集積回路設計のための
パワーエレクトロニクス

群馬大学電気電子工学科
○早坂直人、柏瀬賢二、黒岩伸幸、北原崇、 小林春夫
三洋電機セミコンダクタ･カンパニー
名野隆夫

発表内容

1. 研究目的
2. ゼロ電圧スイッチング (Zero Voltage Switching)
3. ゼロ電流スイッチング (Zero Current Switching)
4. デジタル CMOS LSI の低消費電力化

   → 断熱的論理回路 (Adiabatic Logic Circuit)
5. まとめと今後の課題

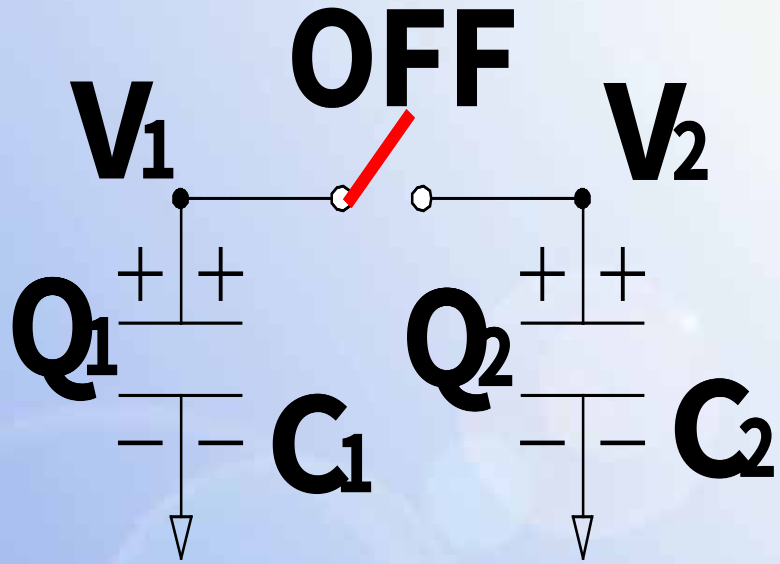
1.研究目的

● 研究目的

集積回路設計にはパワーエレクトロニクスの
考え方が重要になってくる。

この観点から電源回路に加えて
ゼロ電圧スイッチング
ゼロ電流スイッチング
デジタルCMOS LSI の低消費電力化
を調べる。

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



● スイッチ OFF 時

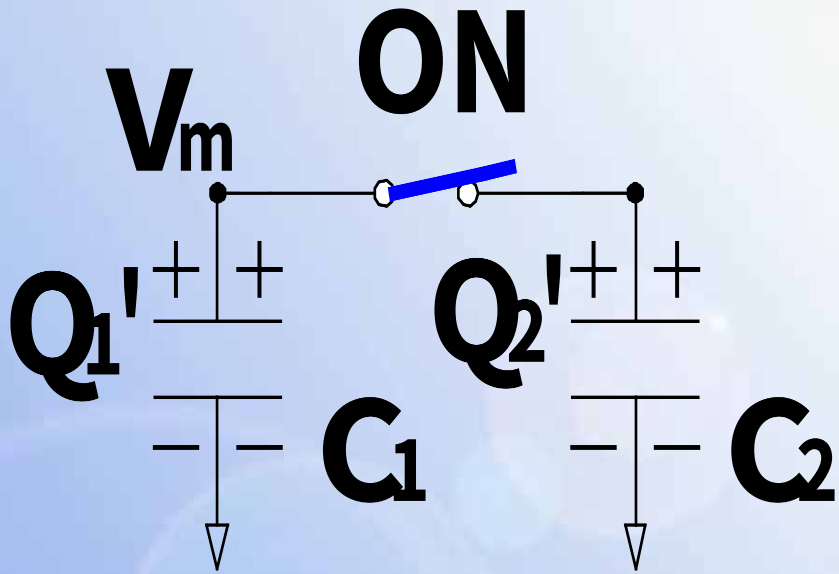
電荷：

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1$$

$$Q_2 = C_2 \cdot V_2$$

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 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

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

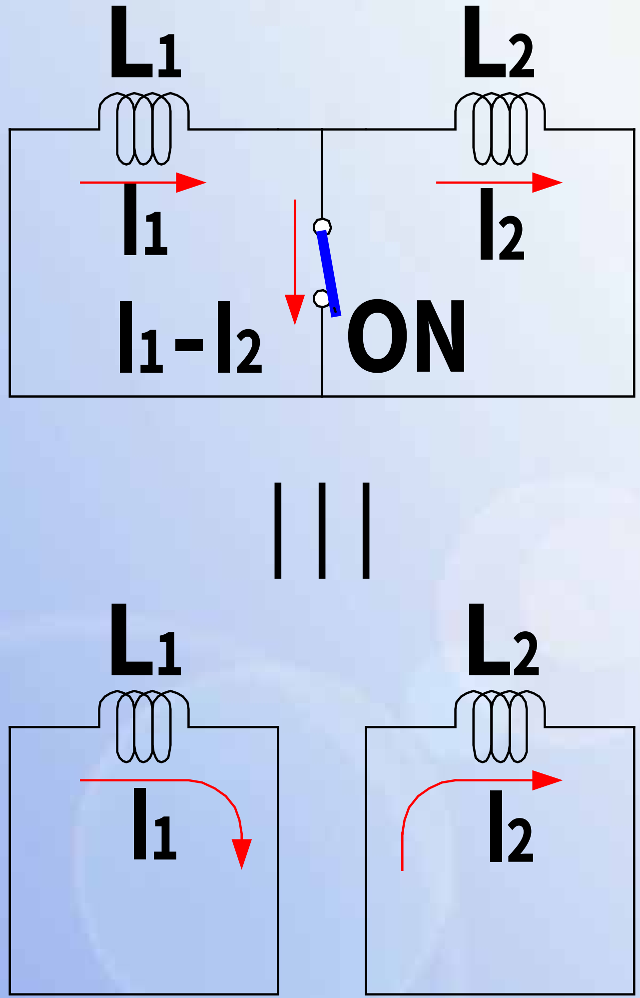
$$= \frac{1}{2}\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}(V_1 - V_2)^2$$

- $V_1 = V_2$ 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**　$E_{loss} = 0$

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

ゼロ電圧スイッチングの双対問題



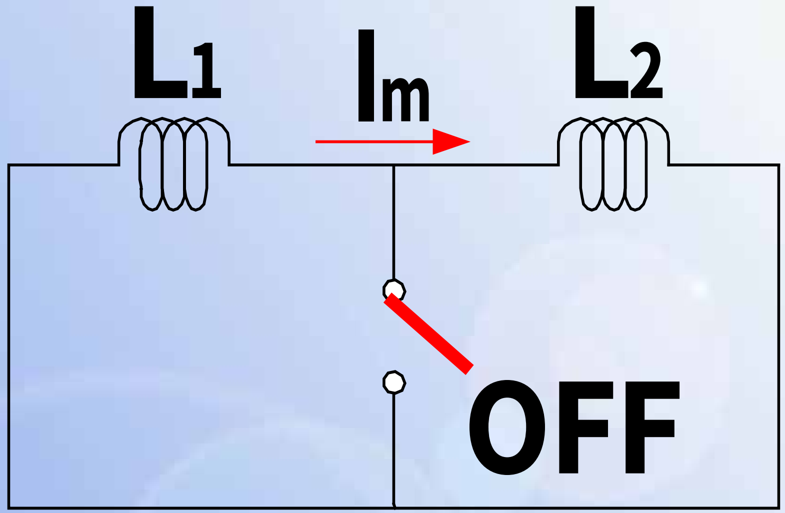
● スイッチ ON 時

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 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

