2020年4月21日(火)

集積回路システム工学

電源回路の基礎

小林春夫
群馬大学大学院理工学府　電子情報部門
koba@gunma-u.ac.jp

下記から講義使用　pdfファイルをダウンロードしてください。
出席・講義感想もここから入力してください。
https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/lecture/lecture.html

Long term thinking

産業革命の歴史

第1次産業革命　(1760-1830年台)

力学　　動力革命

イギリス　　紡績　船舶　鉄道産業へ

第2次産業革命（1865-1890年）

物質科学　　重化学工業革命

ドイツ　アメリカ　　鉄鋼　自動車産業へ

第3次産業革命　(1990-2000年台）

数理科学、デジタル情報革命、インターネット

アメリカ　　通信　コンピュータ　半導体　家電産業

Long term thinking

第4次産業革命が始まりつつある（？）

- 原理：　総合科学　　環境エネルギー革命
  環境エネルギー産業へ　（既存産業の再構築）
- サハラ砂漠での太陽光発電。
  そこからの送電、配電、そして蓄電。
  一社、一国だけではできない。
- 自動車産業　　電気自動車
  ビッグスリー　から　スモールハンドレッドへ
- シェールガス
- 日本では、国の施策

Long term thinking

第4次産業革命が始まりつつある(?)

- スマート・グリッド
- パワー半導体　Si MOSFET, IGBT, SiC, GaN
  パワーエレクトロニクス
- エレクトロニクス、半導体技術・産業
  環境エネルギー技術・産業のキーテクノロジに
  なるストーリーを描くべき
- オーデオ、ゲーム、携帯電話、車、……
  生活を豊かにしてきた。
  環境問題は 「人類に必須」になりつつある。
  「一過性のトレンド、流行り」ではない。

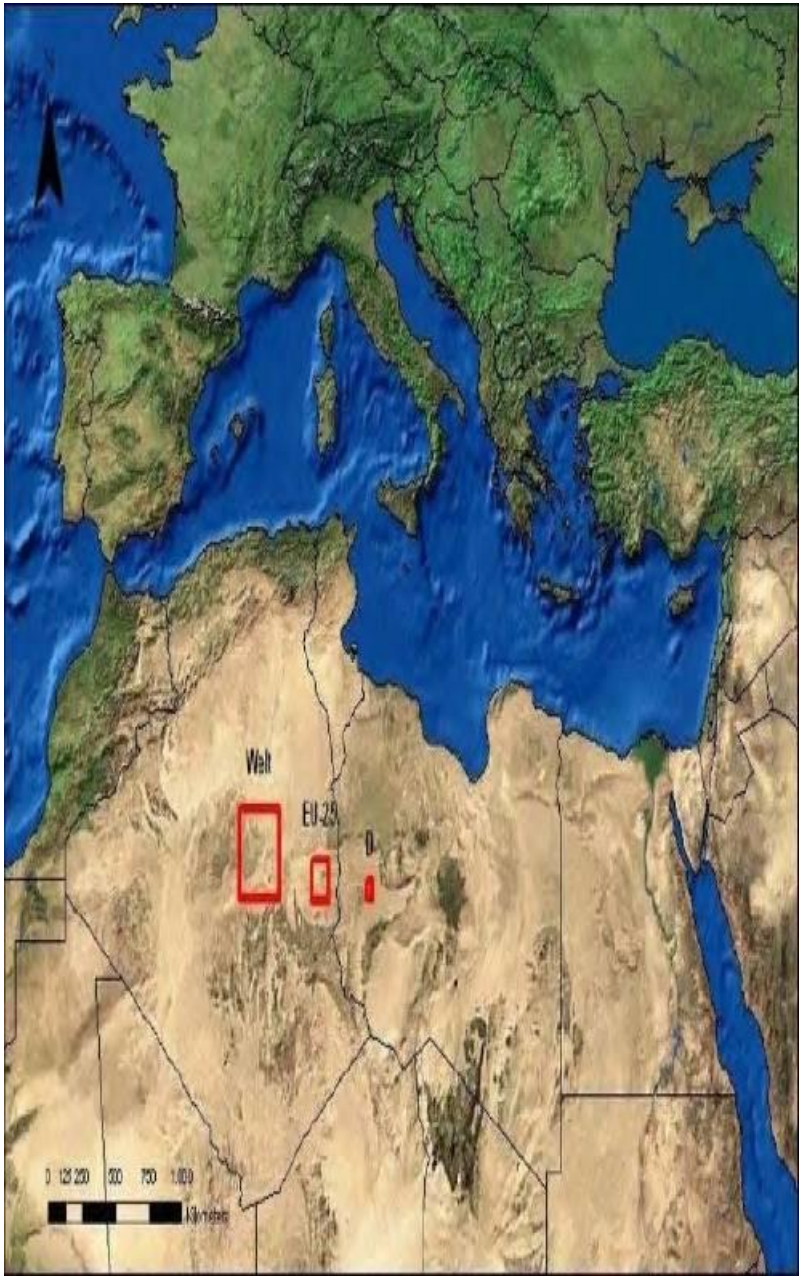
Global thinking

地球規模での発想

砂漠での太陽光発電

全世界, EU25カ国, ドイツの
需要と等しい電力を
太陽エネルギーで発電するのに
必要な面積

「このための
発電, 送電, 変電, 蓄電は
1社、1国ではできない」
（有識者）



電気

① 情報＆信号処理・演算
② 通信
③ エネルギー

3つの側面から非常に扱いやすい物理量

発電 (Electricity Generation)

電力以外のエネルギーを電力へ変換すること
火力、原子力、水力、地熱、太陽熱、太陽光
風力、波力、海流、潮力

電磁誘導、電気化学反応、光起電力効果
ゼーベック効果

変電　(Electric Transform)

- 狭義　交流の電圧変換
- 広義
  - ○　無効電力の調整による電圧の調整
  - ○　周波数変換
  - ○　交流と直流との相互変換
  - ○　直流の電圧変換

など、電力の変換・調整操作全般を意味する

送電　(Electricity Transmission)

直流送電

交流送電

マイクロ波送電

スマートグリッド

無線送電

蓄電 （Electricity Storage)

- 電力を蓄える
- 昼間の太陽光発電による
  電力を蓄えたい。

配電 (Electricity Distribution)

電気を配る（分配する）こと。
電気事業における配電とは、
送電網から変電所を通して受電した電力を
需要家に供給するため、配電網システムの
構築とその運用を行う。
電線路の一部を形成する。

DC-DC 変換回路

シリーズレギュレータ

スイッチングレギュレータ

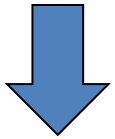
1・非絶縁型昇圧チョークコンバータ
2・非絶縁型降圧チョークコンバータ
3・絶縁型フォワード型（降圧）
4・絶縁型フライバック（超高圧昇圧）
5・ハーフブリッジ型
6・フルブリッジ型

AC-DC変換回路

- 交流電流から電圧の異なる直流電流へ
  変換する整流回路
  （電子回路は直流電流を利用）
- 交流電流の家庭用電源から給電のために、
  AC-DC変換回路を使用。
- AC-DC変換回路は機器に内蔵、または
  ACアダプタとして外部に付属。
- 当初はサイリスタ半導体素子使用
  最近はトランジスタ使用

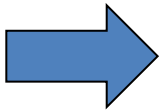
電源回路の技術開発

電源回路の数は膨大、長い間使われる。



開発した技術は
社会的、産業的インパクト大。

エナージーハーベスト



技術者の腕自慢ではなく、
誰もがやってほしい技術

バージニア工科大学訪問

電源回路研究のメッカ

左から2番目　Prof. Fred Lee（Virginia Tech.)
一番左　　恩田謙一先生（当時　群馬大客員教授、ルネサス）

バージニア工科大学はどこ？

米国バージニア州ブラックスバーグ

バージニア工科大学キャンパス（1）

Virginia Polytechnic Institute and State University

バージニア工科大学キャンパス（2）

バージニア工科大学キャンパス（3）

バージニア工科大学キャンパス（4）

省エネルギー化時代の エコ回路システムの基礎

群馬大学　理工学府　電子情報部門
小林春夫
koba@gunma-u.ac.jp

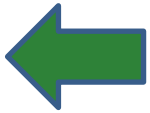
本チュートリアルの目標

アナログ系電子回路の分類

① アナログ回路
(ADC, オペアンプ等)

② 高周波回路

③ パワー系回路
（電源回路等）



3つの間に障壁

かつて
アナログ回路と
高周波回路の
ギャップが議論

アナログ回路技術者・研究者が
電源回路を理解できるようになる。

講演者が考える

エレクトロニクスの理念

エゴとエコ

- 人間社会の利便性の向上　(egoism)
- 関連産業の発展 (economy)
- 環境への貢献 (ecology)

eco の語源:「家」

バランスをとりながら、3者に寄与。

「技術で世の中に喜びを提供する」（本田宗一郎）
「道徳を忘れた経済は罪悪、
経済を忘れた道徳は寝言」（二宮尊徳）

お話しする内容

- アナログ回路研究者の
  電源回路技術理解の試み
- 容量とスイッチから構成する電源回路
- インダクタを用いる電源回路
- まとめ
- 付録1
- 付録2

お話しする内容

- アナログ回路研究者の
  電源回路技術理解の試み
- 容量とスイッチから構成する電源回路
- インダクタを用いる電源回路
- まとめ
- 付録1
- 付録2

電源回路

100V AC

1.5V DC

12V DC

電源回路

電圧を所望の電圧に変換し供給する回路

DC-DCコンバータ
直流入力直流出力

AC-DCコンバータ
交流入力直流出力

DC-ACコンバータ
直流入力交流出力

AC-ACコンバータ
交流入力交流出力

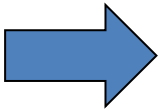
携帯機器の電源回路: 一つの電池から複数の電源電圧を生成

電源回路の技術開発

電源回路の数は膨大、長い間使われる。

開発した技術は
社会的、産業的インパクト大。

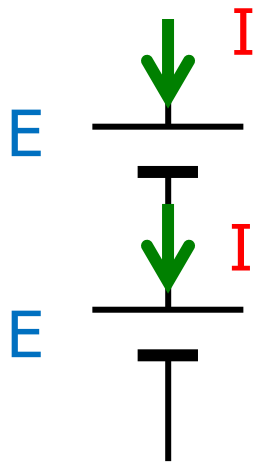
エナージーハーベスト



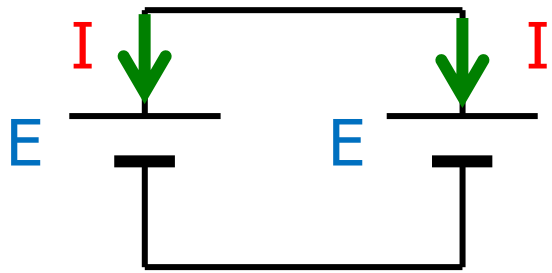
技術者の腕自慢ではなく、
誰もがやってほしい技術

電力(パワー)

- パワー (P) ＝ 電圧 x 電流



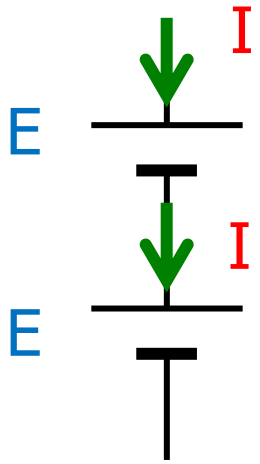
P = 2E x I



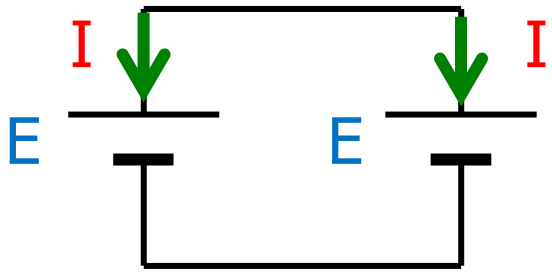
P = E x 2I

降圧型電源回路

- パワー (P) ＝ 電圧 x 電流



P = 2E x I

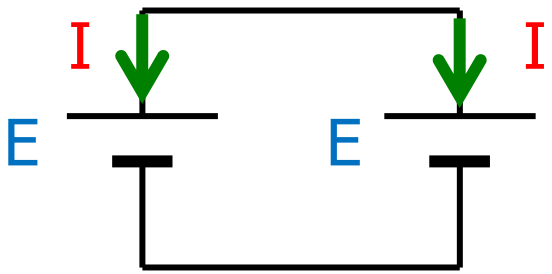


P = E x 2I

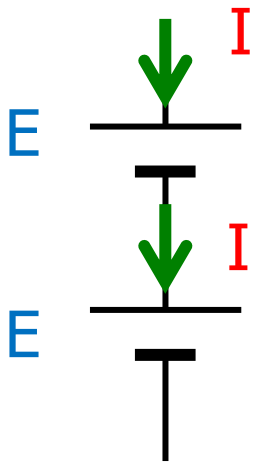
Buck Converter (降圧型DC-DC変換器)
出力電圧 Vout < Vin、 出力電流 Iout > Iin

昇圧型電源回路

- パワー (P) ＝ 電圧 x 電流



P = E x 2I



P = 2E x I

Boost Converter (昇圧型DC-DC変換器)
出力電圧 Vout > Vin、 出力電流 Iout < Iin

電源回路のデバイス

- パワーデバイス（スイッチ）　FOM = Rds・Qg
  - Vds=0 近辺でのRds
  - スイッチング速度
- ダイオード
- 制御回路用半導体デバイス
- コンデンサ
- インダクタ
- トランス

のすべてが重要

パワー系回路、電源回路の基礎となる法則・学問

オームの法則

キリヒホッフの法則

に加えて

熱力学第１法則　（エネルギー保存則）

熱力学第２法則　（熱はエネルギーの墓場）

電気・電子に加えて　磁気も必要

電気電子工学分野の科目

「電気回路」の講義内容

パワー系回路の基礎

「電子回路」の講義内容

アナログ回路の基礎

電源回路の基礎技術

- 回路
- 制御、モデリング
- デバイス （半導体、L、C)

  パワー半導体に加え

  L，Cの受動部品も重要

電流と電圧のバランス

アナログ回路と電源回路の違い

国際学会から

- 電源回路の国際会議での発表

  ➡ 多くの国、多くの機関からの発表

- アナログ回路の国際会議での発表

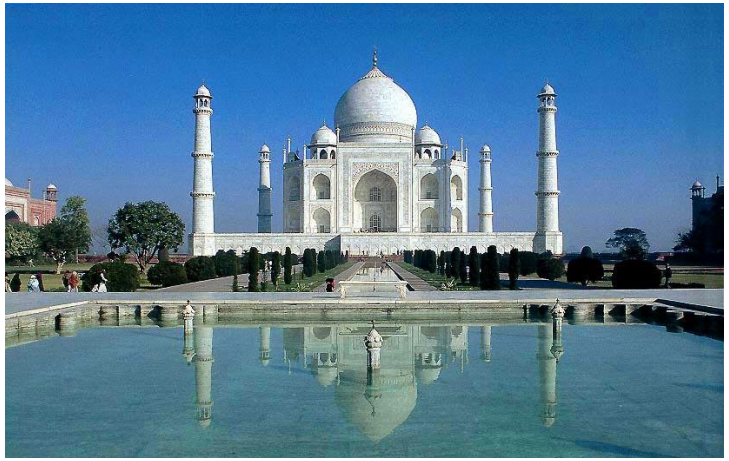
  ➡ 限定されたグループから

アナログ回路と電源回路の違い

回路設計の感覚が異なる

- アナログ回路の美
  バランス、対称性

美は対称性にあり



付録参照

- パワー回路
  対称であることにはこだわらない

C,L 電圧、電流の双対性

- パワー　＝　電圧　x　電流

容量　C	インダクタ　L
$I = C\,(dV/dt)$	$V = L\,(dI/dt)$

インダクタ　L

高周波回路: 周波数領域で考える

　インピーダンス jwL

　高い周波数で大、位相が90度回る

電源回路:　電流を時間領域で考える。

　エネルギー蓄積素子

アナログ回路:　Lは使用しない。

L はオーバーシュートを引き起こす

- R, C回路　1次系

  ステップ応答

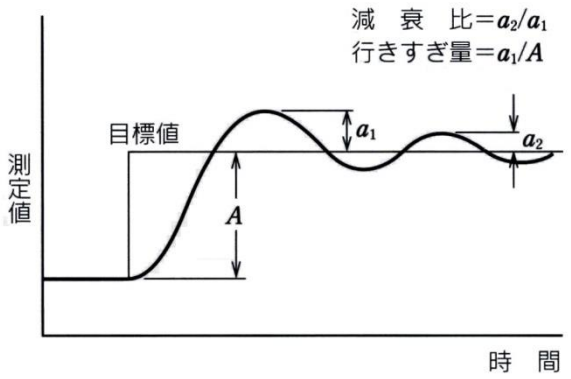
  ➡ 振動的にはならない。

  （オーバーシュートを生じさせない）

- L, C, R 回路　2次系

  ステップ応答

  ➡ Lが強ければ振動的になる。



トランジスタの役割を大別

MOS動作領域

① 信号増幅 (飽和領域)

② 電流源 (飽和領域)

③ 可変抵抗 (線形領域)

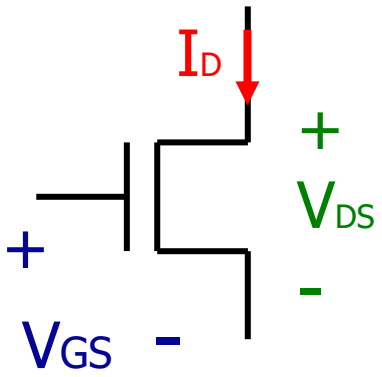
Transistor = Trans + Resistor

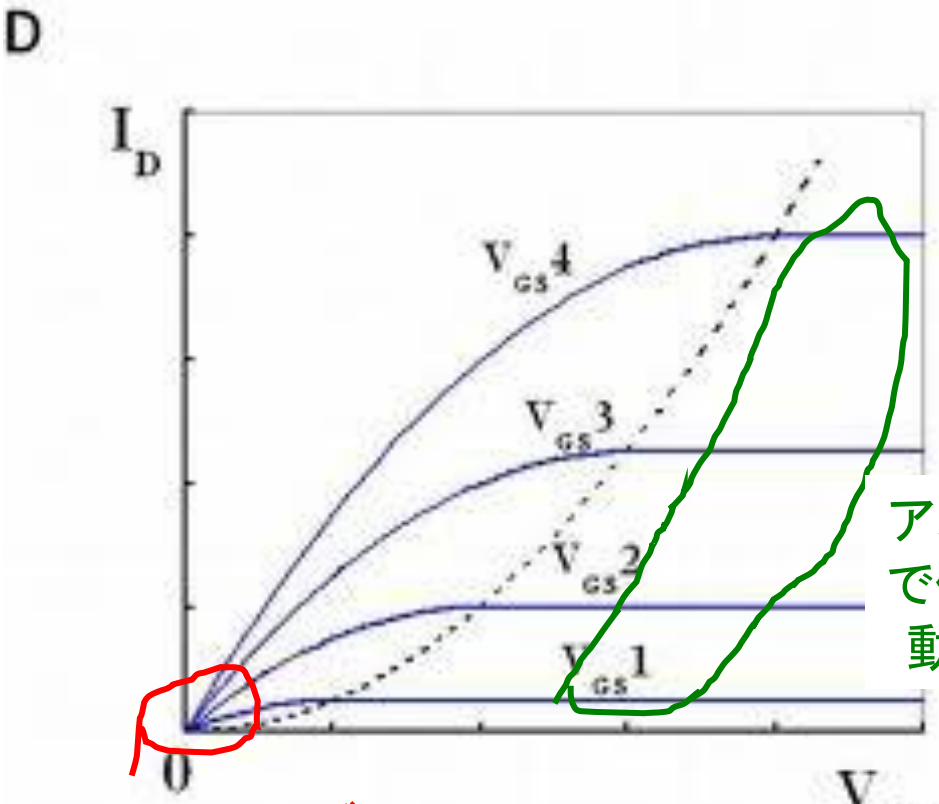
Linear Regulator

④ スイッチ (線形領域@Vds = 0)

Switching Regulator

使用するMOS動作領域





「効率」ではなく「損失」で考える

「電源効率を96% から98% に」

⇒ 大したことない？

効率96% → 損失4%

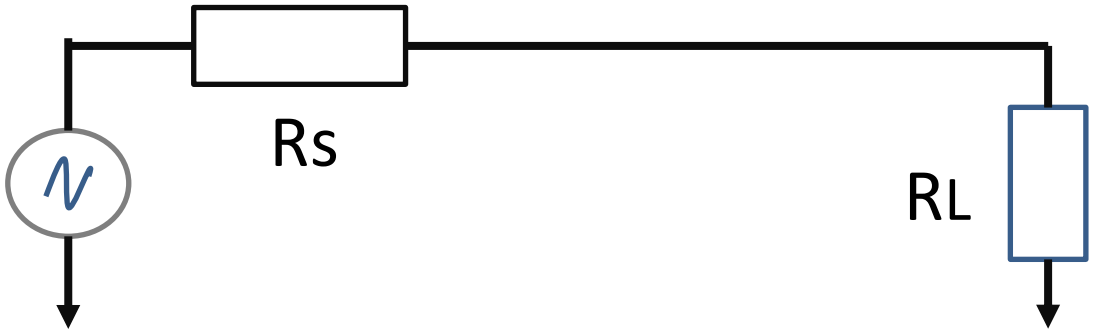
効率98% → 損失2%

「損失を半分（4%から2%）にする」

⇒ 非常に大きな効果

電気信号の伝達

電圧



受信電圧最大

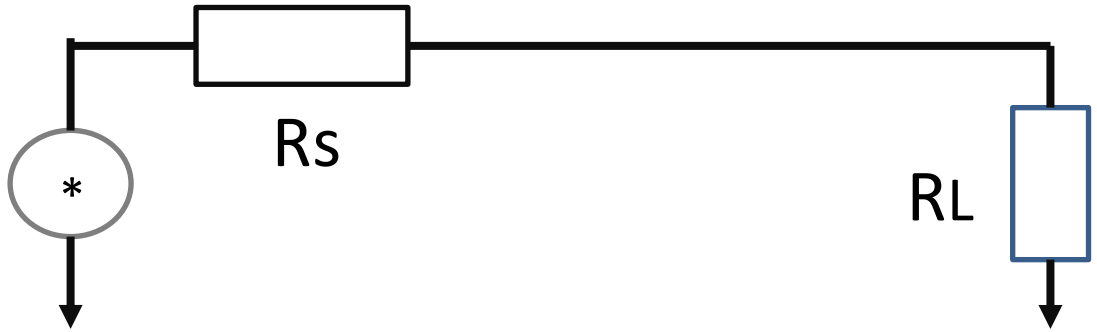
Rs << RL

電流

受信電流最大

Rin >> RL

電力



受信電力最大

Rs = RL

電子回路技術の流れ

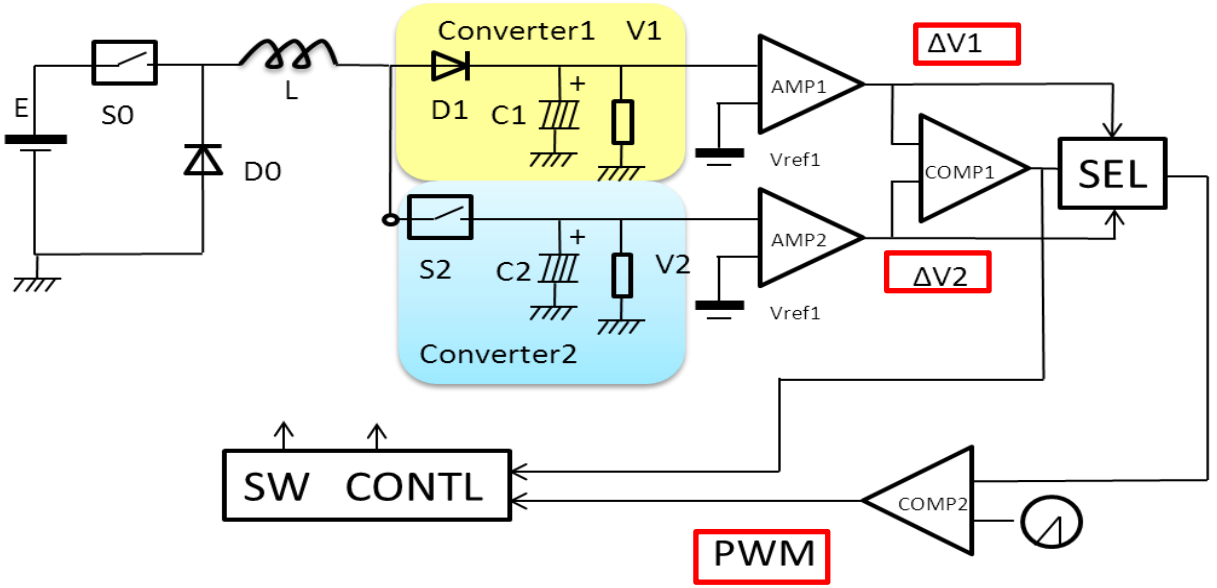
能動デバイスの性能向上、
回路技術の進展により

受動素子を能動素子で置き換える、小さくする
　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
- エネルギー蓄積素子（L, C）
- 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

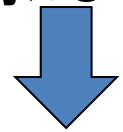
（LEDは寿命長い、電解コンデンサは短い）

お話しする内容

- アナログ回路研究者の
  電源回路技術理解の試み
- **容量とスイッチから構成する電源回路**
- インダクタを用いる電源回路
- まとめ
- 付録1
- 付録2

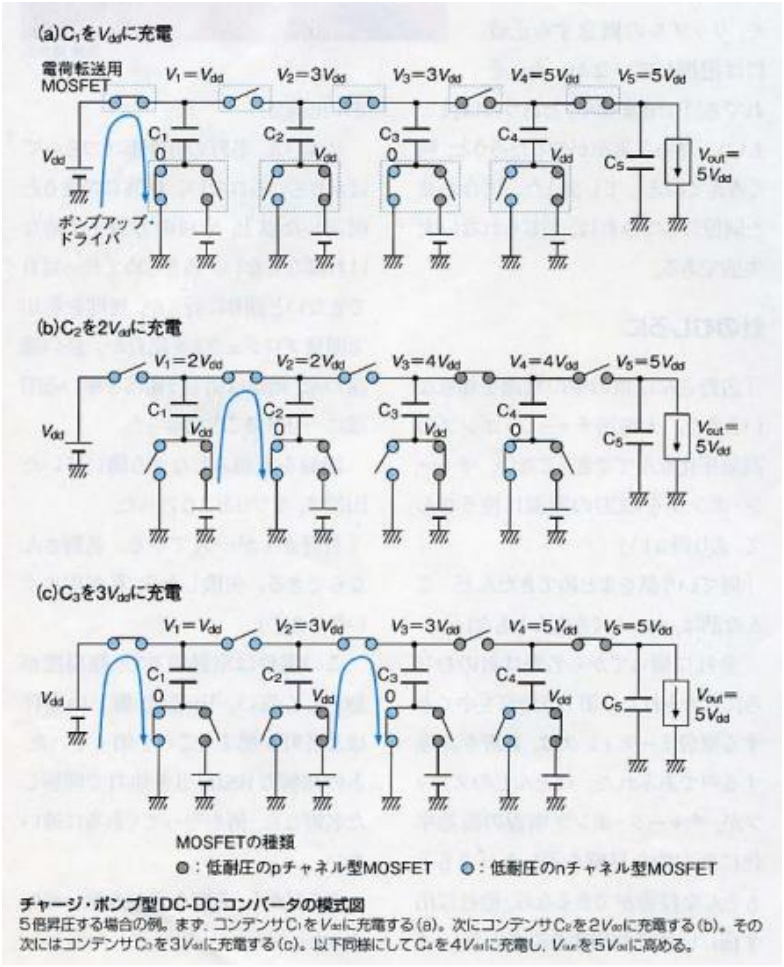
モチベーション

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？

（15年以上前）三洋電機との チャージポンプ電源回路共同研究



無名の偉人伝（名野隆夫氏）日経エレクトロニクス

https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2013/nikei070924_myono.pdf

