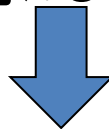
Part I まとめ

- 容量とスイッチからなる回路では
オン抵抗をゼロに近づけても
原理的に電力損失が生じる
- 「電源回路として一定負荷電流を供給のとき
容量 C が大きいほど
スイッチング周波数 f が高いほど
電力損失は小さい
(スイッチング損失はゼロと仮定)」
を導出できる

お話しする内容

十年程前、チャージポンプ電源回路の
産学連携研究開発に携わった際

「チャージポンプはインダクタを使用していない。
大電流・高効率電源は無理」



- なぜ容量とスイッチの回路で
電力損失が生じるのか

Part II

- なぜインダクタを使用すると
大電流・高効率電源が実現できるのか？

電源回路での インダクタの回路動作理解

「インダクタは 低電圧ノードから
高電圧ノードに電流が流れ得る」
と講義で説明 → 多くの学生は驚く

「スイッチング電源はインダクタを用いるので
高効率、大電流が扱える」理由を
自分なりに解釈

インダクタは優れた受動素子

インダクタを用いると 高効率になる理由

- 電圧源とインダクタ



相性が良い

- 電圧源と容量

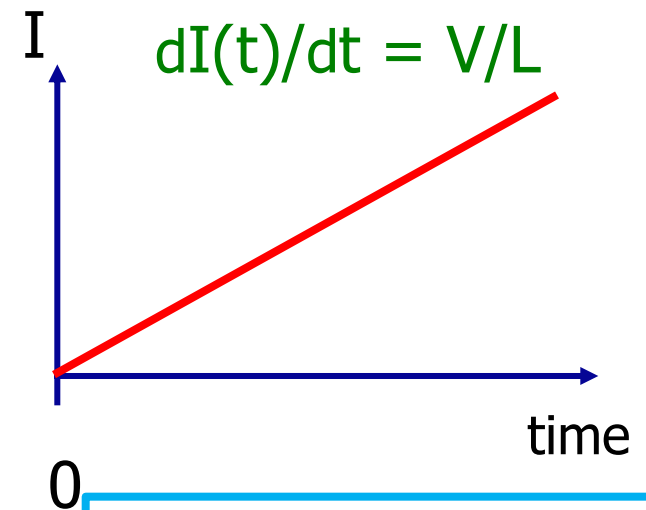
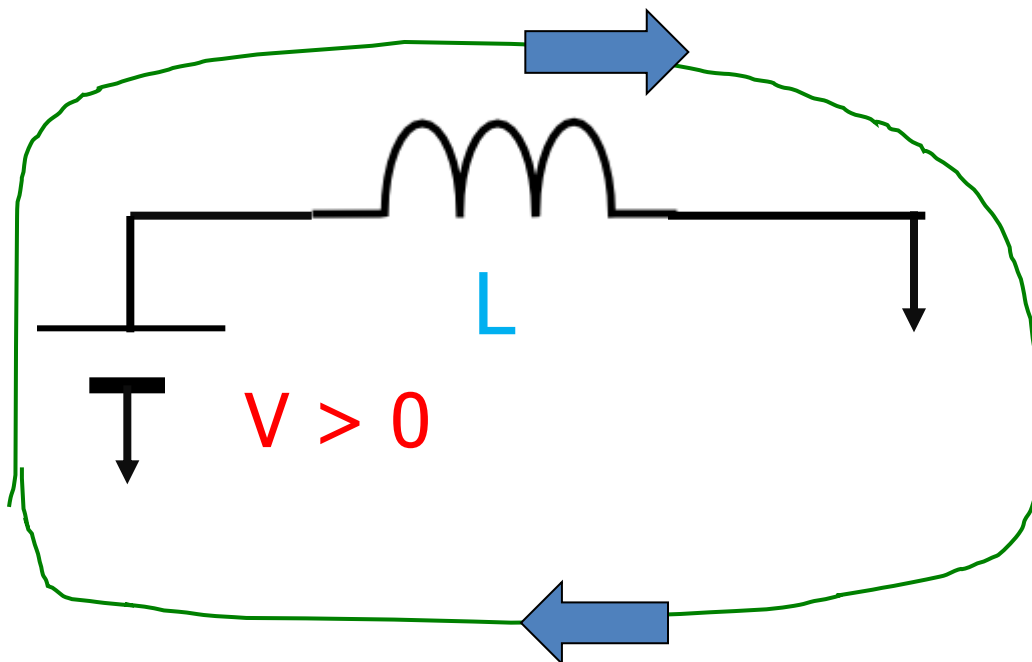


相性が良くない

電圧源からインダクタへの電流

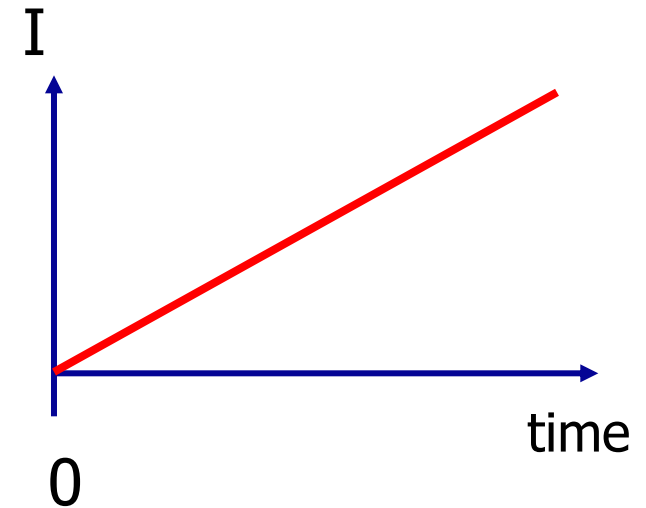
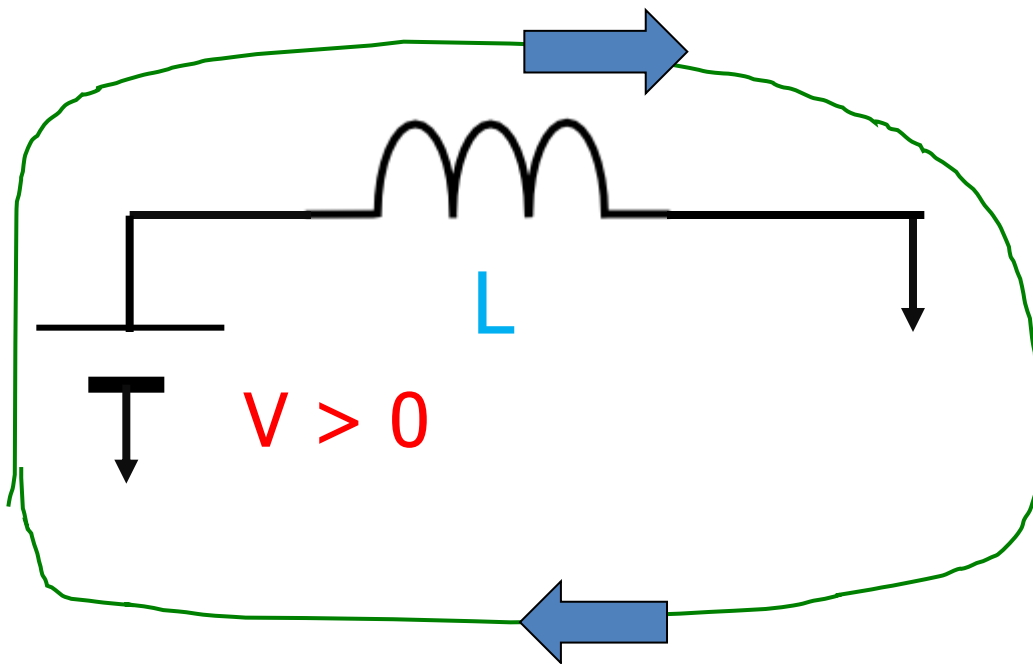
$$I(0) = 0,$$
$$I(t) > 0 \quad (t > 0)$$

