



スイッチング電源

- なぜインダクタを用いるか
高効率, 大電流を扱える理由

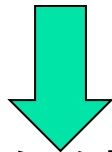
群馬大学 理工学研究院 電子情報部門

小林春夫、轟俊一郎



プロローグ

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」



では、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



目次

- 電圧源とインダクタ 相性良い
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 相性良い
- 電流源とインダクタ 相性良くない
- インダクタによるエネルギー伝送
- スイッチ
- まとめ

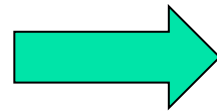


目次

- 電圧源とインダクタ **相性良い**
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 相性良い
- 電流源とインダクタ 相性良くない
- インダクタによるエネルギー伝送
- スイッチ
- まとめ

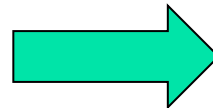
インダクタを用いると 高効率になる理由

- 電圧源とインダクタ



相性が良い

- 電圧源と容量

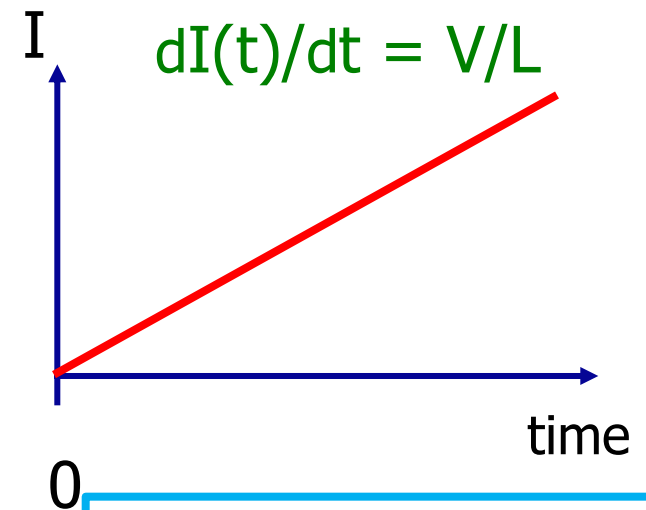
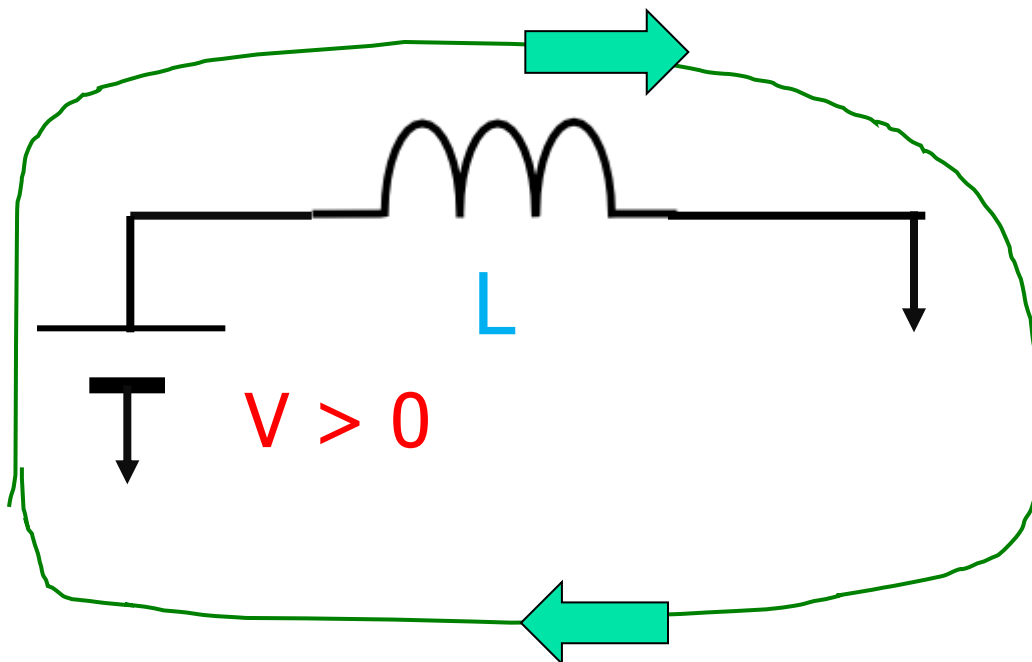


相性が良くない

電圧源からインダクタへの電流

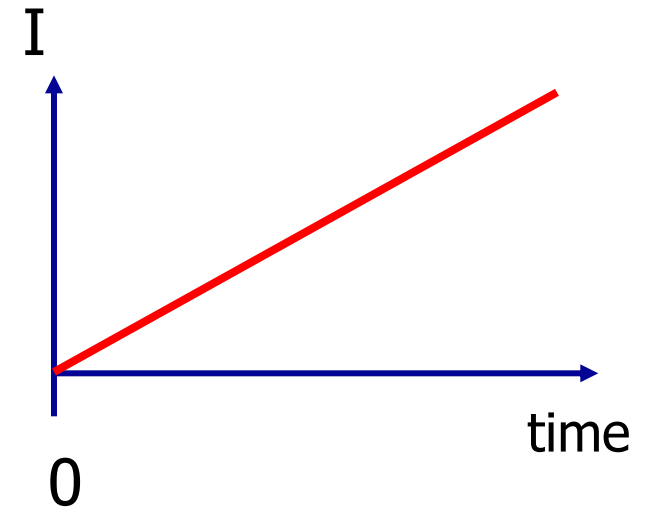
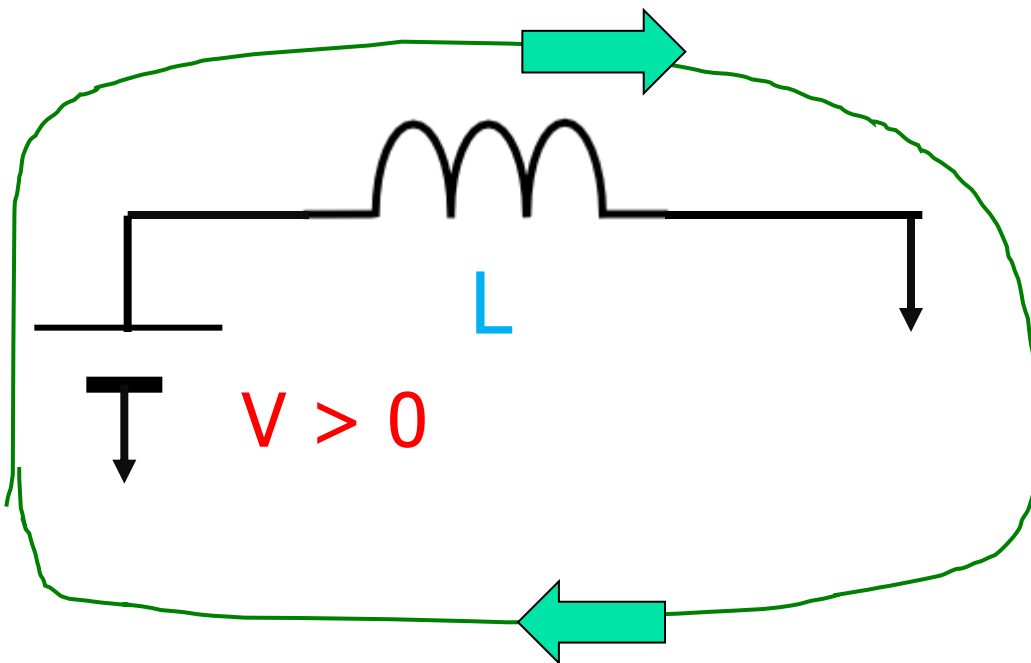
$$I(0) = 0,$$
$$I(t) > 0 \quad (t > 0)$$