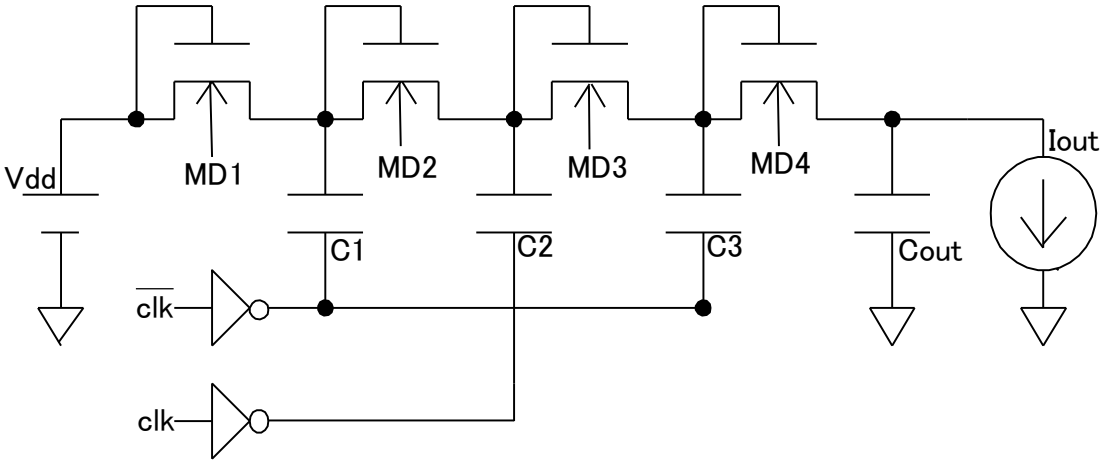
チャージポンプ回路とは

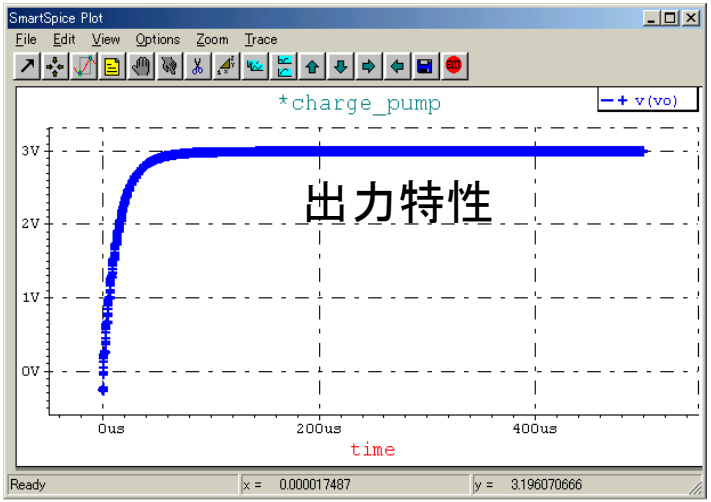
- 供給電源電圧より高い電圧を発生。

（例えば 入力電源電圧3V　出力電圧15V）

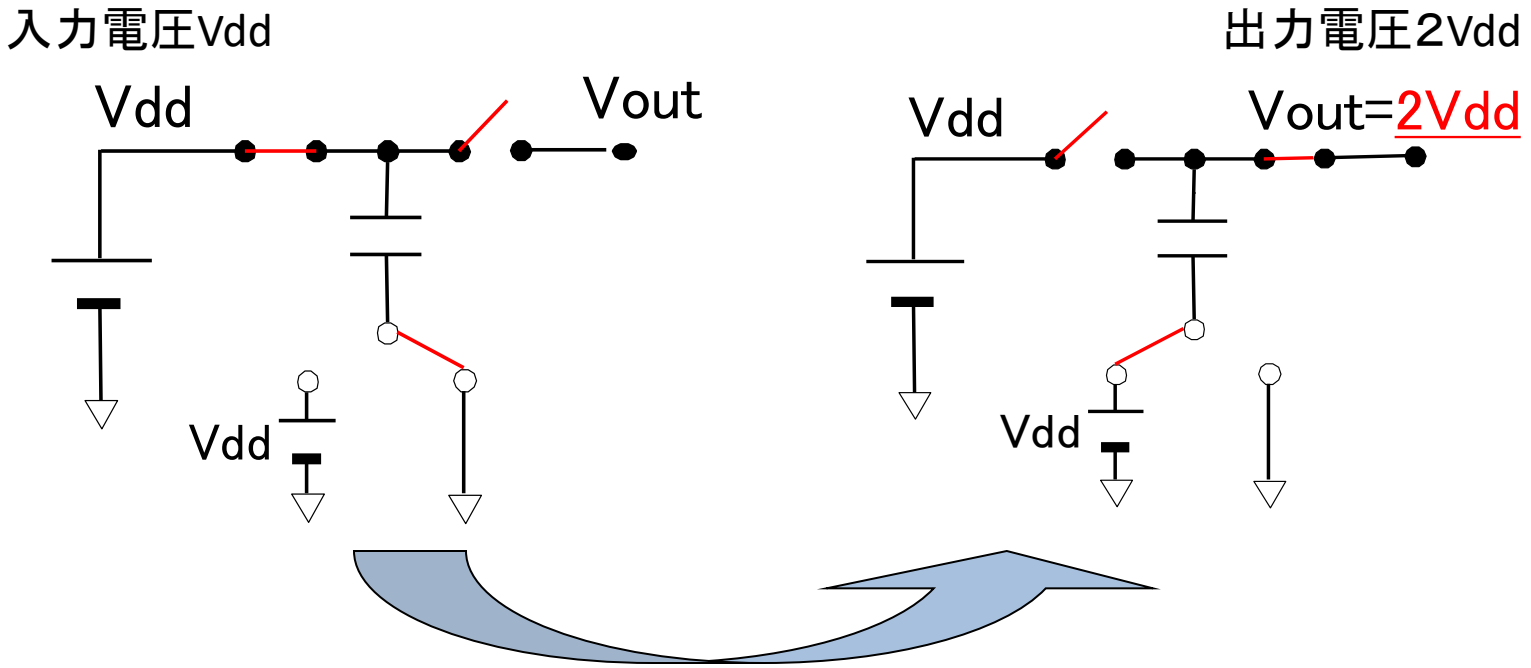
- 多数のコンデンサによる電荷の積分を、
  トランジスタ･スイッチやダイオードで切り替えることで実現。

Dickson charge pump回路（4段）





昇圧の原理



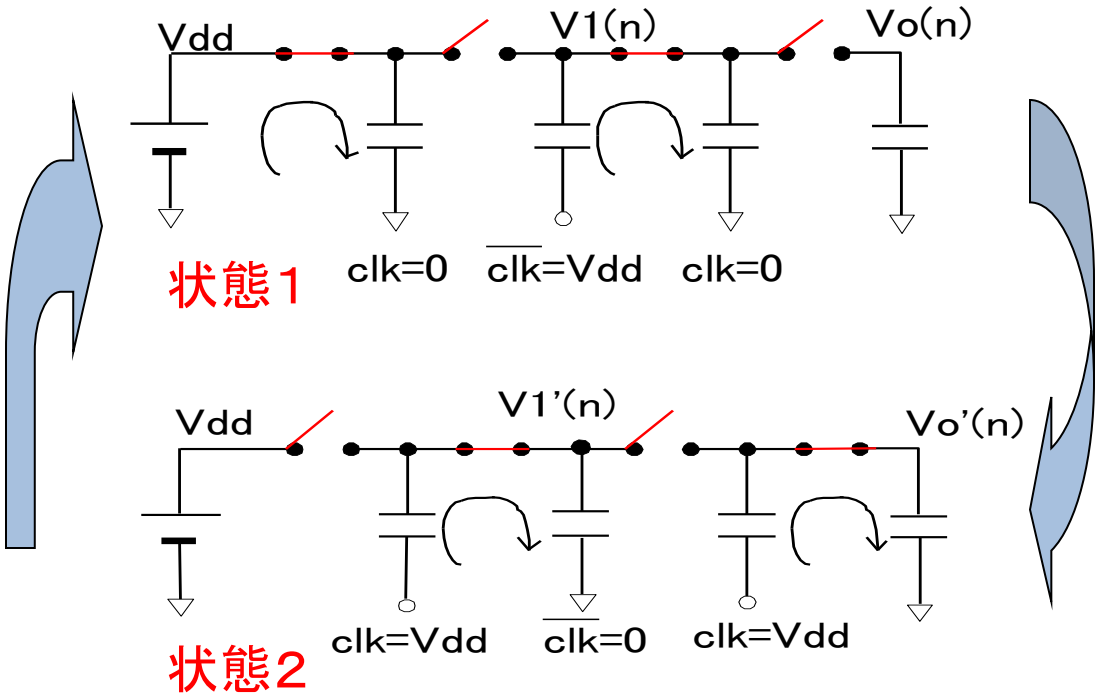
3つのスイッチの切り替えによりVout=2Vddを実現

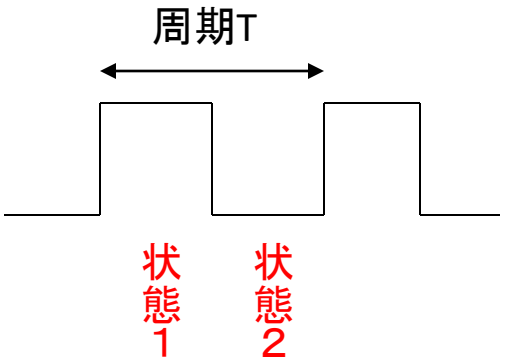
3段チャージポンプ回路は昇圧回路4つを組み合わせたもの

入力電圧Vdd → 出力電圧4Vdd（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)=Vdd
出力:Vo → 4Vdd (定常状態)





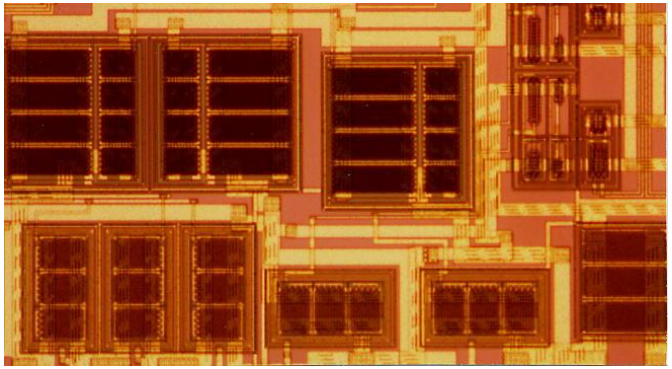
この1サイクルの動作の繰り返しにより
左から右へと電荷を運び昇圧する

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

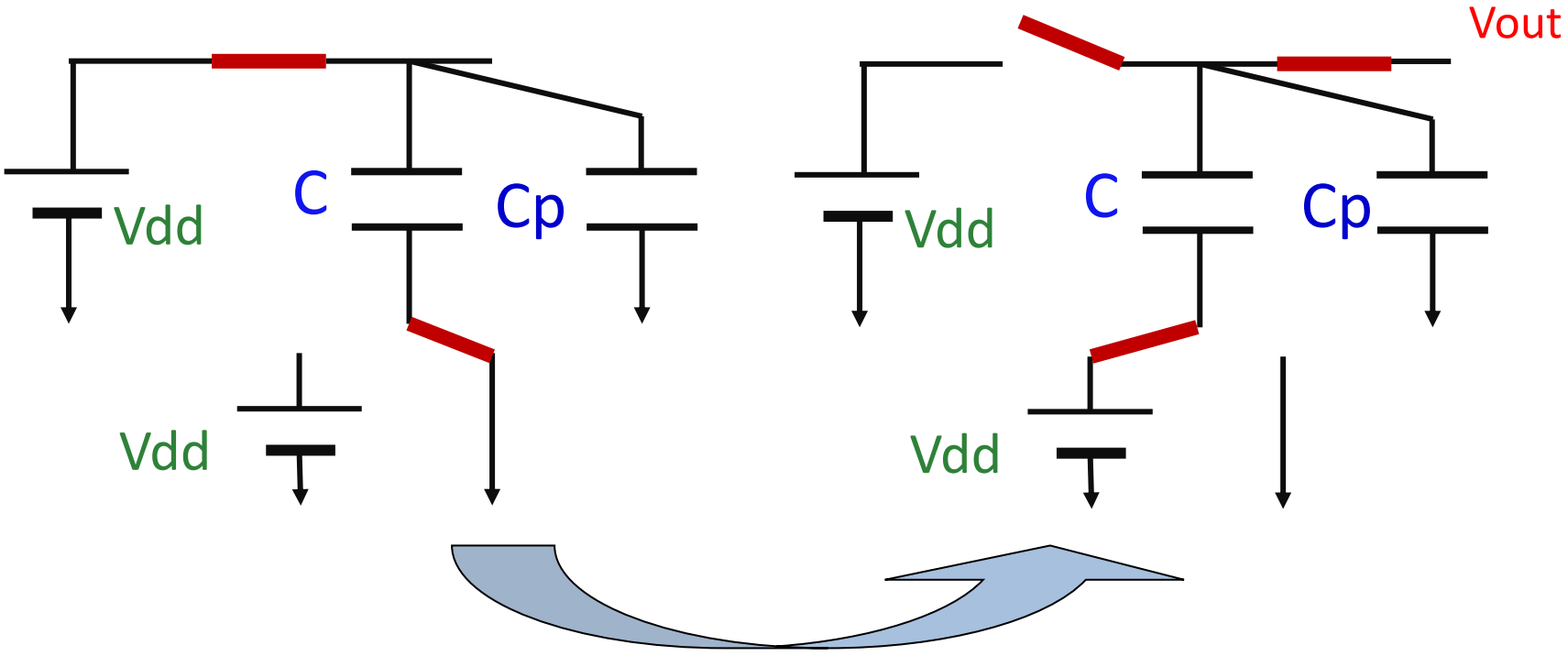
従来は　LSI内で不揮発性メモリ回路用の
高い電圧（ただし電流は微小）を
簡単に発生するために使われる

電流を大きくとるためには？
高い効率を得るためには？



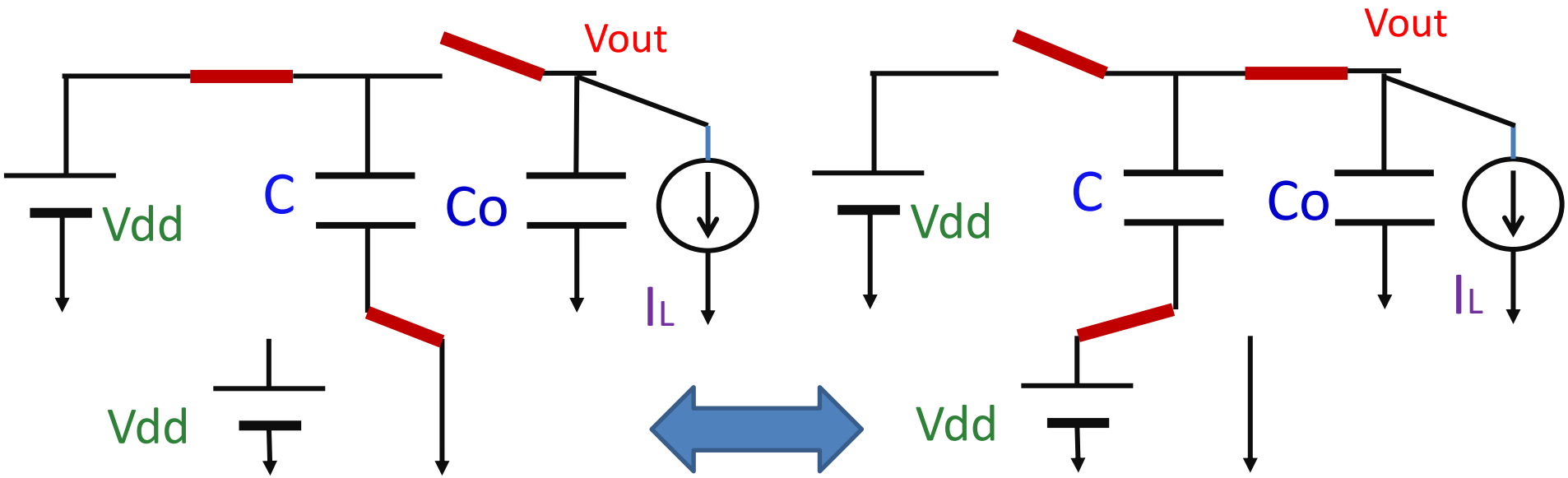
三洋電機で開発した
チャージポンプ電源回路
チップ写真

なぜ
Cp（内部ノードとグランド間の寄生容量）により電力損失が生じるのか



出力容量Co が大きいほど
周波数fが高いほど

高効率

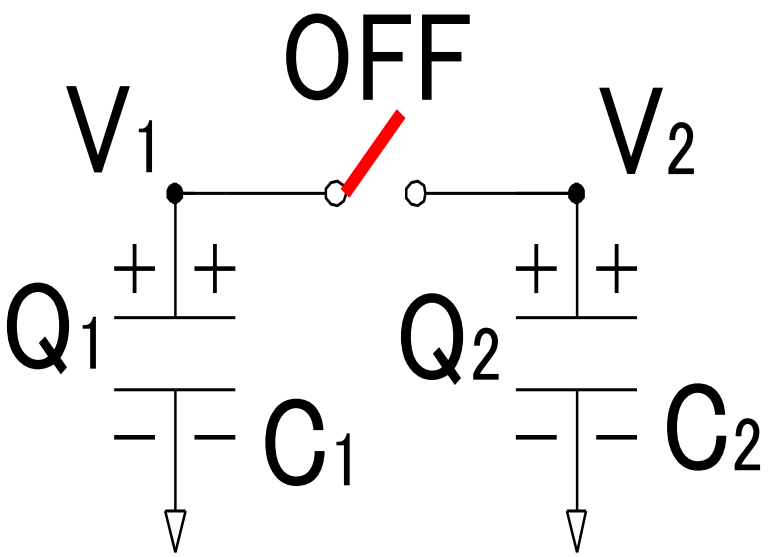


周波数　f

スイッチング損失は無視

I_L（後段回路の）負荷電流

スイッチ　OFF ⟹ ON



● スイッチ OFF 時

電荷：

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1$$

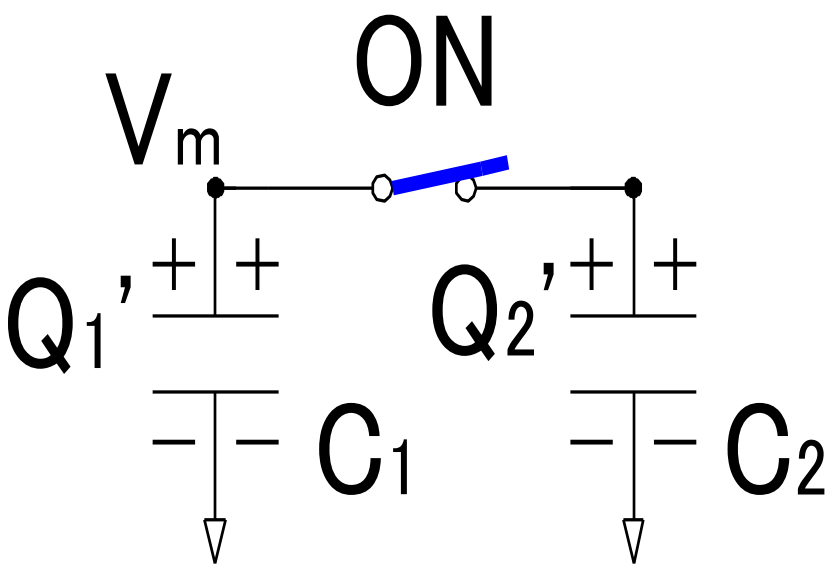
$$Q_2 = C_2 \cdot V_2$$

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　$Q_1' + Q_2'$

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

● 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

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

● $V_1 = V_2$ 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　$E_{loss} = 0$

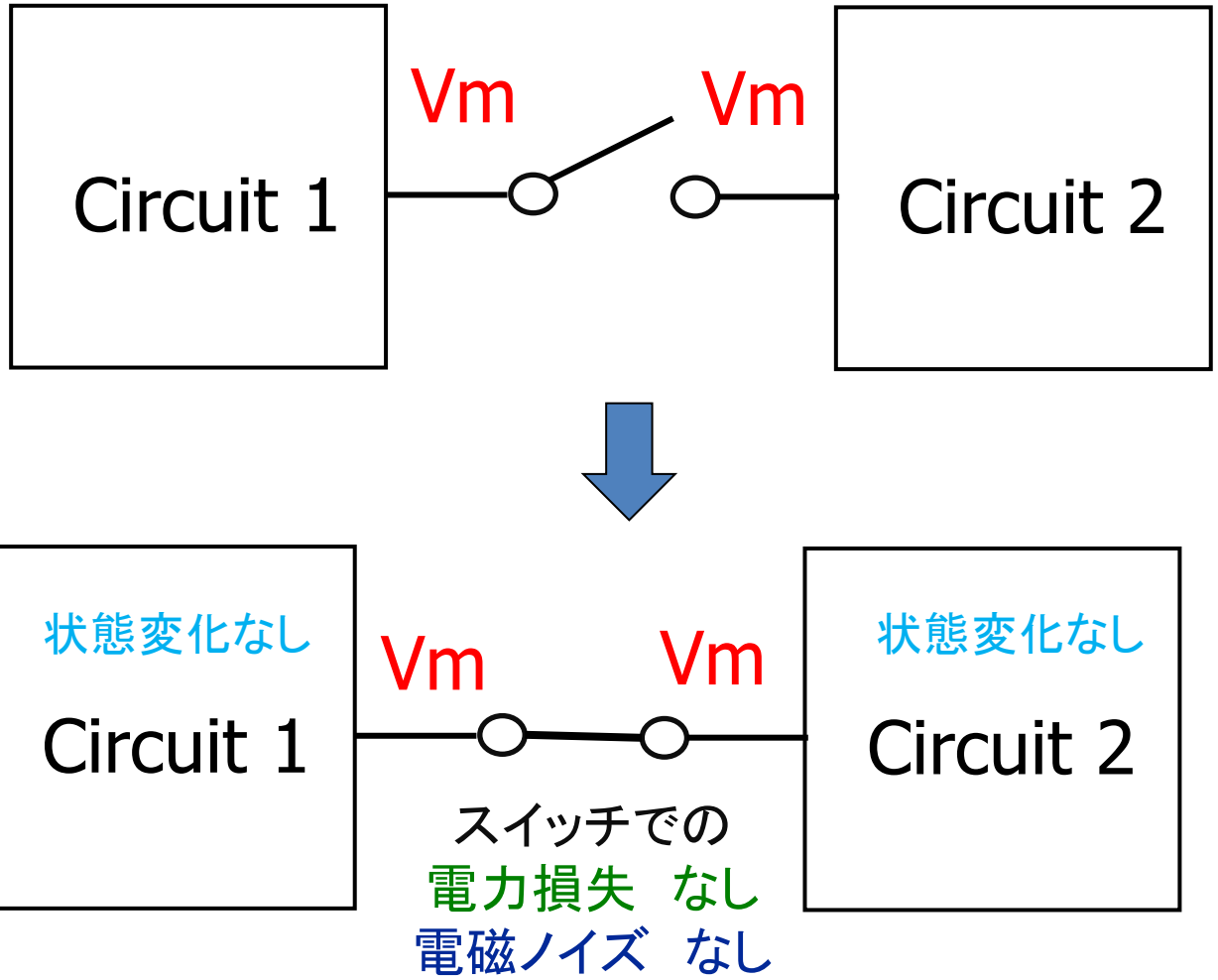
ゼロ電圧スイッチング
(Zero Voltage Switching：ZVS)

状態を変化せずにスイッチをオン

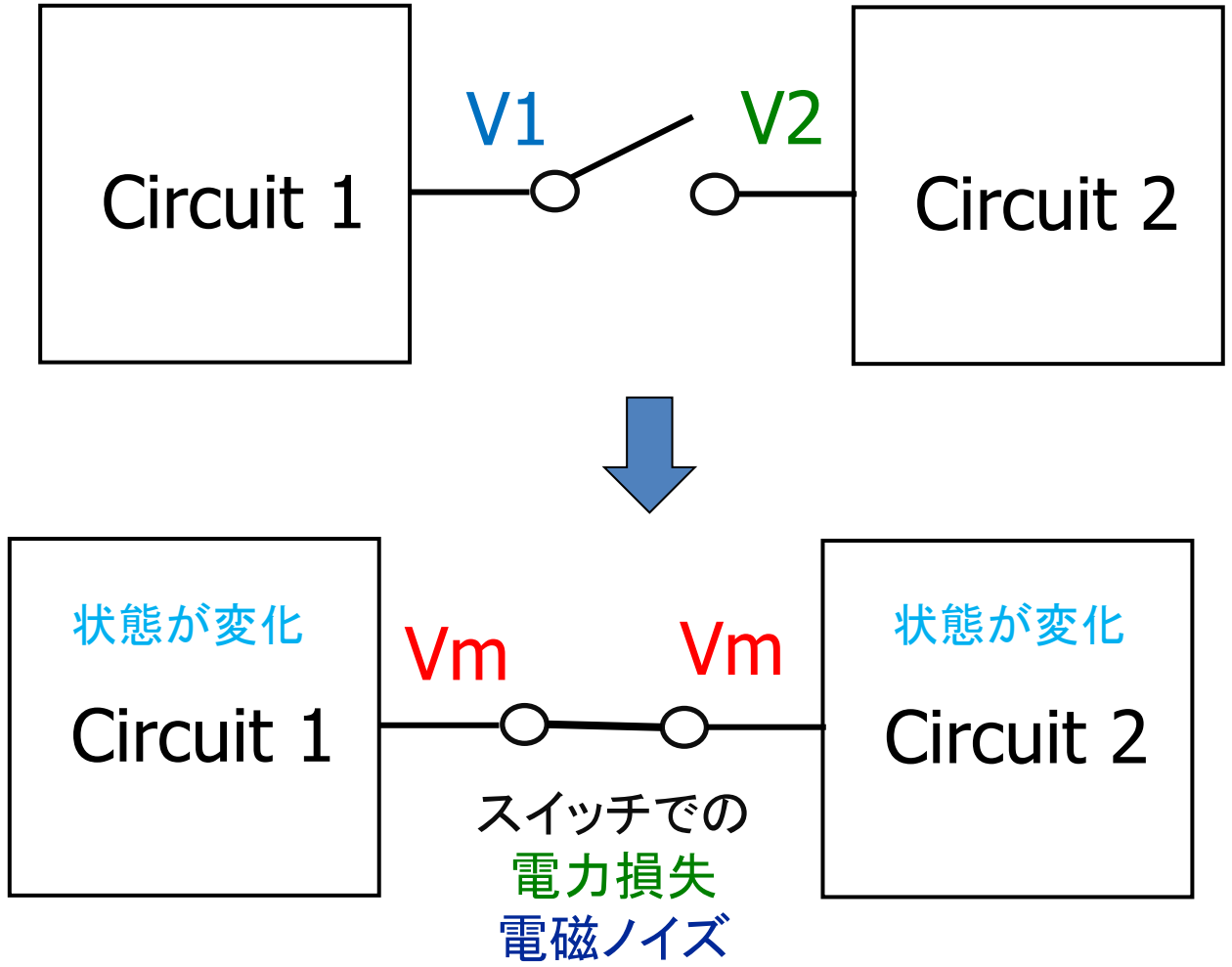
誰もきがつかないように
ドアを開ける
(ドアの前で待ち人なしのときに
ドアを開ける)