$$I = \frac{1}{L} \int V dt$$



電流は時間とともに
増加する

電圧源からインダクタに
(原理的に) 損失なく、いくらでも
エネルギー供給可能

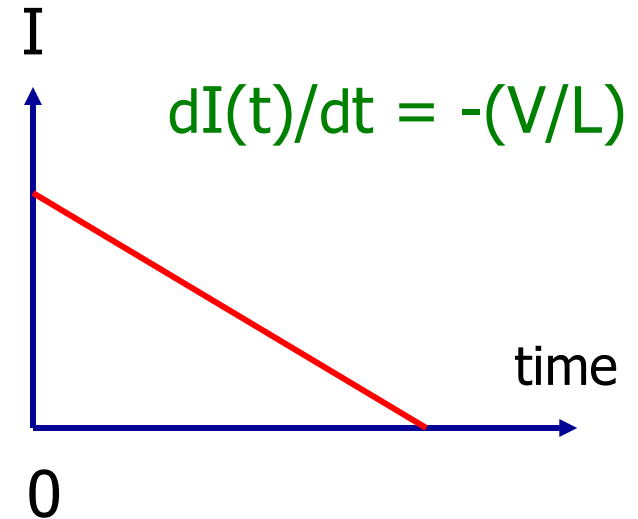
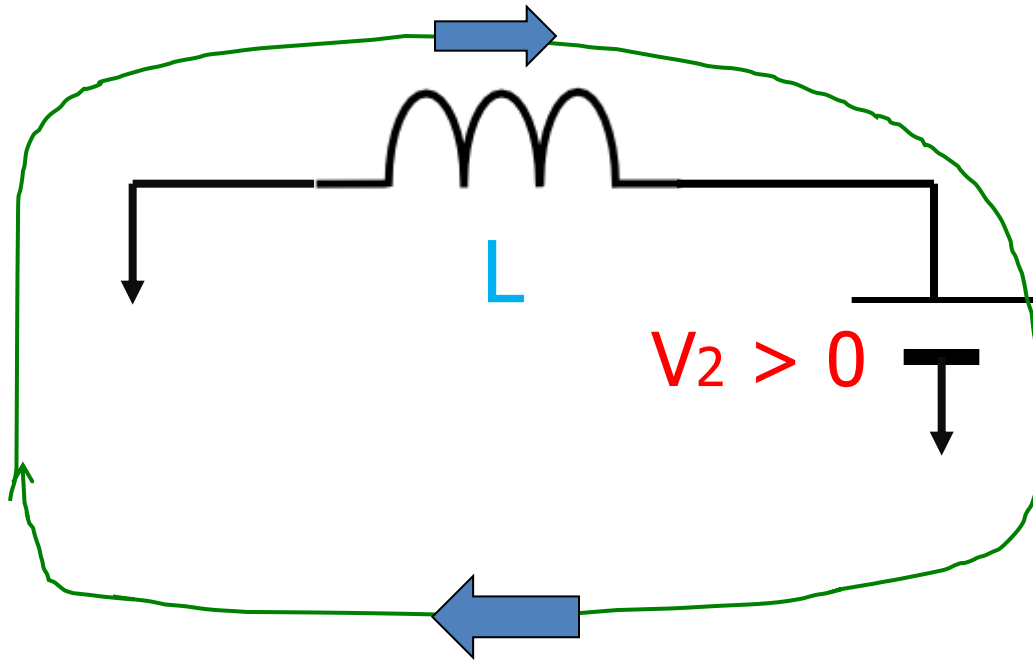


$$E = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{V^2}{L} t^2$$

インダクタに蓄積されているエネルギー $(1/2) L I^2$
時間とともに増加

インダクタは低電位から高電位に 電流が流れ得る

$$I(0) > 0$$

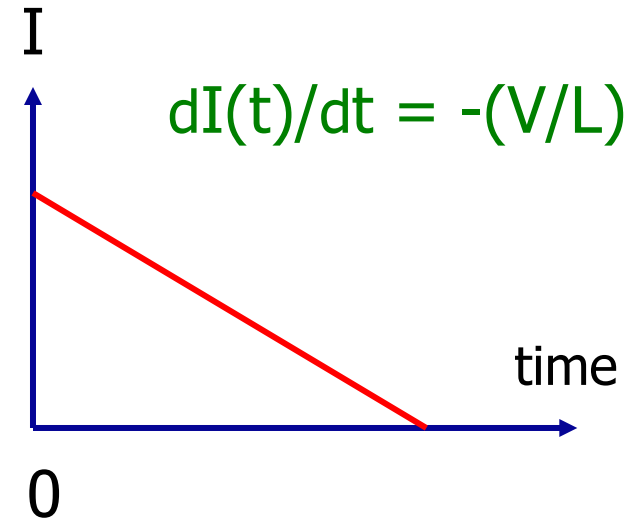
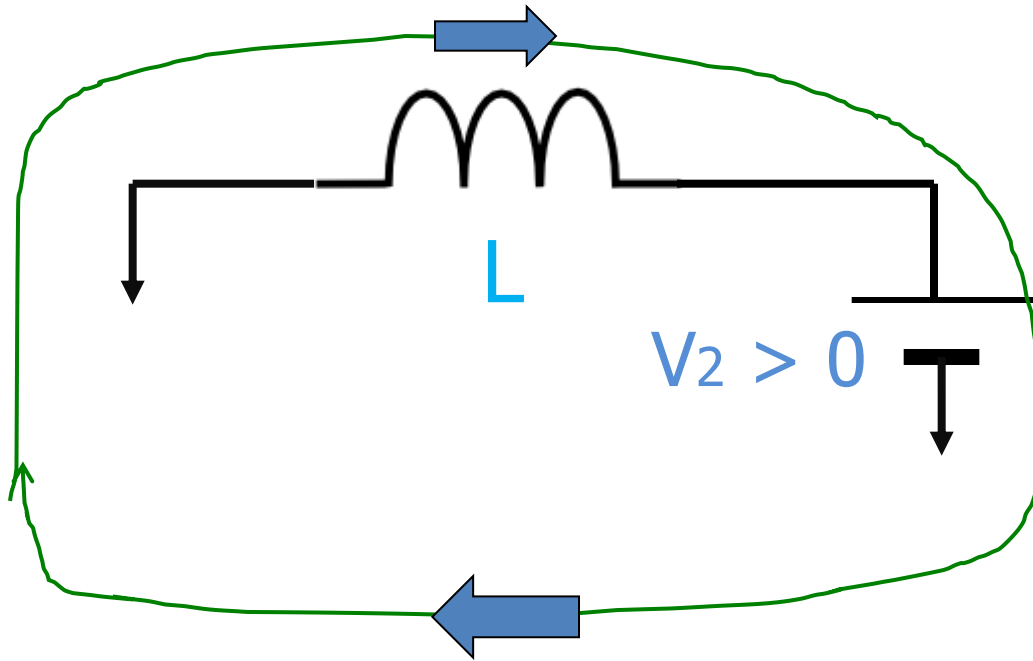


電流は時間とともに
減少する

インダクタのエネルギー

損失なく 全てを電圧源に供給可

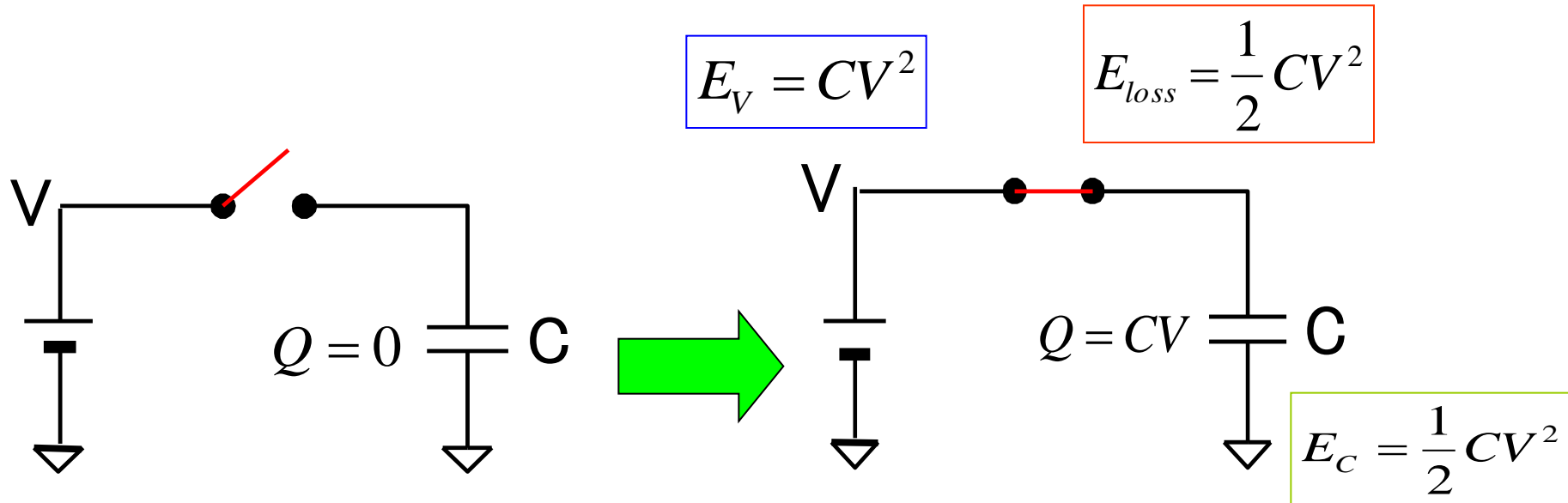
$$I(0) > 0$$



電流は時間とともに
減少する

インダクタに蓄積されているエネルギー $(1/2) L I^2$
時間とともに減少 (電圧源 V_2 に供給)

