

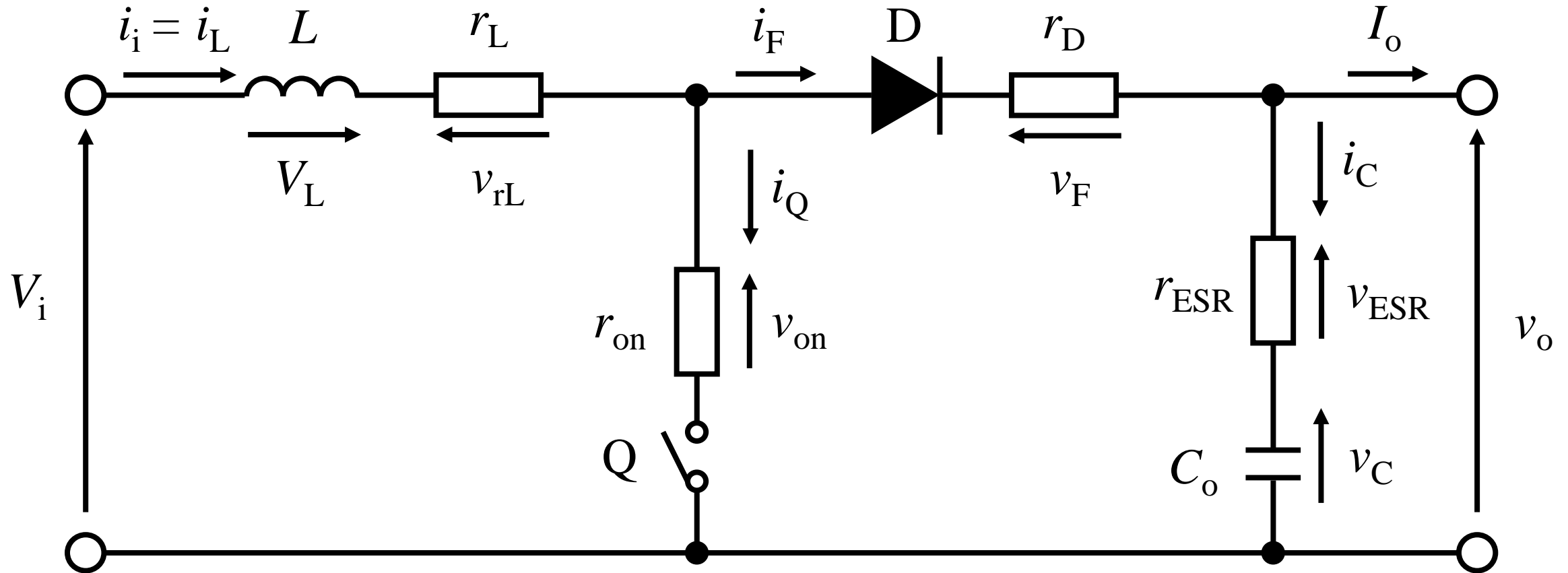
28. スイッチング電源の設計 (4)