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



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

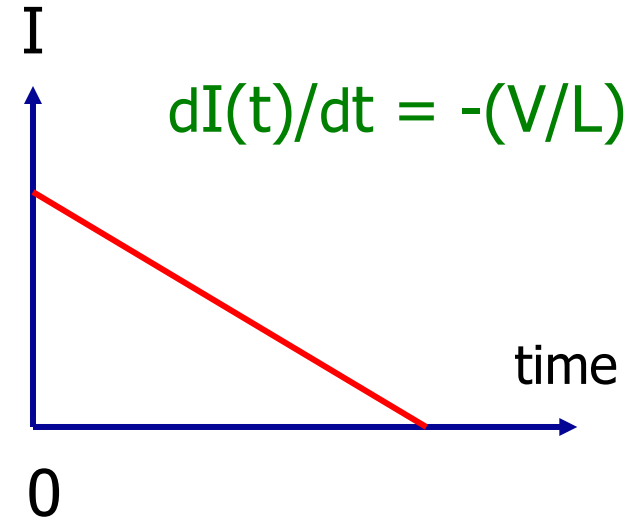
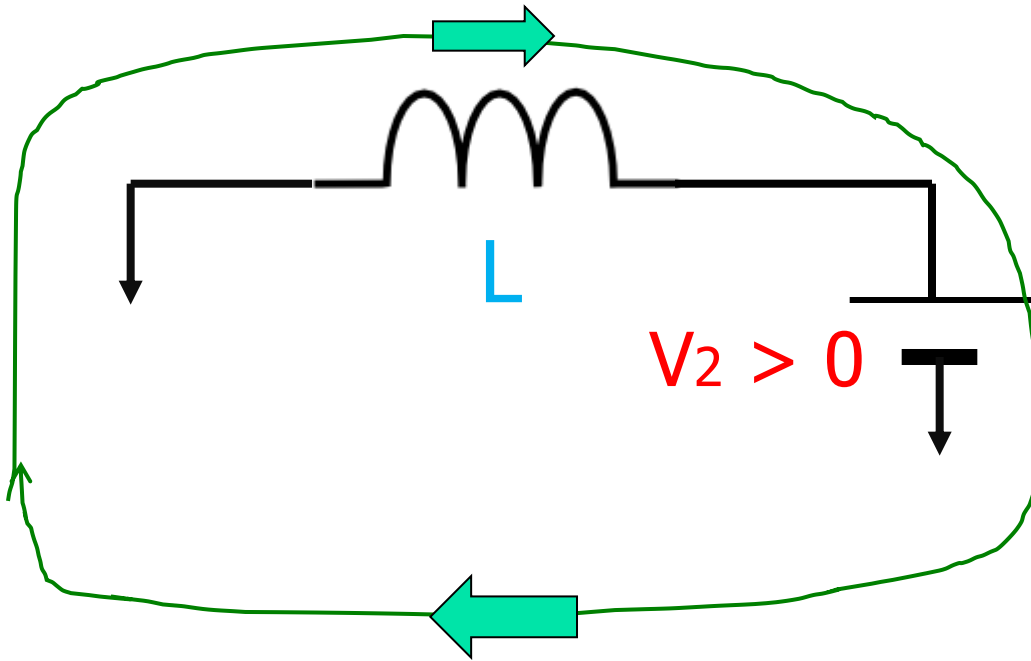


$$E = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{V^2}{L} t^2$$

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

$$I(0) > 0$$

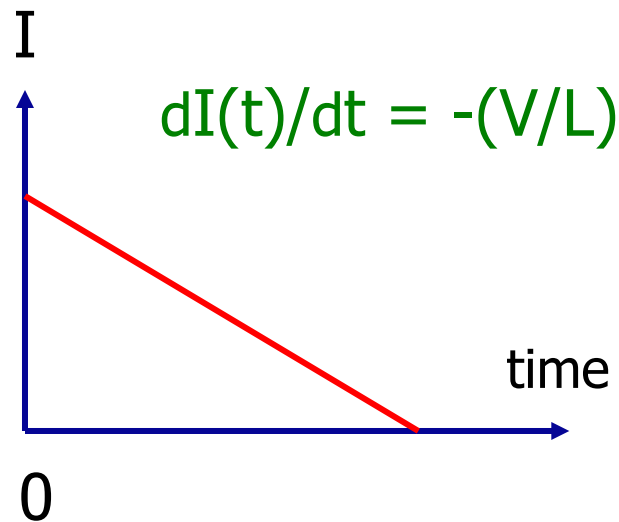
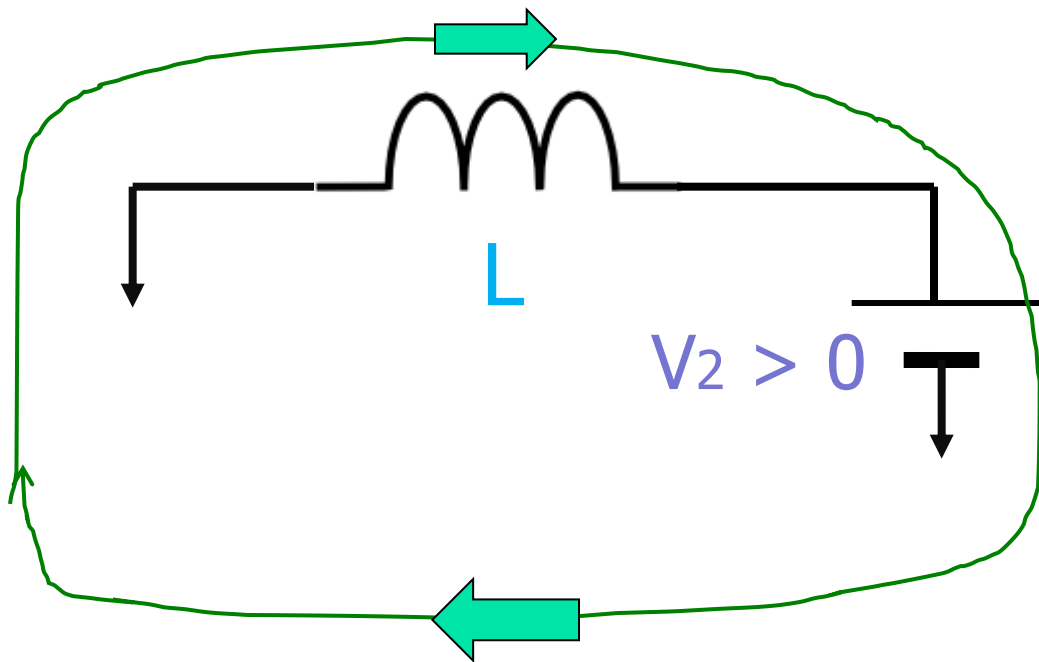