電圧源から容量へのエネルギー供給



電圧源Vから容量Cへのエネルギー供給

- スイッチで同じだけ損失 効率 50%
(オン抵抗が小さくても)
- 供給エネルギー量 $(1/2) CV^2$
(頭打ち)

➡ 相性良くない

双対問題

- 電流源と容量



相性が良い

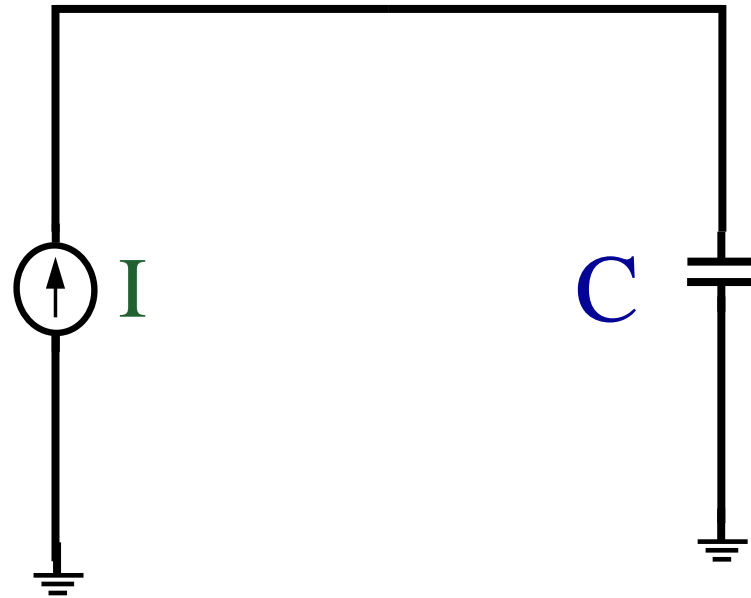
- 電流源とインダクタ



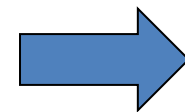
相性が良くない

電流源から容量へのエネルギー供給

- $Q = \int I dt$
- $E = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{I^2}{C} t^2$



電流源から容量へ
原理的に 損失なく、いくらでも
エネルギー供給が可能



相性が良い

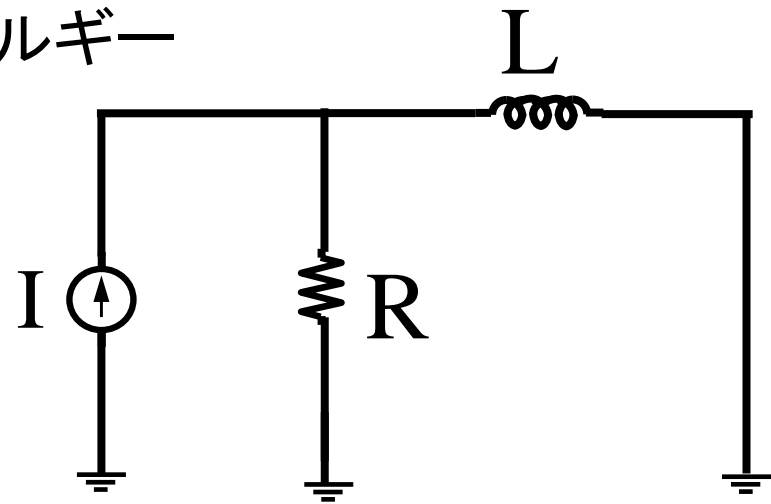
電流源からインダクタへの エネルギー供給 (効率50%, 頭打ち)

定常状態でインダクタのエネルギー

$$E1 = \frac{1}{2} LI^2$$

定常状態になるまでの
抵抗Rでの消費エネルギー

$$E2 = \frac{1}{2} LI^2$$

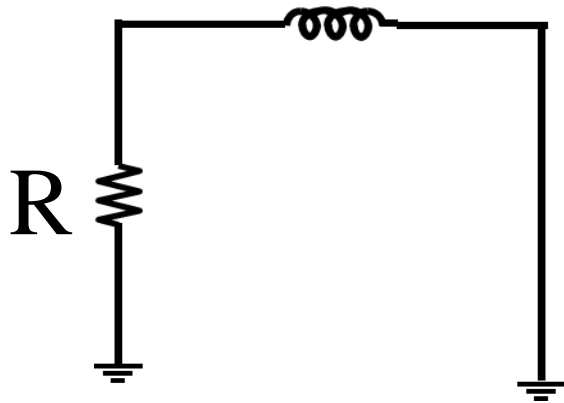


相性が良くない

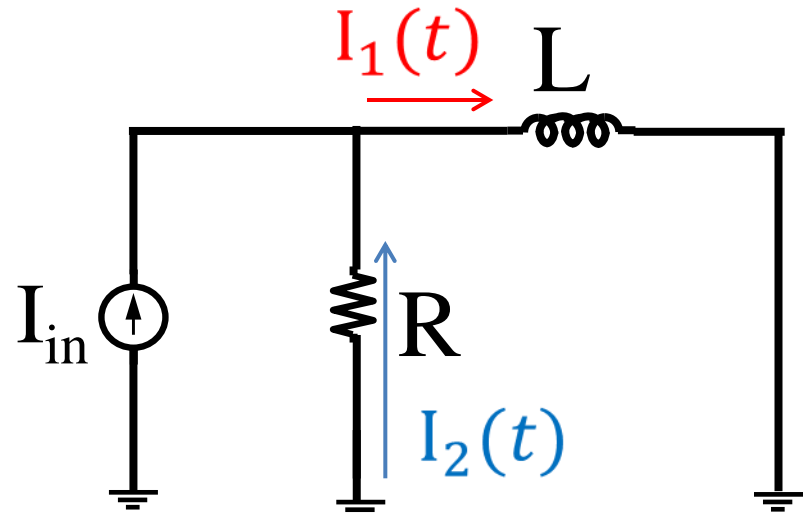
計算過程 (1)

L

群馬大学 轟俊一郎の計算



$t < 0$



$t \geq 0$

$$I_1(t) = I_{in} + I_2(t)$$

$$I_1(0) = 0$$

$$I_2(0) = 0$$

計算過程(2)

①の矢印でキルヒホッフの電圧側を考える

$$0 = RI_2 + L \frac{dI_1}{dt}$$

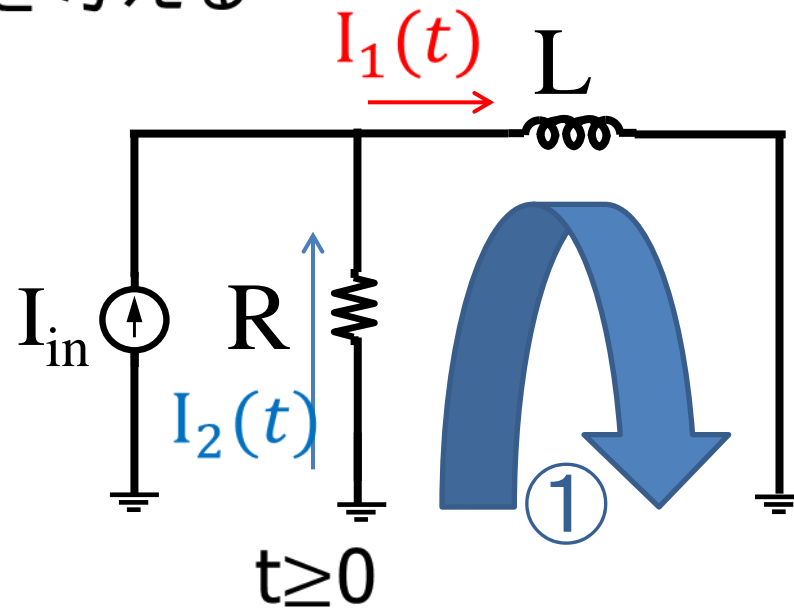
$I_1(t) = I_{in} + I_2(t)$ を代入



$$L \frac{d\{I_{in} + I_2(t)\}}{dt} + RI_2(t) = 0$$



$$L \frac{dI_2(t)}{dt} + RI_2(t) = 0$$



計算過程 (3)