ZVS (Zero Volt Switching)

V1 = V2 で スイッチオン



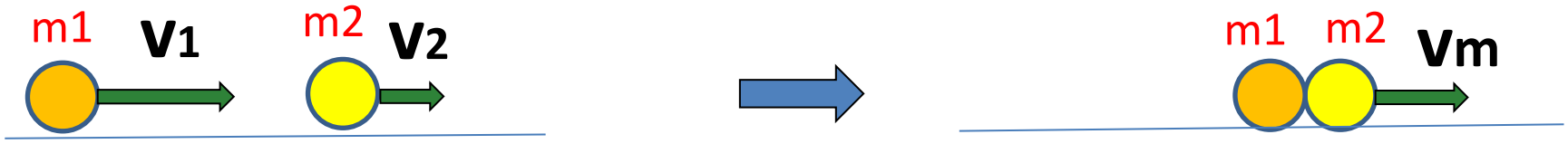
V1 ≠ V2 で スイッチオン



力学問題との相似性

2つの物質の衝突問題

電荷保存則 ⟺ 運動量保存則



スイッチオフ時：　電荷エネルギー　E1

スイッチオン時：　電荷エネルギー E2a ＋ 熱エネルギー E2b

$$E1 = E2a + E2b$$

衝突前：　運動エネルギー　E3

衝突後：運動エネルギー　E4a ＋熱エネルギー E4b

$$E3 = E4a + E4b$$

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　　$I_1+I_2+..+I_N=0$

時間積分

- 電荷保存則　　$Q_1+Q_2+..+Q_N=$一定

- 多質量系　運動方程式（外力なし）

$$m_1\,\mathbf{a_1} + m_2\,\mathbf{a_2} +.. + m_N\,\mathbf{a_N} = \mathbf{0}$$

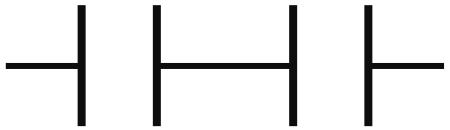
時間積分

- 運動量保存則

$$\mathbf{p_1} + \mathbf{p_2} + ..+ \mathbf{p_N} =$$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
  m1, m2 より小さくない
- 容量2つ　直列結合すれば
  C1, C2 より小さい



C_1　　C_2

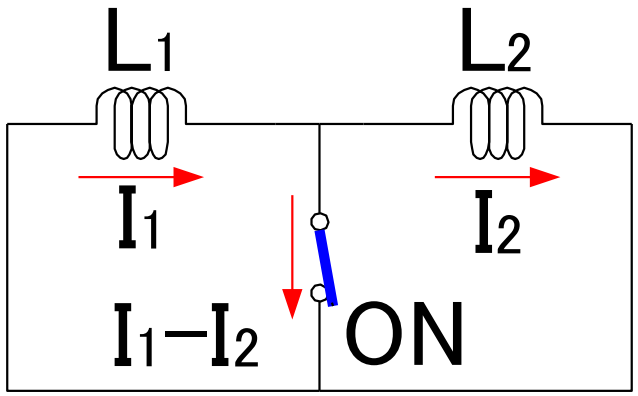
直列結合容量 < C_1, C_2

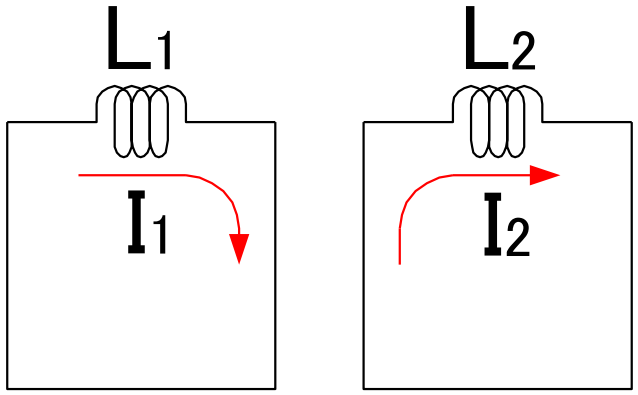
北森俊行 「電気回路論とアナロジー」 応用科学学会誌
特集　電子回路研究　vol.24, no.1, pp.5-7 (2011)

https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2013/3-14-ouyoukagaku.pdf

双対問題

スイッチ　ON ⟹ OFF





● スイッチ ON 時

磁束：

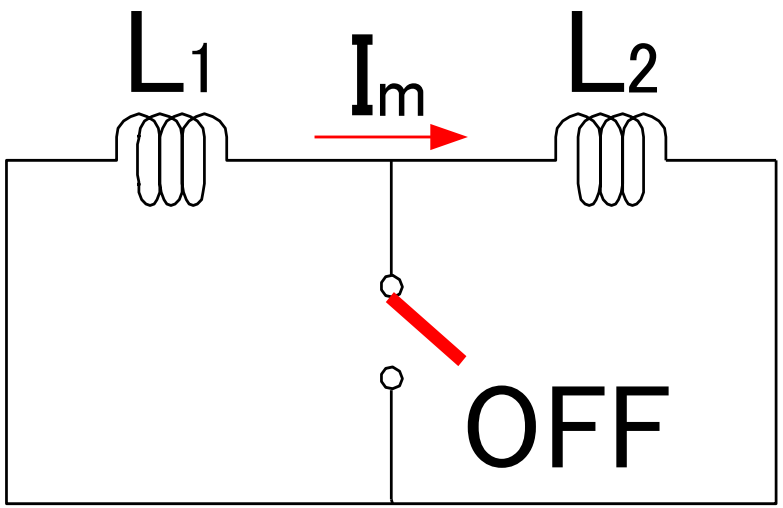
$$L_1 \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2$$

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 ⟹ 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　$(L_1 + L_2) I_m$

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

● 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

$$E_{loss} = E - E'$$

$$= \frac{1}{2}\frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}(I_1 - I_2)^2$$

● $I_1 = I_2$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)

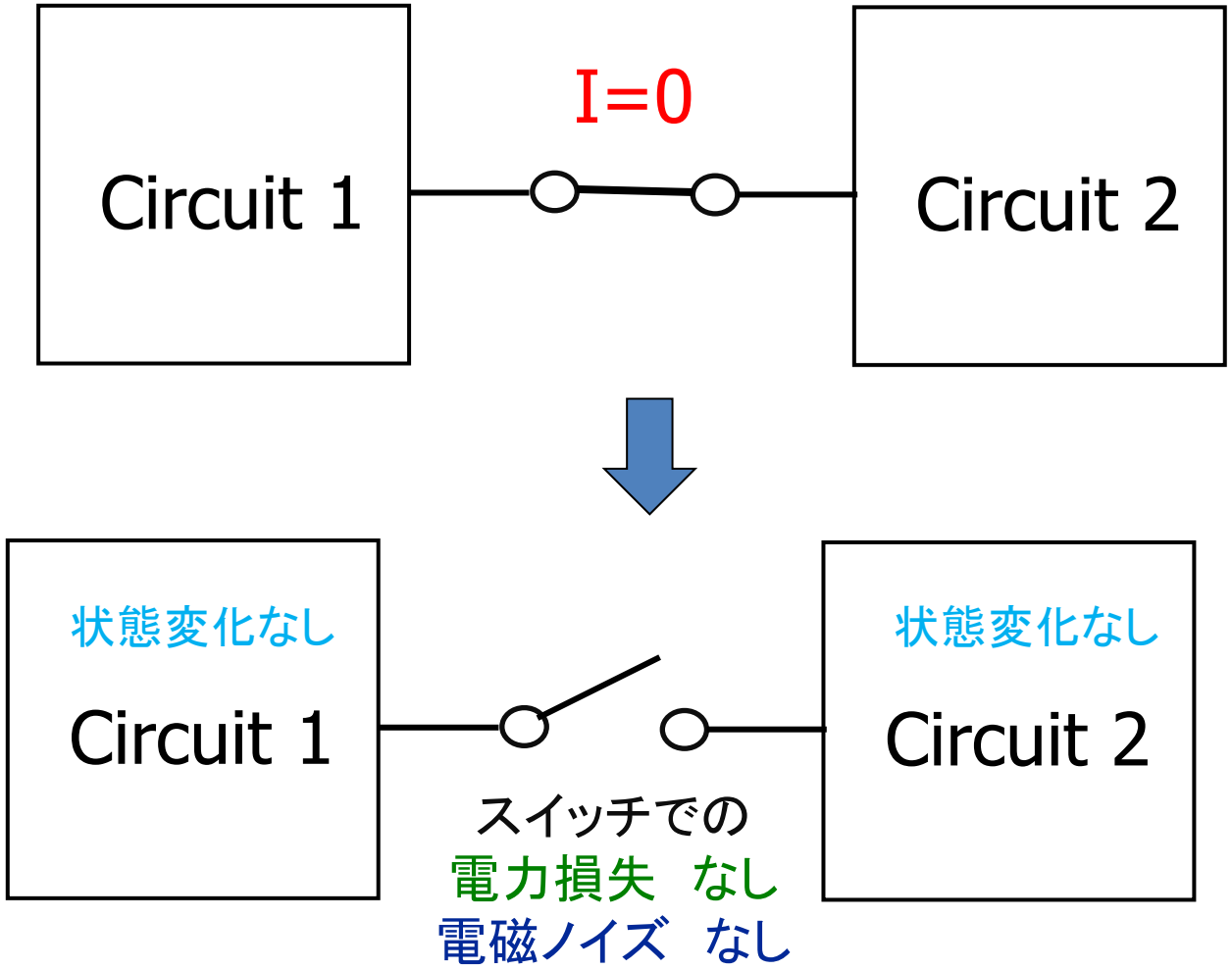
状態を変化せずにスイッチをオフ

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）

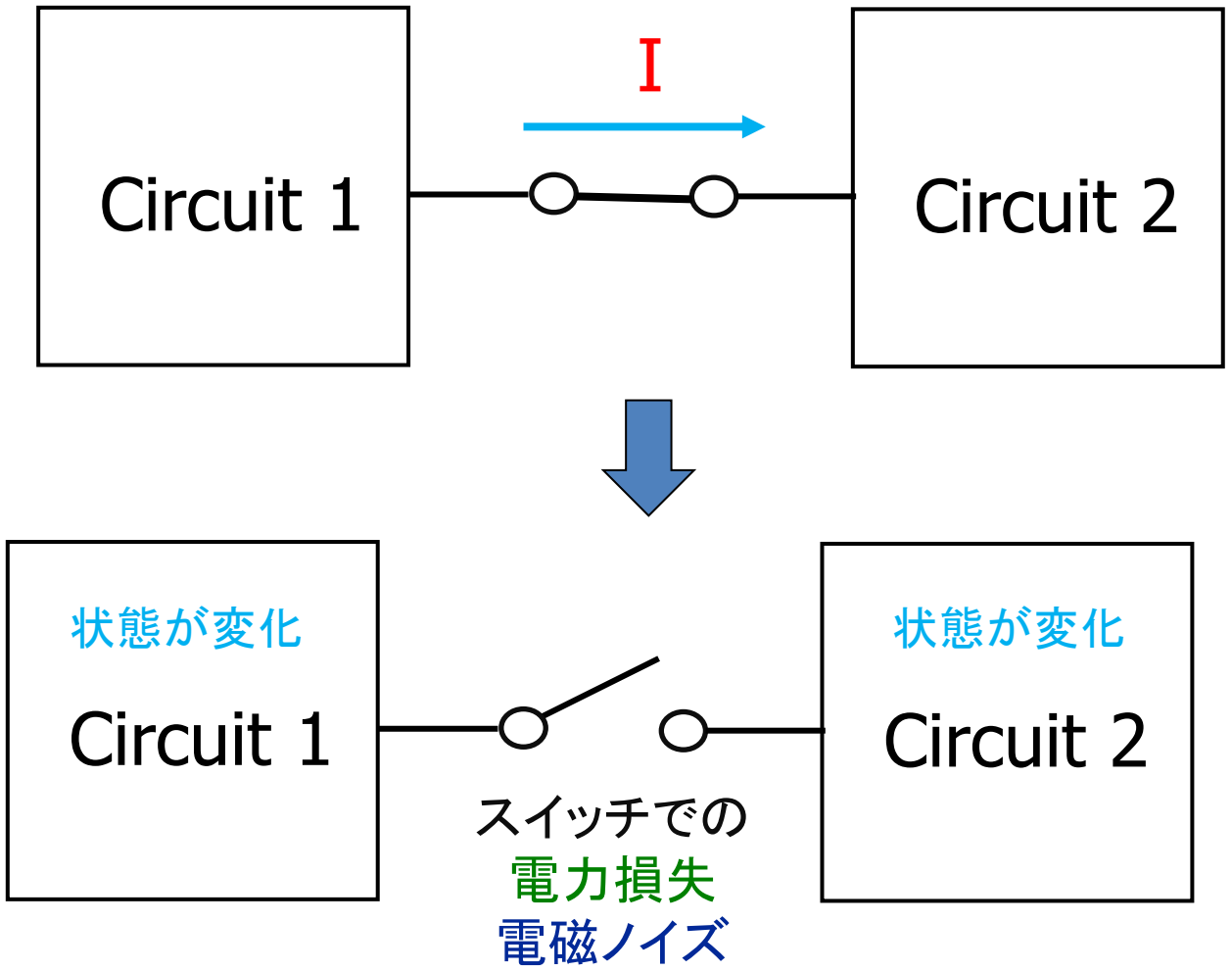
ゼロ電圧スイッチングの双対問題

ZCS (Zero Current Switching)

電流Ｉ＝０で スイッチオフ



電流 I ≠ 0 で スイッチオフ



「名料理人が牛をさばく」

荘子

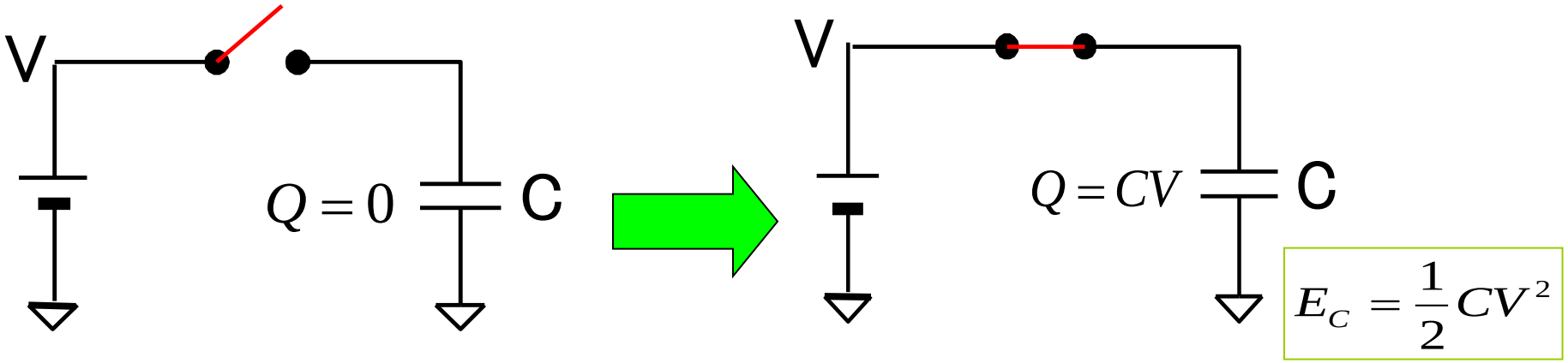
牛は　さばかれているのも
死んだのも気付かない。
「私は牛の筋や骨の隙間に刀を入れるので
刀が折れたり欠けたりしない。
未熟者は力任せにするから
刀が折れたり欠けたりする。」

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

$$E_V = CV^2$$

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



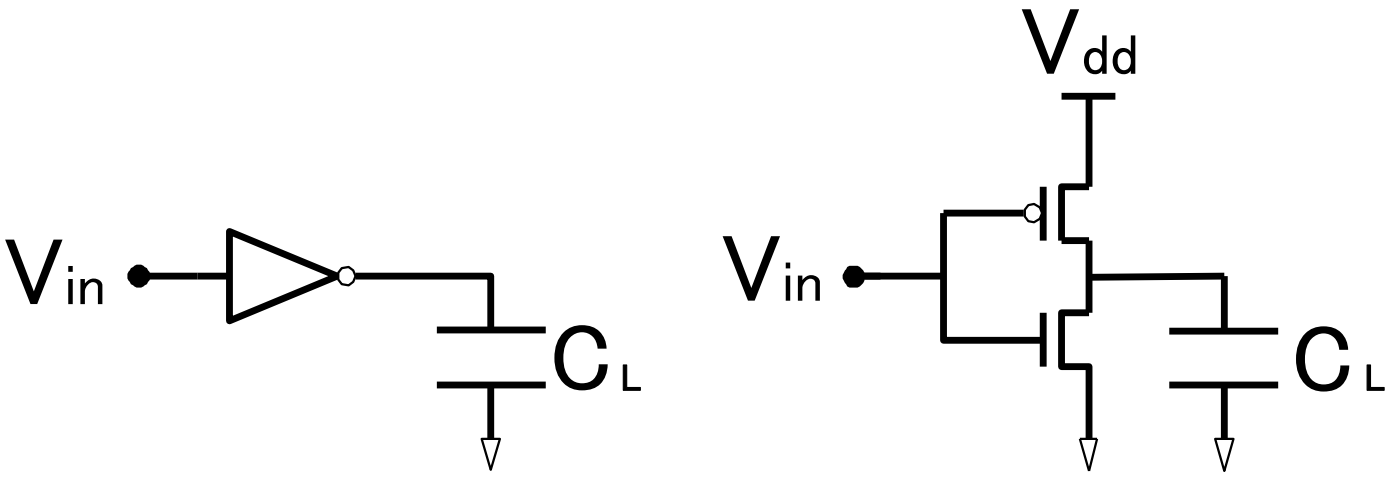
Ev=Eloss+Ec　　Eloss=Ec

デジタルCMOS回路の電力消費

Vdd: 電源電圧

Vin: 入力、　Vout: 出力

C_L :　負荷容量



論理否定(NOT)

論理変数　A, Z

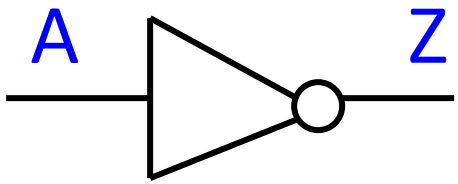
A: 入力，　Z: 出力

$Z = \overline{A}$

真理値表

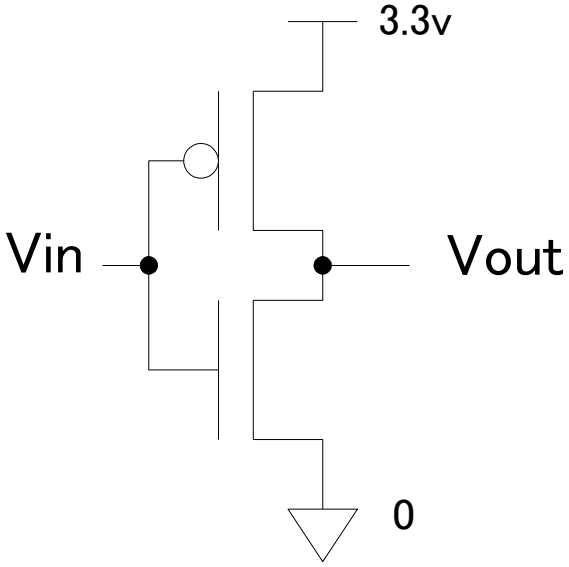
A	Z
0	1
1	0

NOT を実現する回路 ⟹ インバータ回路

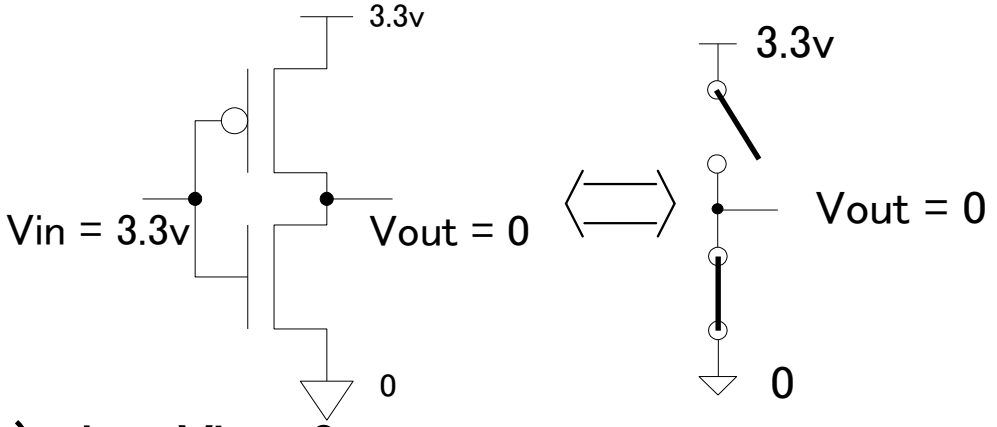


CMOSインバータ回路

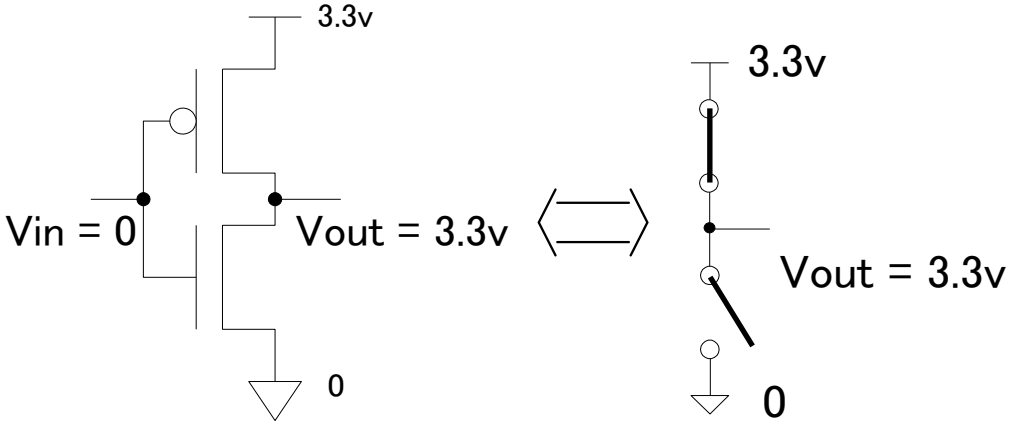
Inverter



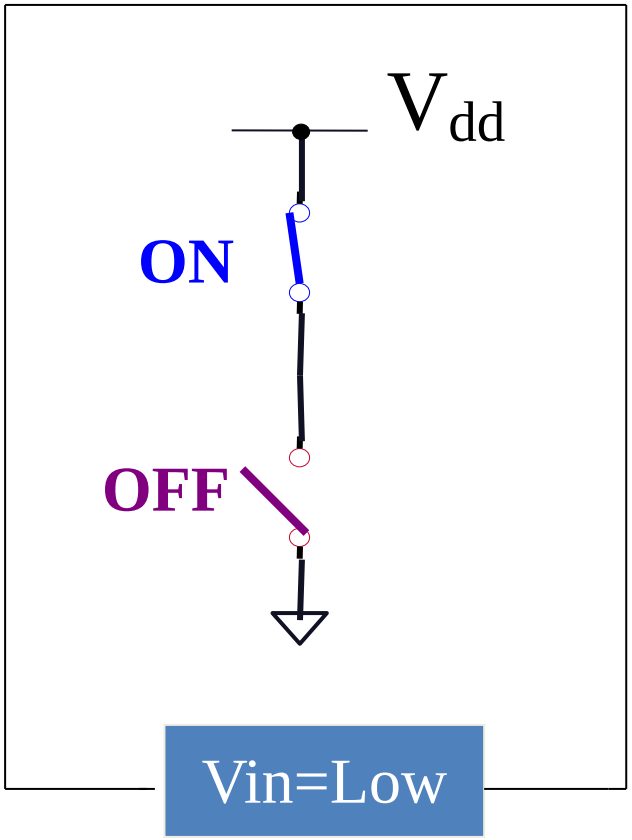
a) when Vin = 1 (3.3v)