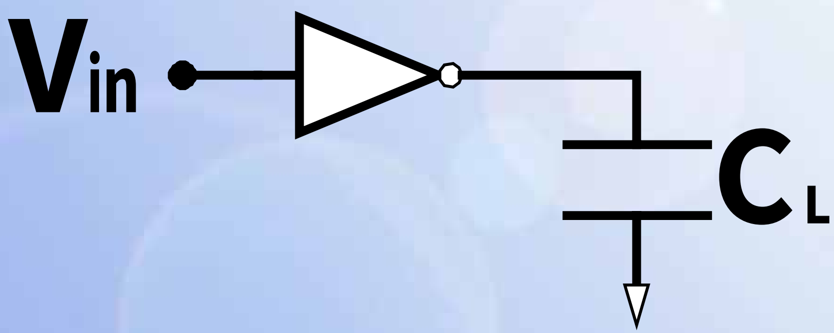
➡ スイッチ･エネルギー･ロス $E_{loss} = 0$

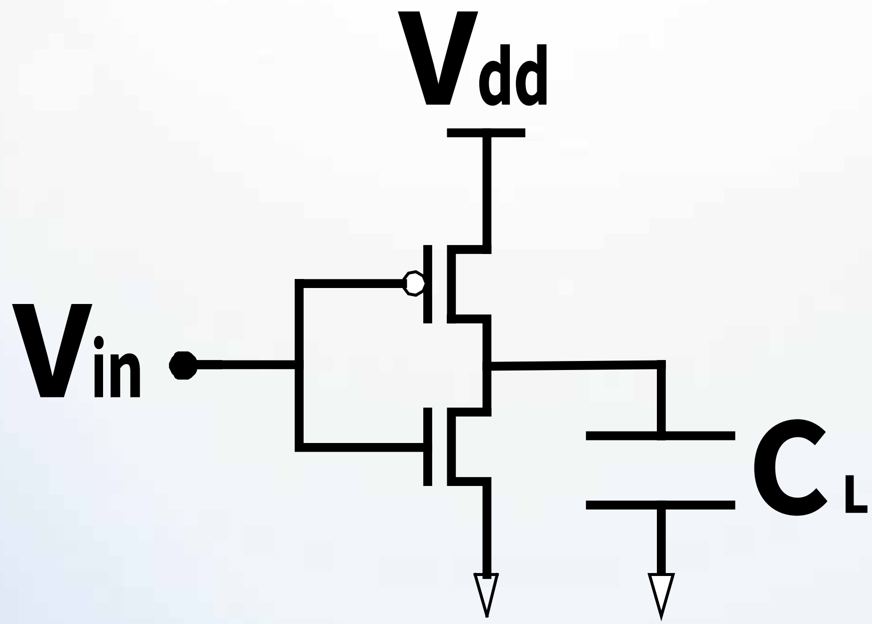
4.デジタルCMOS LSIの低消費電力化

（1） デジタル CMOS 回路の電力消費の原理
（2） 断熱的論理回路 の原理
（3） 断熱的論理回路 の過渡解析

(1) デジタルCMOS回路の電力消費の原理

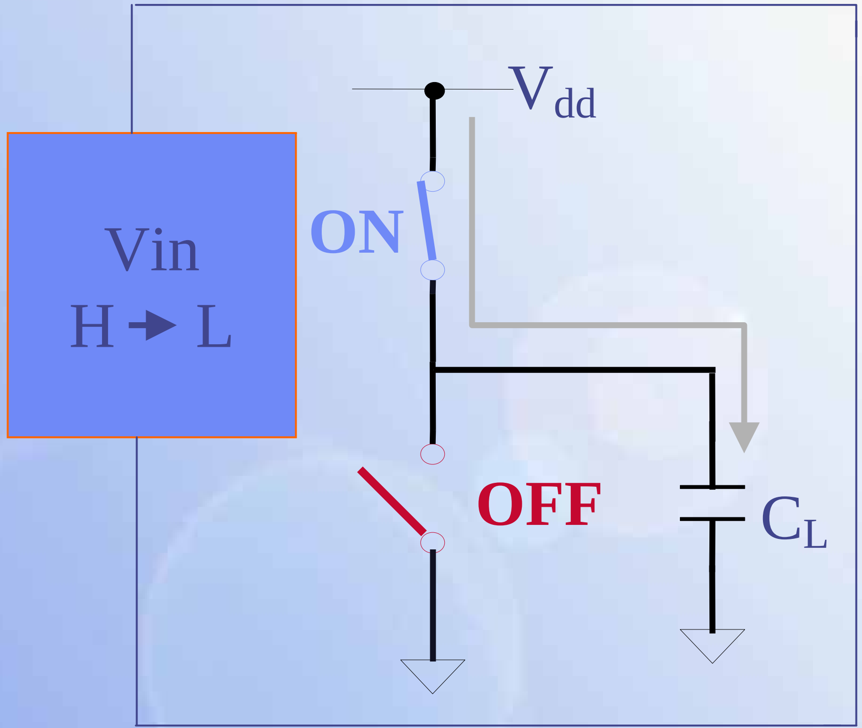
● デジタルCMOS回路 (インバータ)

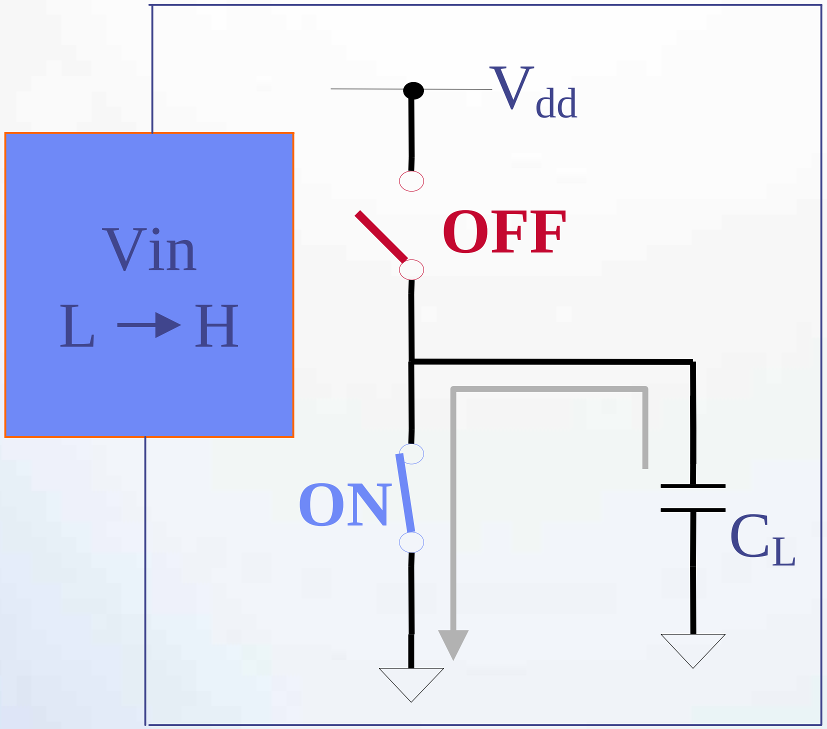




● デジタルCMOS回路 (静的電力消費はゼロ)

● デジタルCMOS回路
(動的消費電力)





● 動的消費電力

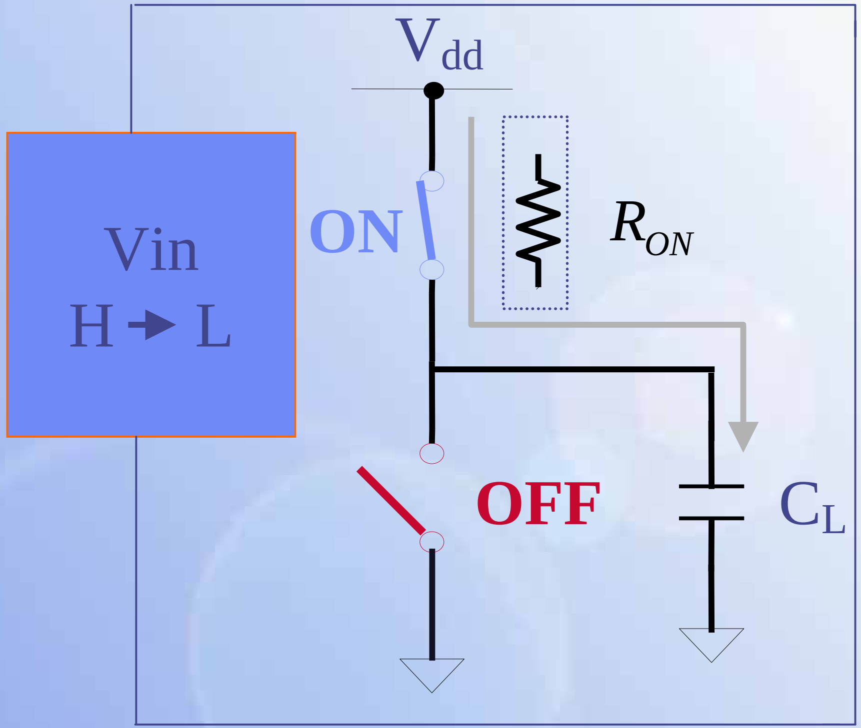
V_{in} : H ⟶ L

蓄積電荷Q : 0 ⟶ $C_L V_{dd}$

↓

C_Lでの蓄積エネルギー

$$\frac{1}{2} C_L \cdot V_{dd}{}^2$$



SW ONによるオン抵抗R_{ON}での

消費エネルギー

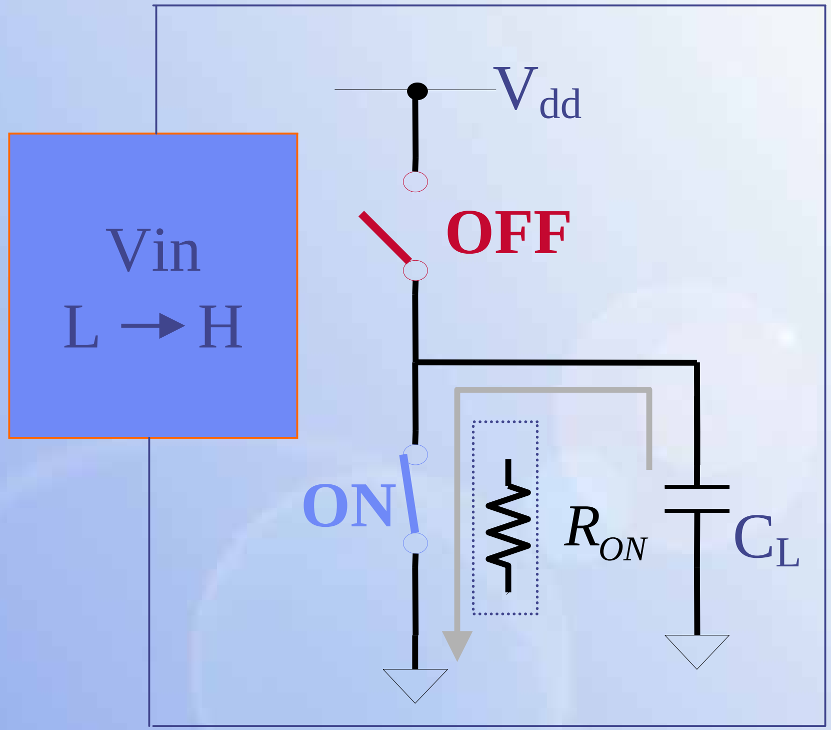
↓

$$\frac{1}{2} C_L \cdot V_{dd}{}^2$$

<u>ゼロ電圧スイッチングではない</u>

● 動的消費電力

V_{in}：	L	→	H
蓄積電荷Q：	$C_L V_{dd}$	→	0



↓

C_Lでの蓄積エネルギー
は引き抜かれる

↓

SW ON によるオン抵抗で
エネルギーとして消費される

↓

$$\frac{1}{2} C_L \cdot V_{dd}^{\ 2}$$

ゼロ電圧スイッチングではない

● 動的消費電力

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 f 回のトグルするとき

トータルの電荷 $Q_{total} = f\ C_L\ V_{dd}$

∴ 消費電力

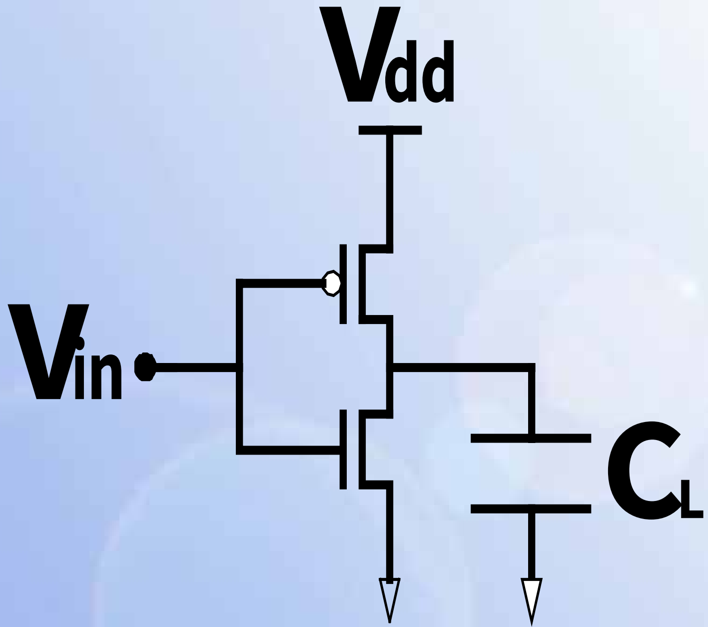
$$P = V_{dd} \cdot I$$
$$= V_{dd} (f \cdot C_L \cdot V_{dd})$$
$$= f \cdot C_L \cdot V_{dd}^{\ 2}$$