電流は時間とともに
減少する

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

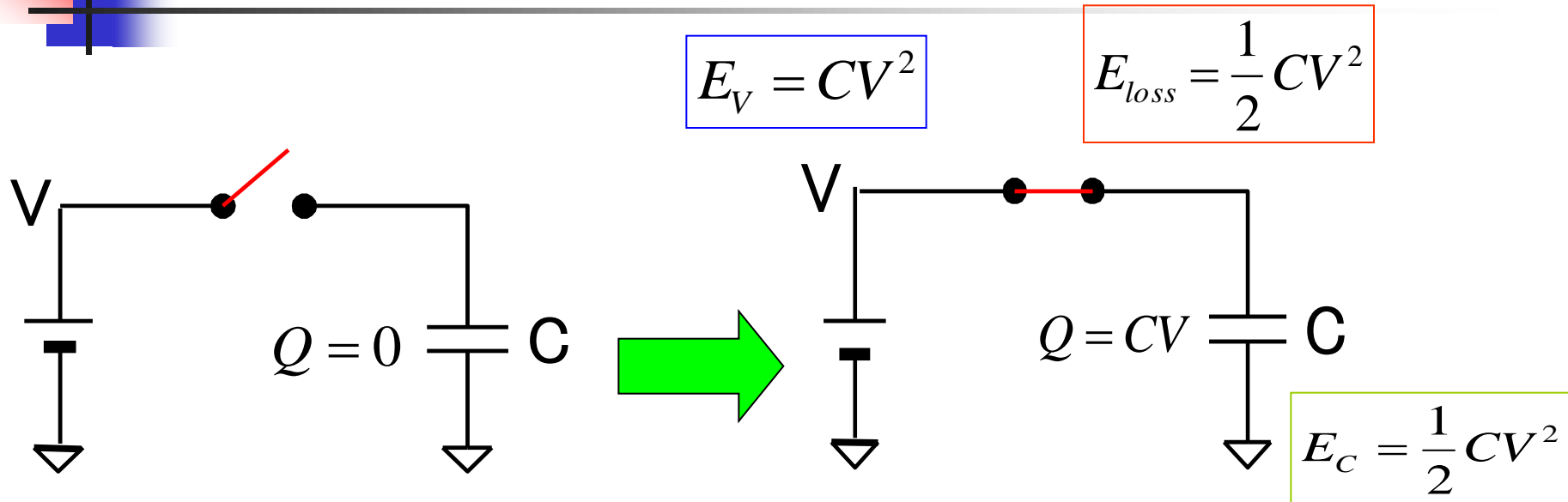
インダクタに蓄積されているエネルギー $(1/2) L I^2$
時間とともに減少 (電圧源 V_2 に供給)



目次

- 電圧源とインダクタ 相性良い
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 相性良い
- 電流源とインダクタ 相性良くない
- インダクタによるエネルギー伝送
- スイッチ
- まとめ

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



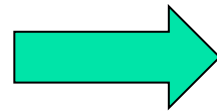
目次

- 電圧源とインダクタ 相性良い
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 **相性良い**
- 電流源とインダクタ 相性良くない
- インダクタによるエネルギー伝送
- スイッチ
- まとめ



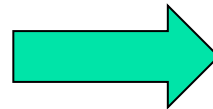
双対問題

- 電流源と容量



相性が良い

- 電流源とインダクタ

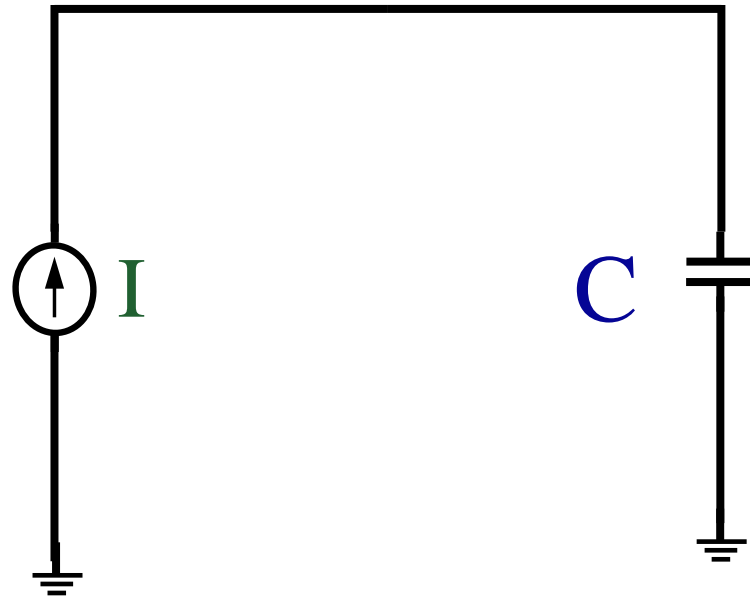


相性が良くない

電流源から容量へのエネルギー供給

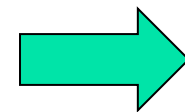
- $Q = \int I dt$

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



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



目次

- 電圧源とインダクタ 相性良い
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 相性良い
- **電流源とインダクタ 相性良くない**
- インダクタによるエネルギー伝送
- スイッチ
- まとめ

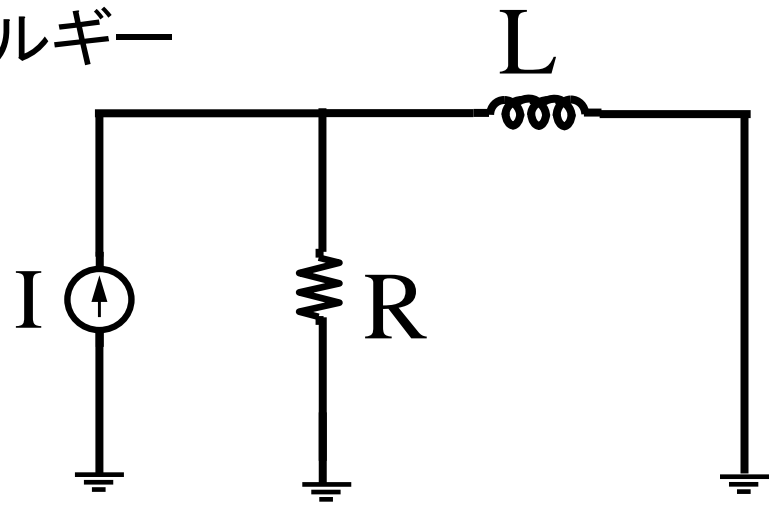
電流源からインダクタへの エネルギー供給 (効率50%, 頭打ち)