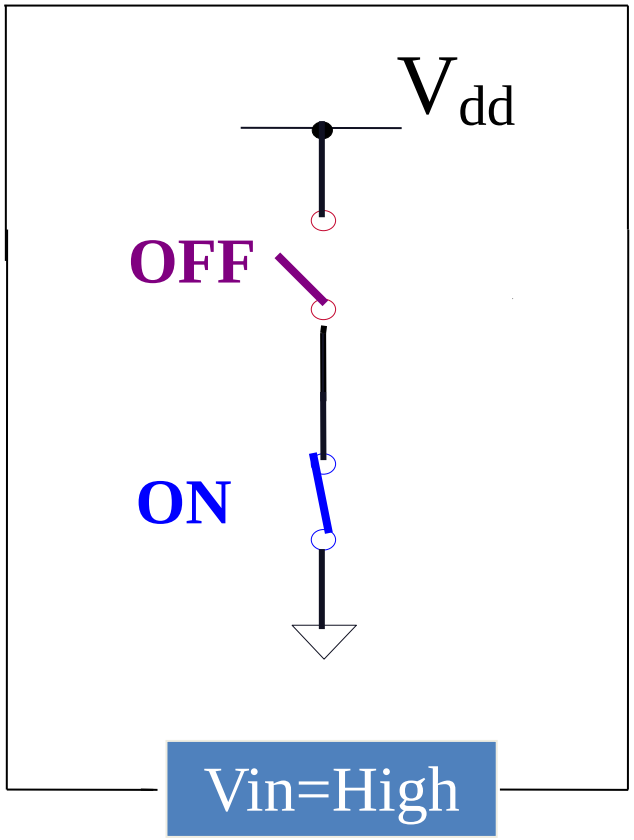


b) when Vin = 0



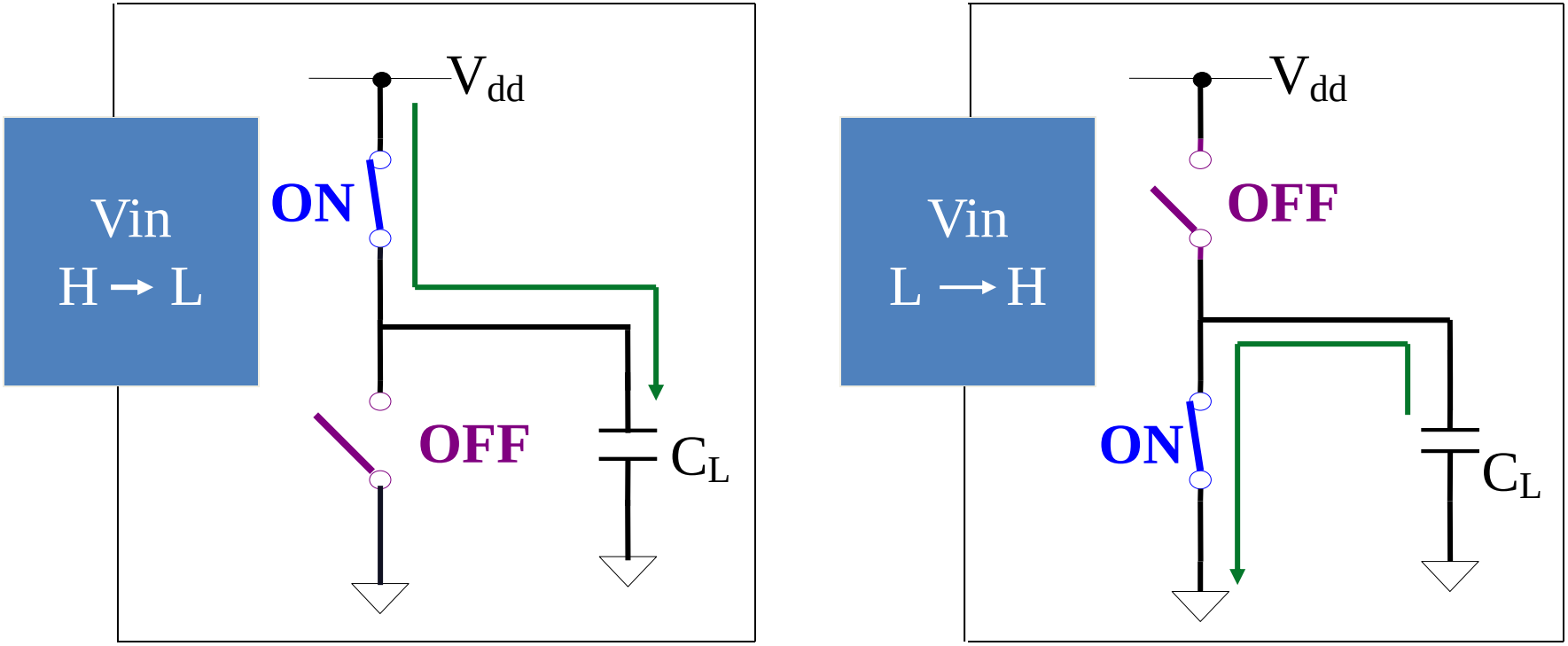
静的電力消費はゼロ



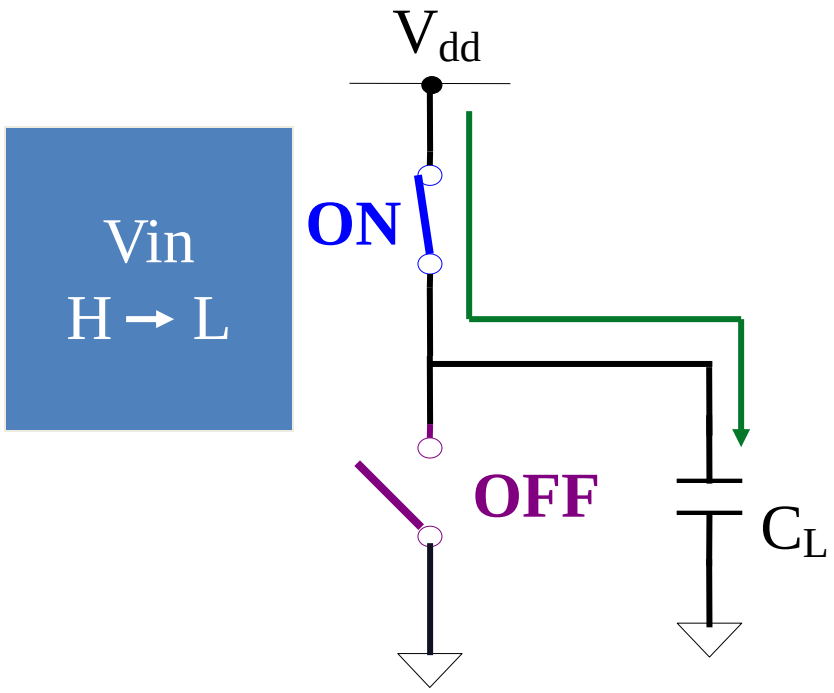


（注） 最近の微細CMOSデジタル回路では リーク電流が大きくなり、静的電力消費の占める割合が増えてきている。

動的消費電力 (1)



動的消費電力 (2)



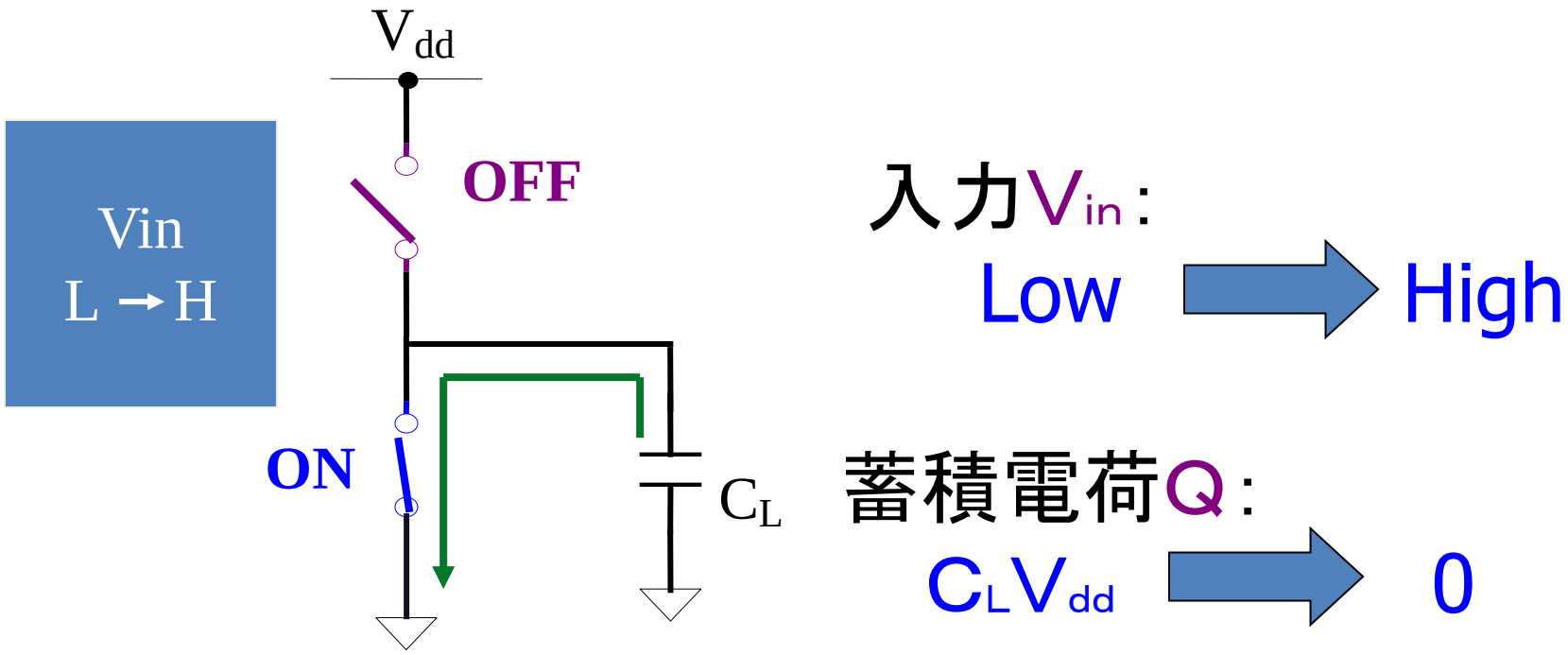
入力V_{in}:

High → Low

蓄積電荷Q:

0 → $C_L V_{dd}$

動的消費電力 (3)



動的消費電力 (4)

V_{in} : H ⟶ L ⟶ 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

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

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

f : 出力トグル周波数　C_L : 負荷容量

V_{dd} : 電源電圧

デジタルCMOS 回路のスピード

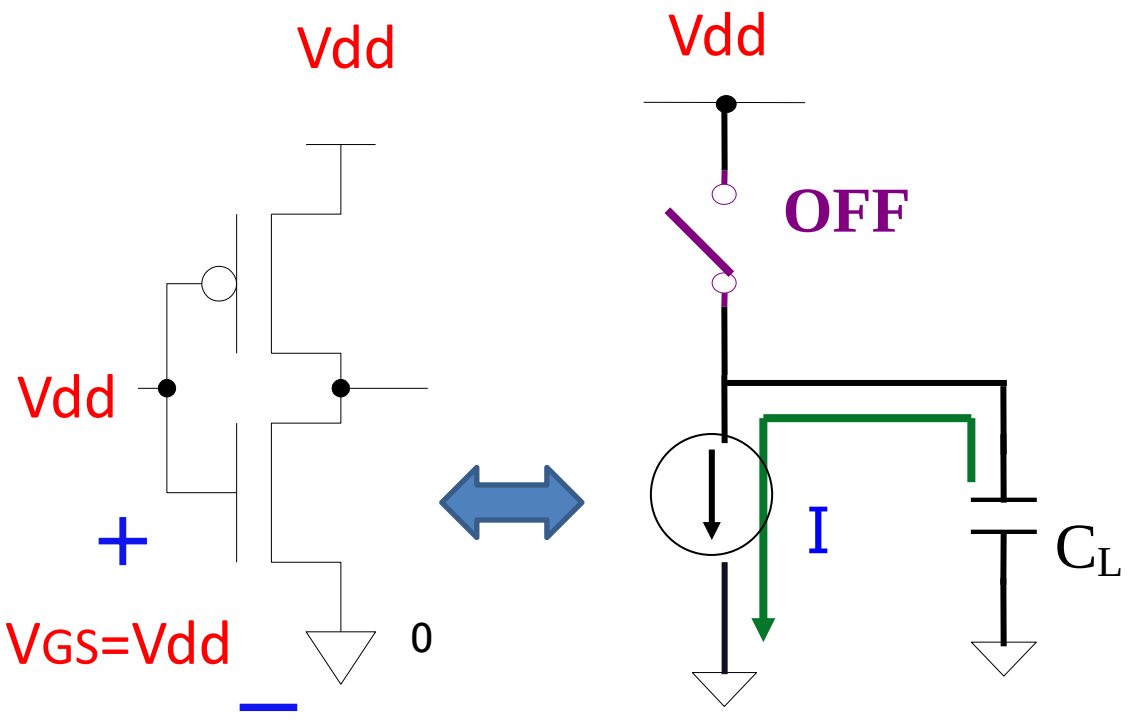
電源電圧 Vdd:

- 低消費電力化のため電源電圧を下げるとスピードは遅くなる。
- スピードは電源電圧に比例
- 消費電力は電源電圧の２乗に比例

温度: スピードは温度にほぼ反比例。

低温環境化でコンピュータを高速化する試みあり。

なぜ電源電圧を上げると
デジタルCMOS回路は高速化するのか？



引き抜く電荷

$Q = C\ Vdd$

MOSの２乗則

$I = K\ (Vdd - Vth)^2$

$\fallingdotseq K\ Vdd^2$

ゲート遅延

$T = Q / I$

$= C / (K\ Vdd)$

デジタル回路の Figure of Merit (FOM)

FOM = スピード/消費エネルギー

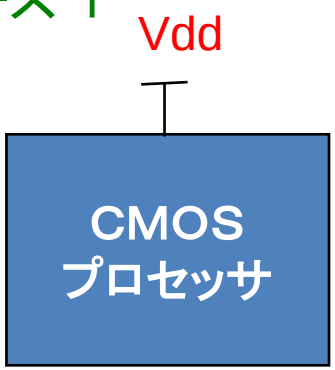
「A」のエネルギーを消費し「B」のスピードの回路と、
「2A」のエネルギーを消費し「2B」のスピードの回路の FOM は同じ。

工学設計： トレードオフ (Trade-off, 妥協）
の考え方が重要

デジタルCMOS回路：
電源電圧を小さくして使用するとFOMが良。

マルチプロセッサ構成による低消費電力化

ケース 1

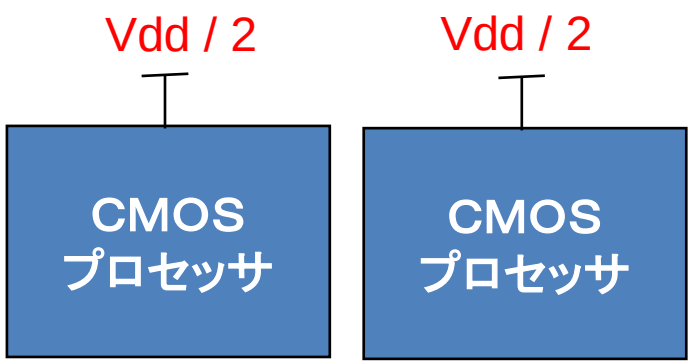


消費電力 $P1 = A (Vdd)^2$

スピード $S1 = B\ Vdd$

ケース2 は ケース 1 と
スピード同等で
消費電力が2分の1

ケース 2



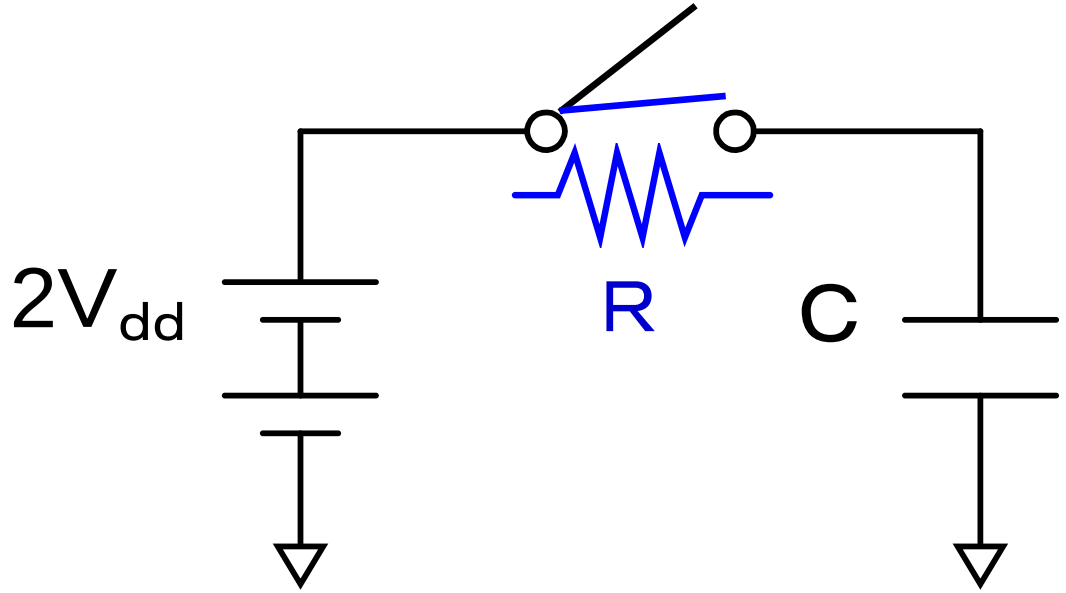
$$P2 = A (Vdd / 2)^2 + A (Vdd / 2)^2$$

$$= (1 / 2) A\ Vdd^2$$

$$S2 = B (Vdd / 2) + B (Vdd / 2)$$

$$= B\ Vdd$$

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

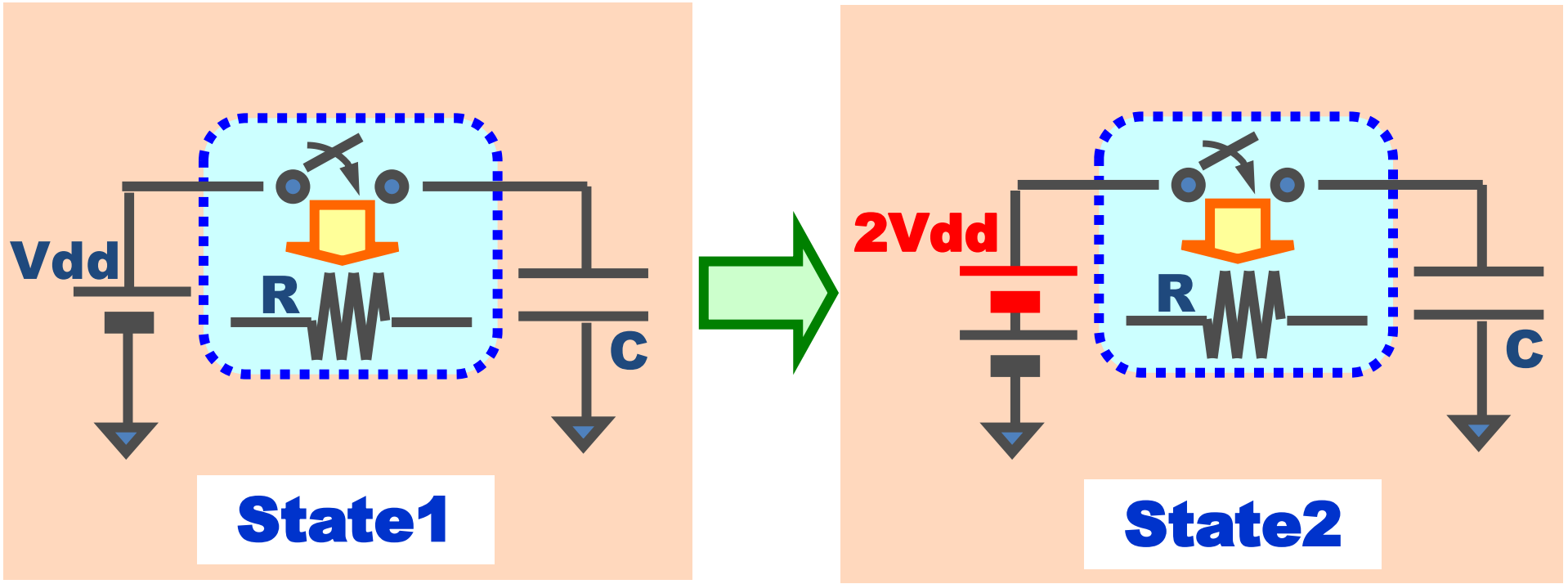
$$E_{total} = 2V_{dd}\int_0^{\infty} i(t)dt = V_{dd}Q = 4CV_{dd}{}^2 \qquad E_c = \frac{1}{2}C\left(2V_{dd}\right)^2 = 2CV_{dd}^2$$

損失するエネルギー＝蓄えられるエネルギー

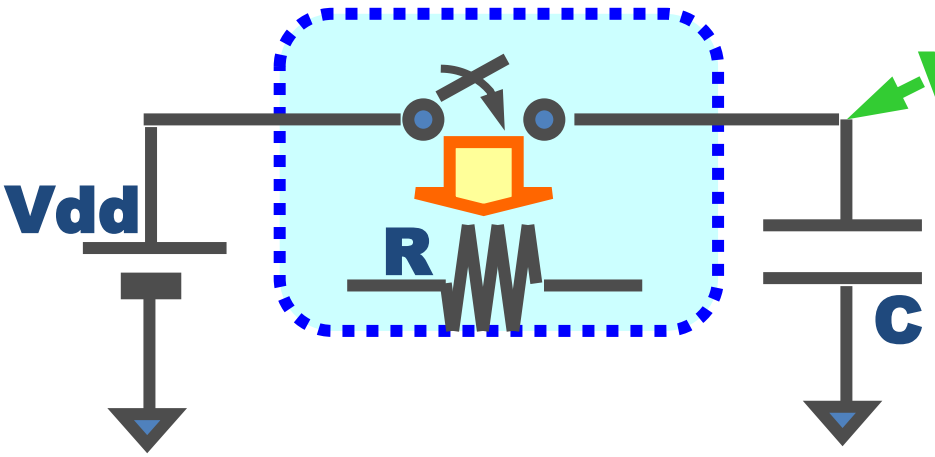
$$E_R = 2CV_{dd}^2$$

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



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

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

$$(\tau = RC)$$

$$E_{R1} = \int_0^\infty i(t)\left(V_{dd} - V_{out1}(t)\right)dt$$

$$= \frac{1}{R}\int_0^\infty \left(V_{dd} - V_{out1}(t)\right)^2 dt$$

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

$$E_{C1} = \int_0^\infty i(t)V_{out1}(t)dt$$

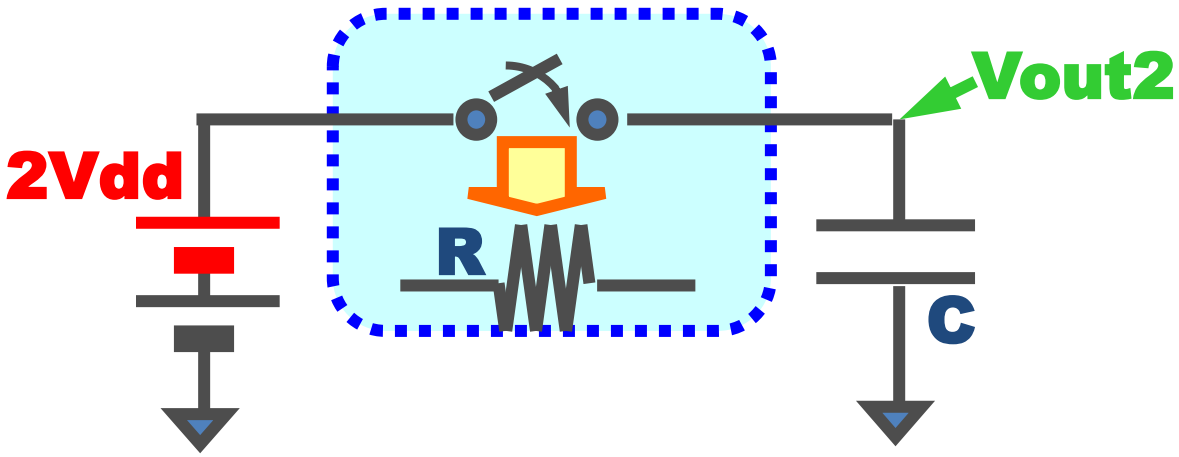
$$= \frac{1}{2}CV_{dd}^{\ 2}$$

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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: $E_{Total\_C} = 2CV_{dd}^{2}$