28. Design of the Switch-Mode Power Supply (SMPS) (4)

講義内容

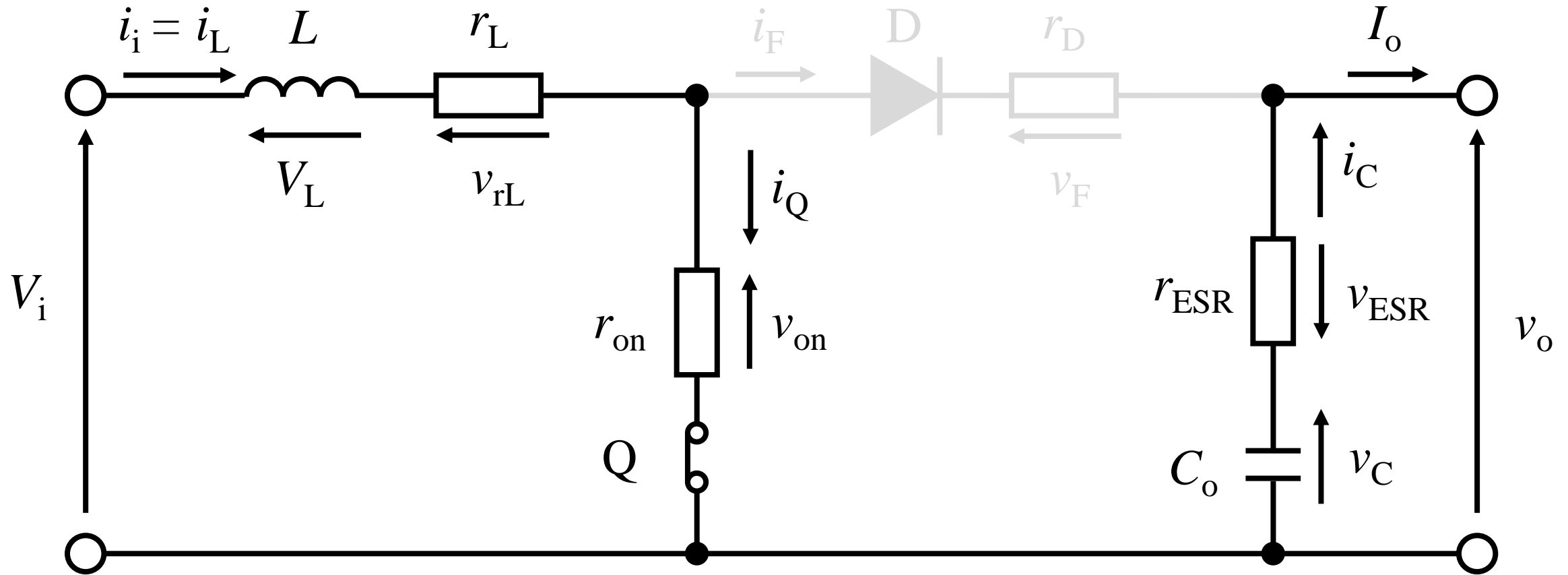
- 1. 寄生成分を考慮した昇圧型コンバータ**
- 2. 簡易的な損失計算例**
- 3. 電流のより詳細な解析**

寄生成分を考慮したDC-DCコンバータ（昇圧型）



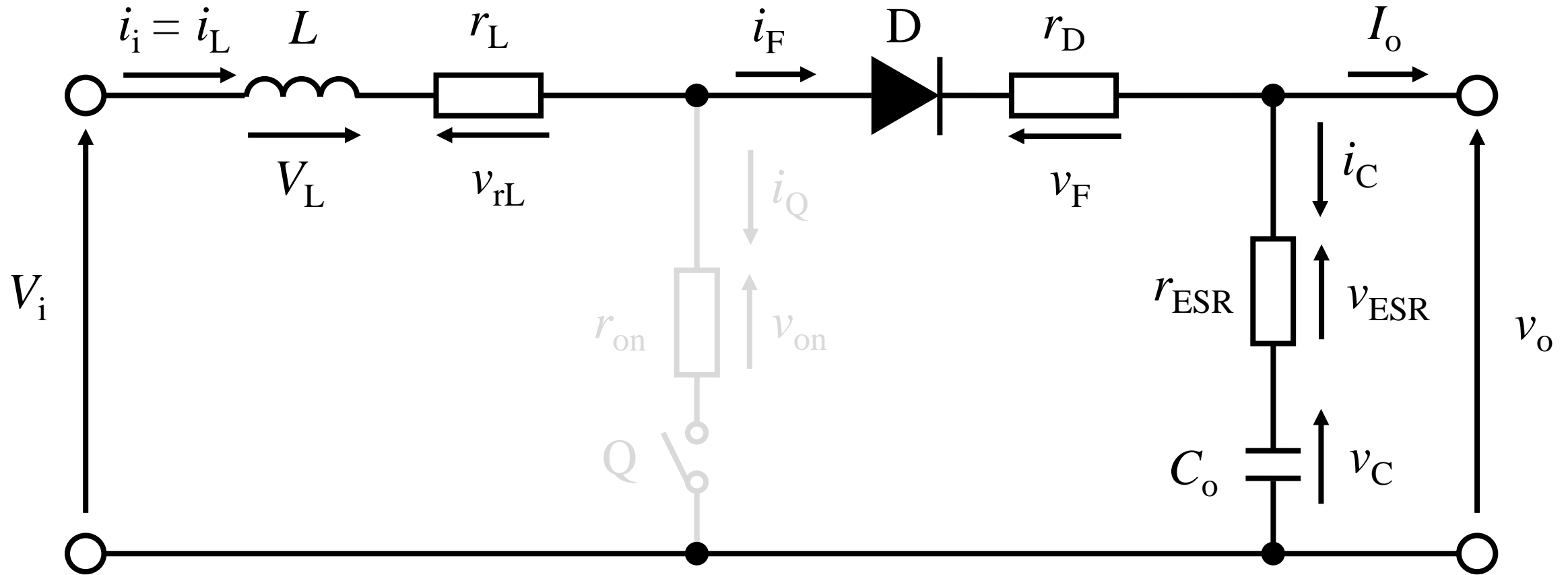
寄生成分として**寄生抵抗**を追加（さらに厳密には L_p , C_p も考慮）