- $L \frac{dI_2(t)}{dt} + RI_2(t) = 0$

$$I_2(t) = Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

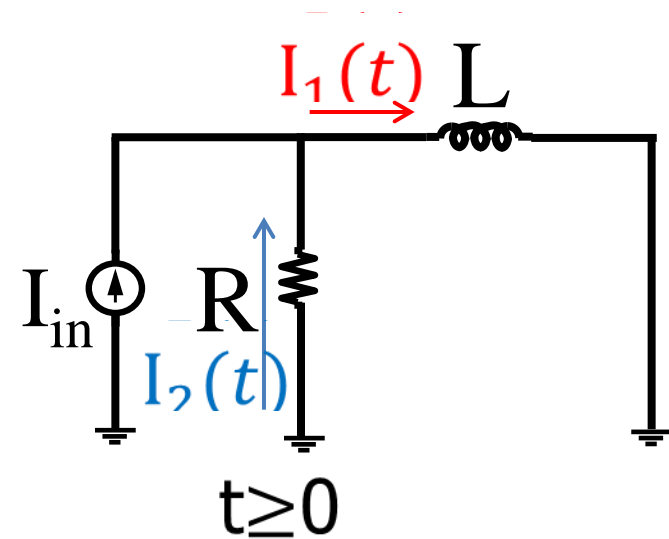


$$I_1(t) = I_{in} + Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

初期条件: $I_1(0) = 0 \Rightarrow A = -I_{in}$

- $I_1(t) = I_{in} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \right\}$

- $I_2(t) = I_{in} e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$



抵抗Rで消費するエネルギー

$$\begin{aligned}\int_0^{\infty} R I_2(t)^2 dt &= \int_0^{\infty} R \left\{ -I_{in} \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \right\}^2 dt \\ &= \int_0^{\infty} \{ R I_{in}^2 \exp\left(-\frac{2R}{L}t\right) \} dt \\ &= R I_{in}^2 \left(-\frac{L}{2R}\right) \left[\exp\left(-\frac{2R}{L}t\right) \right]_0^{\infty} \\ &= R I_{in}^2 \left(-\frac{L}{2R}\right) (0 - 1) = \frac{1}{2} L I_{in}^2\end{aligned}$$

抵抗で $\frac{1}{2} L I_{in}^2$ のエネルギーを消費

抵抗R の値に依らない

定常状態でインダクタは電流メモリ

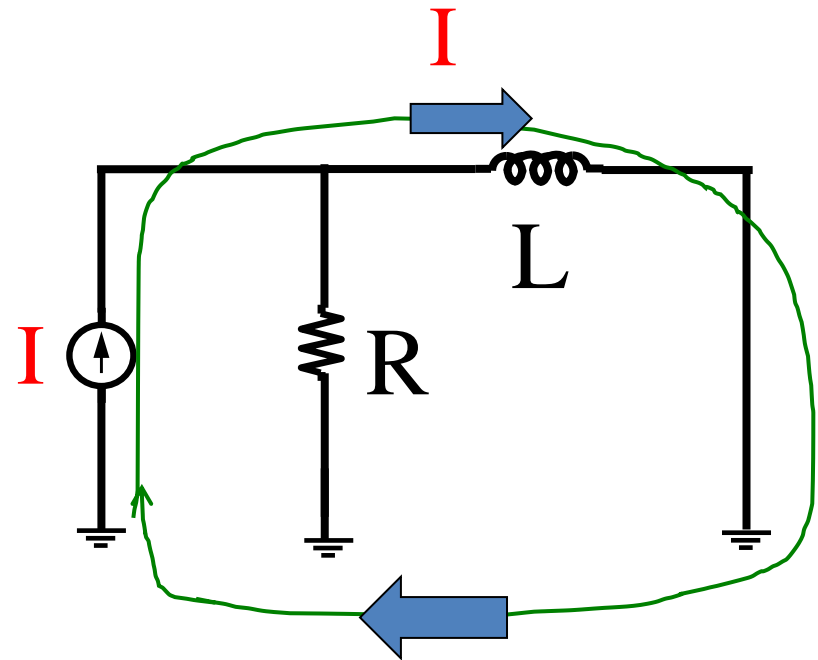
定常状態で

インダクタの電流

$$I = \text{一定}$$

インダクタのエネルギー

$$E1 = \frac{1}{2}LI^2$$



C,L 電圧、電流の双対性

- パワー = 電圧 × 電流

容量 C

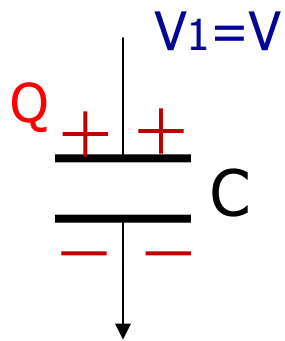
$$I = C (dV/dt)$$

インダクタ L

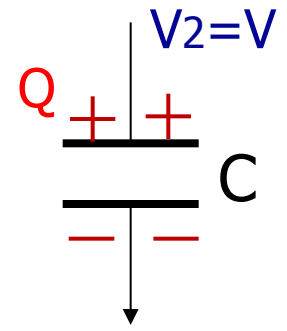
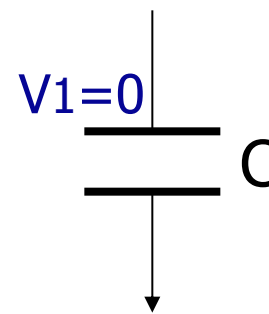
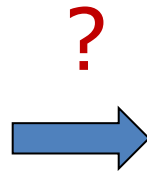
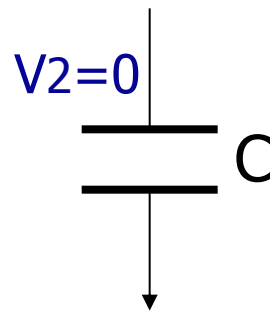
$$V = L (dI/dt)$$