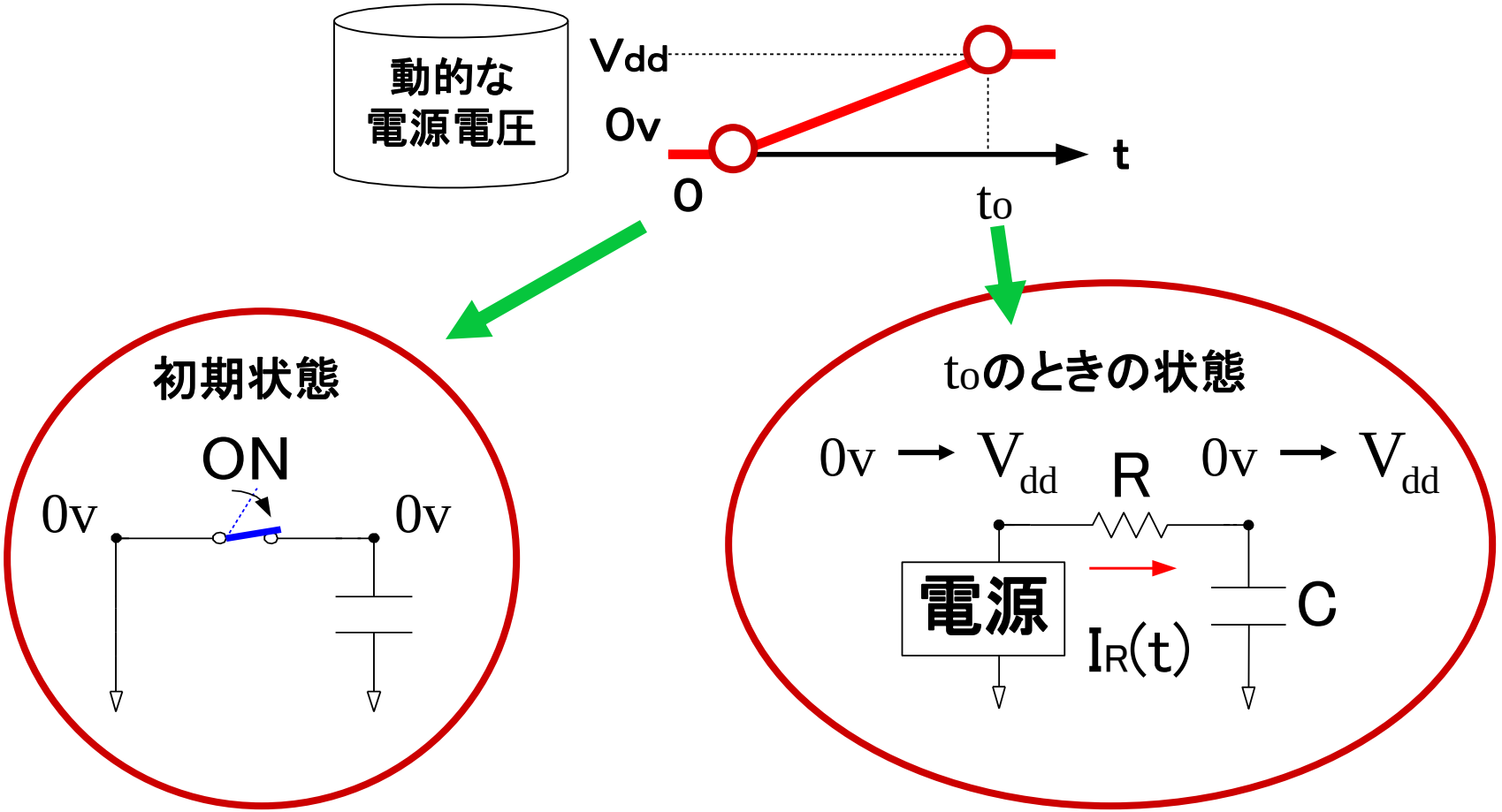
改善

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

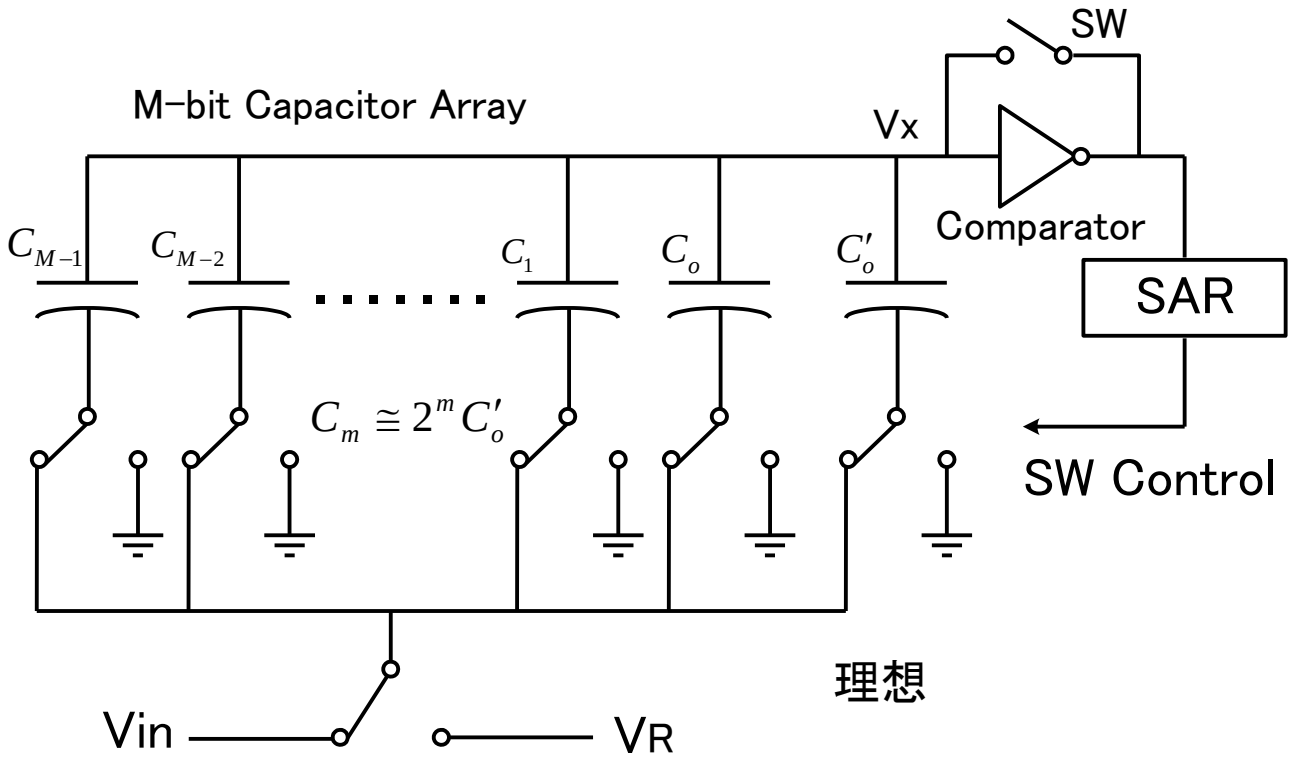
➡ 消費エネルギー：ゼロ

電流：小 ⇒ $E_R = R\int I(t)^2 dt$

➡ 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

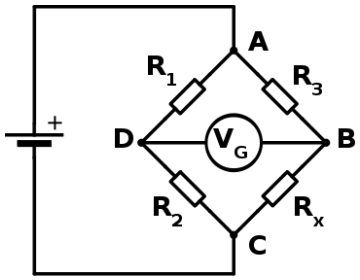
⇒ その消費エネルギーが問題

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、ブリッチ回路



- 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

92

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

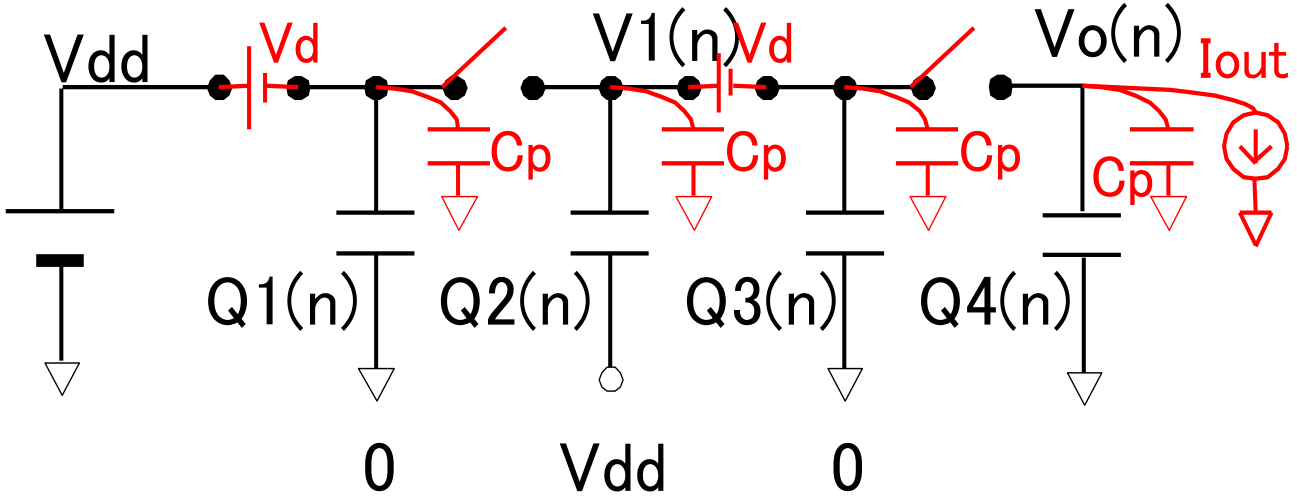
- 欠点:

  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 Cp, ダイオードドロップVd, 負荷電流 Iout



（n段チャージポンプ回路の効率）

$$=1-\frac{nCCpVdd^2+(2n+2)(C+Cp)VdTIout+4nT^2Iout^2}{nCCpVdd^2+(2n+2)CVddTIout+2CpVddTIout}$$

「チャージポンプ回路の効率」の注意

- 電源を入れ、容量に充電されるまで

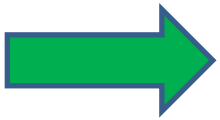
  効率は最大50%

- 定常状態に到達後

  - 効率は50%以上になりえる。
  - 容量Cが大きいほど

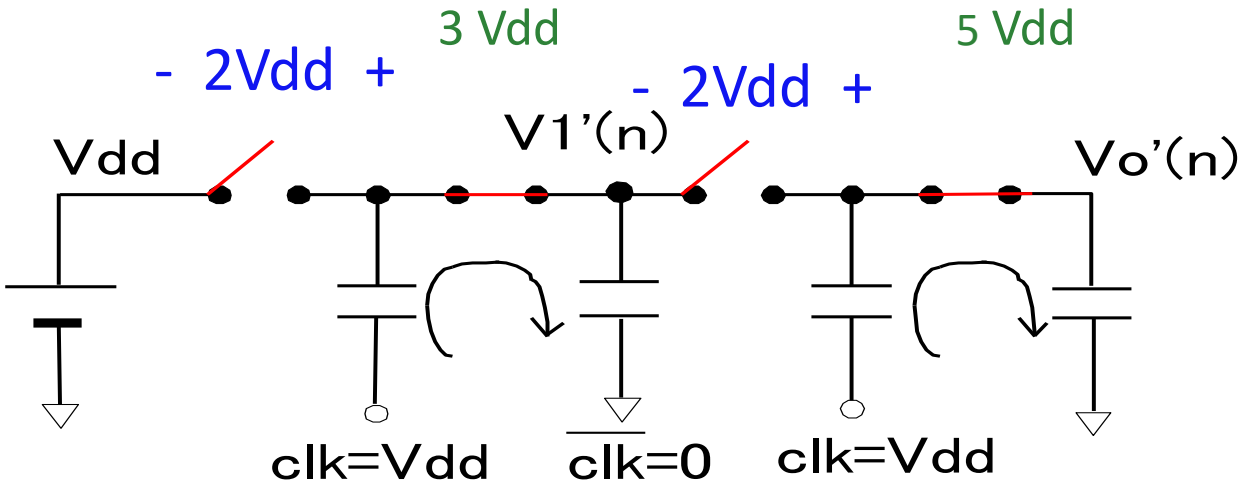
    スイッチング周波数が高いほど

    （スイッチング損失, 寄生容量無視の場合）

    高効率になる。

チャージポンプ電源回路とデバイス耐圧



- 高耐圧MOSを使用しなくてよい

  オフMOSスイッチのドレイン・ソース間電圧Vds ⇒ 2Vdd

- 容量Cは高耐圧が必要

Part I まとめ

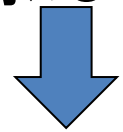
- 容量とスイッチからなる回路では
  オン抵抗をゼロに近づけても
  原理的に電力損失が生じる
- 「電源回路として一定負荷電流を供給のとき
  容量Cが大きいほど
  スイッチング周波数f が高いほど
  電力損失は小さい
  （スイッチング損失、寄生容量無視の場合）」
  を導出できる

お話しする内容

- アナログ回路研究者の
  電源回路技術理解の試み
- 容量とスイッチから構成する電源回路
- **インダクタを用いる電源回路**
- まとめ
- 付録1
- 付録2

モチベーション

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？

電源回路での
インダクタの回路動作理解

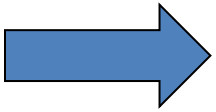
「インダクタは　低電圧ノードから
高電圧ノードに電流が流れ得る」
と講義で説明 ⇒ 多くの学生は驚く

「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

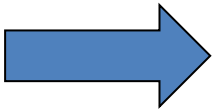
インダクタを用いると
高効率になる理由

- 電圧源とインダクタ



相性が良い

- 電圧源と容量

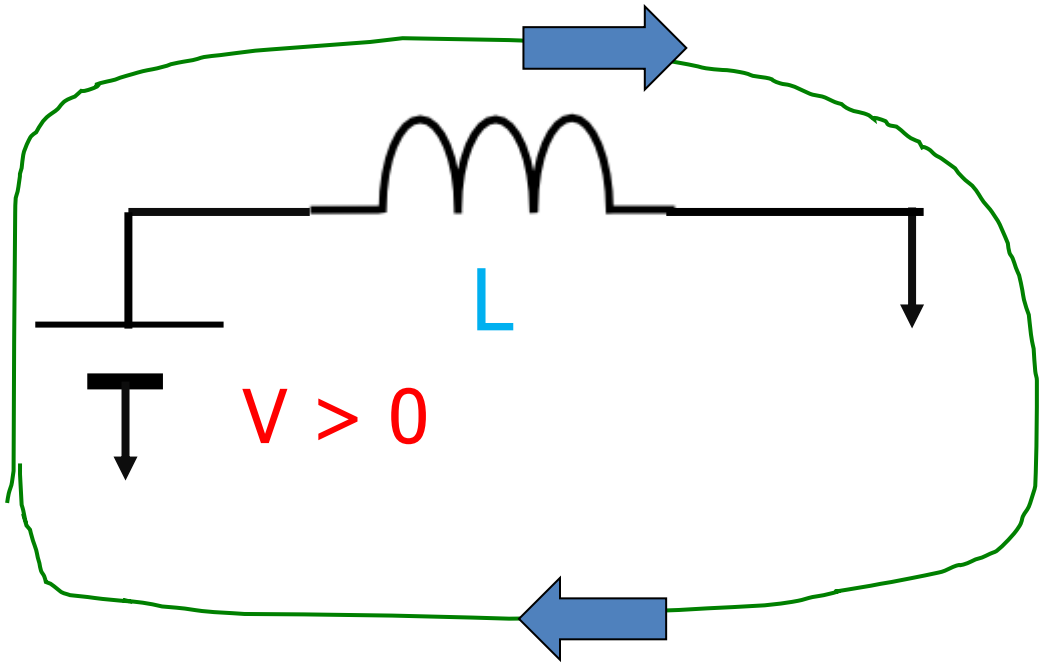


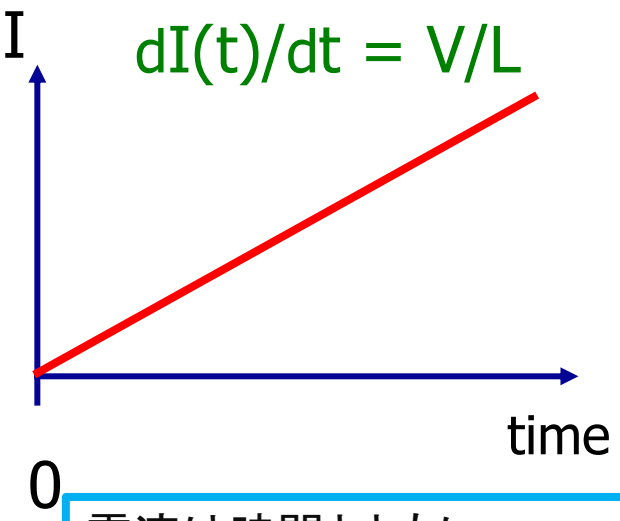
相性が良くない

電圧源からインダクタへの電流

I(0)=0,
I(t) > 0 (t>0)