f :出力トグル周波数　C_L :負荷容量

V_{dd} :電源電圧

(2) 断熱的論理回路の原理

● CMOS VLSIの**消費電力**が大きな問題



CMOS論理回路の消費電力

$$P_{ower} = f \cdot C_L \cdot V_{dd}^{\ 2}$$

↓ **従来の手法**

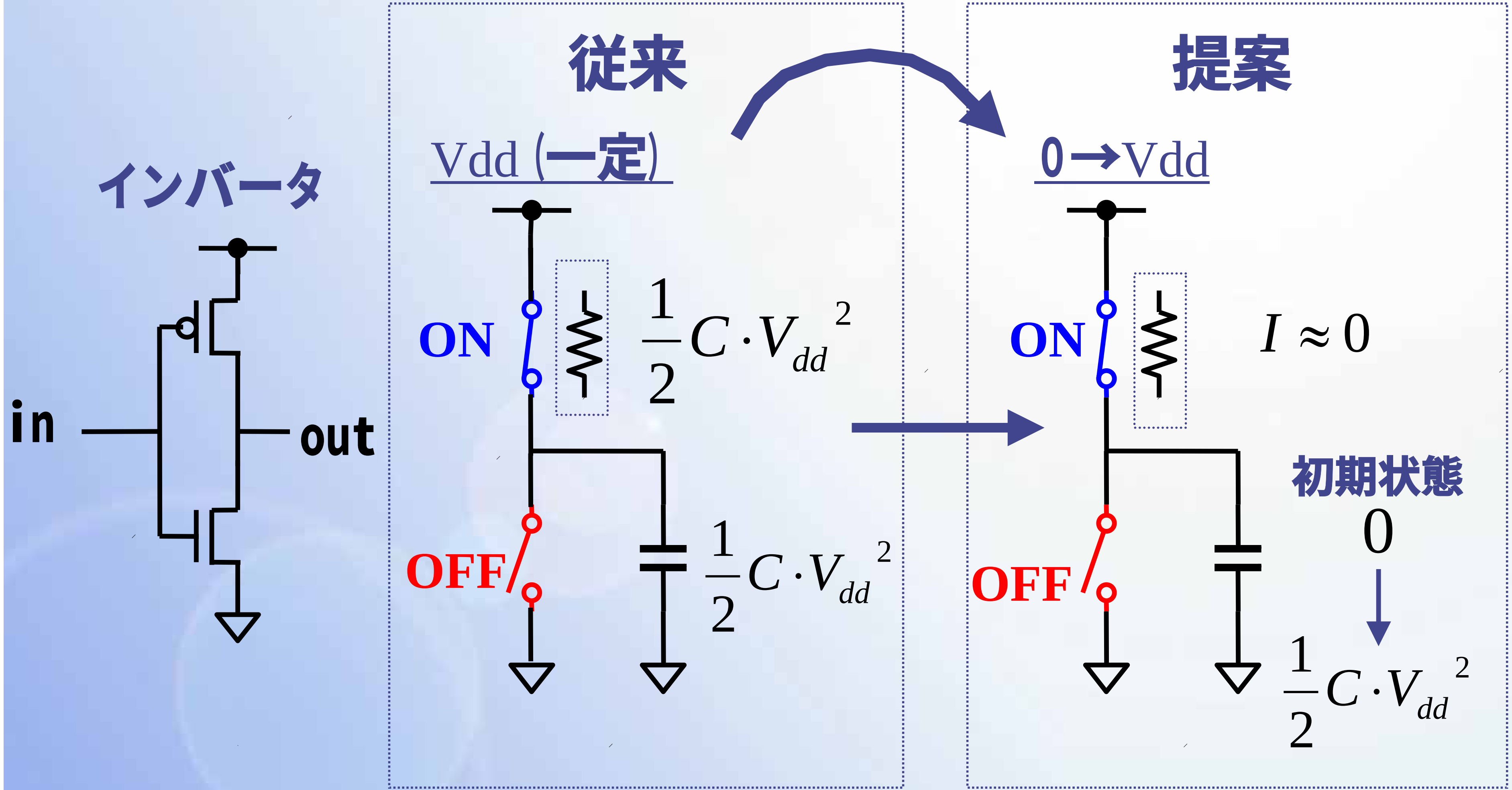
f, C_L, V_{dd} **を小さくする**

今回考える低消費電力化の方法

↓

断熱的論理回路を考察

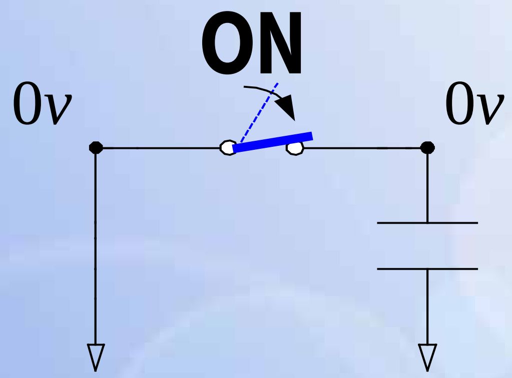
● 断熱的論理回路（CMOS回路）



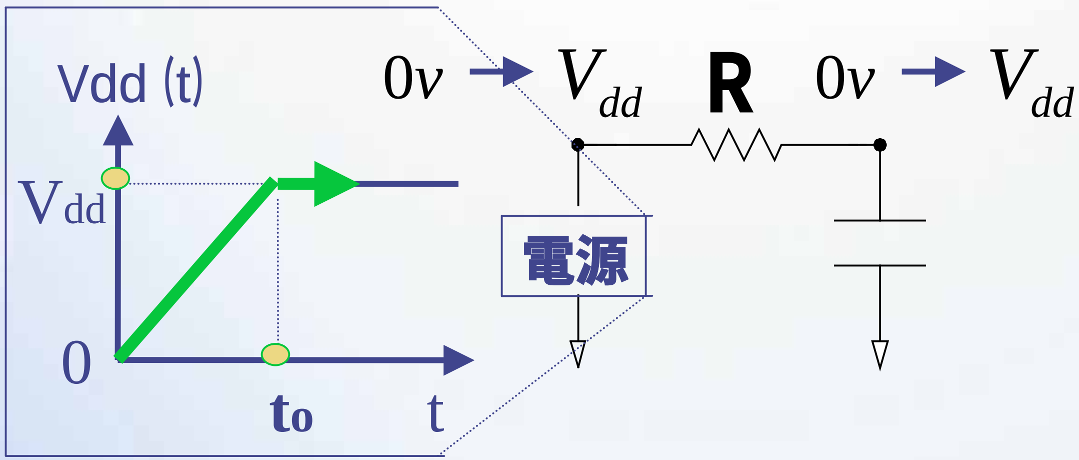
●断熱的論理回路（入力 High ⟶ Low)の考察

電源をゆっくりと立ち上げる。 ➡ 熱力学的可逆過程

➡ 断熱的論理回路 (adiabatic logic circuit)



初期状態



ゼロ電圧スイッチング ➡ ゆっくり電源を立ち上げる

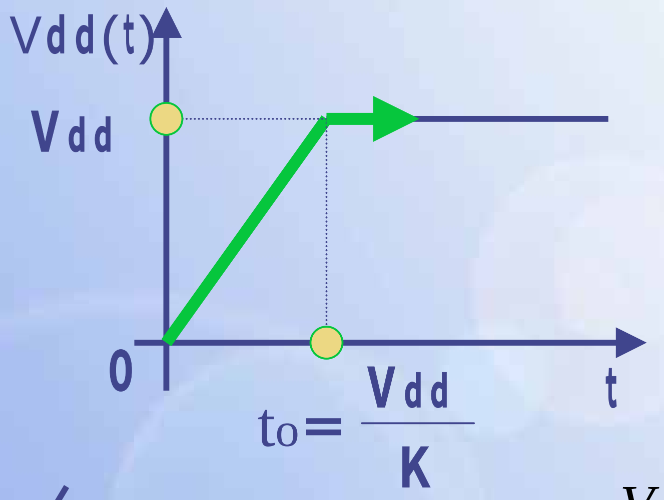
● 断熱的論理回路の解析

電源 Vdd ： 一定

↓

電源 Vdd(t) ： ランプ入力

t_0 まで k に比例する



$$
\begin{cases}
V_{dd}(t) = k \cdot t & (0 \le t \le \frac{V_{dd}}{k}) \\
V_{dd}(t) = V_{dd} & (\frac{V_{dd}}{k} \le t)
\end{cases}
$$

RC 回路

$$
\begin{cases}
V_{out}(t) = \frac{1}{C}\int_0^t I(t)dt \\
I(t) = \frac{V_{dd}(t) - V_{out}(t)}{R}
\end{cases}
$$

$$\therefore R \cdot I(t) = k \cdot t - \frac{1}{C}\int_0^t I(t)dt$$

↓ ラプラス変換

$$I(s) = k \cdot C\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{C \cdot R}}\right)$$