容量間の電荷伝送

エネルギー損失なしで 左から右は可能か



$$Q = C V$$

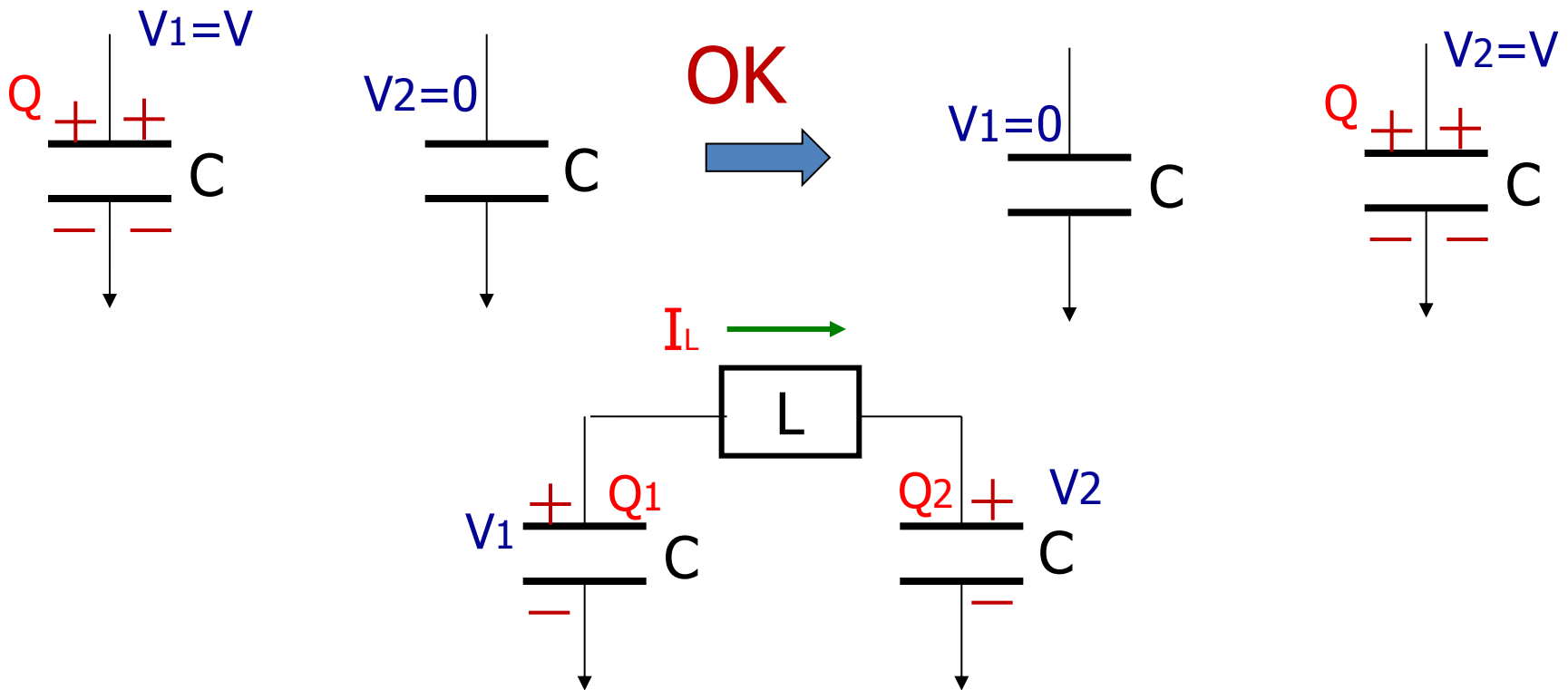


$$Q = C V$$

容量間の電荷伝送

インダクタは優れた受動素子

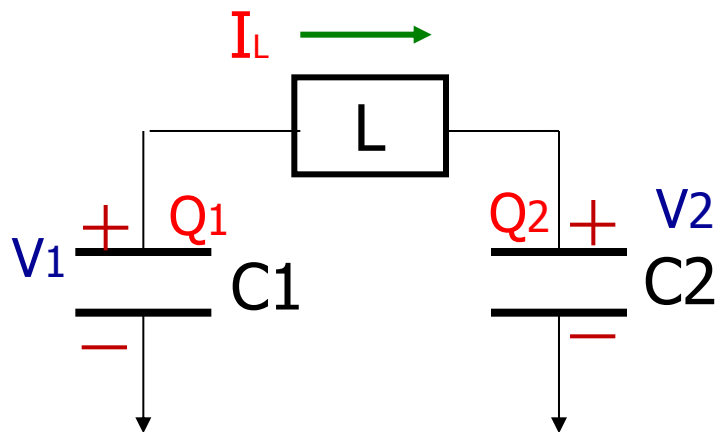
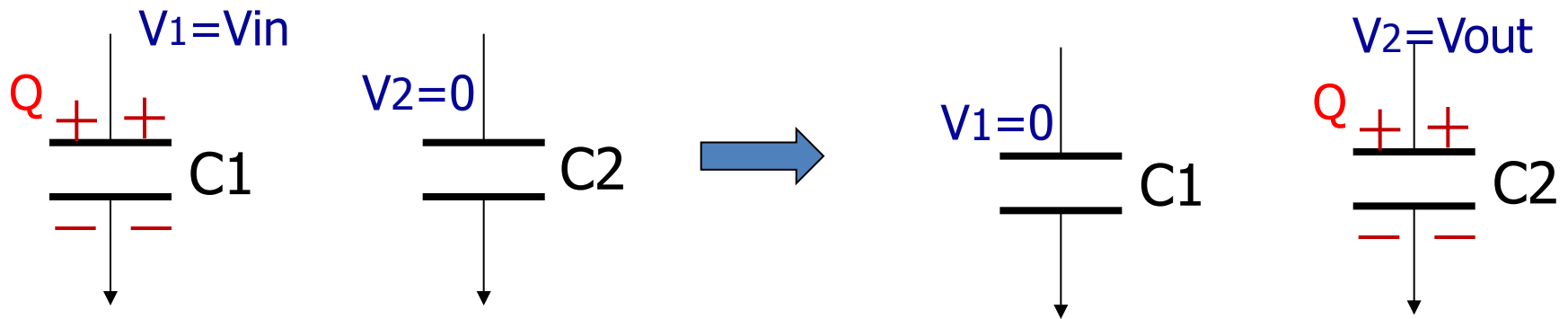
エネルギー損失なしで 左から右は**可能**！



$$(1/2) C V_1^2 + (1/2) C V_2^2 + (1/2) L I_L^2 = \text{一定}$$

インダクタを用いて 損失なしでの昇圧、降圧の実現

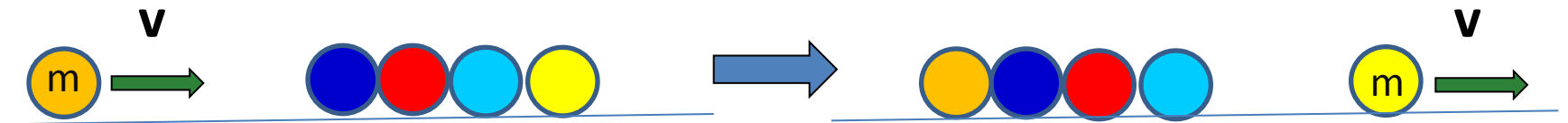
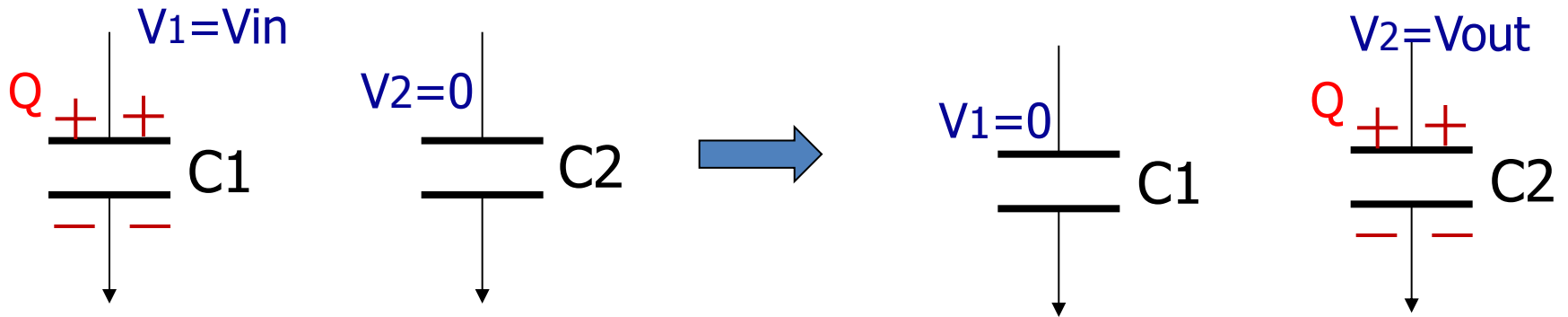
エネルギー損失なしで 左から右は**可能**！



$C1 > C2 \Rightarrow V_{in} < V_{out}$
昇圧

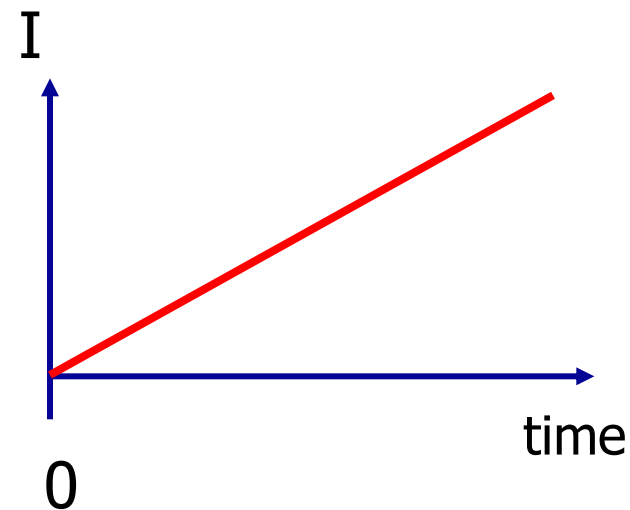
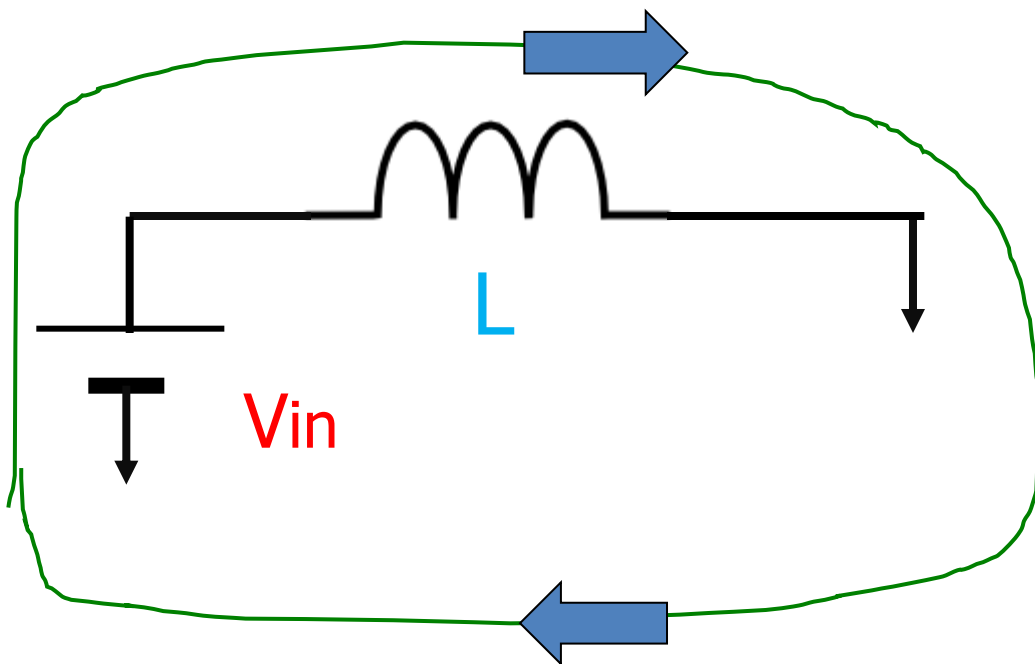
$C1 < C2 \Rightarrow V_{in} > V_{out}$
降圧