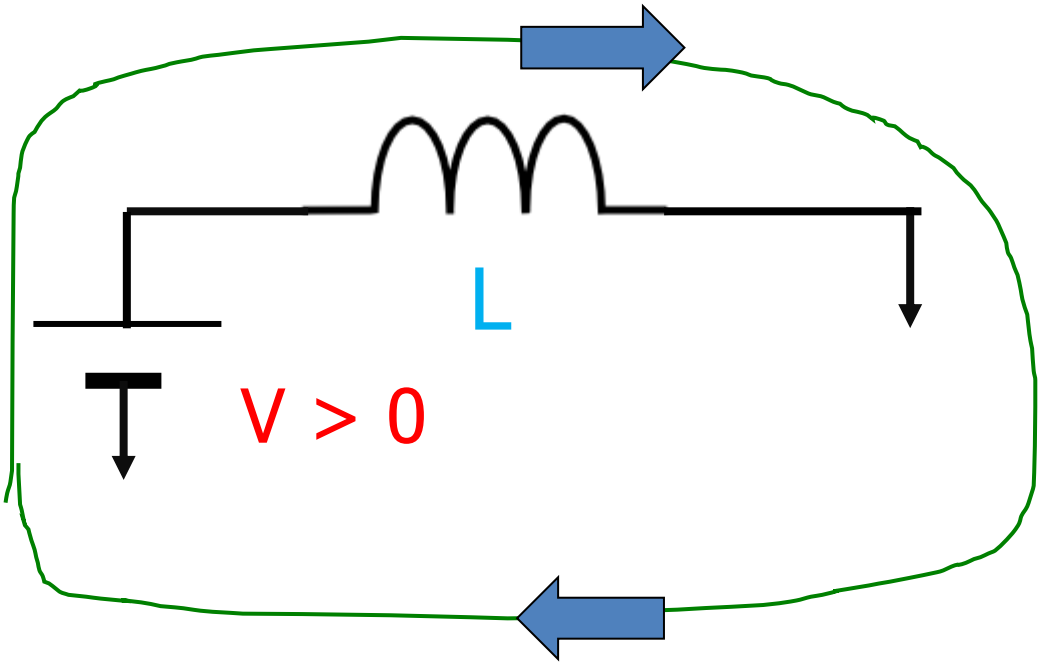
$$I = \frac{1}{L}\int V\,dt$$

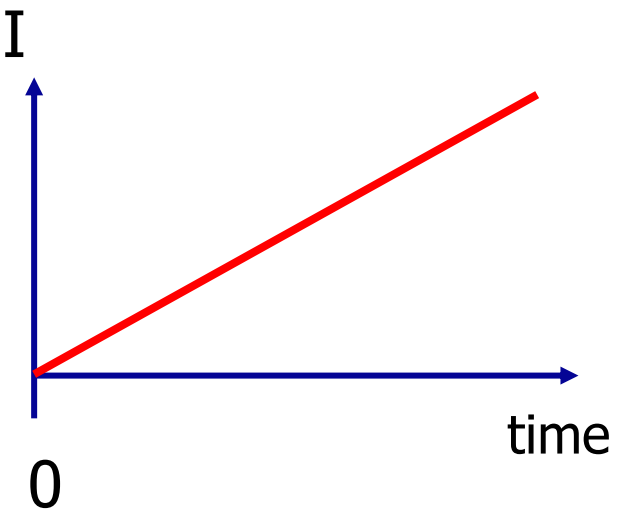




電流は時間とともに
増加する

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

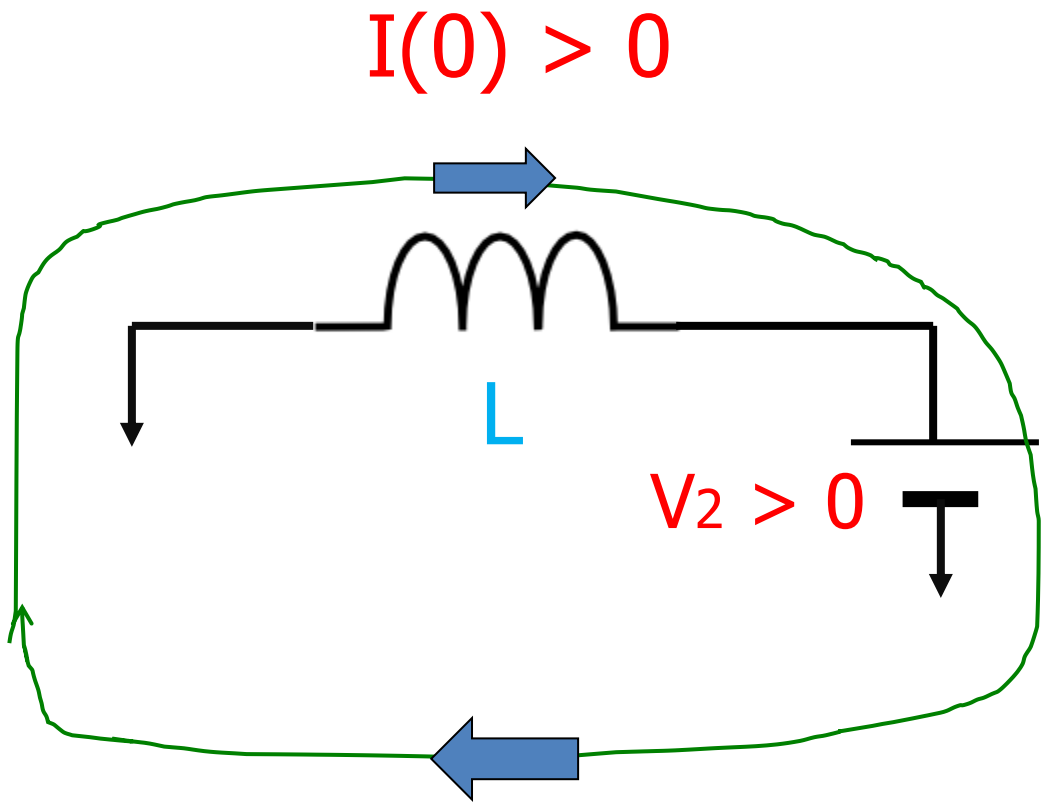


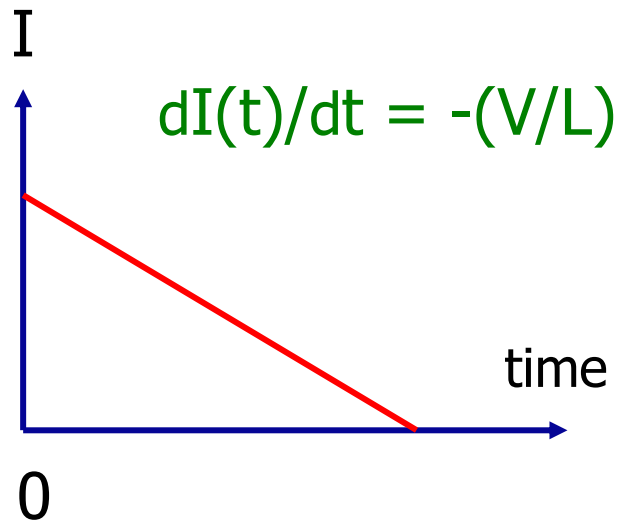


$$E = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\frac{V^2}{L}t^2$$

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

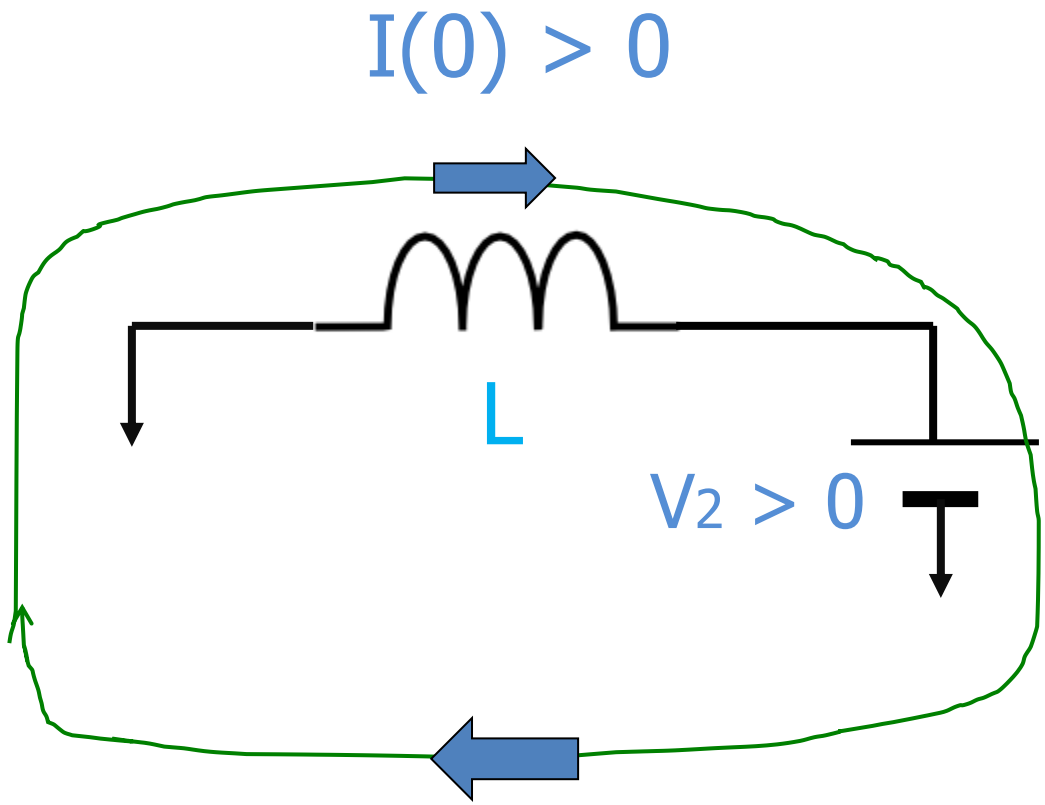
インダクタは低電位から高電位に電流が流れ得る

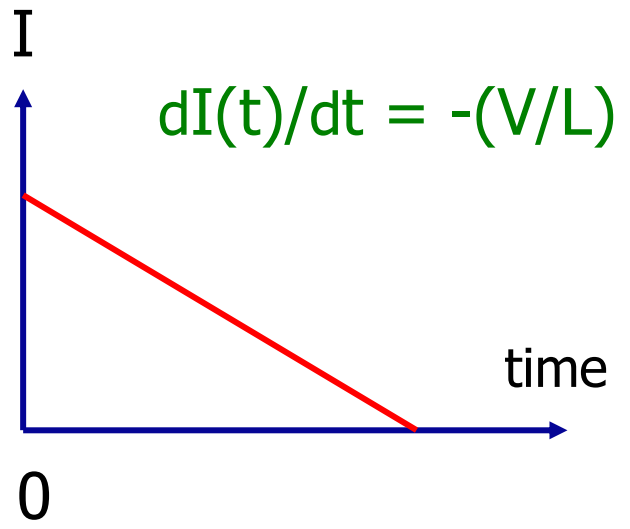




電流は時間とともに
減少する

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

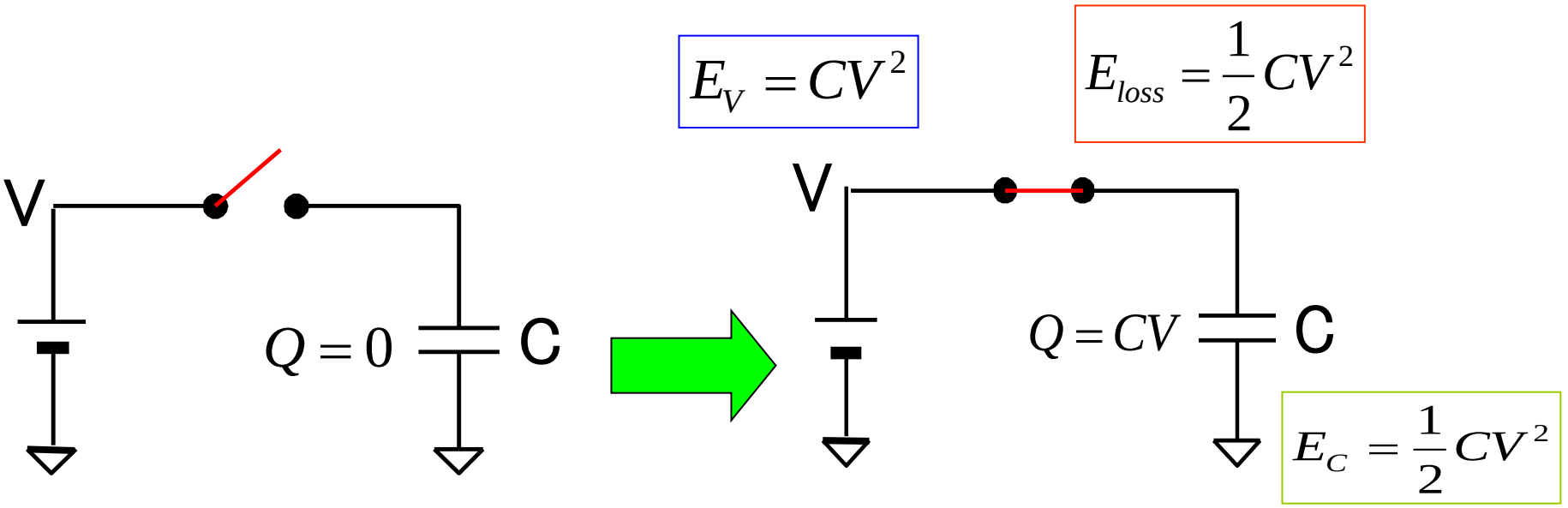




電流は時間とともに
減少する

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V2に供給）

電圧源から容量へのエネルギー供給



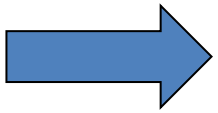
電圧源Vから容量Cへのエネルギー供給

- 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

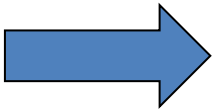
双対問題

- 電流源と容量



相性が良い

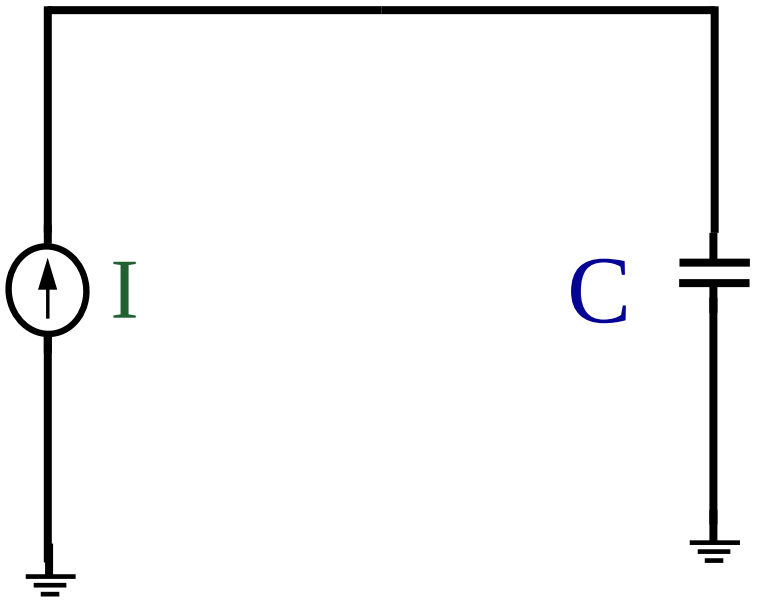
- 電流源とインダクタ



相性が良くない

電流源から容量へのエネルギー供給

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



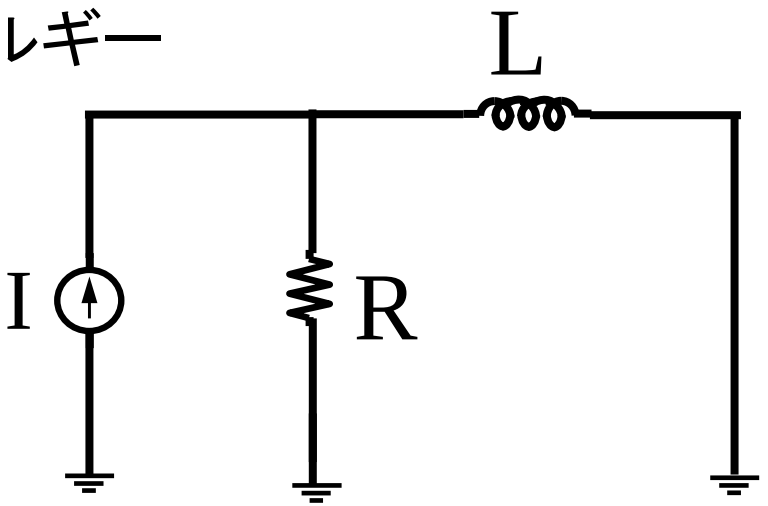
電流源から容量へ
原理的に　損失なく、いくらでも
エネルギー供給が可能

→ 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

$$\mathrm{E1} = \frac{1}{2} L I^2$$



定常状態になるまでの
抵抗Rでの消費エネルギー

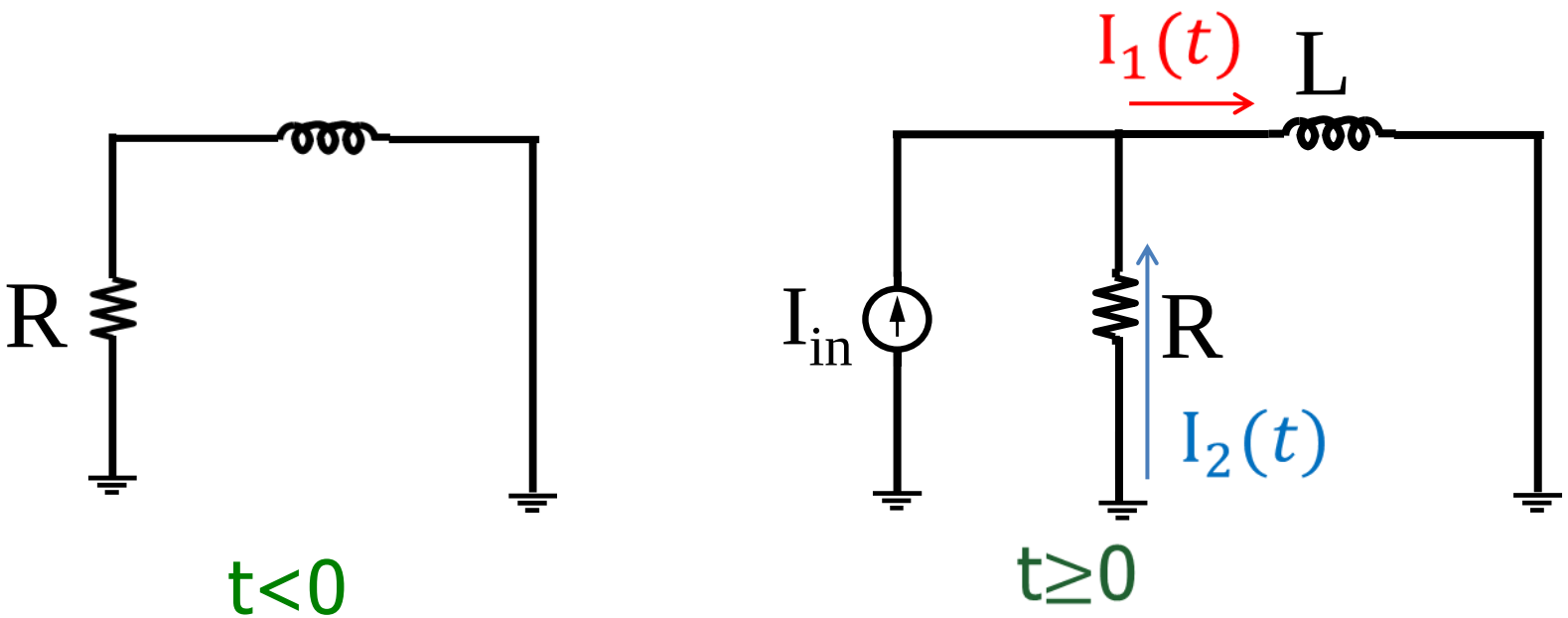
$$\mathrm{E2} = \frac{1}{2} L I^2$$

相性が良くない

計算過程 (1)

L

群馬大学　轟俊一郎の計算



$$I_1(t) = I_{in} + I_2(t)$$
$$I_1(0) = 0$$
$$I_2(0) = 0$$

計算過程(2)

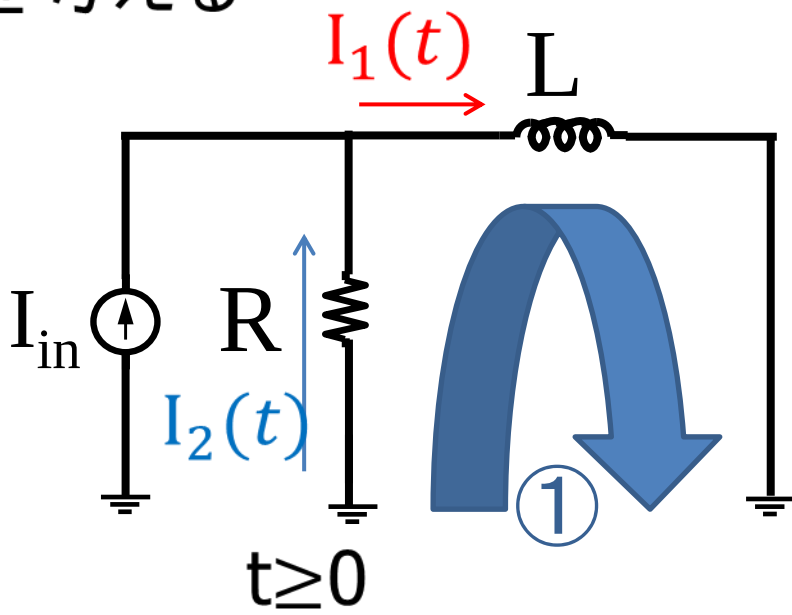
①の矢印でキルヒホッフの電圧側を考える

$$0 = \mathrm{R}\mathrm{I}_2 + L\frac{d\mathrm{I}_1}{dt}$$

$\mathrm{I}_1(t) = I_{in} + I_2(t)$を代入

$$L\frac{d\{I_{in}+I_2(t)\}}{dt} + R\mathrm{I}_2(t) = 0$$

$$\mathrm{L}\frac{dI_2(t)}{dt} + R\mathrm{I}_2(t) = 0$$



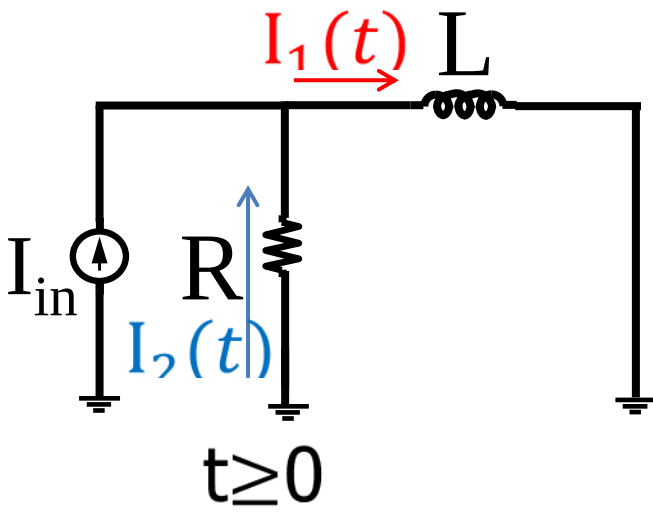
計算過程 (3)

- $\mathrm{L}\frac{dI_2(t)}{dt} + R\mathrm{I}_2(t) = 0$

$$\mathrm{I}_2(t) = Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

$$\mathrm{I}_1(t) = \mathrm{I}_{\mathrm{in}} + Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

初期条件：$\mathrm{I}_1(0) = 0 \Rightarrow \mathrm{A} = -\mathrm{I}_{\mathrm{in}}$



- $\mathrm{I}_1(t) = \mathrm{I}_{\mathrm{in}}\left\{1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}\right\}$
- $\mathrm{I}_2(t) = \mathrm{I}_{\mathrm{in}}e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$

抵抗Rで消費するエネルギー

$$\int_0^\infty RI_2(t)^2 dt = \int_0^\infty R\left\{-I_{in}\exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right\}^2 dt$$

$$= \int_0^\infty \{RI_{in}^2 \exp\left(-\frac{2R}{L}t\right)\} dt$$

$$= \mathrm{RI_{in}^2}\left(-\frac{\mathrm{L}}{2\mathrm{R}}\right)\left[\exp\left(-\frac{2R}{L}t\right)\right]_0^\infty$$

$$= \mathrm{RI_{in}^2}\left(-\frac{\mathrm{L}}{2\mathrm{R}}\right)(0-1) = \frac{1}{2}LI_{in}^2$$