↓ 逆ラプラス変換

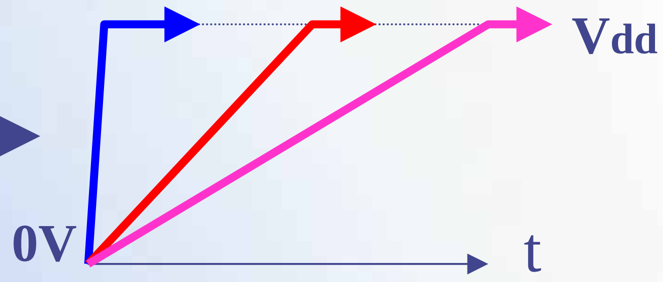
$$\therefore I(t) = k \cdot C\left(1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C}t}\right)$$

$$\propto k, C$$

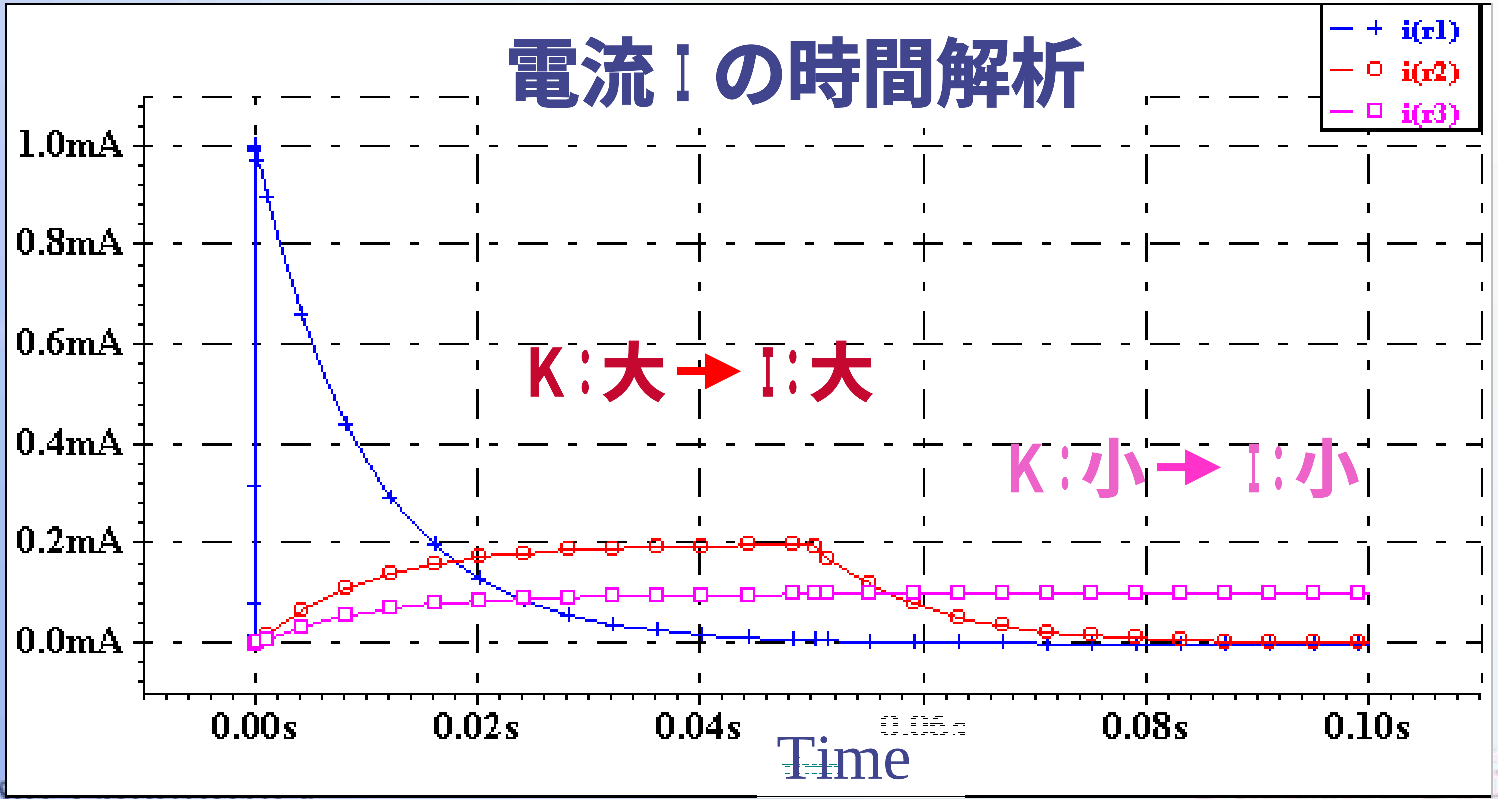
●断熱的論理回路の解析

ランプ入力における電流I(t)の時間解析

電源 →



青;直流電源
赤;ランプ入力(k:大)
紫;ランプ入力(k:小)