定常状態でインダクタのエネルギー

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

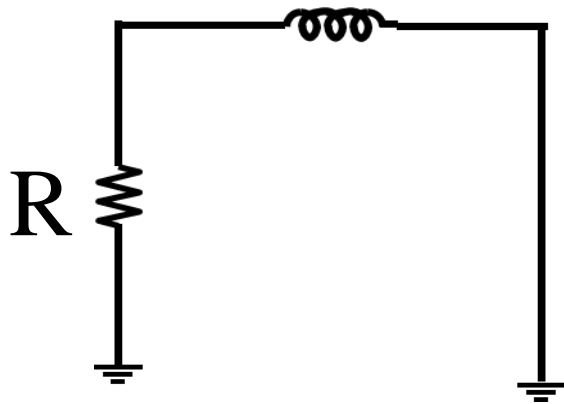
定常状態になるまでの
抵抗Rでの消費エネルギー

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

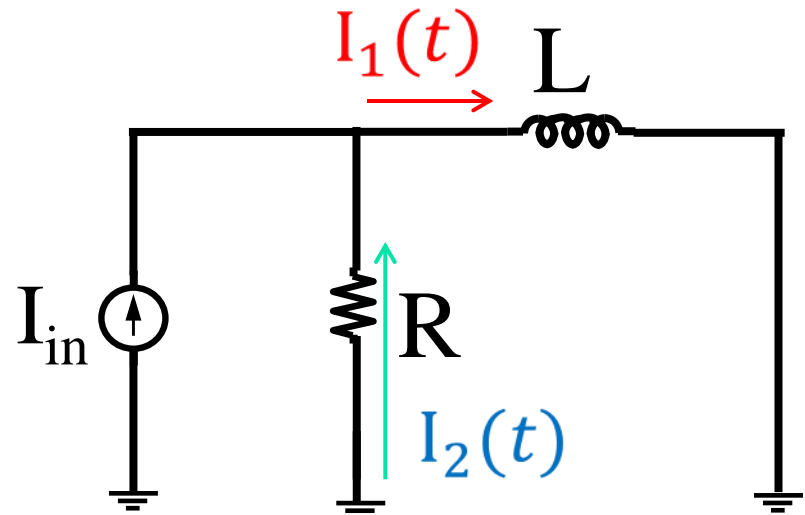


相性が良くない

計算過程 (1)



$t < 0$



$t \geq 0$

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

$$I_1(0) = 0$$

$$I_2(0) = 0$$

計算過程(2)

①の矢印でキルヒホッフの電圧側を考える

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

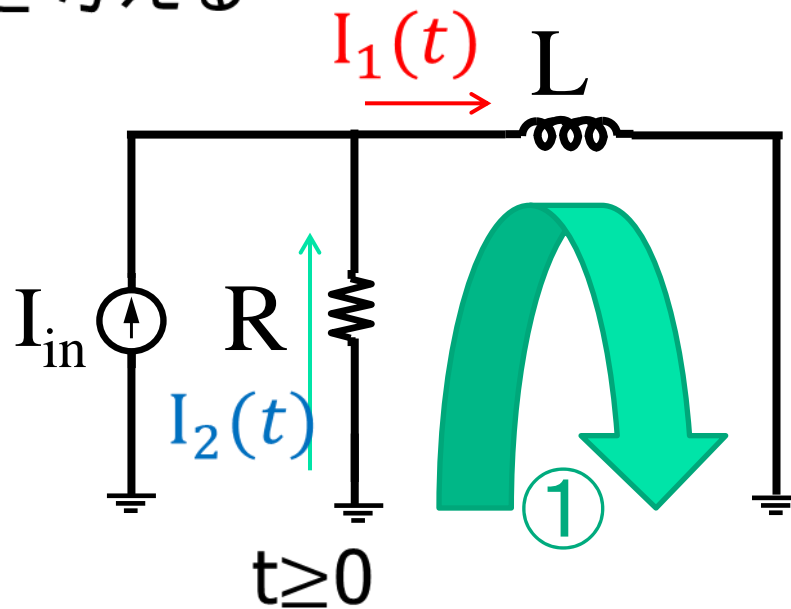
$I_1(t) = I_{in} + I_2(t)$ を代入



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



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



計算過程 (3)

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

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

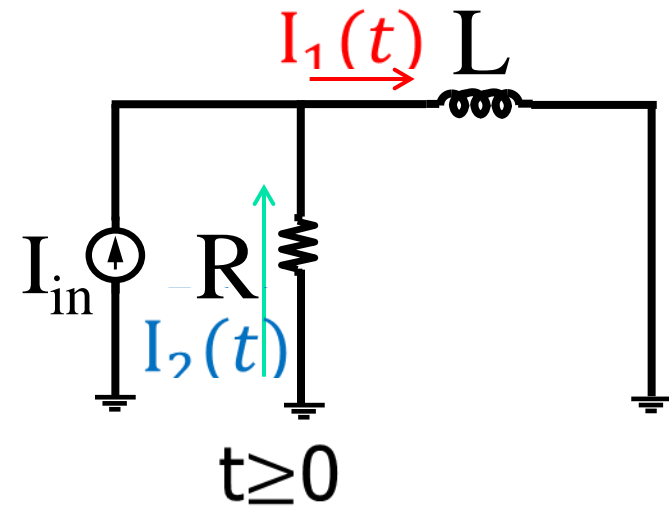


$$I_1(t) = I_{in} + Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

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

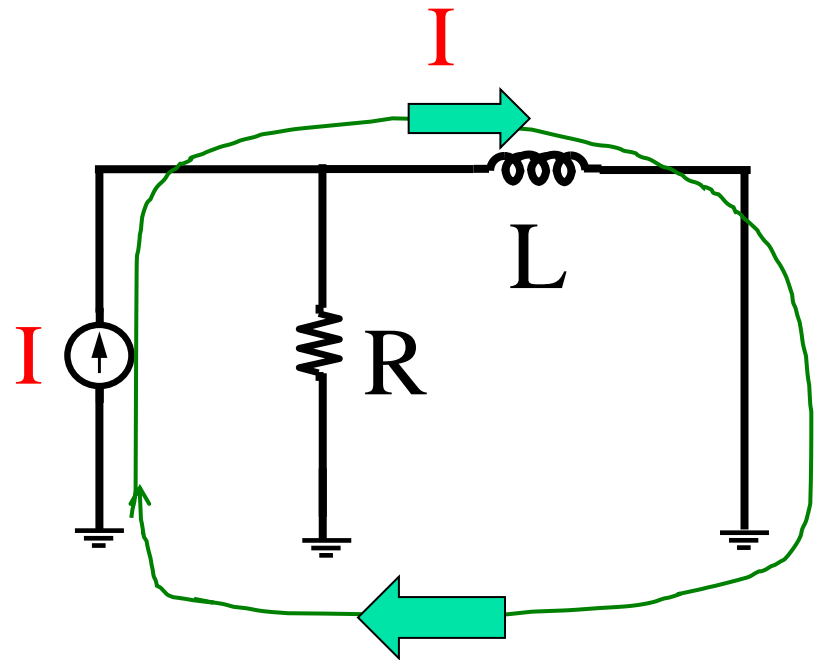
定常状態で

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 x 電流

容量 C

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

インダクタ L

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



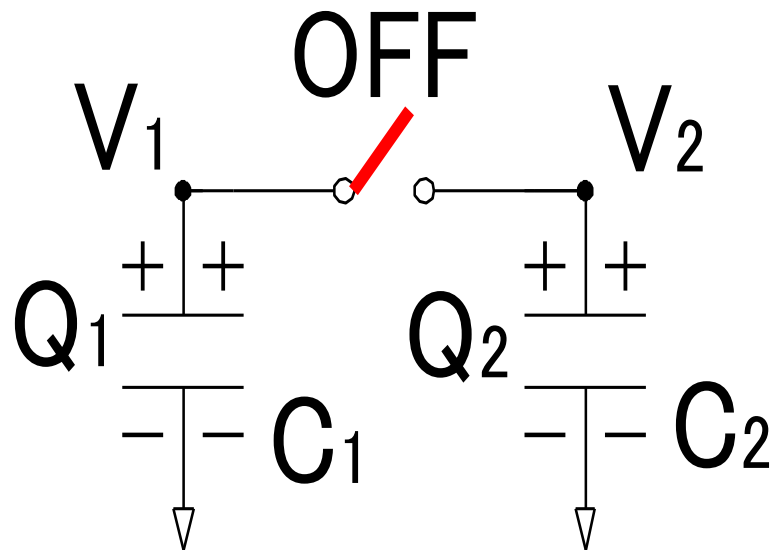
目次

- 電圧源とインダクタ 相性良い
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 相性良い
- 電流源とインダクタ 相性良くない
- **インダクタによるエネルギー伝送**
- スイッチ
- まとめ