抵抗で$\frac{1}{2}LI_{in}^2$のエネルギーを消費

抵抗R の値に依らない

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

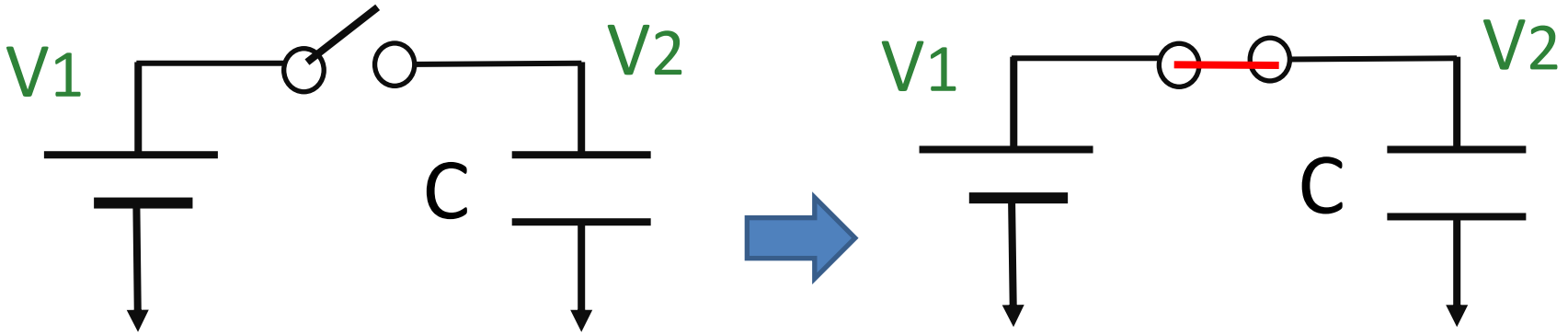
近似

インダクタ電流は急には変化しない

大分大学　佐藤輝被先生

電圧源と容量の接続

容量 C を
電圧源 V2 と近似

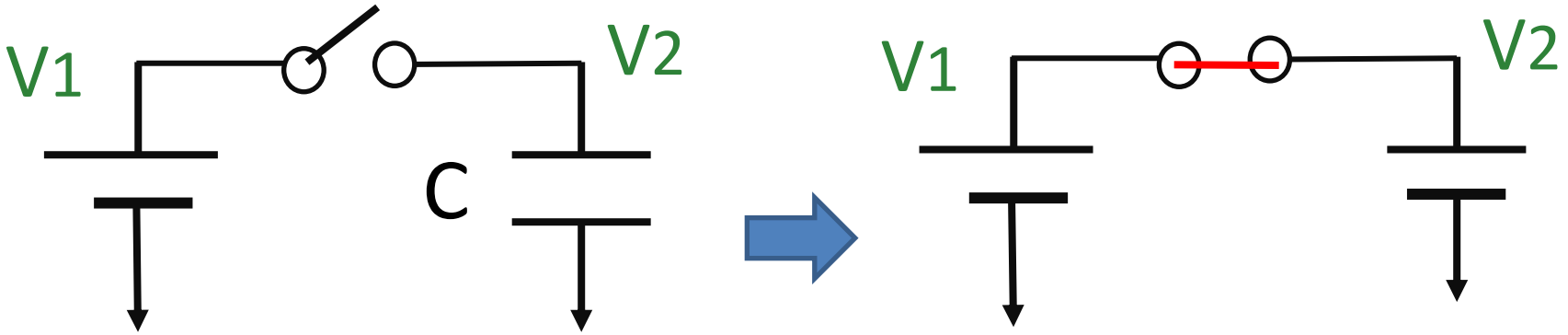


異なる電圧源V1, V2を接続

大分大学　佐藤輝被先生

電圧源と容量の接続

容量 C を
電圧源 V2 と近似



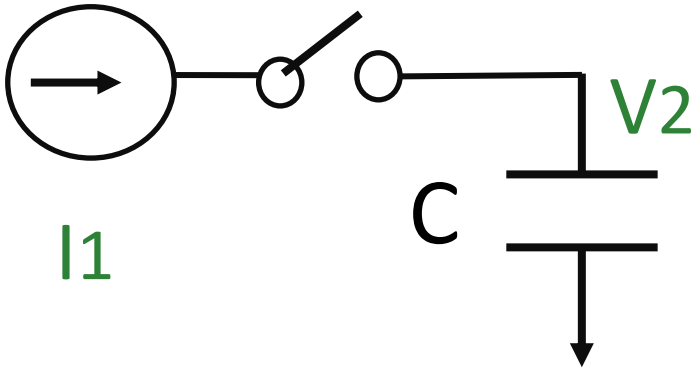
異なる電圧源V1, V2を接続

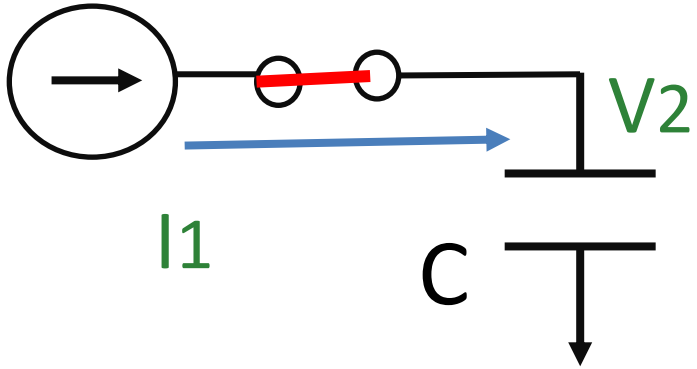
キリヒホッフ電圧則に反する ➡ 相性良くない

大分大学　佐藤輝被先生

電流源と容量の接続

容量を電圧源と近似



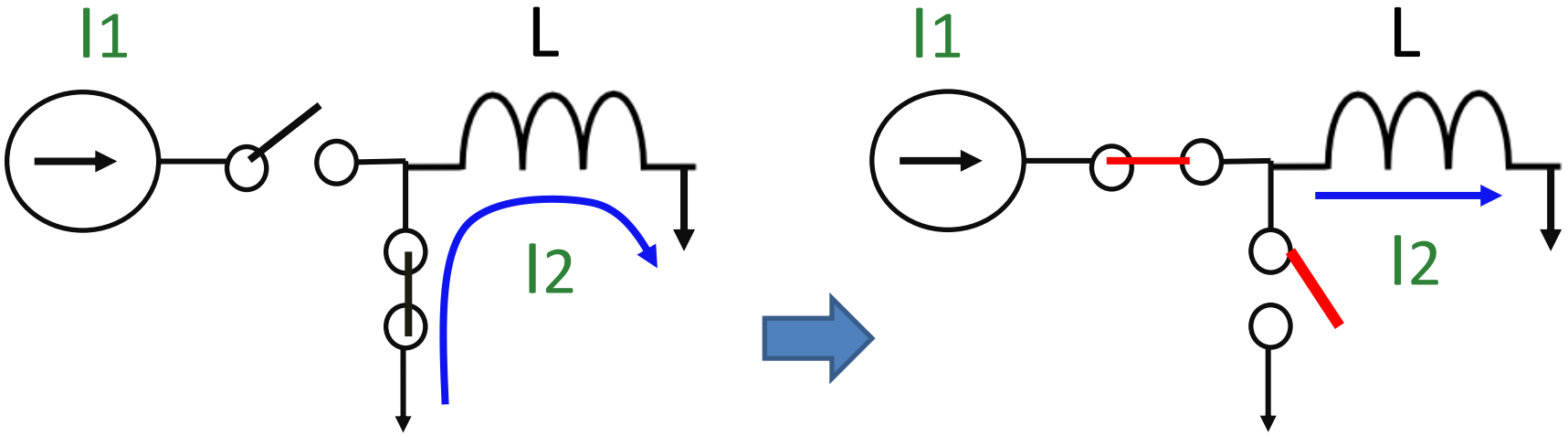


相性が良い

大分大学　佐藤輝被先生

電流源とインダクタの接続

インダクタ L を
電流源 I2 と近似

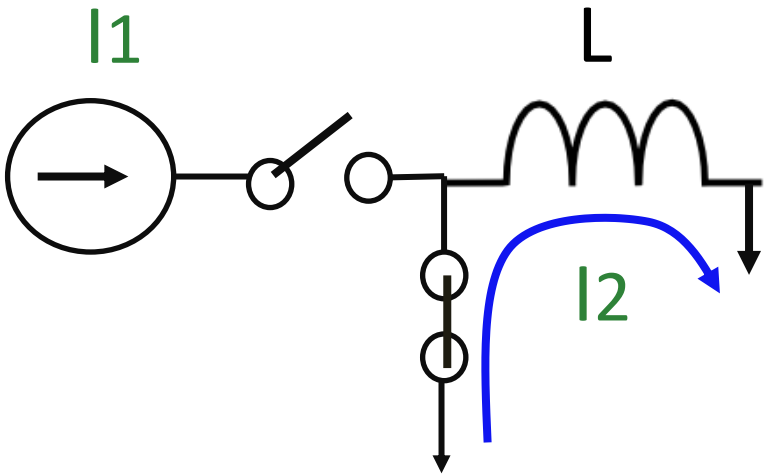


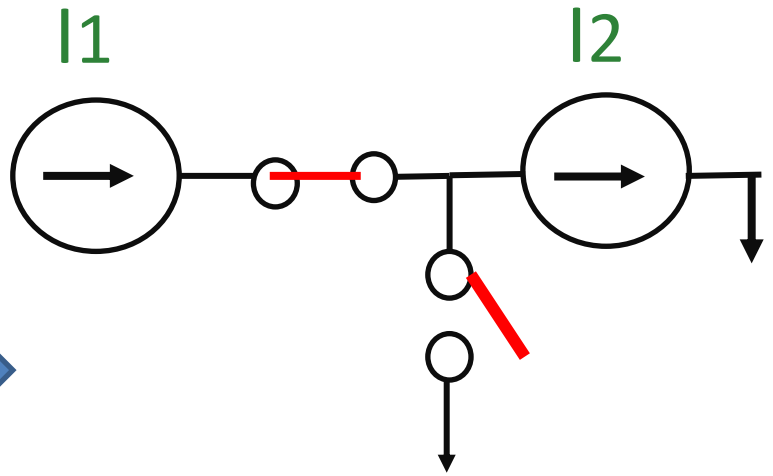
異なる電流源I1, I2を接続

大分大学　佐藤輝被先生

電流源とインダクタの接続

インダクタ L を
電流源 I2 と近似





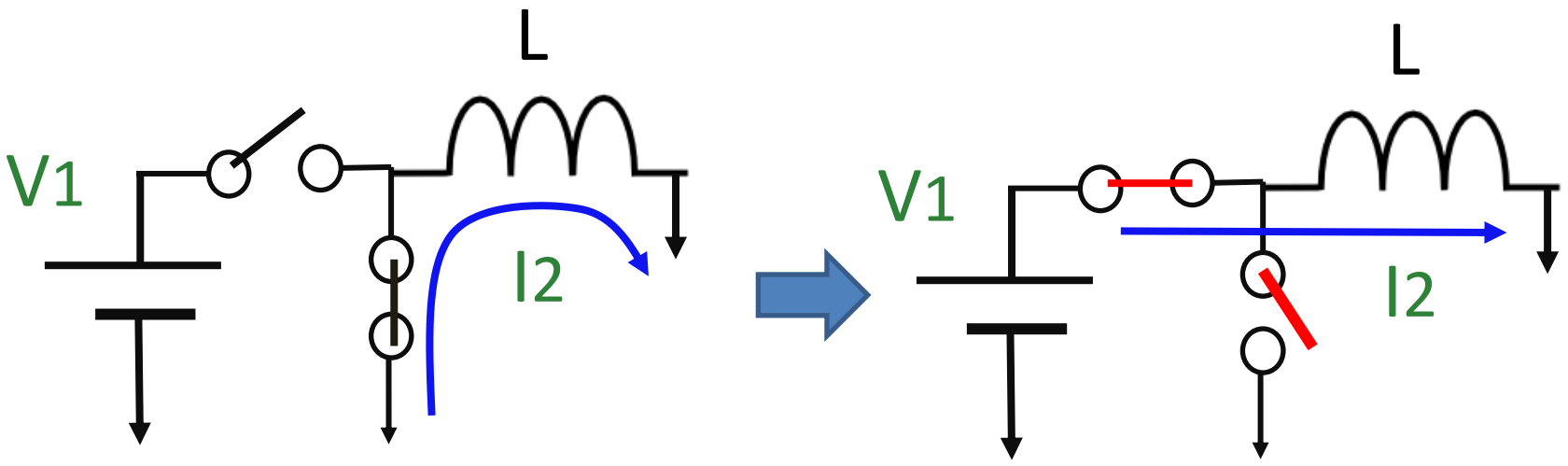
異なる電流源I1, I2を接続

キリヒホッフ電流則に反する ➡ 相性良くない

大分大学　佐藤輝被先生

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

定常状態でインダクタは電流メモリ

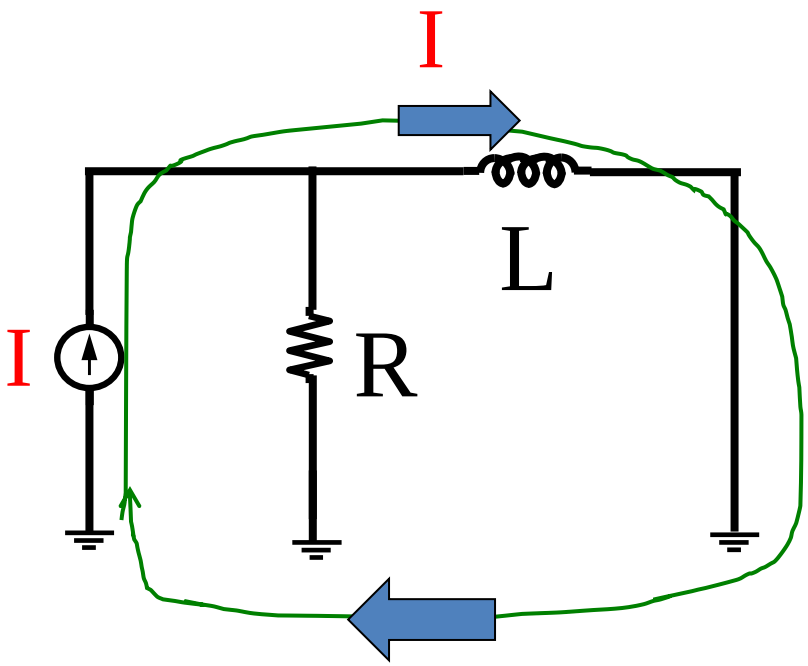
定常状態で

インダクタの電流

$$\mathrm{I} = \text{一定}$$

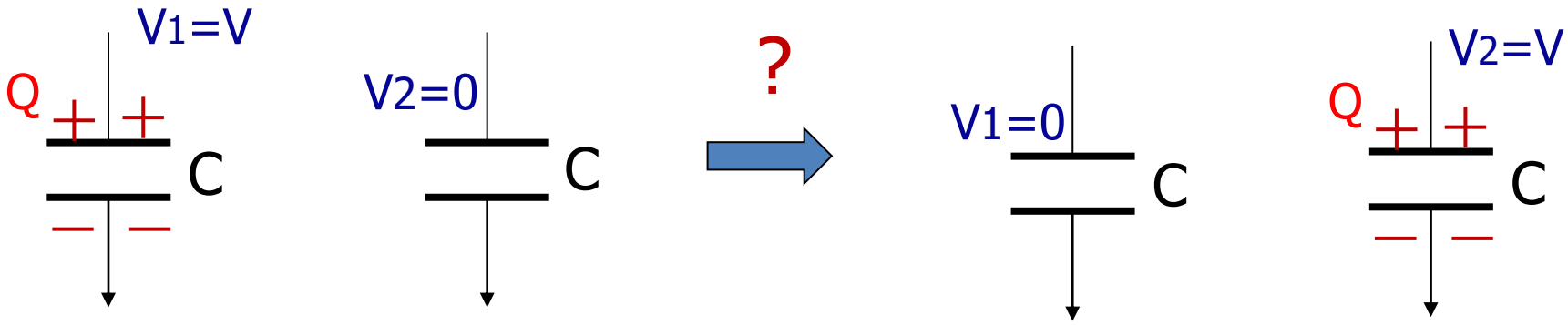
インダクタのエネルギー

$$\mathrm{E1} = \frac{1}{2} L I^2$$



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



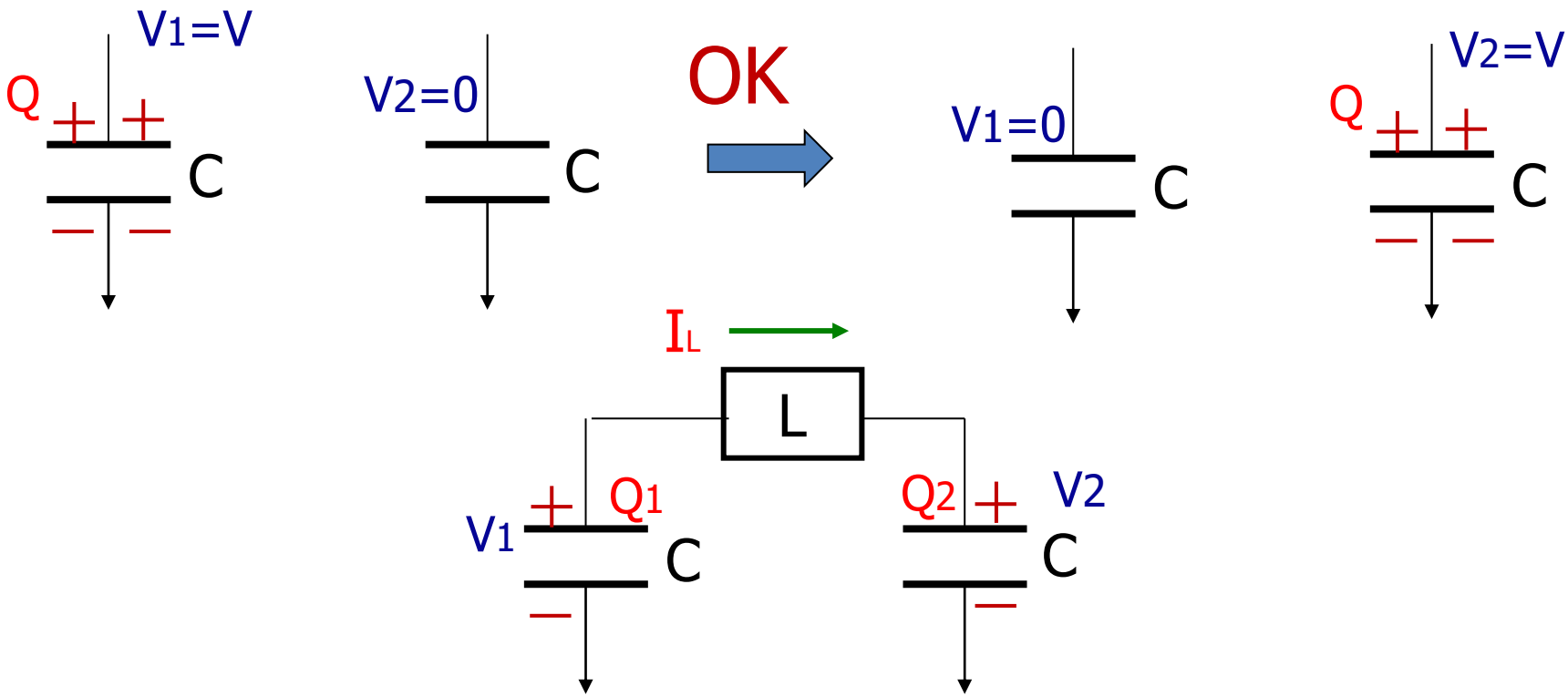
Q = C V

Q = C V

容量間の電荷伝送

インダクタは優れた受動素子

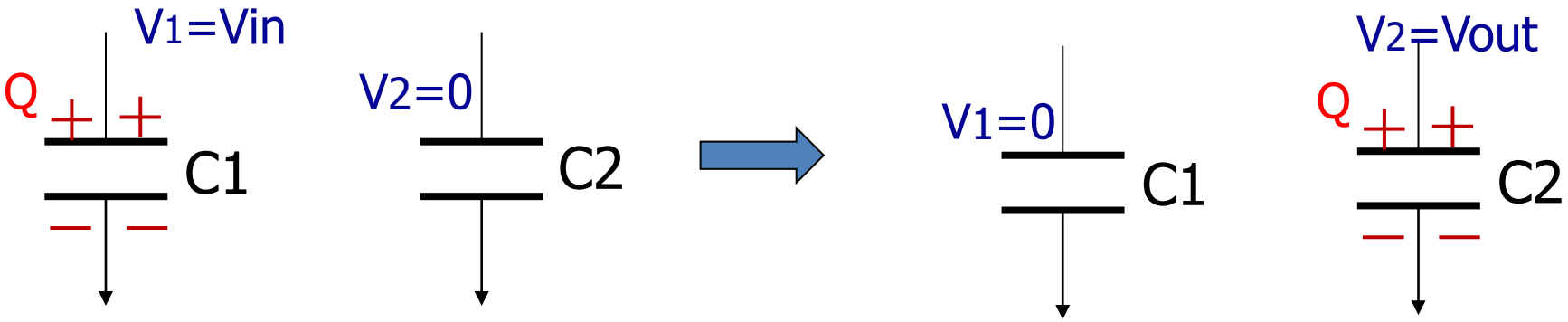
エネルギー損失なしで　左から右は**可能！**

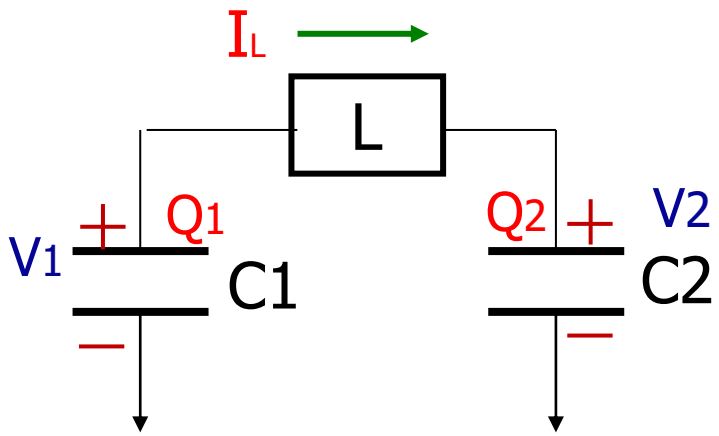


$$(1/2)\,C\,V_1^2 + (1/2)\,C\,V_2^2 + (1/2)\,L\,I_L^2 = \text{一定}$$

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！**

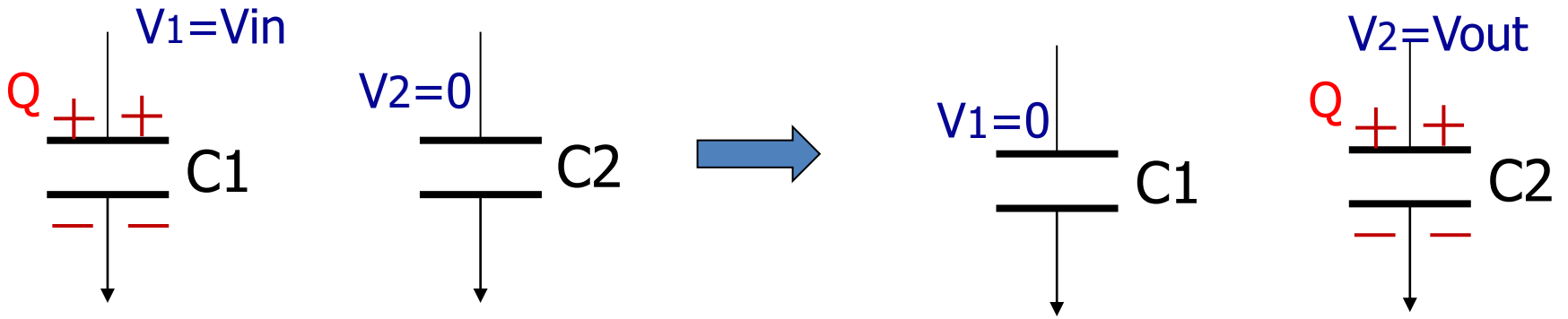


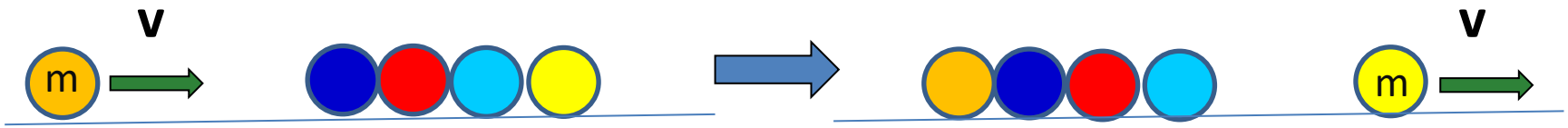


C1 > C2 ⇒ Vin < Vout
昇圧

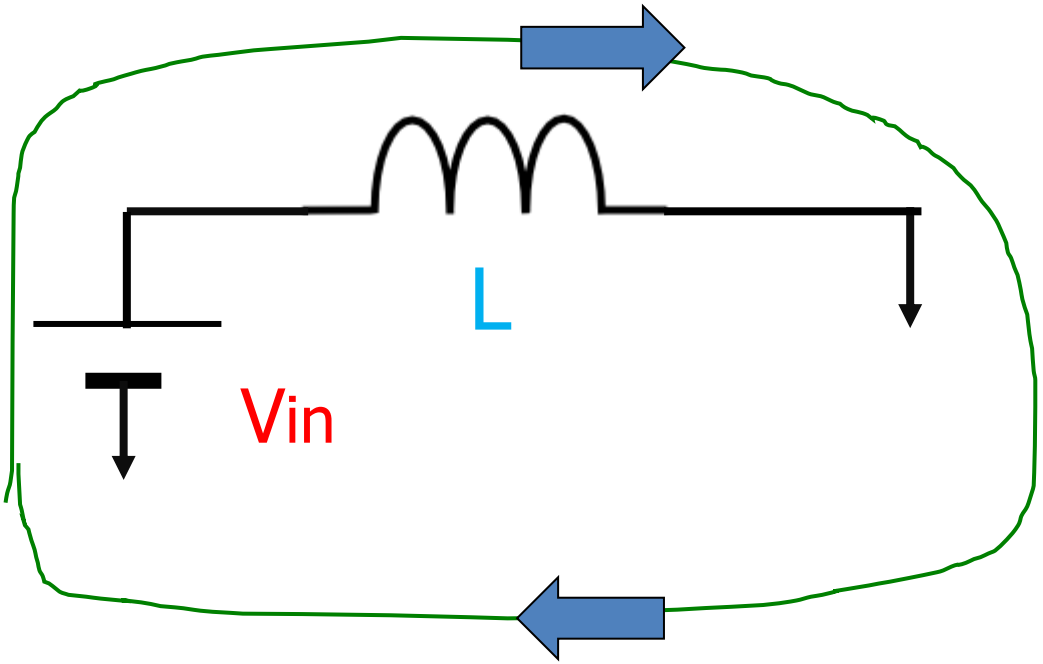
C1 < C2 ⇒ Vin > Vout
降圧

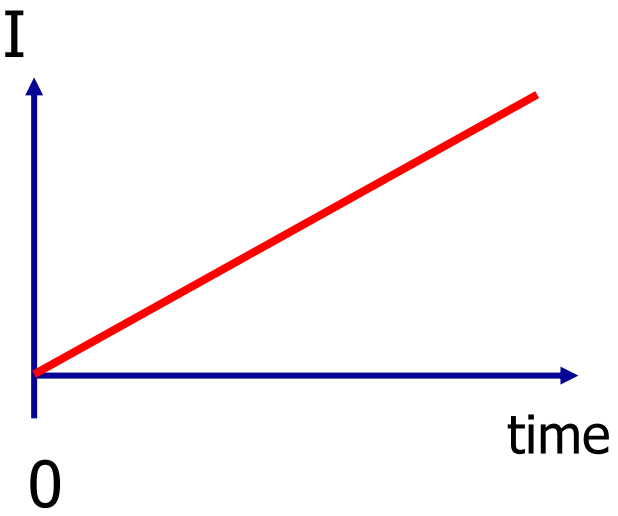
完全衝突問題とのアナロジ





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



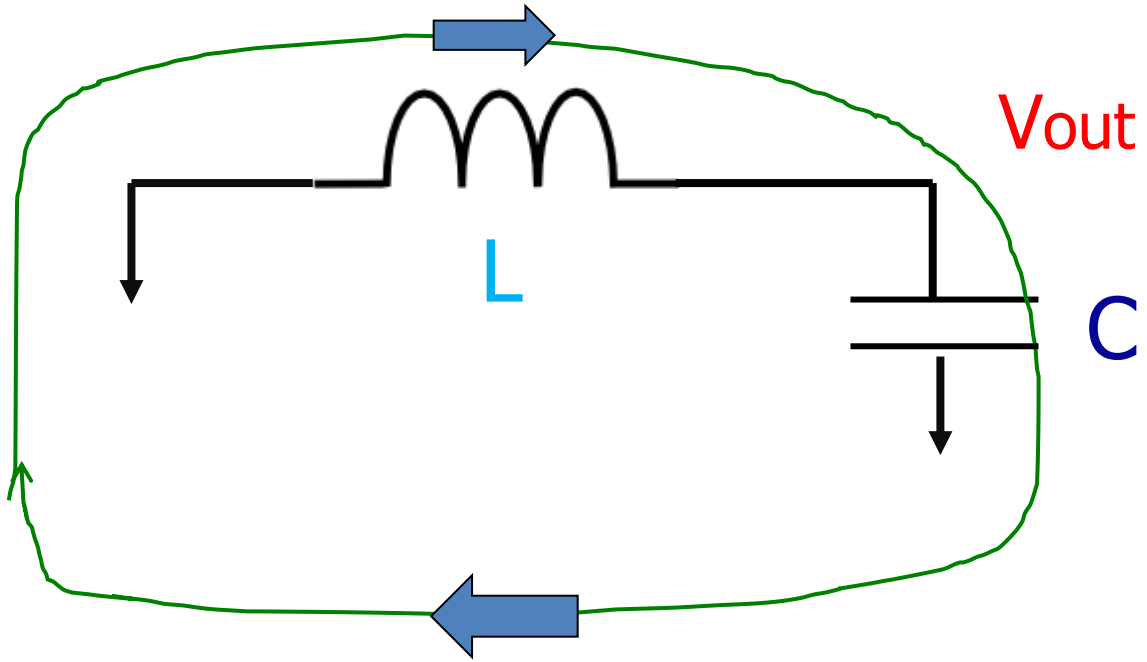


$$E = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\frac{V^2}{L}t^2$$

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= V I

- スイッチオフ

  I=0 ➡ P=0

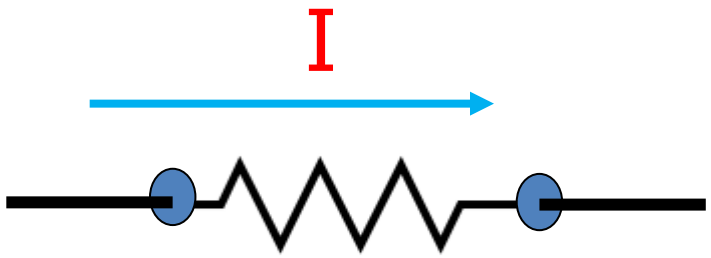
- スイッチオン

  V=0 ➡ P=0

実際のスイッチの電力損失

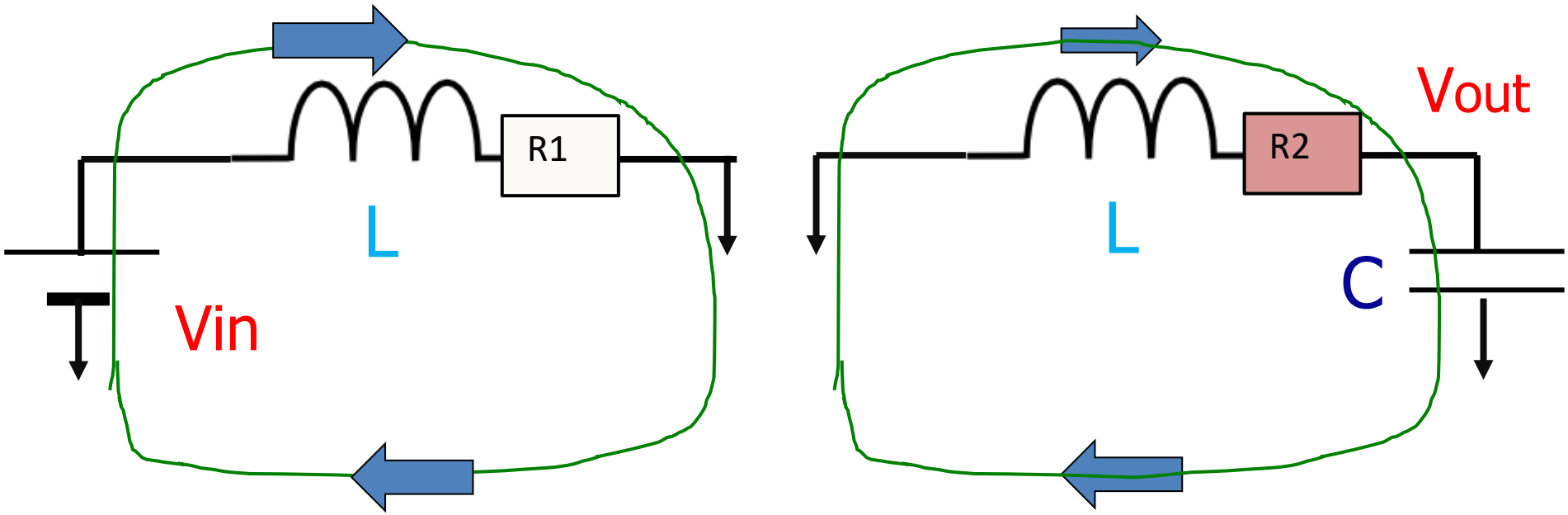
導通損失（Conduction Loss)

● スイッチオン



導通損失　$P = R I^2$

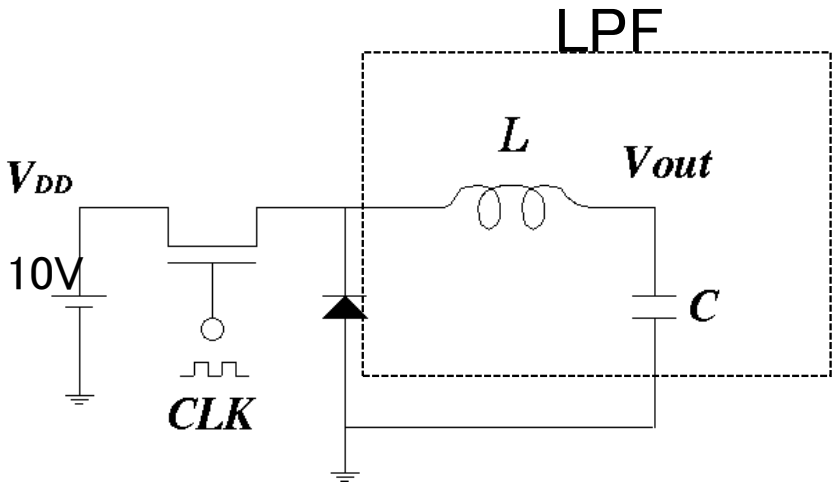
スイッチの導通損失　R1, R2

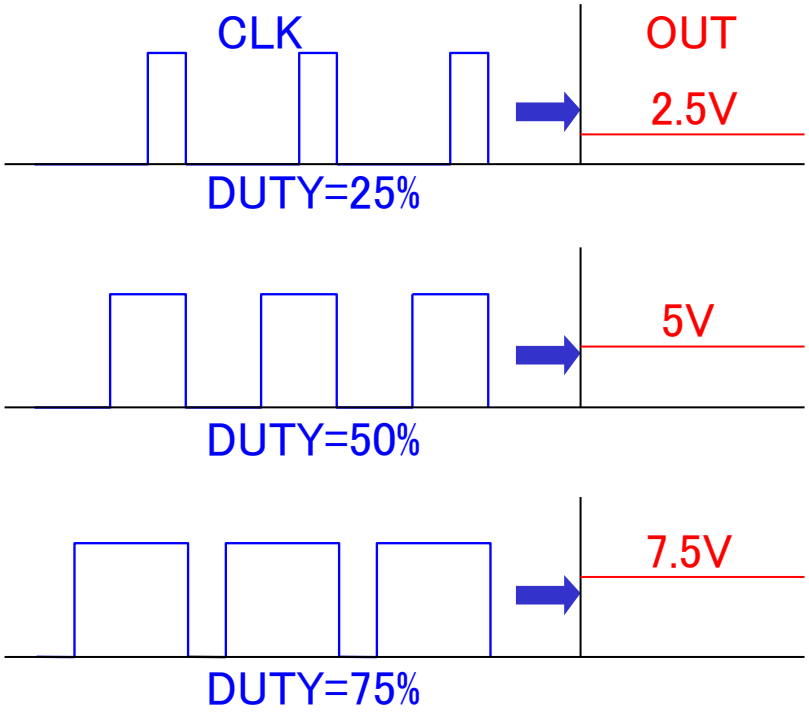


R1, R2 を小さくすれば　電源回路の効率上昇

DC-DC変換回路の原理　説明1

・入力電源電圧Vdd
・CLKでスイッチング
・LCローパス・フィルタ(LPF)で平滑化
・出力電源電圧Vout



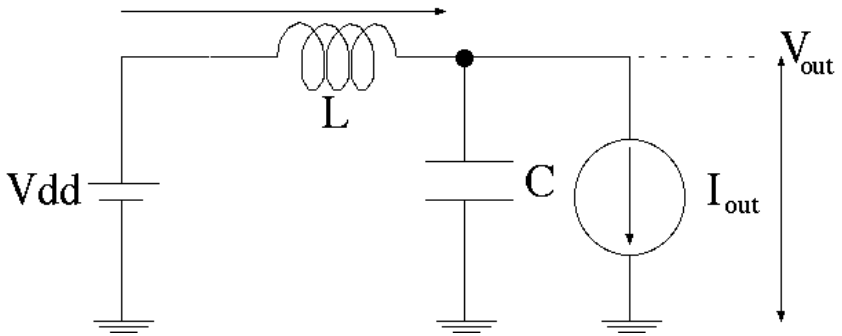


$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T} \bullet V_{dd}$$

T;クロック周期

出力電圧はクロックデューティ(比率)によって決定

DC-DC変換回路の原理　説明2



◆Clk=ONのとき

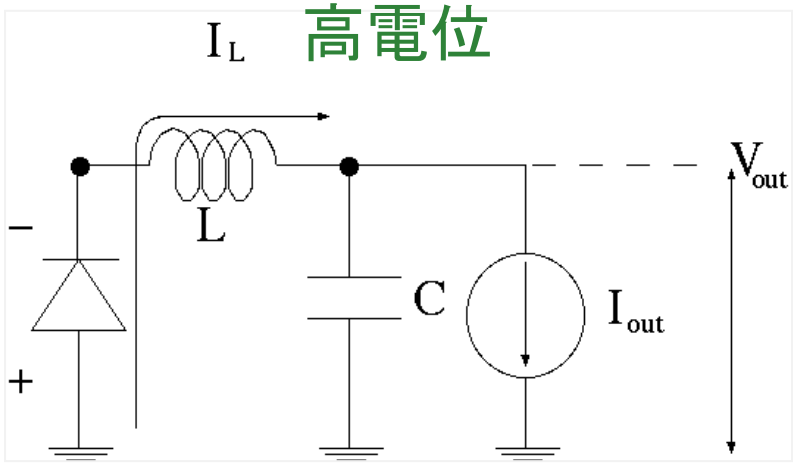
MOSスイッチ　オン

$$\Delta I_L = \frac{V_{dd} - V_{out}}{L} \bullet T_{on}$$

高い電位から低い電位に電流が流れる

インダクタ電流 I_L が増加していく

DC-DC変換回路の原理　説明2



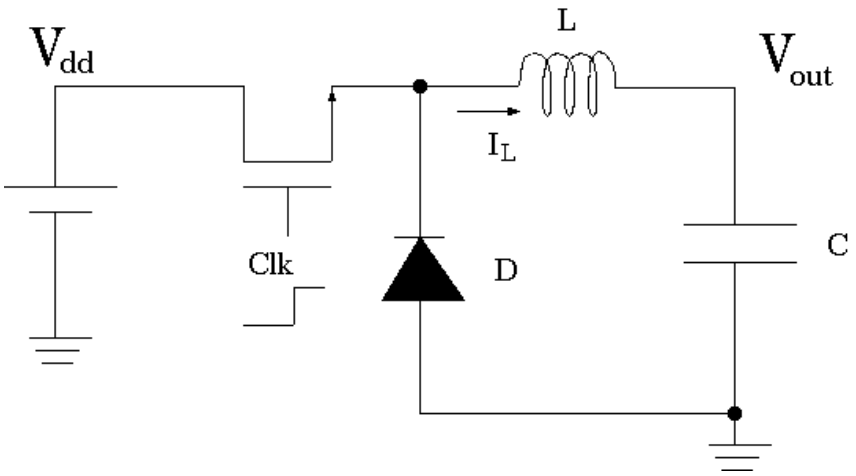
◆Clk=OFFのとき

MOSスイッチ　オフ

$$\Delta I_L = -\frac{V_{out}}{L} \bullet T_{off}$$

低い電位から高い電位に電流が流れる

DC-DC変換回路の原理　説明2



- Clk=ONのとき

$$\Delta I_L = \frac{V_{dd} - V_{out}}{L} \bullet T_{on}$$

- Clk=OFFのとき

$$\Delta I_L = -\frac{V_{out}}{L} \bullet T_{off}$$

ONのときの電流の変化量＝OFFのときの電流の変化量

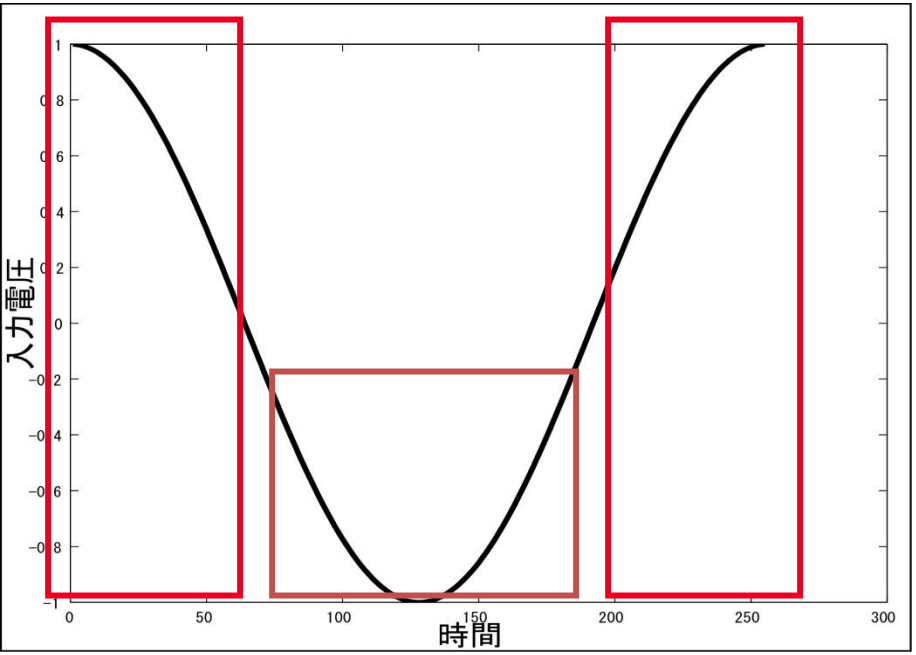
$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T} \bullet V_{dd}$$