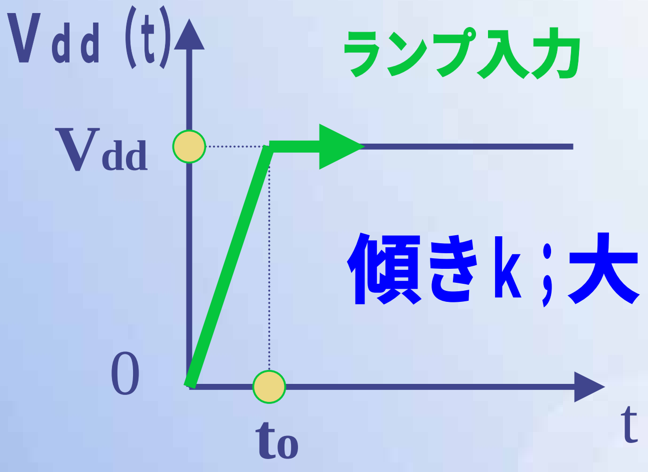


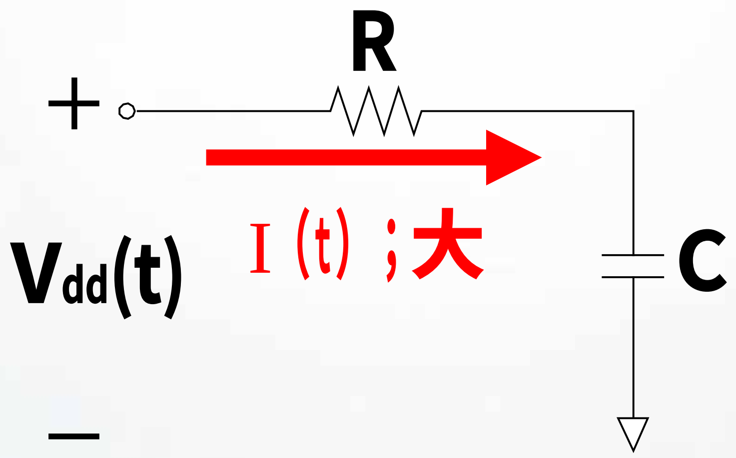
群馬大学

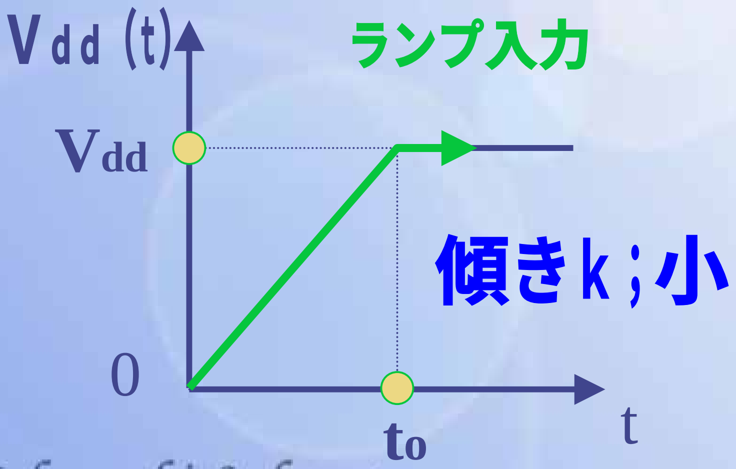
● 断熱的論理回路の原理

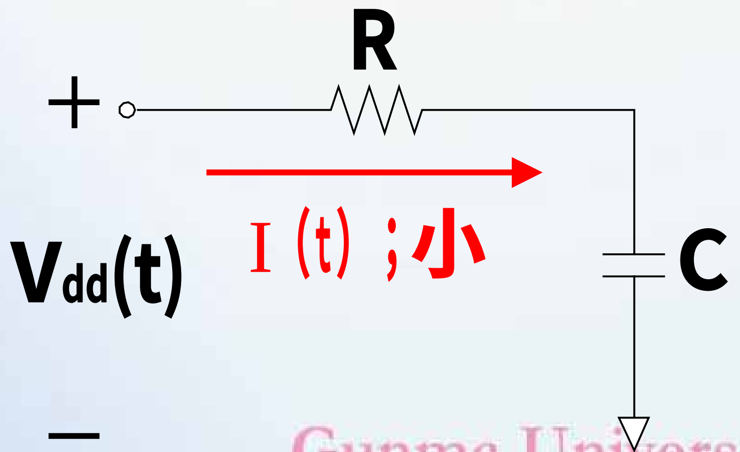
ゆっくりと電源Vddを上げる

消費エネルギーは電流 I(t)の2乗に比例



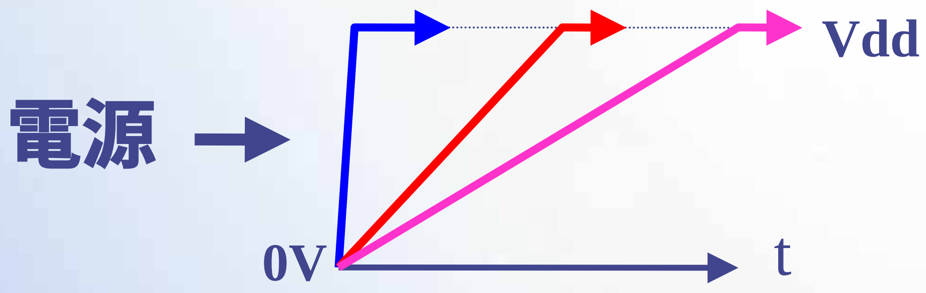






● 断熱的論理回路

R での消費エネルギーは電流I (t) の2乗に比例



消費電力

$$P = R \cdot I(t)^2$$

$\longrightarrow$ P :小

消費エネルギー

I (t) :小

$$E_R = \int P dt = R \int I(t)^2 dt$$

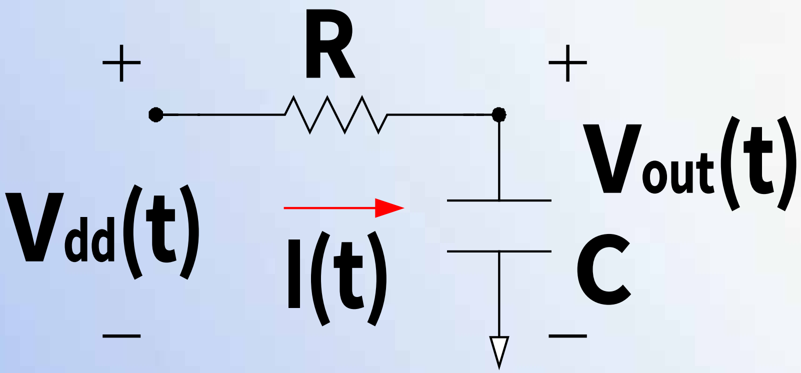
$\longrightarrow$ E_R :小

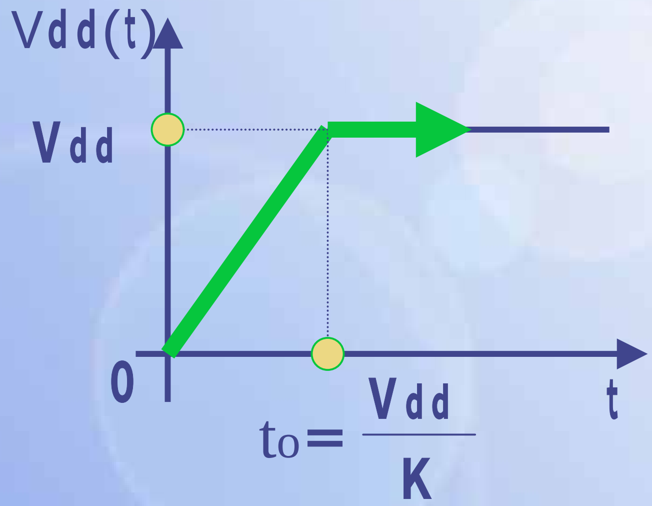
（3）断熱的論理回路の過渡解析

ＲＣ 回路における
Ｒ での消費エネルギーの解析

ランプ波入力電源

●ランプ波入力電源





● 電源：V dd(t)

$$
\begin{cases}
V_{dd}(t) = k \cdot t & \left(0 \le t \le \dfrac{V_{dd}}{k}\right) \\
V_{dd}(t) = V_{dd} & \left(\dfrac{V_{dd}}{k} \le t\right)
\end{cases}
$$

RC **回路から**

$$
\begin{cases}
I(t) = \dfrac{V_{dd}(t) - V_{out}(t)}{R} \\
V_{out}(t) = \dfrac{1}{C}\displaystyle\int_0^t I(t)\,dt
\end{cases}
$$

$$
\therefore R \cdot C \frac{d}{dt} V_{out}(t) + V_{out}(t) = V_{dd}(t)
$$

上の微分方程式を解く。

● Vout(t)を求める

（ｉ） $0 \le t \le \dfrac{V_{dd}}{k}$ のとき、 $V_{out}(0) = 0$

$$V_{out}(t) = k \cdot t - k \cdot R \cdot C\left(1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C}t}\right)$$

$t = \dfrac{V_{dd}}{k}$ のとき V_0 とおくと

$$V_0 = V_{dd} - k \cdot R \cdot C\left(1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C}\frac{V_{dd}}{k}}\right)$$

（ii） $\dfrac{V_{dd}}{k} \le t$ のとき、 $V_{out}\left(\dfrac{V_{dd}}{k}\right) = V_o$

$$V_{out}(t) = V_{dd} + (V_o - V_{dd})e^{-\frac{1}{R \cdot C}\left(t - \frac{V_{dd}}{k}\right)}$$

● 消費エネルギーを求める

$$E = \int_0^{\infty} \frac{1}{R}\left(V_{dd}(t) - V_{out}(t)\right)^2 dt = E_1 + E_2$$

（ｉ） $0 \le t \le \dfrac{V_{dd}}{k}$ のとき

$$E_1 = k \cdot R \cdot C^2 V_{dd} + k^2 R^2 C^3 \left(2e^{-\frac{1}{RC}\frac{V_{dd}}{k}} - \frac{1}{2}e^{-\frac{2}{RC}\frac{V_{dd}}{k}} - \frac{3}{2}\right)$$

（ii） $\dfrac{V_{dd}}{k} \le t$ のとき

$$E_2 = \frac{1}{2}k^2 R^2 C^3 \left(1 - 2e^{-\frac{1}{RC}\frac{V_{dd}}{k}} + e^{-\frac{2}{RC}\frac{V_{dd}}{k}}\right)$$

● 消費エネルギー

$$\therefore \quad E = k \cdot R \cdot C^2 Vdd + k^2 R^2 C^2 (e^{-\frac{1}{RC}\frac{Vdd}{k}} - 1)$$

(なお $k \to \infty$ のとき

$$E_\infty = \frac{1}{2} C \cdot V_{dd}{}^2$$

(従来の消費エネルギー))

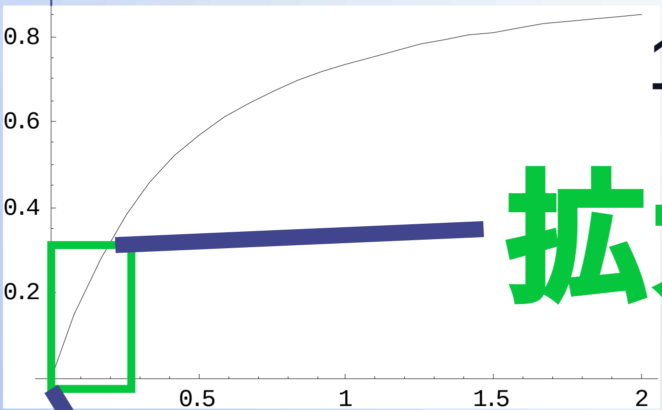
● 従来の消費エネルギーとの比較

$$\therefore \quad \frac{\text{断熱的論理回路の消費エネルギー}}{\text{従来の回路の消費エネルギー}} = \frac{E}{E_\infty} = 2(e^{-\frac{1}{x}} - 1)x^2 + 2 \cdot x$$

但し、無次元量 x は

$$x = k \cdot R \cdot C \cdot \frac{1}{V_{dd}} \xrightarrow{t_0 = \frac{V_{dd}}{k}} \quad \therefore \quad x = R \cdot C \cdot \frac{1}{t_0}$$

● 従来の消費エネルギーとの比較(グラフ化)