完全衝突問題とのアナロジ



スイッチング電源 動作 (1)

損失なく電圧源のエネルギーを
インダクタに供給

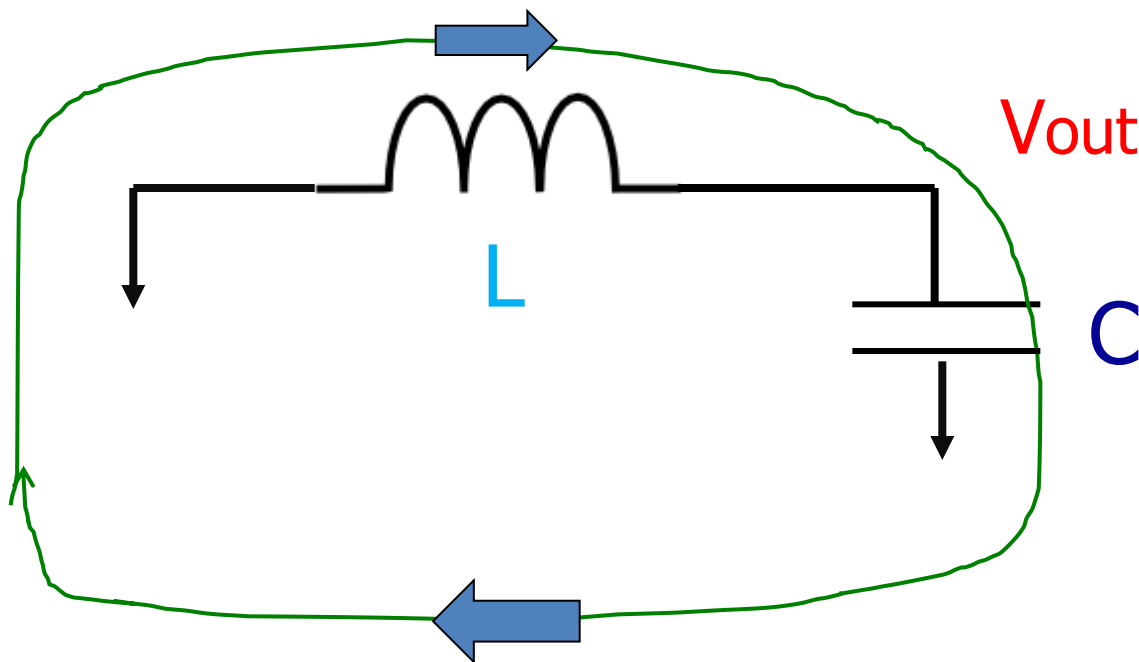


$$E = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{V^2}{L} t^2$$

インダクタに蓄積されているエネルギー $(1/2) L I^2$
時間とともに増加

スイッチング電源 動作 (2)

損失なくインダクタのエネルギーを
負荷(容量)に供給



理想スイッチは電力損失がゼロ

● 電力損失 $P = VI$

● スイッチオフ

$$I=0 \Rightarrow P=0$$



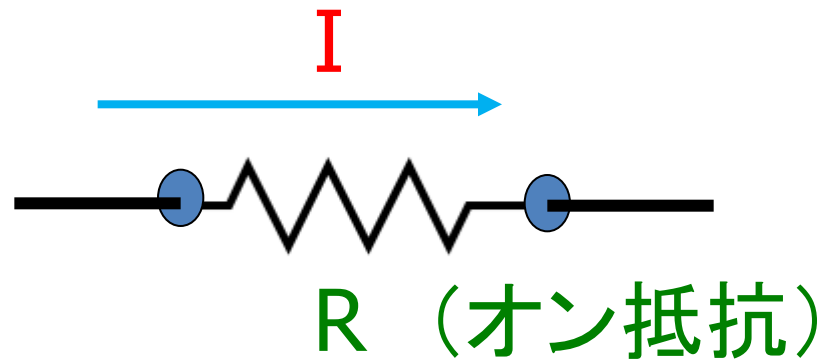
● スイッチオン

$$V=0 \Rightarrow P=0$$



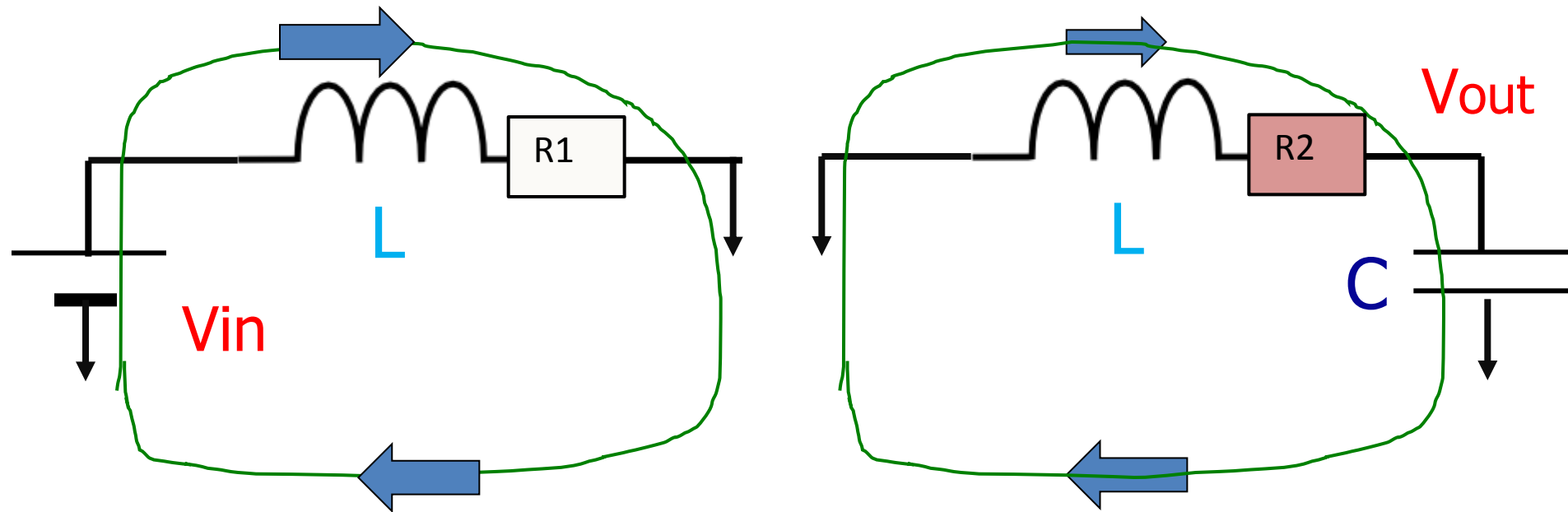
実際のスイッチの電力損失
導通損失 (Conduction Loss)