スイッチ

OFF → 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

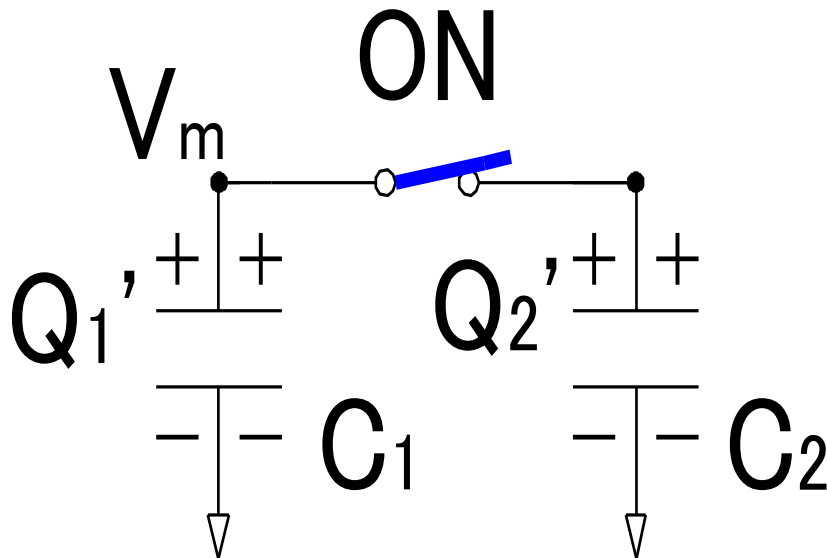
電荷：

$$Q_1' = C_1 \cdot V_m$$

$$Q_2' = C_2 \cdot V_m$$

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

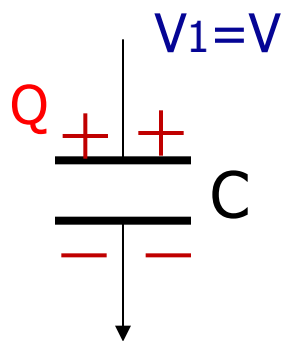
$$\begin{aligned} E_{loss} &= E - E' \\ &= \frac{1}{2} \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} (V_1 - V_2)^2 \end{aligned}$$

● $V_1 = V_2$ のとき、SW ON → ゼロ電圧スイッチング

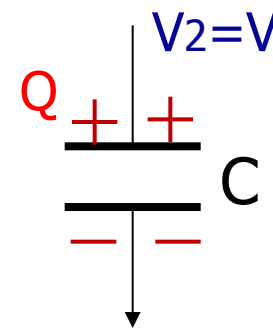
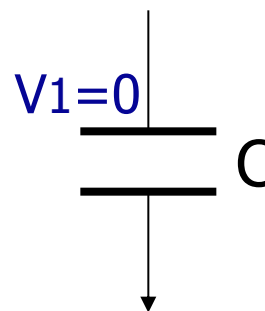
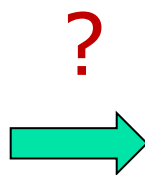
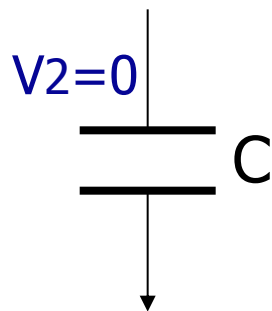
→ スイッチ・エネルギー・ロス $E_{loss} = 0$