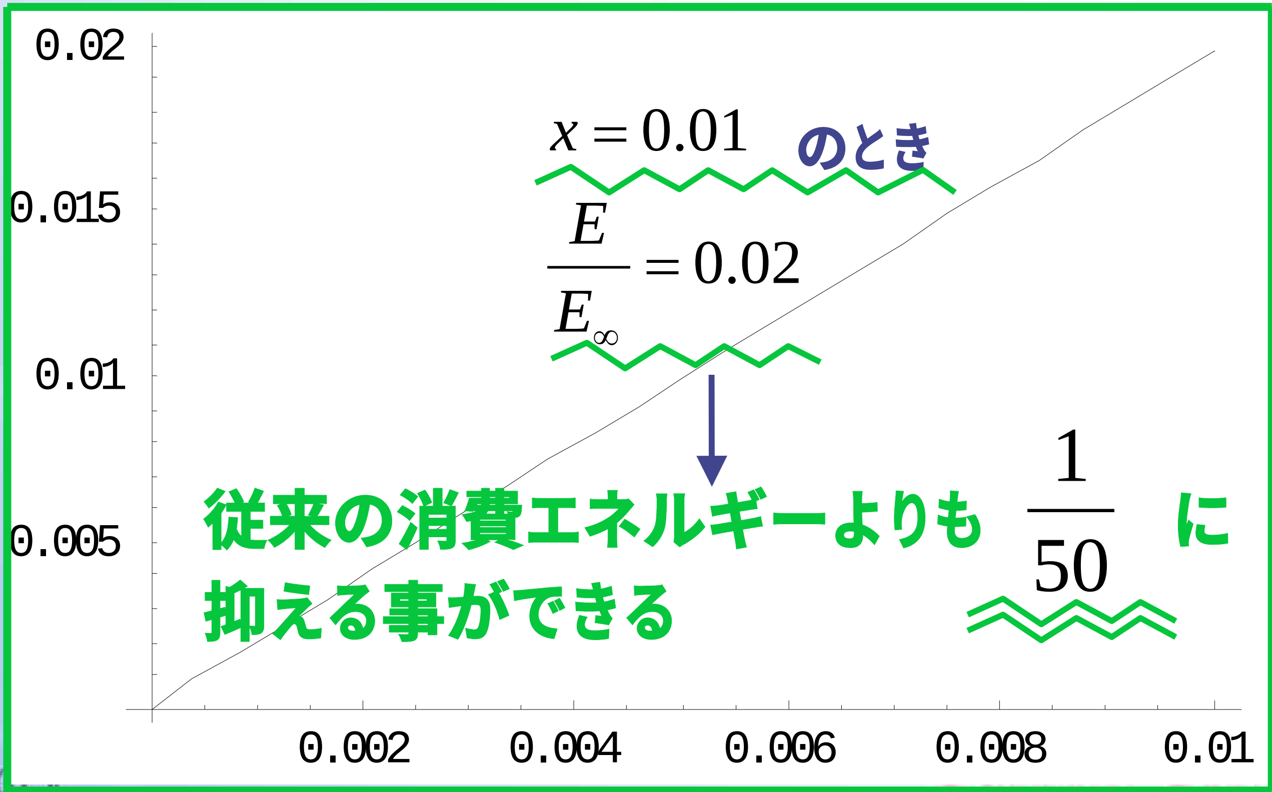
1に収束

拡大

● $\dfrac{\text{断熱的論理回路の消費エネルギー}}{\text{従来の回路の消費エネルギー}} = \dfrac{E}{E_\infty}$

● $x = R \cdot C \cdot \dfrac{1}{t_0}$

$\dfrac{E}{E_\infty}$



$x = 0.01$ のとき

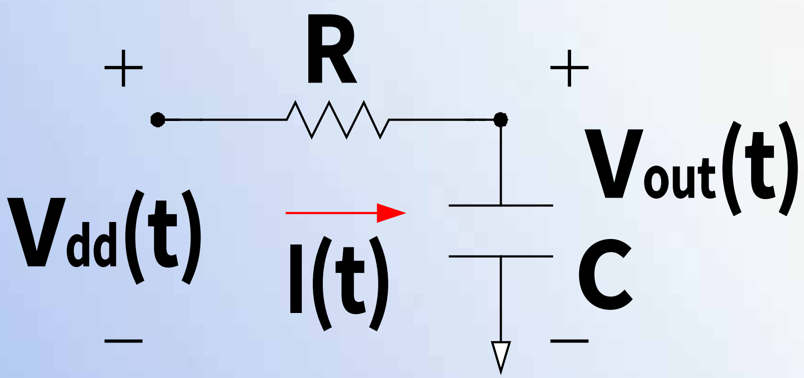
$\dfrac{E}{E_\infty} = 0.02$

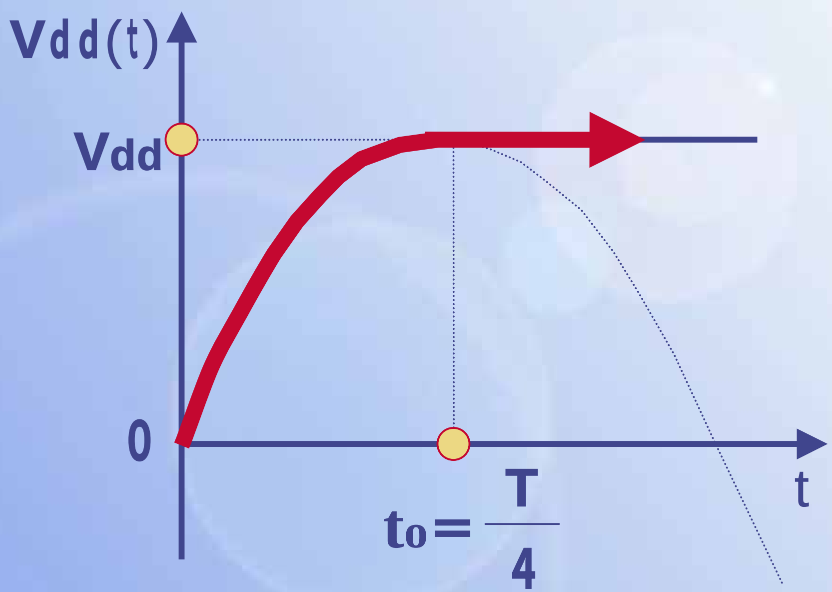
従来の消費エネルギーよりも $\dfrac{1}{50}$ に抑える事ができる

x

Sine波入力電源

● Sine波入力電源





● 電源：Vdd(t)

$$
\begin{cases}
V_{dd}(t) = V_{dd} \cdot \sin\ (\omega\ \ t) & (0 \le t \le \dfrac{T}{4}) \\
V_{dd}(t) = V_{dd} & (\dfrac{T}{4} \le t)
\end{cases}
$$

RC **回路から**

$$
\begin{cases}
I(t) = \dfrac{V_{dd}(t) - V_{out}(t)}{R} \\
V_{out}(t) = \dfrac{1}{C}\displaystyle\int_0^t I(t)\,dt
\end{cases}
$$

$$
\therefore R \cdot C \frac{d}{dt} V_{out}(t) + V_{out}(t) = V_{dd}(t)
$$

上の微分方程式を解く。

● Vout(t)を求める

（ｉ） $0 \le t \le \frac{T}{4}$ のとき、 $V_{out}(0) = 0$

$$V_{out}(t) = \frac{\omega RCV_{dd}}{1+\omega^2 R^2 C^2}\{\omega RCe^{-\frac{1}{RC}} - \cos(\omega\, t)\} + \frac{V_{dd}}{1+\omega^2 R^2 C^2}\sin(\omega\, t)$$

$t = \frac{T}{4}$ のとき V_0 とおくと

$$V_0 = \frac{V_{dd}}{1+\omega^2 R^2 C^2}(\omega RCe^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{4}} + 1)$$

（ii） $\frac{T}{4} \le t$ のとき、 $V_{out}(\frac{T}{4}) = V_o$

$$V_{out}(t) = V_{dd} + (V_0 - V_{dd})e^{-\frac{1}{RC}(t-\frac{T}{4})}$$

群馬大学

● 消費エネルギーを求める

$$E = \int_0^\infty \frac{1}{R}\left(V_{dd}(t) - V_{out}(t)\right)^2 dt = E_1 + E_2$$

（ｉ） $0 \le t \le \frac{T}{4}$ のとき

$$E_1 = \frac{\omega^2 RC^2}{1+\omega^2 R^2 C^2}\frac{1}{8}V_{dd}{}^2 T - \frac{\omega^2 R^2 C^3}{(1+\omega^2 R^2 C^2)^2}\frac{1}{2}V_{dd}{}^2 (1+e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{2}})$$

（ⅱ） $\frac{T}{4} \le t$ のとき

$$E_2 = \frac{\omega^2 R^2 C^3}{(1+\omega^2 R^2 C^2)^2}\frac{1}{2}V_{dd}{}^2 (e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{2}} - 2\omega RCe^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{4}} + \omega^2 R^2 C^2)$$

● 消費エネルギー

$$\therefore\ E = \frac{\omega^2 RC^2}{1+\omega^2 R^2 C^2}\frac{1}{8}V_{dd}{}^2 T$$

$$+\frac{\omega^2 R^2 C^3}{(1+\omega^2 R^2 C^2)^2}\frac{1}{2}V_{dd}{}^2(\omega^2 R^2 C^2 - 2\omega RCe^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{4}} - 1)$$

なお　$t_0 \to 0$　、つまり　$T=0$　のとき

$$E_0 = \frac{1}{2}C\cdot V_{dd}{}^2$$

（従来の消費エネルギー）

● 従来の消費エネルギーとの比較

$$\therefore \frac{\text{断熱的論理回路の消費エネルギー}}{\text{従来の回路の消費エネルギー}} = \frac{E}{E_0}$$

$$= \frac{\pi}{1+y^2}\frac{y}{2} + \frac{y^2}{(1+y^2)^2}(y^2 - 2ye^{-\frac{\pi}{2y}} - 1)$$

但し、無次元量 y は

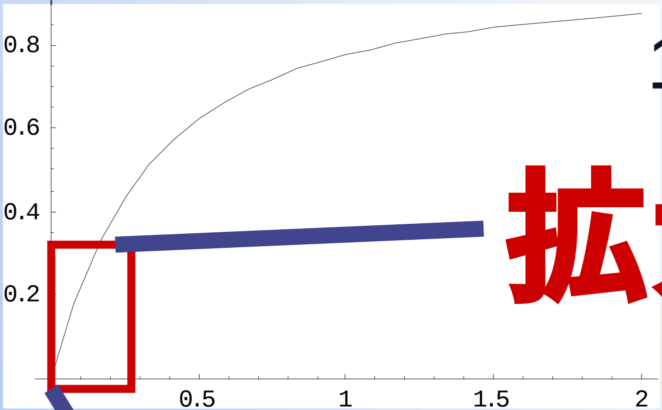
$$y = \omega RC$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{、} t_0 = \frac{T}{4} \text{、} x = R \cdot C \cdot \frac{1}{t_0}$$

$$\therefore y = \frac{\pi RC}{2}\frac{1}{t_0} = \frac{\pi}{2}x$$

● 従来の消費エネルギーとの比較(グラフ化)

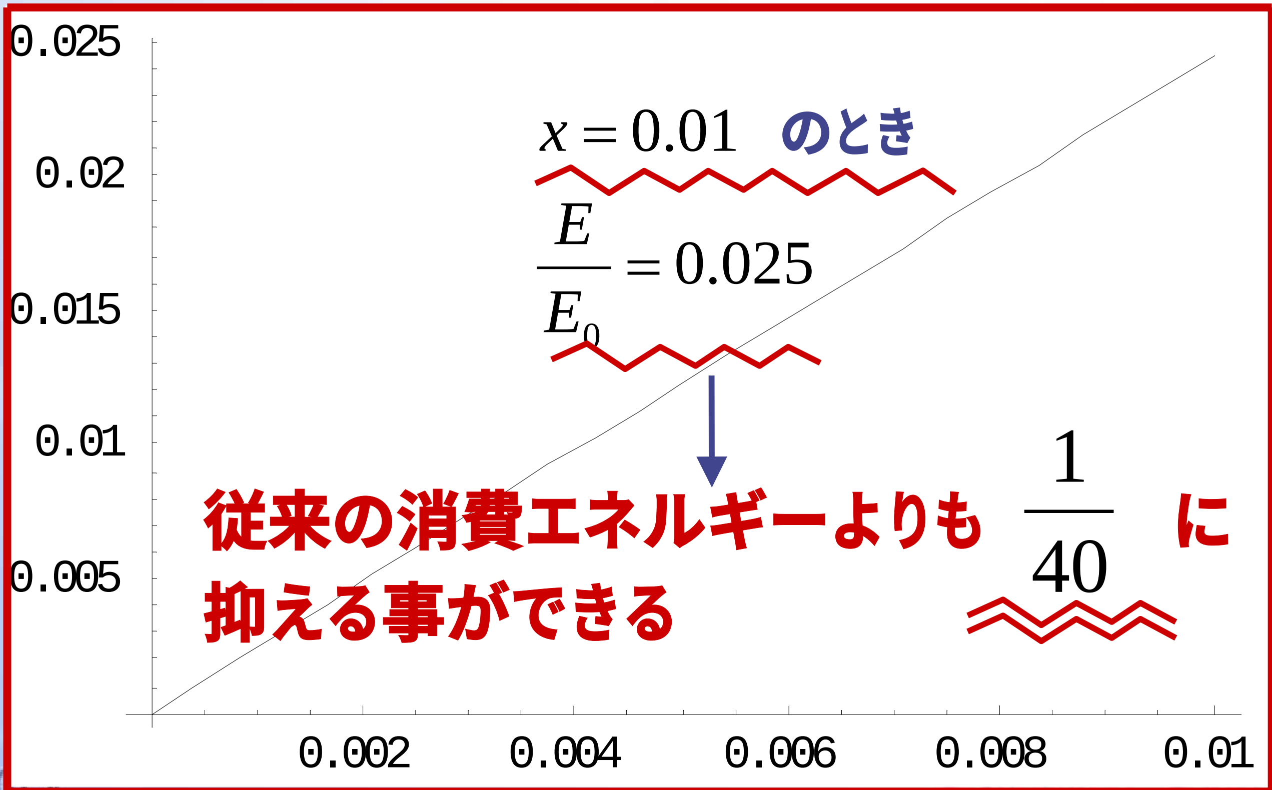
- $\dfrac{\text{断熱的論理回路の消費エネルギー}}{\text{従来の回路の消費エネルギー}} = \dfrac{E}{E_0}$
- $x = \dfrac{2}{\pi} y$