● スイッチオン



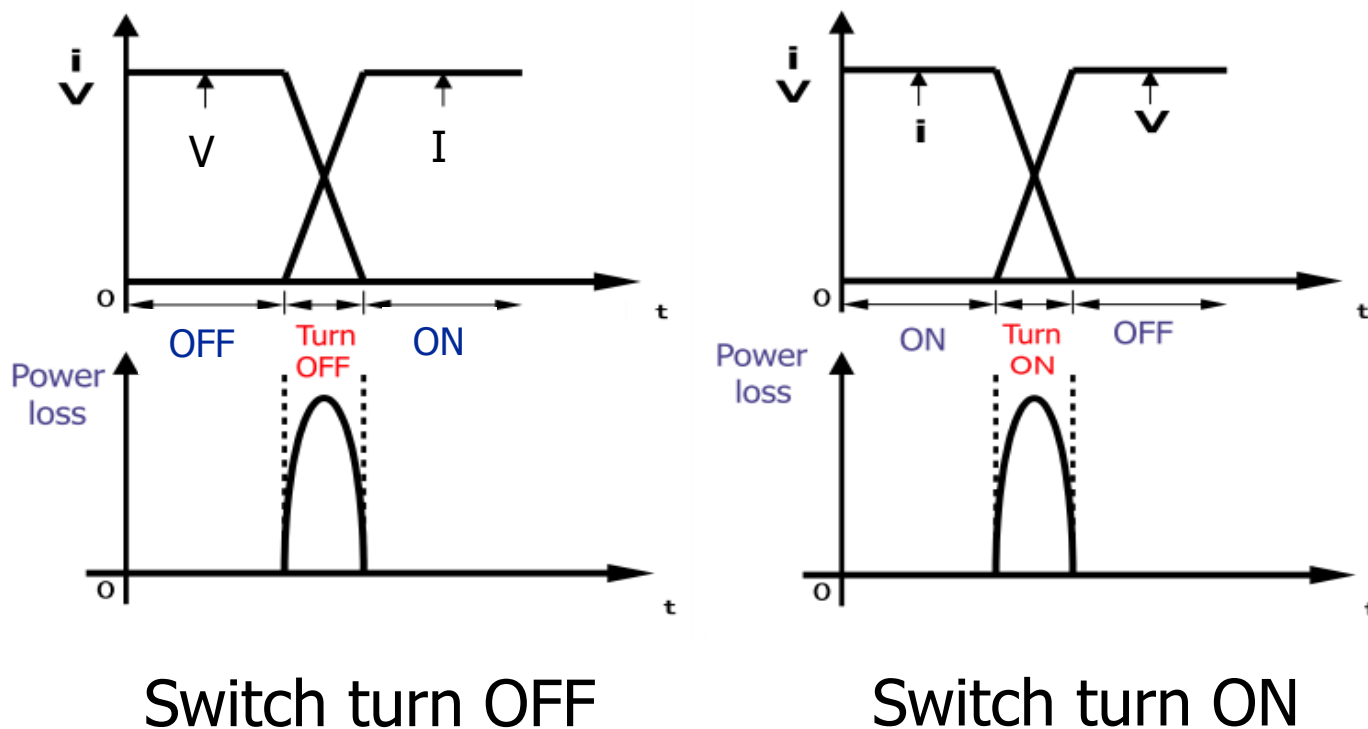
導通損失 $P = R I^2$

スイッチの導通損失 R1, R2



R1, R2 を小さくすれば 電源回路の効率上昇

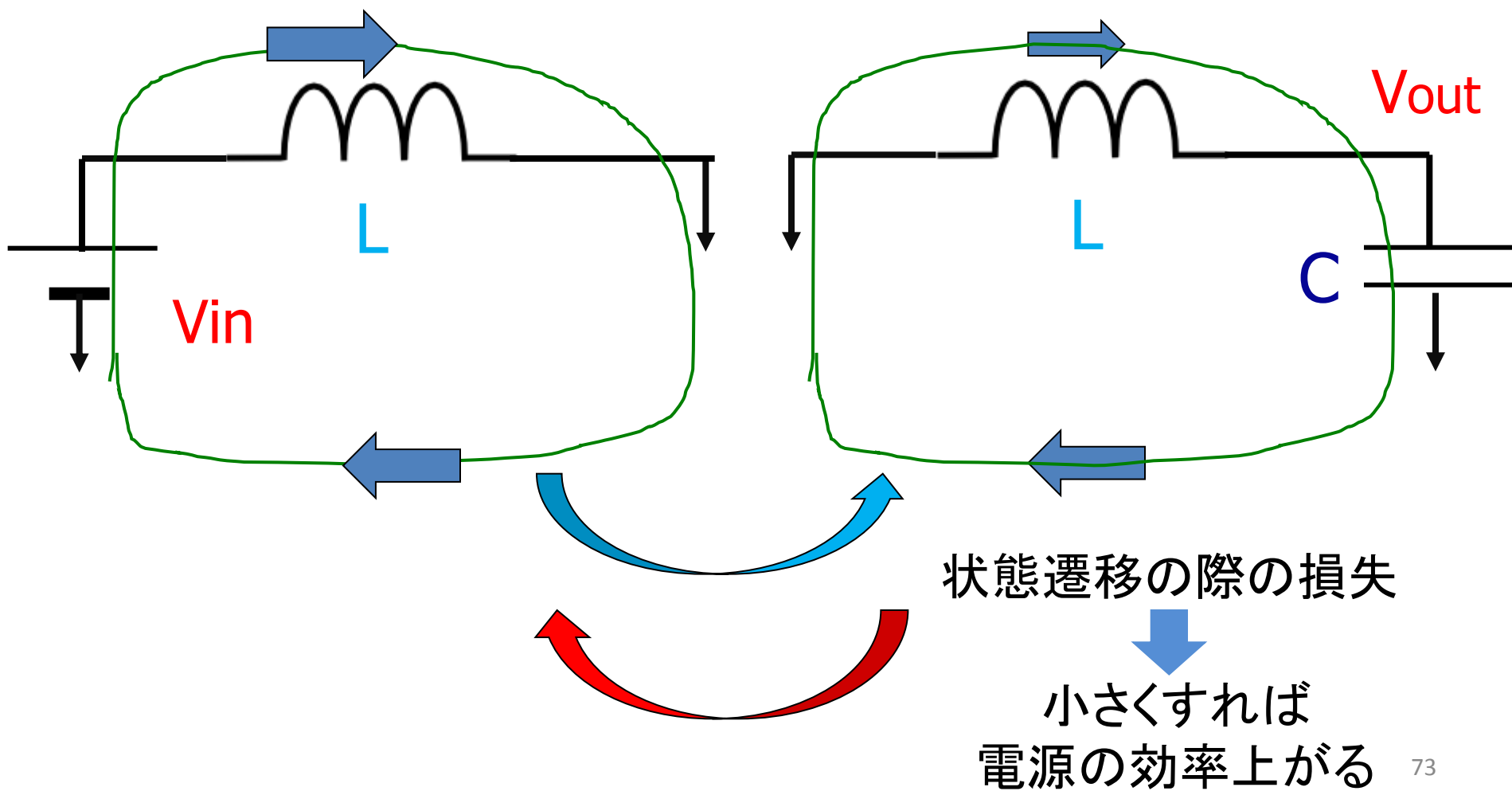
実際のスイッチの電力損失 スイッチング損失 (Switching Loss)



高速スイッチングデバイス

→ スイッチング損失 小

スイッチング損失



Part II まとめ

- スイッチング電源で
インダクタを用いるのは
電圧源と相性が良いから
- スイッチング電源で、
スイッチの損失を小さくすると効率向上
- 「容量＋スイッチ」の電源では
スイッチ損失を小さくしても
効率は原理的に頭打ち

別の表現をすれば

- スイッチング電源は L を用いるので理想デバイスの場合原理的に効率100%を達成可能。
- チャージポンプ電源は L を用いてないので理想デバイスを用いても原理的に効率100%は達成できない。

電子回路技術の流れ

能動デバイスの性能向上、
回路技術の進展により



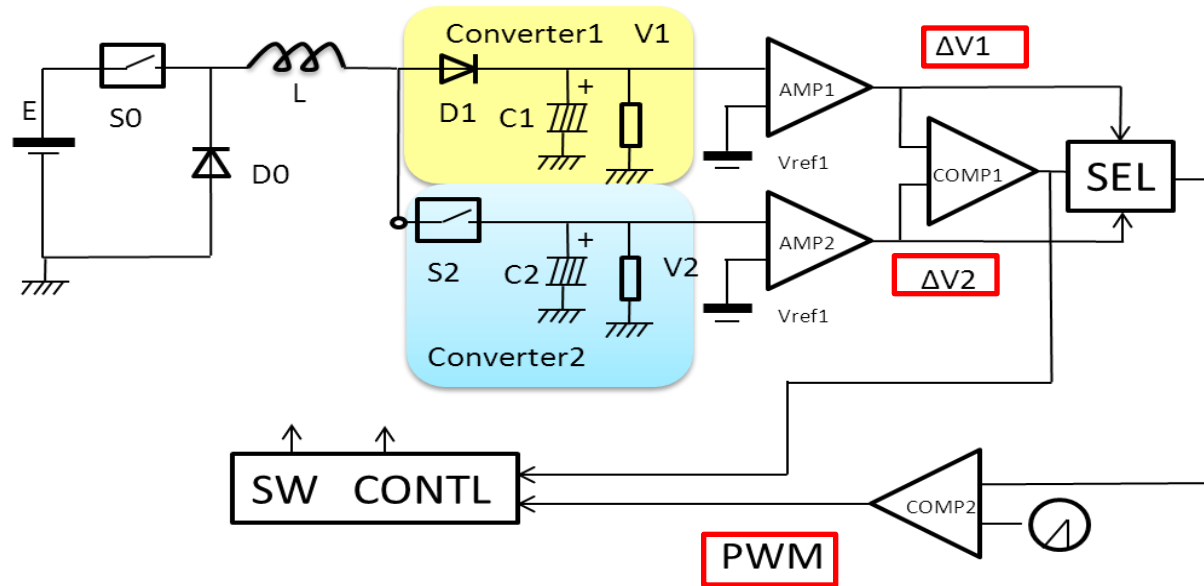
受動素子を能動素子で置き換える

特に インダクタを他の素子で置き換える

受動素子(L, C, R) は線形、ノイズ少ないが
面積大きい

電源回路では

- 単一インダクタ多出力電源回路



- スイッチングの高周波化でL, Cを小さくする
- LED駆動回路で電解コンデンサを使用しない
(LEDは寿命長い、電解コンデンサは短い)

最後に

応用の色彩が強い
産学連携分野でも
基本・本質を理解することが重要

「稽古とは 一より習い 十を知り
十よりかへる もとのその一」

(千利休)