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



$$Q = C V$$

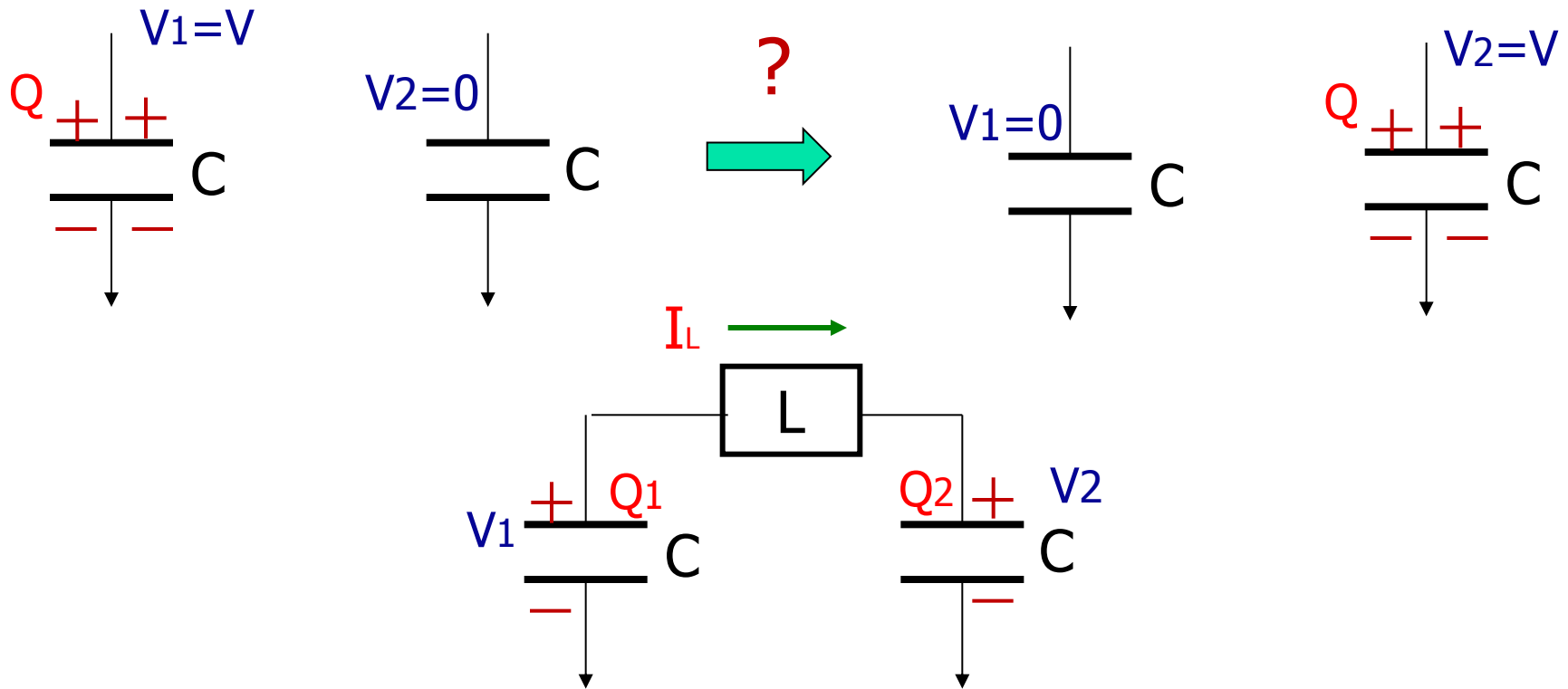


$$Q = C V$$

容量間の電荷伝送

インダクタは優れた受動素子

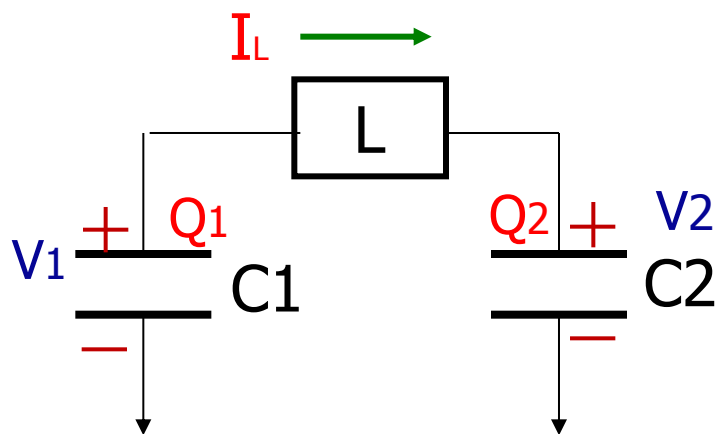
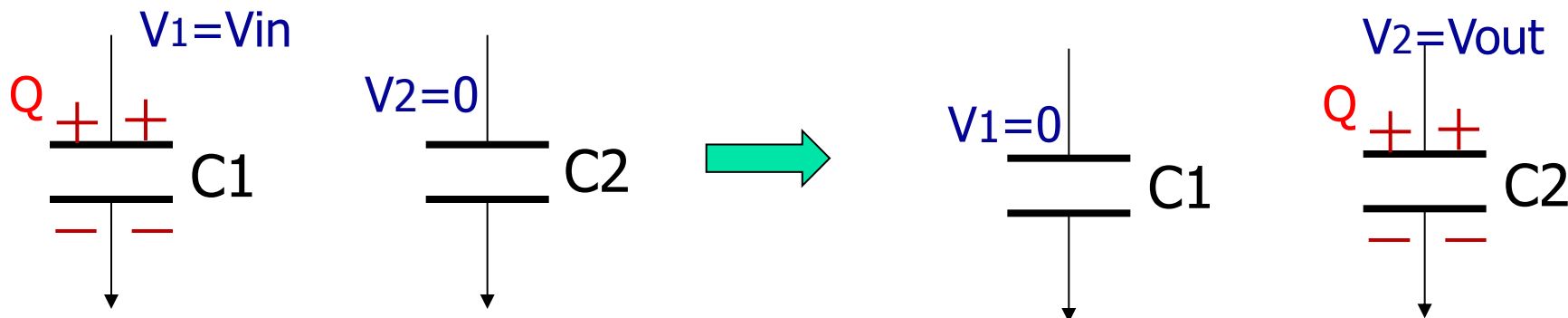
エネルギー損失なしで 左から右は**可能**！



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

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**！

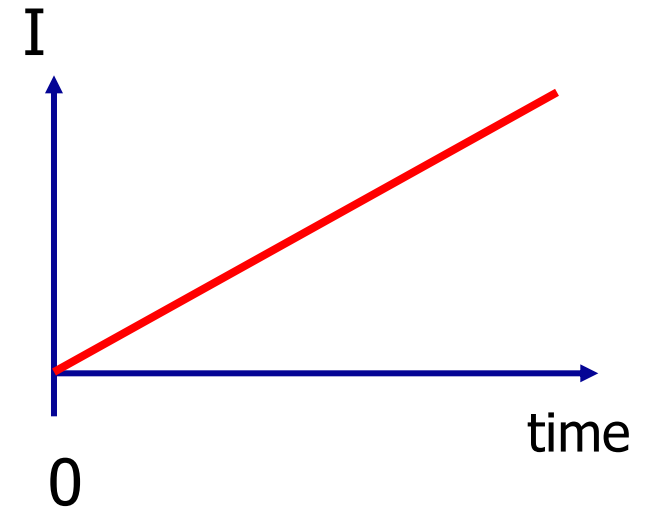
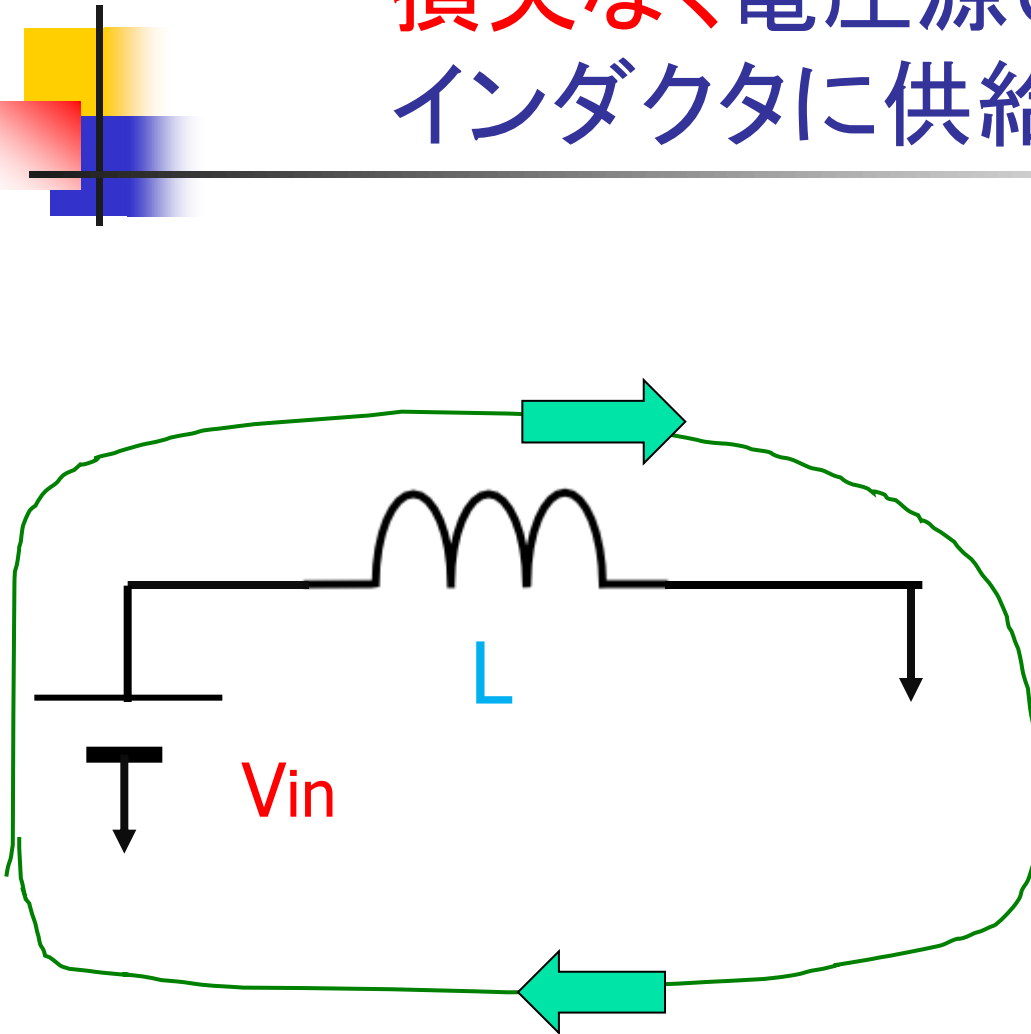