1に収束

拡大

$\dfrac{E}{E_0}$



x

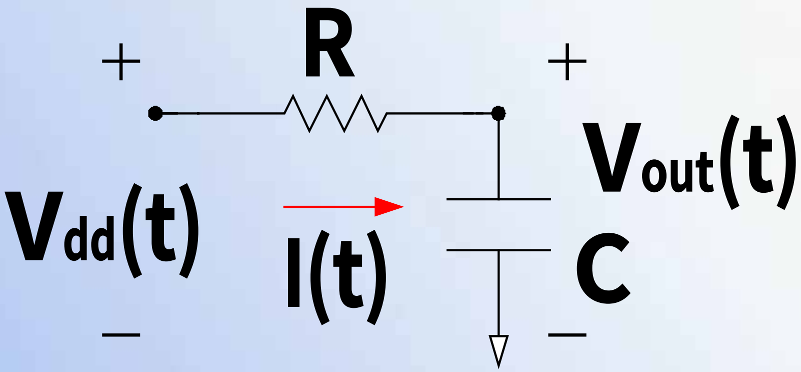
$x = 0.01$ のとき

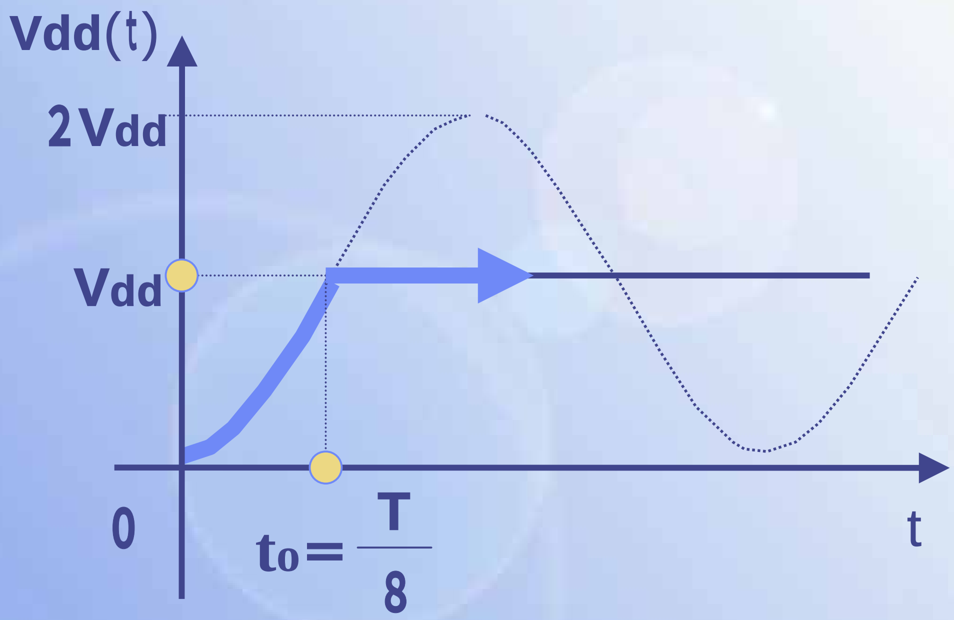
$\dfrac{E}{E_0} = 0.025$

従来の消費エネルギーよりも $\dfrac{1}{40}$ に抑える事ができる

Sine２乗波入力電源

● Sine 2乗波入力電源





● 電源：$V_{dd}(t)$

$$\begin{cases} V_{dd}(t) = 2V_{dd} \cdot \sin^2(\omega t) & (0 \le t \le \frac{T}{8}) \\ V_{dd}(t) = V_{dd} & (\frac{T}{8} \le t) \end{cases}$$

RC 回路から

$$\begin{cases} I(t) = \dfrac{V_{dd}(t) - V_{out}(t)}{R} \\ V_{out}(t) = \dfrac{1}{C}\displaystyle\int_0^t I(t)\,dt \end{cases}$$

$$\therefore\ R \cdot C \frac{d}{dt} V_{out}(t) + V_{out}(t) = V_{dd}(t)$$

上の微分方程式を解く。

● Vout(t)を求める

（ｉ） $0 \le t \le \frac{T}{8}$ のとき、 $V_{out}(0) = 0$

$$V_{out}(t) = V_{dd}\left(1 - \frac{4\omega^2R^2C^2}{1+4\omega^2R^2C^2}e^{-\frac{1}{RC}t} - \frac{2\omega RC}{1+4\omega^2R^2C^2}\sin(2\omega t) - \frac{1}{1+4\omega^2R^2C^2}\cos(2\omega t)\right)$$

$t = \frac{T}{8}$ のとき V_0 とおくと

$$V_0 = \frac{V_{dd}}{1+4\omega^2R^2C^2}\left((1-2\omega RC)^2 - 4\omega^2R^2C^2e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{8}}\right)$$

（ii） $\frac{T}{8} \le t$ のとき、 $V_{out}(\frac{T}{8}) = V_o$

$$V_{out}(t) = V_{dd} + (V_0 - V_{dd})e^{-\frac{1}{RC}(t-\frac{T}{8})}$$

● 消費エネルギーを求める

$$E = \int_0^\infty \frac{1}{R}\left(V_{dd}(t) - V_{out}(t)\right)^2 dt = E_1 + E_2$$

(ｉ) $0 \le t \le \frac{V}{8}$ **のとき**

$$E_1 = \frac{4\omega^2 RC^2}{(1+4\omega^2 R^2 C^2)^2} V_{dd}^2 \left[\frac{1+4\omega^2 R^2 C^2}{16} T - RC + 2\omega^2 R^3 C^3 \left(1 - e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{4}}\right) - 4\omega R^2 C^2 e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{8}} \right]$$

(ⅱ) $\frac{T}{8} \le t$ **のとき**

$$E_2 = \frac{2\omega^2 R^2 C^3}{(1+4\omega^2 R^2 C^2)^2} V_{dd}^2 \left(1 + 4\omega RCe^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{8}} + 4\omega^2 R^2 C^2 e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{4}}\right)$$

● 消費エネルギー

$$\therefore\quad E=\frac{2\omega^2RC^2}{(1+4\omega^2R^2C^2)^2}V_{dd}{}^2\left[\frac{1+4\omega^2R^2C^2}{8}T-RC\right.$$

$$\left.-4\omega R^2C^2e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{8}}+4\omega^2R^3C^3\right]$$

(なお　$t_0\to 0$　、つまり　$T=0$　のとき

$$E_0=\frac{1}{2}C\cdot V_{dd}{}^2$$

（従来の消費エネルギー）)

● 従来の消費エネルギーとの比較

$$\therefore \frac{\text{断熱的論理回路の消費エネルギー}}{\text{従来の回路の消費エネルギー}} = \frac{E}{E_0}$$

$$= \frac{\pi}{1+4z^2} z - \frac{4(1-4z^2)}{(1+4z^2)^2} z^2 - \frac{16z^3}{(1+4z^2)^2} e^{-\frac{\pi}{4z}}$$

但し、無次元量 z は

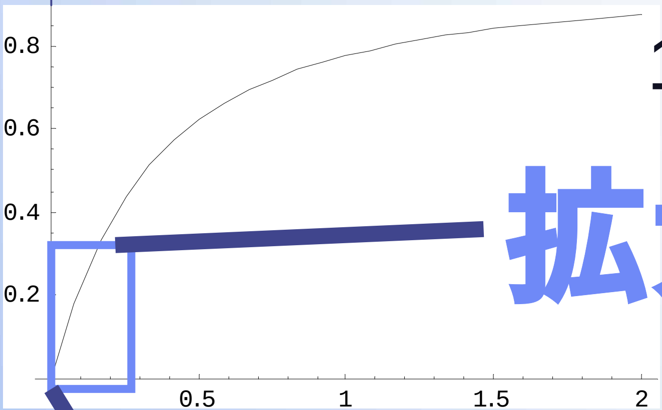
$$z = \omega RC$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{、} t_0 = \frac{T}{8} \text{、} x = R \cdot C \cdot \frac{1}{t_0}$$