相性の良しあしの解釈

大分大学 佐藤輝被先生より

電圧源 ↔ 容量

近似

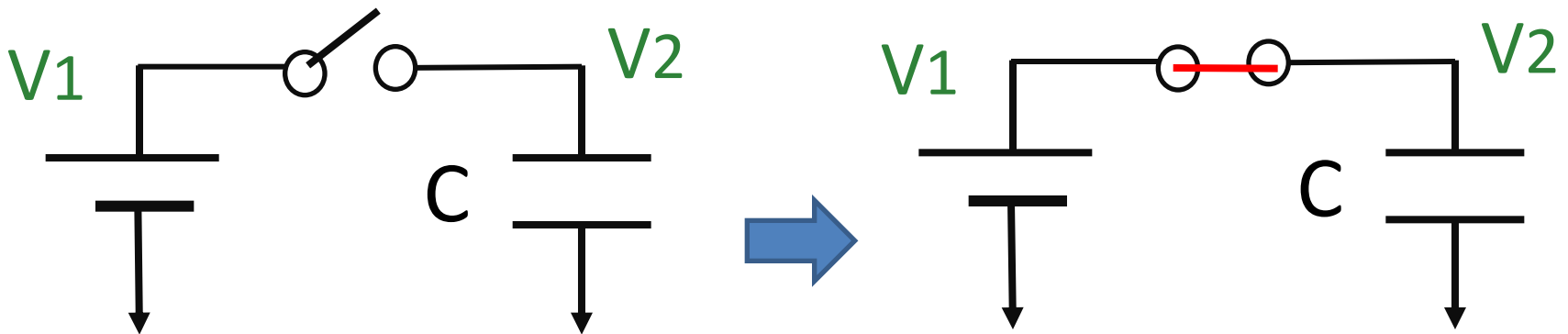
電流源 ↔ インダクタ

近似

インダクタ電流は急には変化しない

電圧源と容量の接続

容量 C を
電圧源 V_2 と近似

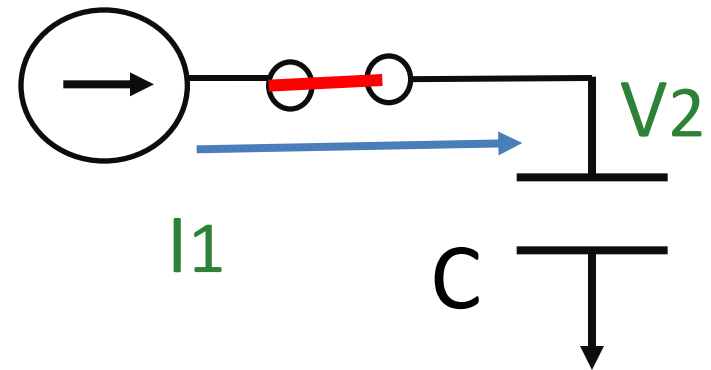
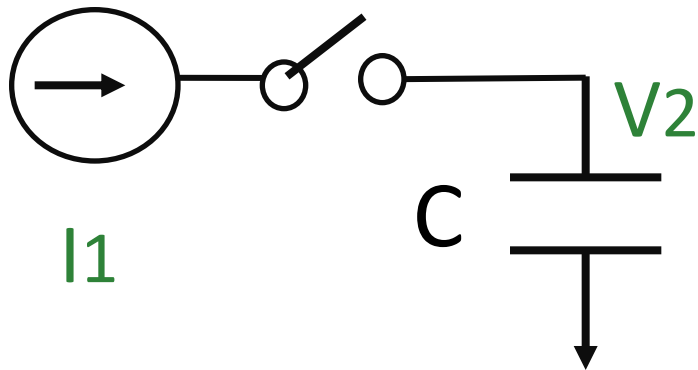


異なる電圧源 V_1 , V_2 を接続

キリヒホッフ電圧則に反する ➡ 相性良くない

電流源と容量の接続

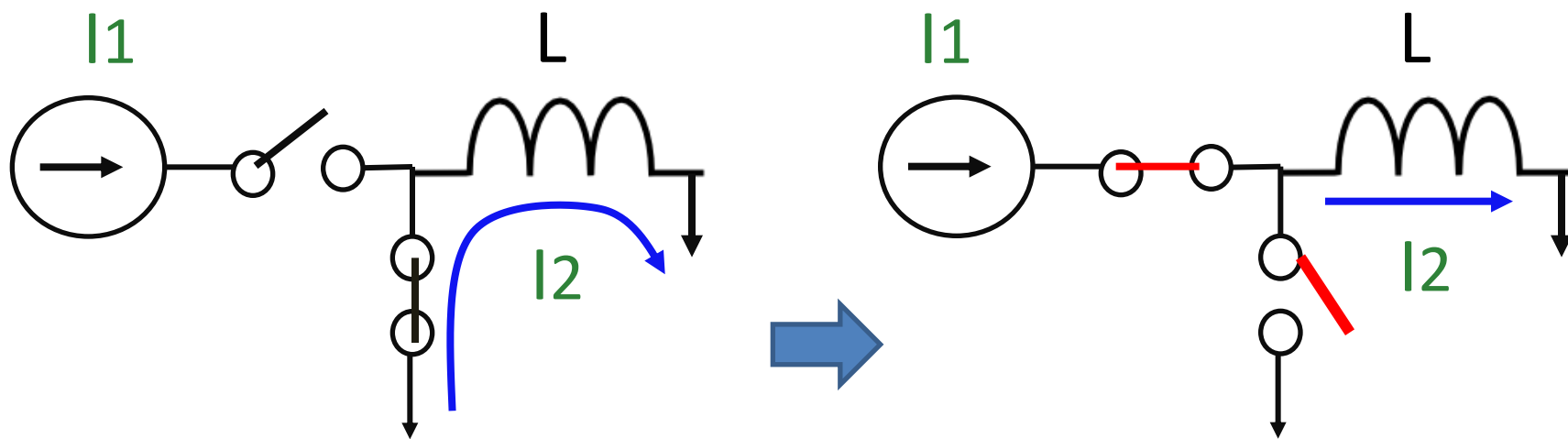
容量を電圧源と近似



相性が良い

電流源とインダクタの接続

インダクタ L を
電流源 I_2 と近似

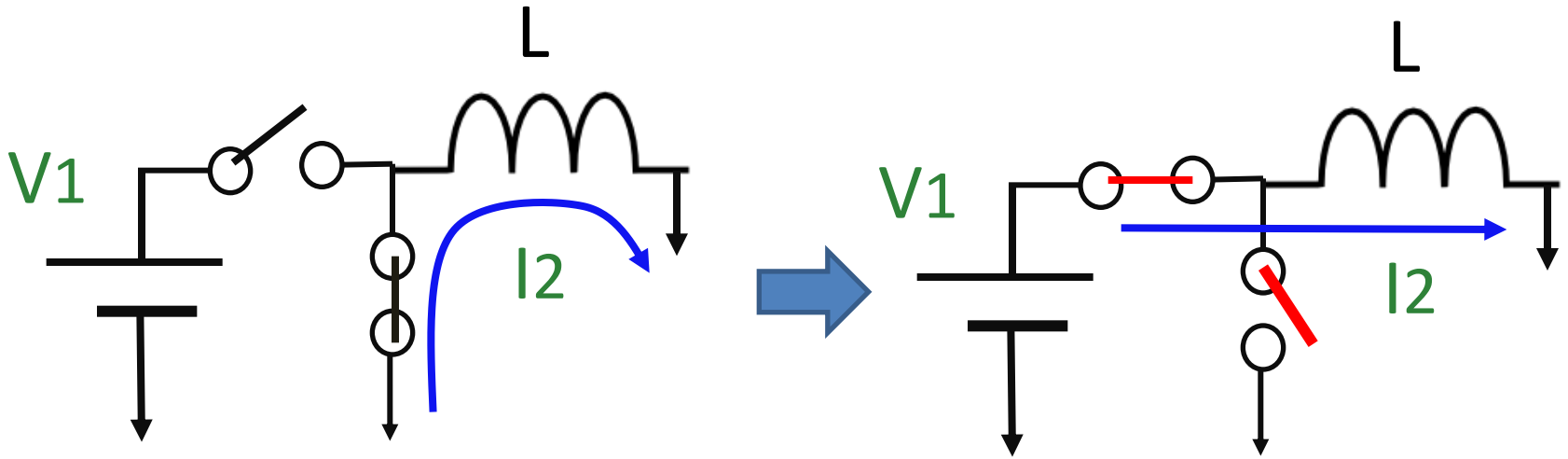


異なる電流源 I_1, I_2 を接続

キリヒホッフ電流則に反する ➡ 相性良くない

電圧源とインダクタの接続

インダクタを電流源と近似



相性が良い