$C1 > C2 \rightarrow V_{in} < V_{out}$
昇圧

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

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

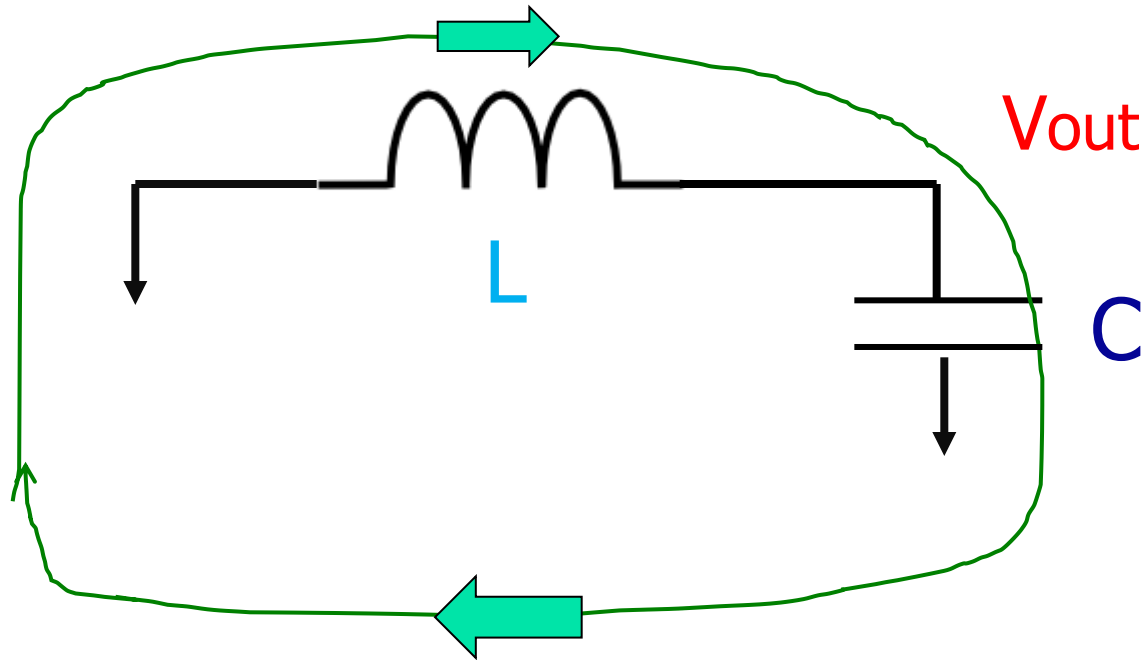


$$E = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{V^2}{L} t^2$$

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





目次

- 電圧源とインダクタ 相性良い
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 相性良い
- 電流源とインダクタ 相性良くない
- インダクタによるエネルギー伝送
- **スイッチ**
- まとめ

理想スイッチは電力損失がゼロ

● 電力損失 $P = V I$

● スイッチオフ

$$I = 0 \longrightarrow P = 0$$



● スイッチオン

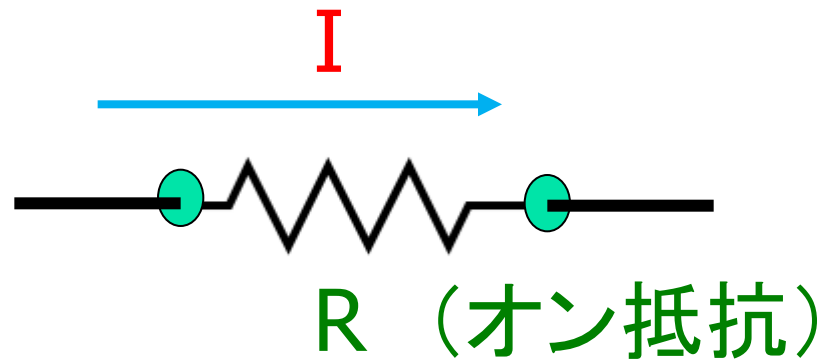
$$V = 0 \longrightarrow P = 0$$



実際のスイッチの電力損失

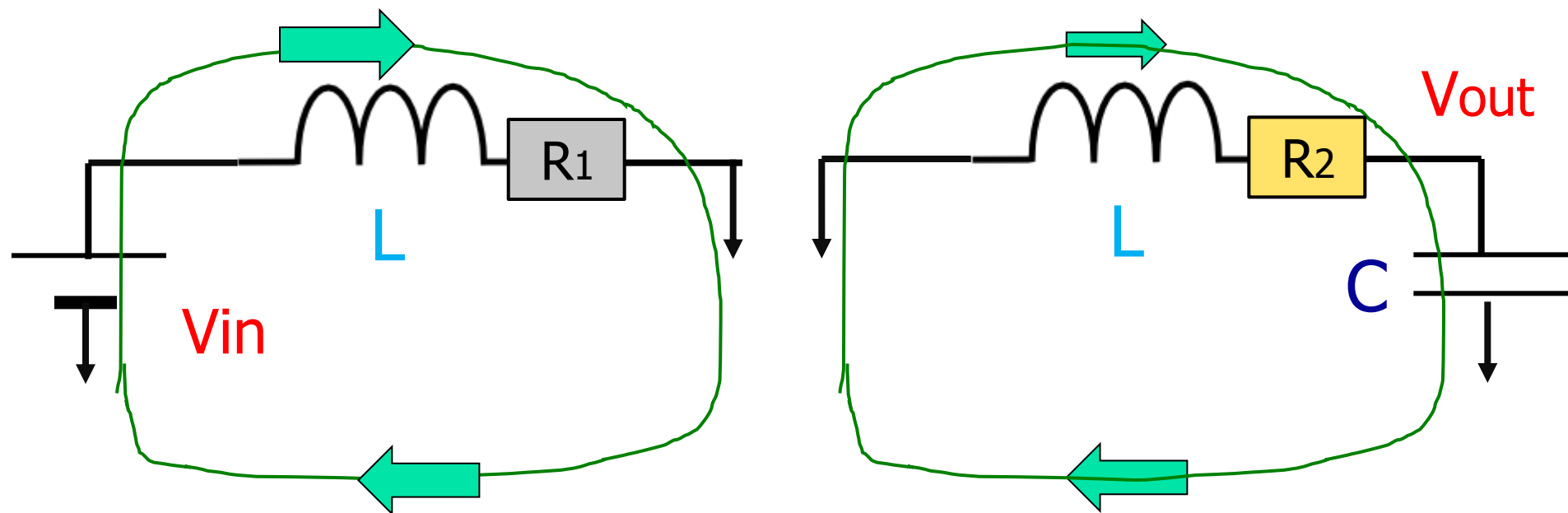
導通損失 (Conduction Loss)