T;クロック周期

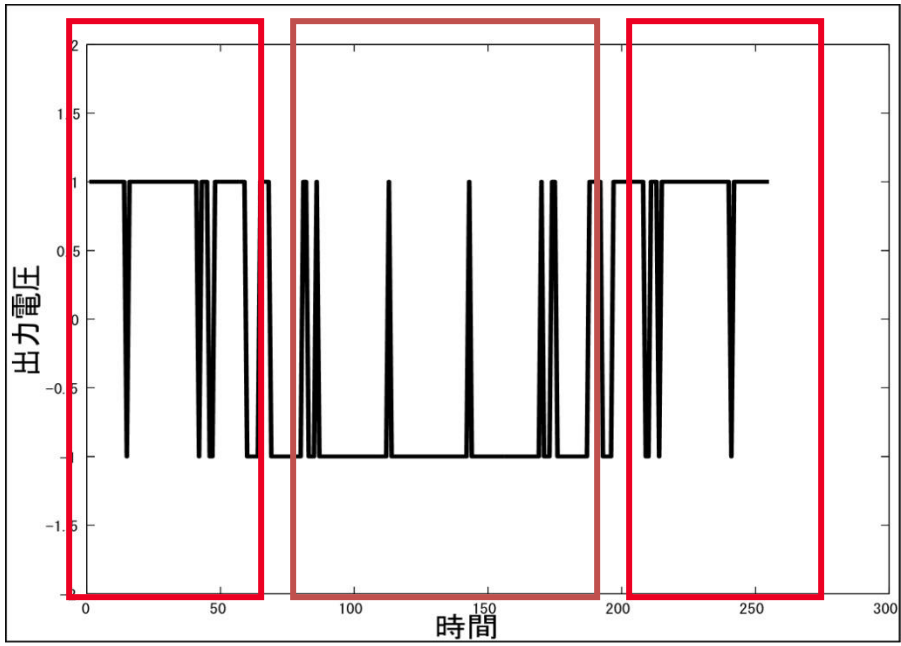
出力電圧はクロックデューティ(比率)によって決定

PWM（パルス幅変調）制御方式

DC-DC電源回路の
駆動クロックデューティ(比率)を変調

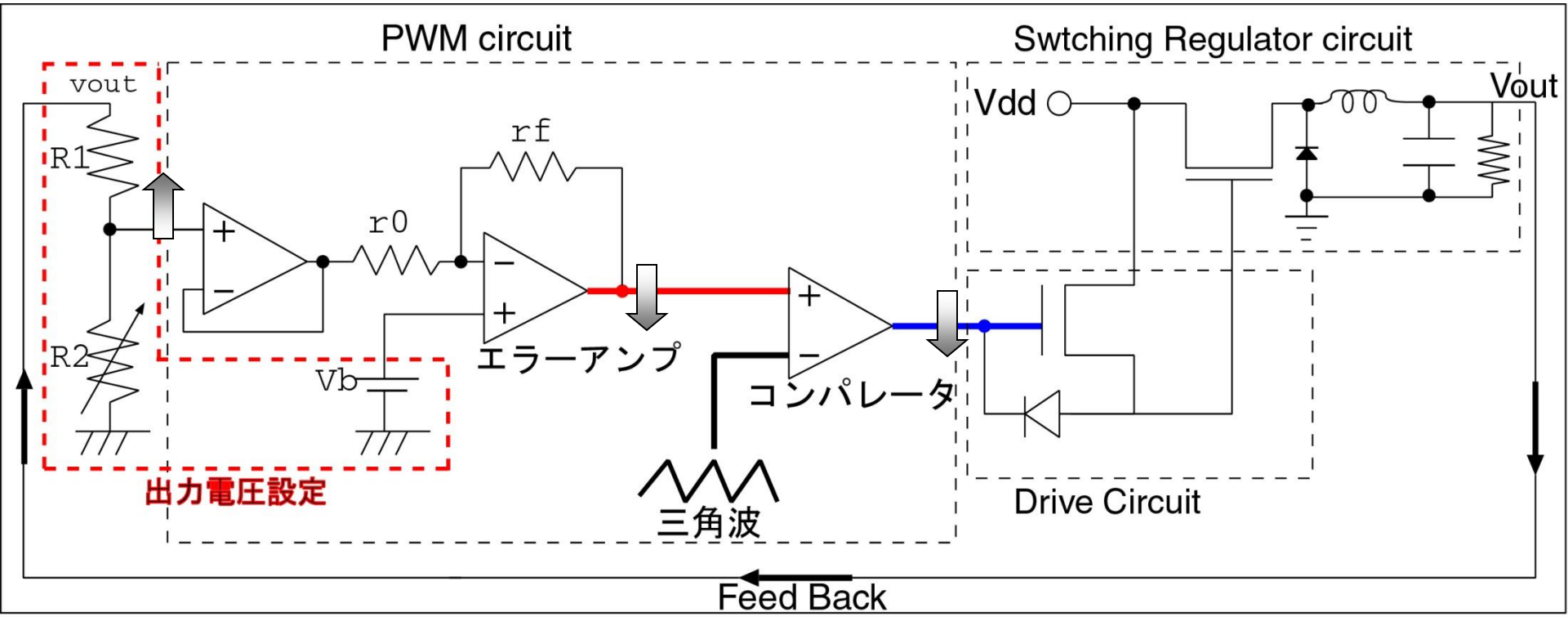


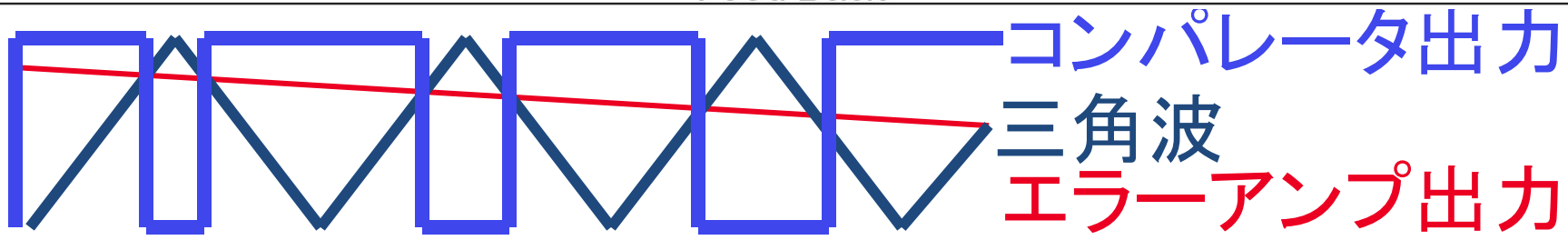
PWM入力信号



PWM出力信号

PWM制御方式を用いたDC-DC変換回路



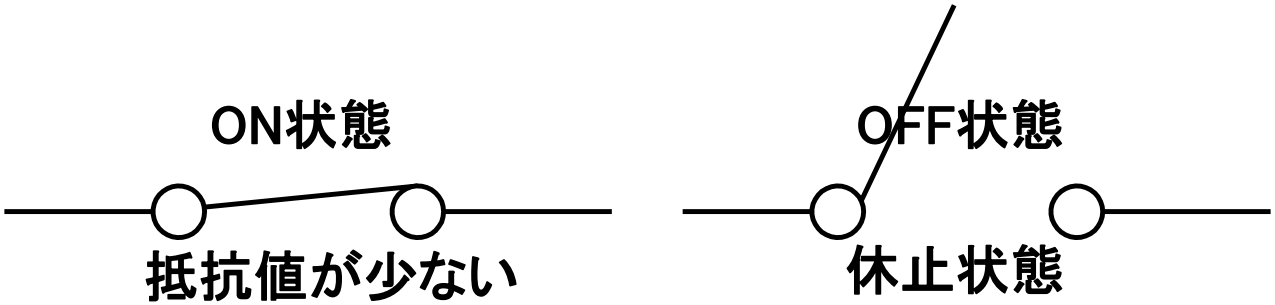


PWM制御 の特徴

メリット

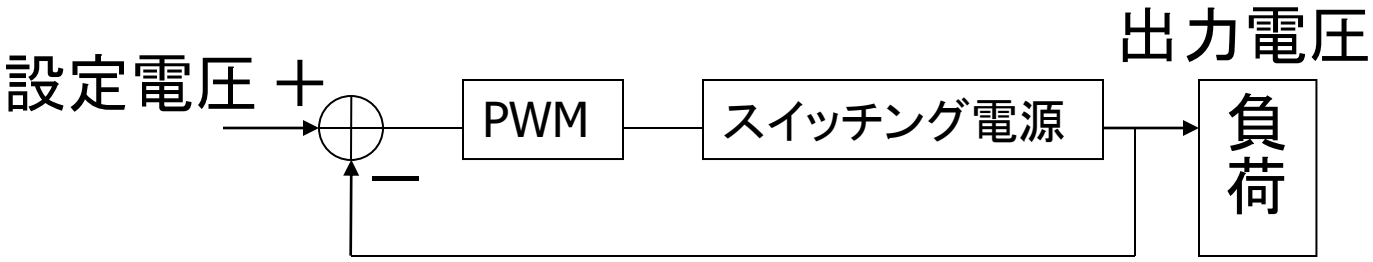
- スイッチでON/OFF

⇨ 電力効率が良い



- 帰還制御

⇨ 負荷によらず出力電圧が安定

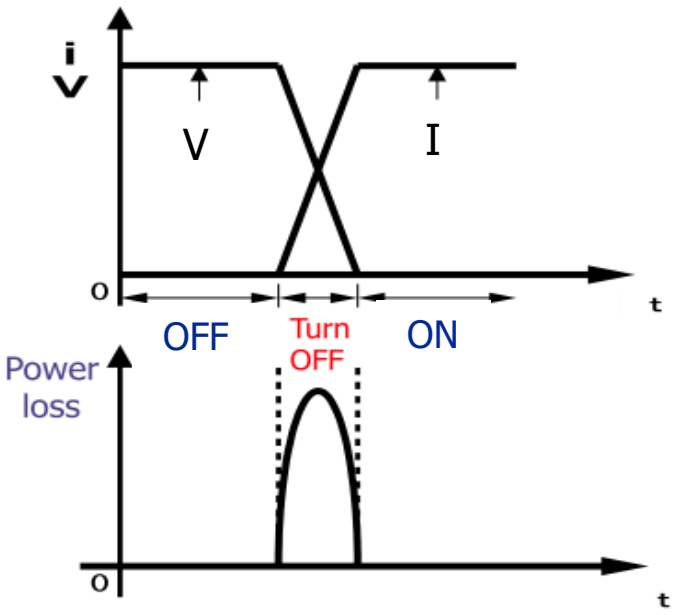


デメリット

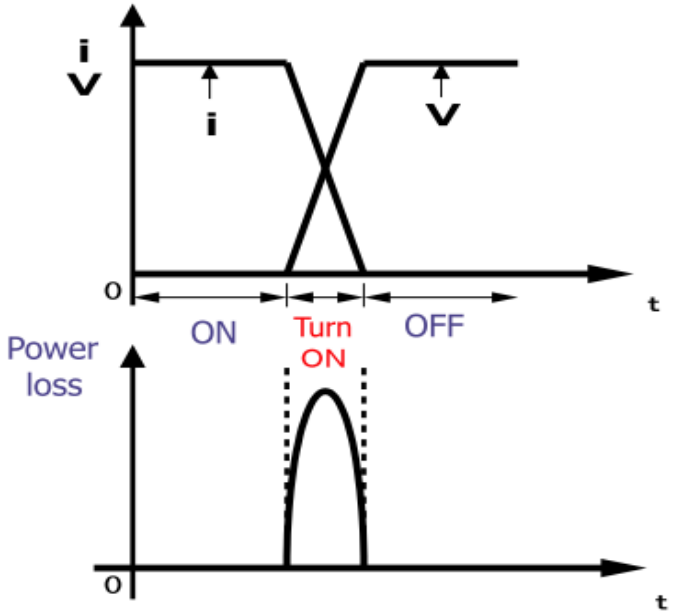
- 電源周波数に同期 ⇨ 高調波ノイズが特定周波数に集中
- 矩形波を発生 ⇨ 高調波ノイズが大きい

実際のスイッチの電力損失

スイッチング損失（Switching Loss)



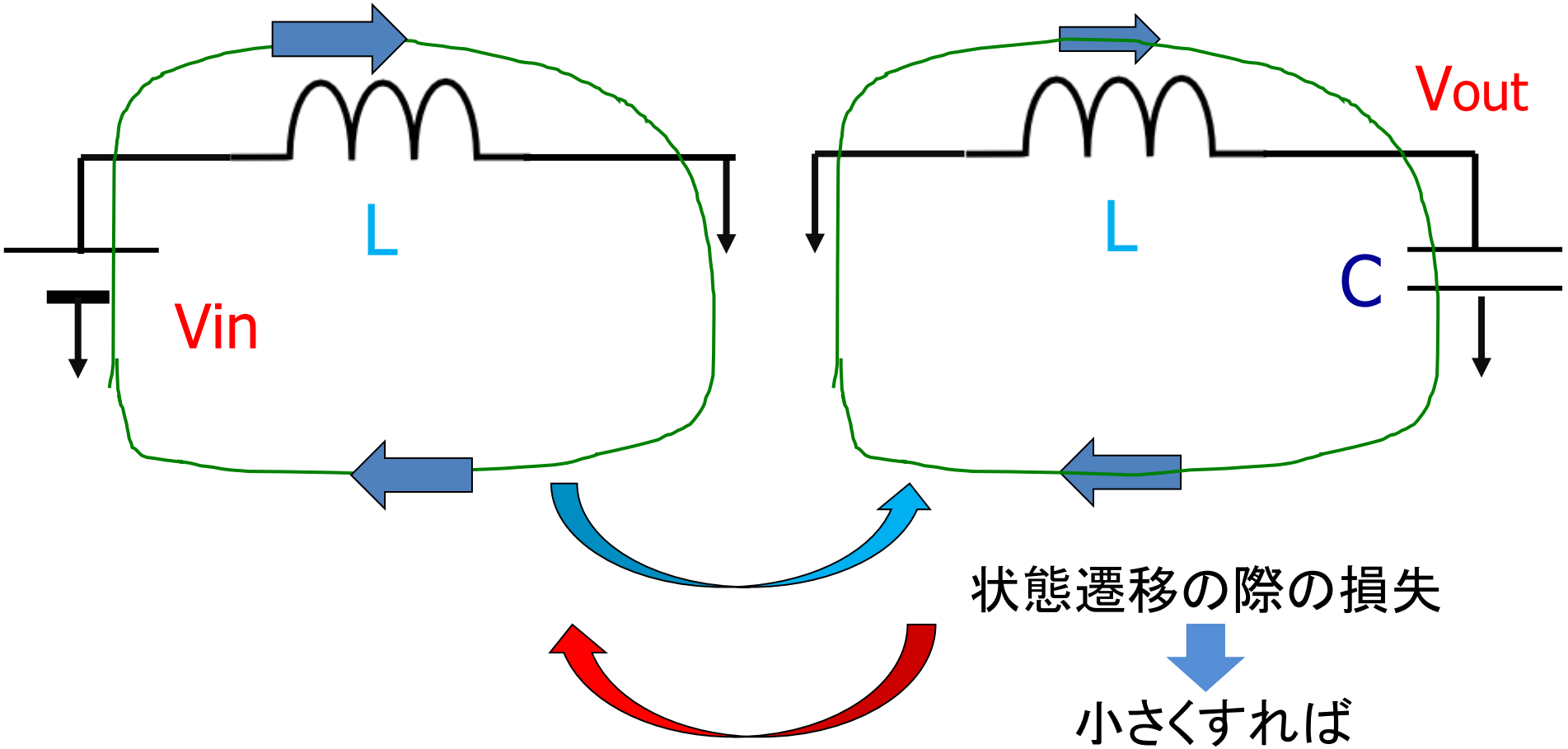
Switch turn OFF



Switch turn ON

高速スイッチングデバイス
⇒ スイッチング損失　小

スイッチング損失



状態遷移の際の損失

小さくすれば
電源の効率上がる

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。

最後に

回路の情報・文献は溢れているが、
一つ一つを本当に理解していくことが重要。

➡ 自分は何が理解できていて
何が理解できてないのか。

「之を知るを之を知ると為し、
知らざるを知らざると為す。
是れ知るなり。」　（論語）

日経産業新聞

2001年(平成13年)11月14日(水曜日)

群大と共同開発 半導体を製品化

三洋電機

電圧調整の電源回路

デジタル放送用

キンセキ 地上波向け開発

基準信号発生器

キンセキは十三日、デジタル地上波放送システム向けの高精度の基準信号発生器「MCXO-094A」=写真=を開発したと発表した。高性能の恒温槽入り水晶発振器とルビジウム原子発振器、全地球測位システム(GPS)を組み合わせた機械で、周波数などのずれを基準値に対して一日に一兆分の一以下にとどめることができる。放送機器メーカー向けに一台九十万一百万円で販売を始めた。

基準信号発生器は放送波をある一定の周波数に保つために不可欠の装置で、現在のアナログ放送でも使われている。ただ、アナログ放送向けは恒温槽入り水晶

三洋電機・群馬大学が共同開発したチャージポンプ回路

共同開発は三洋電機セミコンダクターカンパニーと同学部電気電子工学科の小林春夫研究室で進めた。チャージポンプは、電池などから得られる電気をCCDなどの各部品にあわせ、必要な電圧に調整する回路。現在使われているコイルを使ったスイッチングレギュレーター回路と比べて、小型・薄型で、電磁波の発生が抑えられるのが特徴。

これまでの回路では電磁波によるノイズを抑えるために、CCDと電源回路を離れて配置するなどの配慮が必要だった。コイルが不要なチャージポンプ回路を利用することで、基盤設計の自由度が増すほか、部品の厚みも三分の二の一㍍程度に抑えられる。

従来、チャージポンプは扱うことができる電流が数十㍃(㍃は百万分の一)㌃と小さいほか、効率が低いために用途が限られていた。共同研究で回路の設計を見直して、CCDに必要な数㍃㌃の電流を扱うことが可能になったほか、電圧の制御も整数倍から〇・五倍刻みに細かくなった。

これまでに数社のデジタルカメラなどに採用が決まった。携帯情報端末(PDA)などの携帯機器の普及で、小型の電源回路への需要が高まると判断した。

ICカード用半導体開発

ソニー、独大手と共同

ソニーと半導体大手の独インフィニオンテクノロジーズは十三日、接触、非接触のいずれでも利用できるICカード用半導体を共同で開発すると発表した。両社のICカード向け半導体技術を持ち寄り、多機能のICカードを開発する。二〇〇二年中の製品化を目指す。

ソニーは非接触ICカードの独自仕様「Felica」を展開、半導体チップはアジアを中心に累計で二千五百万個を出荷している。国内ではJR東日本に定期券向けに納入している。インフィニオンは接触型ICカード向けが中心で累計三十億個を出荷、米国防総省にも納入を決めるなどセキュリティー技術に強い。

両社が得意とする技術を組み合わせ、接触、非接触の両方に対応したICカード用半導体を開発。チップの製造はインフィニオンが手がけ、ソニーがカードに組み込み、事業展開する。

ドラム式洗濯乾燥機 スリムに

東芝は幅を五百八十㍉に抑えたドラム式洗濯乾燥機「快速銀河21 TW-641H」=写真=を十一月一日に発売する。同社従来機種に比べ、幅を二十㍉小さくした。これにより約九五%の住宅で設置できるようになったという。

同社が十月に発売したドラム式洗濯乾燥機の販売が好調なことから、品ぞろえを強化する。

洗濯容量は六㌔、乾燥容量は三・六㌔。従来機種に比べ小さくし、単身者や小家族などの需要に対応できるようにした。価格はオープンだが、店頭では十四万八千円程度の見込み。

洗濯から乾燥までの時間は約百七十分。脱水時のドラムの回転数を毎分千二百回に高速化したほか、出力が千四百㌧の乾燥用ヒーターを搭載して実現した。

温風で除菌する除菌モードも搭載。乾燥行程の消費電力量を約一六%削減した。運転音は洗濯時で三十二㌫、脱水時で四十四㌫。色はパールブルー、フロスティホワイトの二種類。

東芝、95%の住宅に設置可能

ボタン1つで頭出し VTR3機種を発売

アイワ

アイワは録画した番組をボタンを押すだけで頭出し再生できるVTR三機種を二十一日から順次発売する。タイマー録画終了後、「留守録コール」のボタンを押すと録画開始部分まで巻き戻して再生する。タイマー録画して外出、帰宅した際などすぐに録画した番組を見ることができる。

BS(放送衛星)アナログチューナー内蔵のハイファイ「HV-BX300」(二万九千五百円)、ハイファイの「HV-FR100」(二万九千五百円)、

ITOH DENKI
IT時代のe-コンベヤパーツ
POWER MOLLER. 伊東電機株式会社
www.itohdenki.co.jp

日本経済新聞

2001年(平成13年)11月14日(水曜日)

電圧調整のLSI外販

三洋電機 群馬大と共同開発

三洋電機は群馬大学工学部と共同開発した半導体の外部販売を始める。デジタルカメラや携帯電話などに使われる電源供給部品で、コイルなどを使う現在の方法と比べて製品の小型化につながる。来年二月から国内や欧州メーカー向けに量産を始め、二〇〇三年度に百億円の販売を見込む。両者は半導体開発の共同研究を手掛けてきたが、製品化は初めて。

デジカメ・携帯電話用

三洋電機の東京製作所(群馬県大泉町)に拠点を置く同社セミコンダクターカンパニーと群馬大工学部電気電子工学科の小林春夫研究室が共同開発した。小林助教授はシステムLSIの回路設計が専門で、三洋電機のほか地元企業などと共同研究を進めている。

製品化するのは「チャージポンプ」と呼ばれる回路をくみ込んだ大規模集積回路(LSI)。電池から得られる電圧をデジタルカメラの画像素子や携帯電話や携帯情報端末(PDA)のカラー液晶表示など各部品が使う電圧に調整する。

こうした電圧調整にはコイルを使った部品を使っているが、コイルで発生する電磁波が画像上でノイズになってあらわれるなどの弊害がある。部品同士を離して置いたりシールドで覆うなどの対策が必要だった。

チャージポンプはコンデンサを利用するためノイズが発生しない。部品を一緒に設置できるほか部品数も少なくてすむなど回路の小型化につながり、設計の自由度が増す。厚さも三分の二程度の約一㍉になる。

チャージポンプの理論は以前から提唱されていたが、効率が五〇%程度と低いなどの問題があった。回路の設計を見直して、課題とされていた電流が逆流する問題などを解決。効率を九五%に上げ、電圧を細かく制御できるよう改良した。

これまでに数社のデジタルカメラなどに採用が決まった。携帯機器の小型化競争で需要が高まると見ており、国内外の携帯機器メーカー向けに拡販する。

群馬大学は一九八八年に地域共同研究センターを設置。今年度は民間から専任教官を迎え入れたほか、同大学などが中心になって栃木、埼玉各県の企業や大学、行政の連携を目指した「北関東産官学研究会」を設立するなど共同研究の拡充を図っている。二〇〇〇年度に約三十五件だった共同研究は、今年度は倍増する見通し。

コンデンサで電圧を調整する(三洋電機・群馬大学が共同開発した回路)

足利銀増資

3億円引き受け

栃木県、12月補正で検討

栃木県の福田昭夫知事は十三日の定例会見で、足利銀行が県に要請していた第三者割当増資の引受額について「三億円の補正予算案を十二月県議会に提出する方向で検討している」と述べた。引受額は一九九九年

同行は二〇〇二年三月期に多額の不良債権処理を実施する結果、自己資本比率が六・二三%に低下するのを補うため、来年一月末までの払い込みで約二百五十億円の第三者割当増資を計画している。県の制度融資が一・二七%を占めていることから、増資額約二百五十億円の一・二七%に当たる三億円を引き受ける方針。

茨城で調剤薬局展開

企業OBが中小支援

群馬銀行などの企業退職者が中心となり総合コンサルティング会社を前橋市に設立し、このほど本格営業を始めた。金融のほか、製造業、流通など幅広い業種のOBが参加しており、地元中小企業の経営全般をアドバイスする。

この会社はコンサルファーム群馬(前橋市、清水邦宏社長)。群銀出身の清水社長のほか、県内の製造業者や流通業者の早期退職者や定年退職者が中心になって結成した。会計事務所やコンピューターソフト製作会社などとも提携し、経営管理やマーケティング、システム構築など幅広い分野でコンサル業務をする。

コンサルティング料は月三十万円前後が基本。大手コンサル会社よりも低めに抑えて、県内の中小・中堅企業の需要を掘り起こす。地場のコンサルティング会社は生産管理やコンピューターシステムなど専門分野に特化したものが多く、経営全般を対象とするのは珍しい。

清水社長は「中小企業は人材育成や資金繰りの対応がおろそかになりがち。経営ノウハウの支援で成長企業を育てつつ、赤字企業の立て直しにも取り組みたい」と意気込んでいる。

金融・製造業など広く参加

前橋にコンサル会社

イプカーグループ

上海に専門商社設立

東南アジアで加工品原料調達

現地工場に供給

茨城県内で素材加工品を製造するサカイグループは中国・上海に専門商社を設立した。東南アジアで調達した資材を上海の現地工場に供給するほか、上海で作った製品や中国で仕入れた衣類を日本に供給する。製造拠点のある上海に商社を置くことで原料や資材の調達コストを削減するとともに、素材加工以外への多角化を進める。

設立したのは上海坂井国際貿易公司(坂井宏充社長)。グループの運営会社、泉商事(水戸市、坂井康亨社長)が一〇〇%出資した。坂井貿易公司は東南アジアなどから鉄、ガラス、木材など各種原料を調達。加工品を製造する現地法人の上海坂井塑料成形公司に供給するほか、現地の他の製造会社にも原料を販売する。

作業服などの衣類を中国国内で調達して上海坂井塑料で使うほか、日本に輸入してグループの製造会社に供給する。国内企業に外販もする。木材など各種原料・資材や半製品を東南アジアなどで調達し、加工品の販売先である家電メーカーや厨房(ちゅうぼう)製造会社などに売ることも検討

https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/2003-10-10myouno-analog.pdf

https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/e84-c_10_1602.pdf

https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/e86-a_2_371.pdf