$$\therefore z = \frac{\pi RC}{4} \frac{1}{t_0} = \frac{\pi}{4} x$$

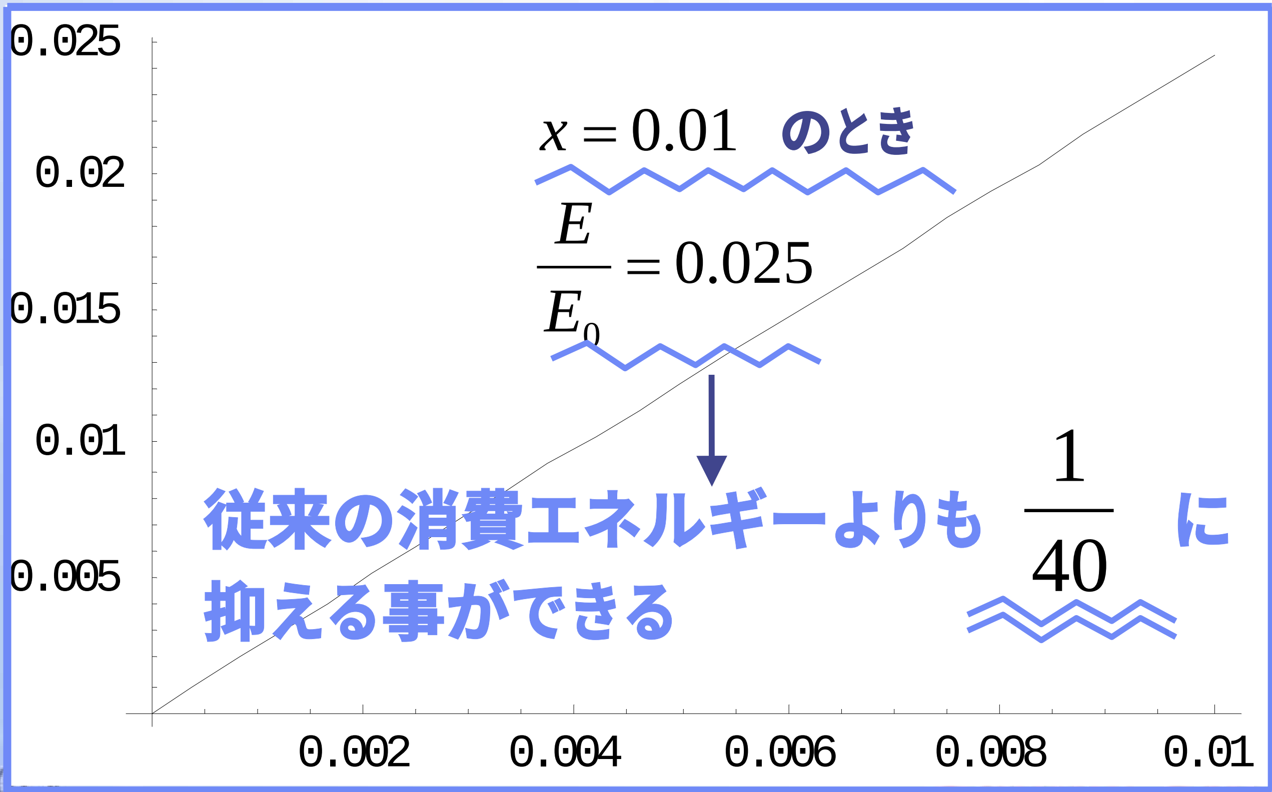
● 従来の消費エネルギーとの比較（グラフ化）

- $\dfrac{\text{断熱的論理回路の消費エネルギー}}{\text{従来の回路の消費エネルギー}} = \dfrac{E}{E_0}$
- $x = \dfrac{4}{\pi} z$



1に収束

拡大



$x = 0.01$ のとき

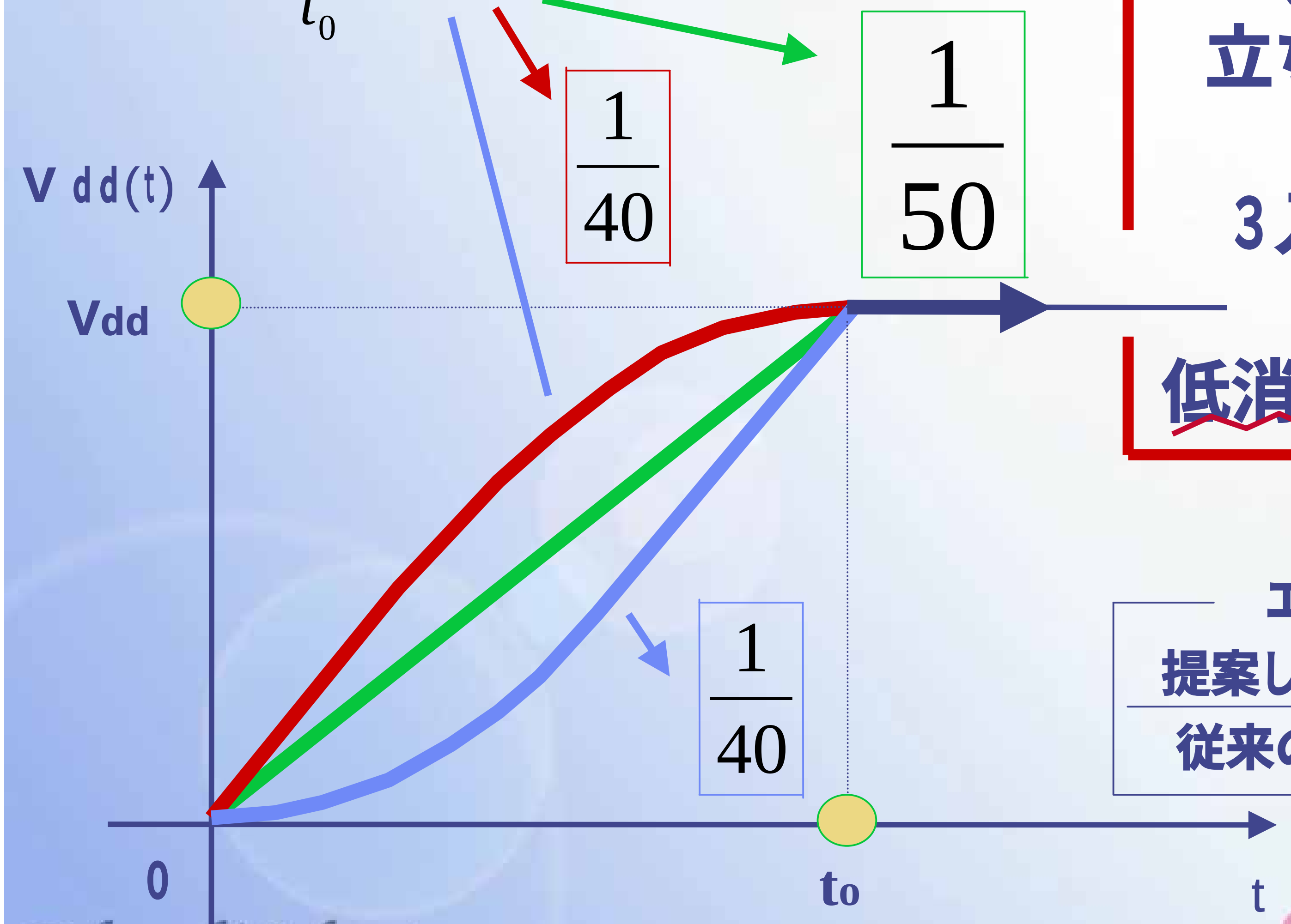
$\dfrac{E}{E_0} = 0.025$

従来の消費エネルギーよりも $\dfrac{1}{40}$ に抑える事ができる

消費エネルギーの比較

● 消費エネルギーの比較

$$x = R \cdot C \cdot \frac{1}{t_0} = 0.01$$ のときのエネルギー比



結論

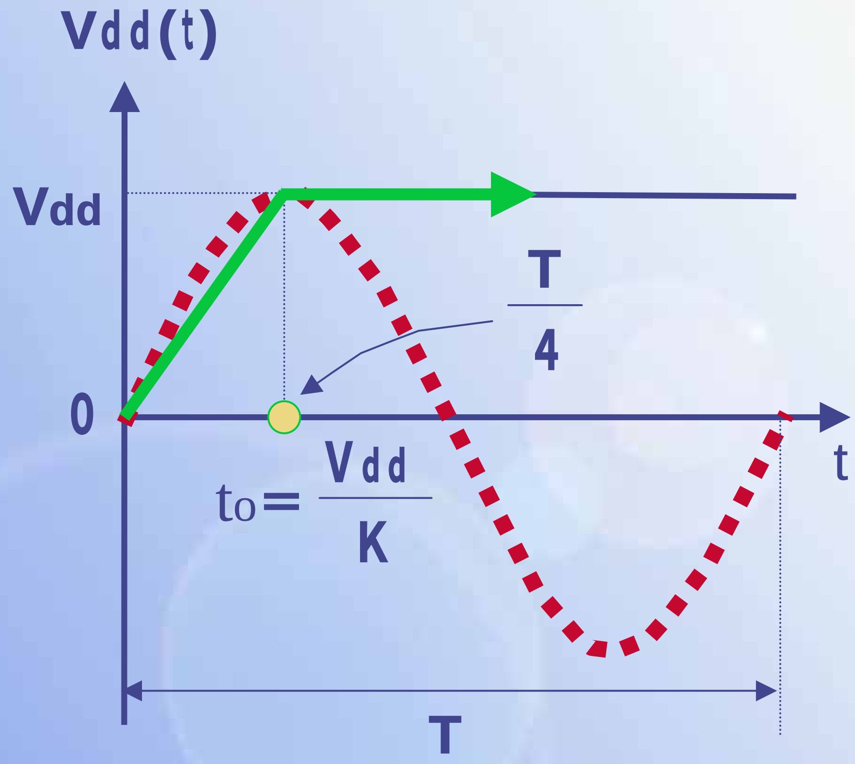
ランプ波の
立ち上げ方式
↓
3入力の中で
1番の
低消費エネルギー

$$\text{エネルギー比} = \frac{\text{提案した消費エネルギー}}{\text{従来の消費エネルギー}}$$

実際問題

● ランプ波入力電源の設計を考察

（Sine波で設計する場合）



時定数 $R \cdot C = 0.1\ ns$

とおくと

$$x = R \cdot C \cdot \frac{1}{t_0}$$ **から**

$$\therefore\quad x = R \cdot C \frac{4}{T} = 4 \cdot f \cdot R \cdot C$$

周波数 $f = 25\ MHz$ **のとき**

$$\therefore\quad x = 0.01$$

このとき、

従来との消費エネルギー比 $= \dfrac{1}{50}$

●時定数 $R \cdot C = 0.1\ ns$ のとき 周波数 f と 従来との消費エネルギー比との関係

周波数 f	$25\ MHz$	$100\ MHz$	$500\ MHz$	$1\ GHz$
x	0.02	0.04	0.2	0.4
従来とのエネルギー比	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

5．まとめと今後の課題

まとめ

- ZVS、ZCSの原理を明確化
- 断熱的論理回路の原理を明確化
- ランプ波、Sine波、Sine2乗波の電源の立ち上げ方式での消費エネルギーを計算
- ランプ波が最も低消費エネルギー

今後の課題

- 断熱的論理回路の設計