● スイッチオン



導通損失 $P = R I^2$

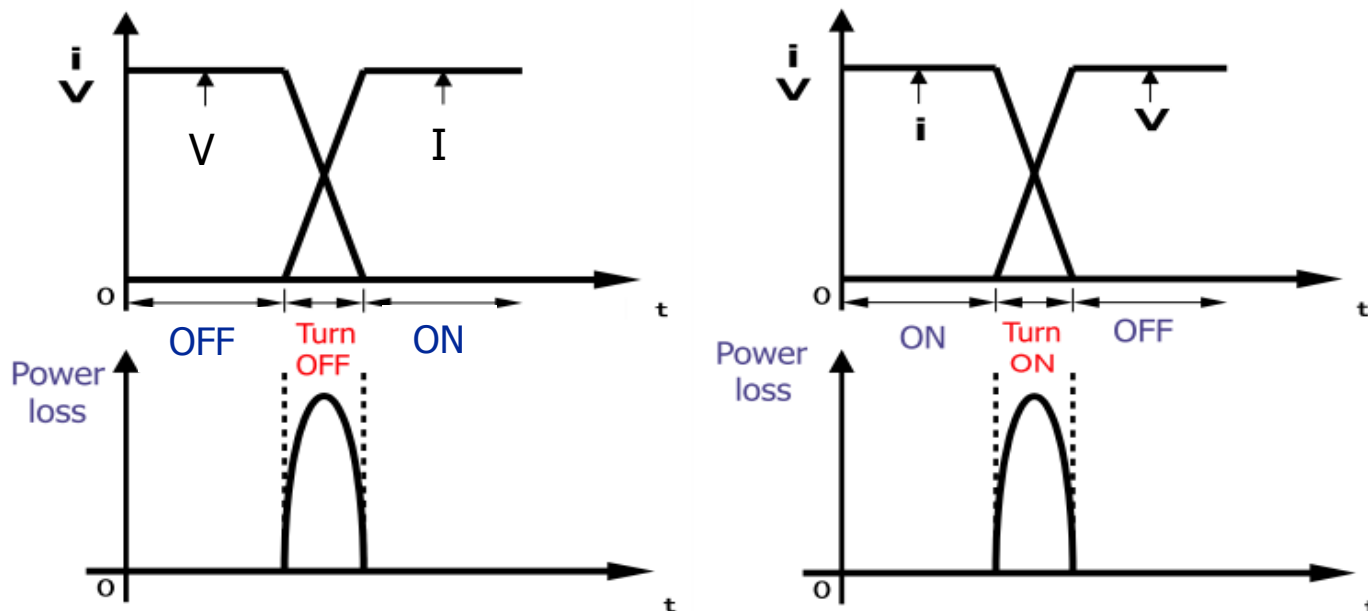
スイッチの導通損失 R1, R2



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)



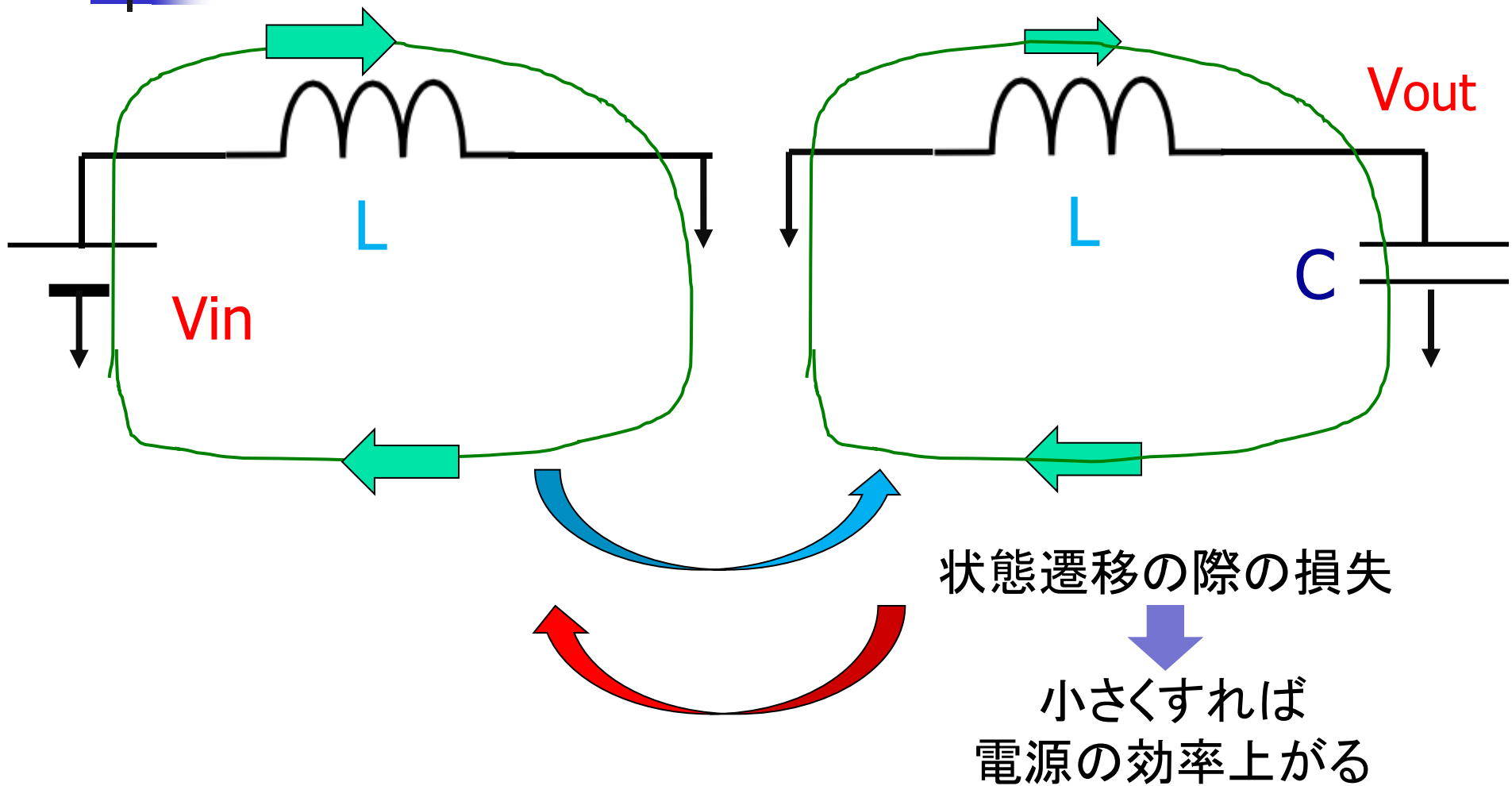
Switch turn OFF

Switch turn ON

高速スイッチングデバイス

→ スwitching損失 小

スイッチング損失





目次

- 電圧源とインダクタ 相性良い
- 電圧源と容量 相性良くない
- 電流源と容量 相性良い
- 電流源とインダクタ 相性良くない
- インダクタによるエネルギー伝送
- スイッチ
- **まとめ**



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。

付録

スイッチング電源回路の研究者より

スイッチング電源の基本は

「直流電圧を一旦高周波電圧に変換し、
その後、高周波成分を除去する」



そのためにはローパスフィルタが必要



「電力を扱うローパスフィルタには
インダクタを使う」と解釈すべき