Q=ON時の等価回路



ON 時間は DT_s (D : デューティ比 , T_s : スイッチング 時間)

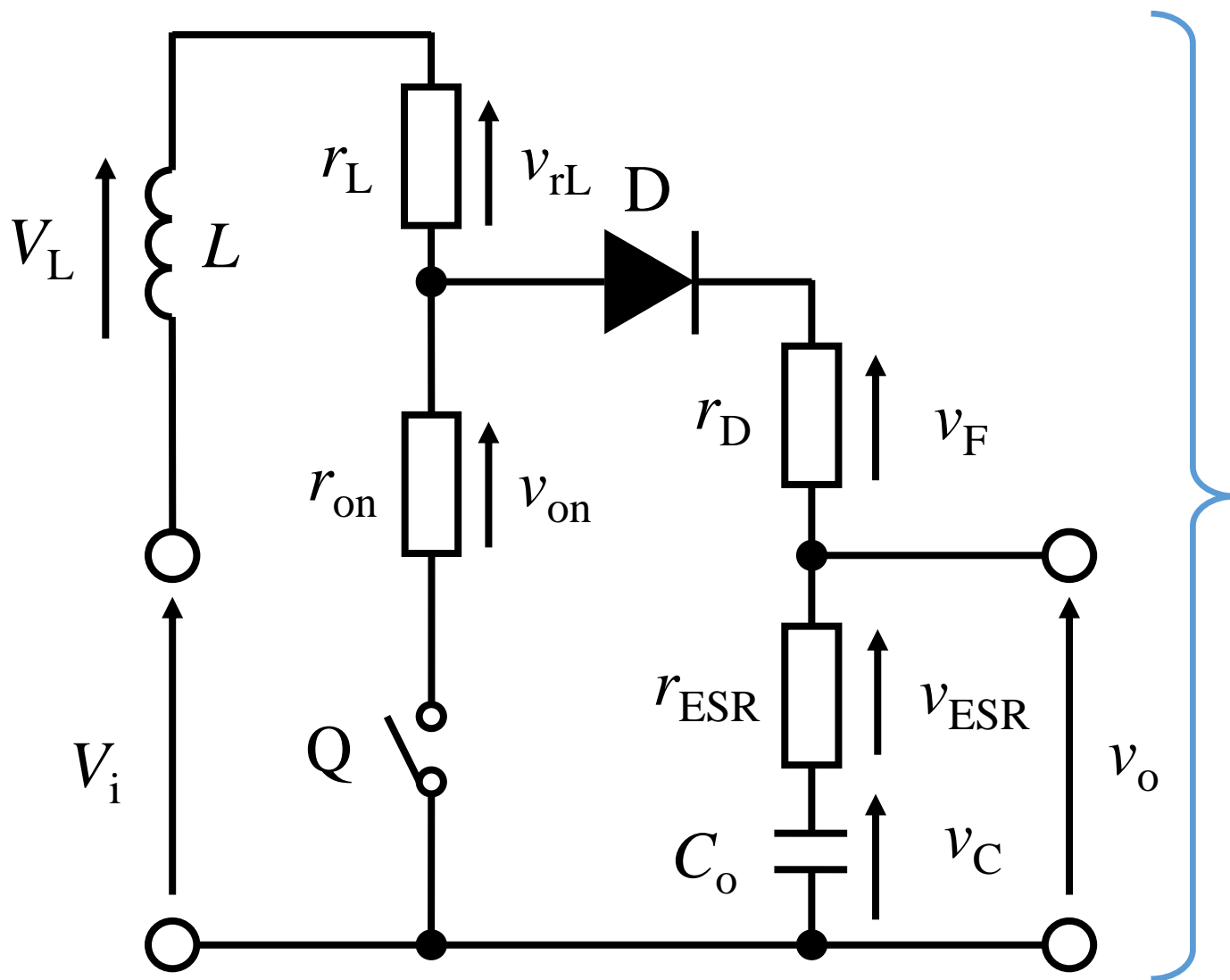
Q=OFF時の等価回路



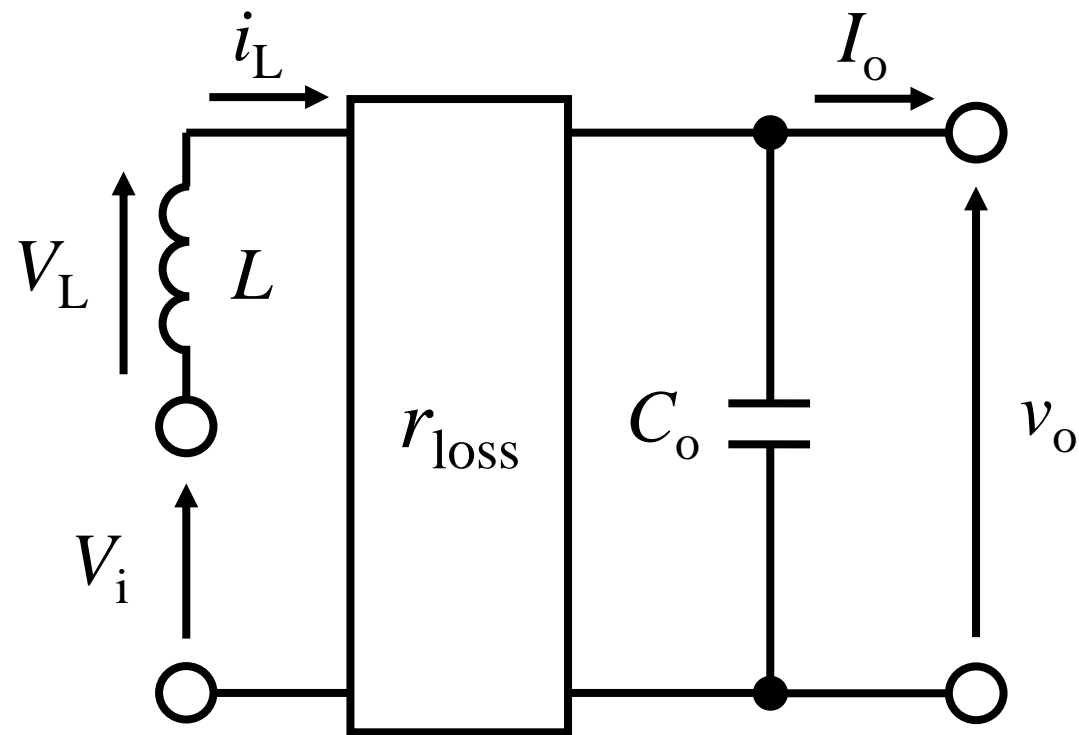
OFF 時間は $(1-D)T_s$

理想 状態の **デューティ比** $D = \frac{V_o - V_i}{V_o}$

記述を書き換えた場合の昇圧型DC-DCコンバータ



簡単化のために, $r_{ESR} = 0$ とすると



$$r_{loss} = r_L + D \cdot r_{on} + (1 - D) \cdot r_D$$

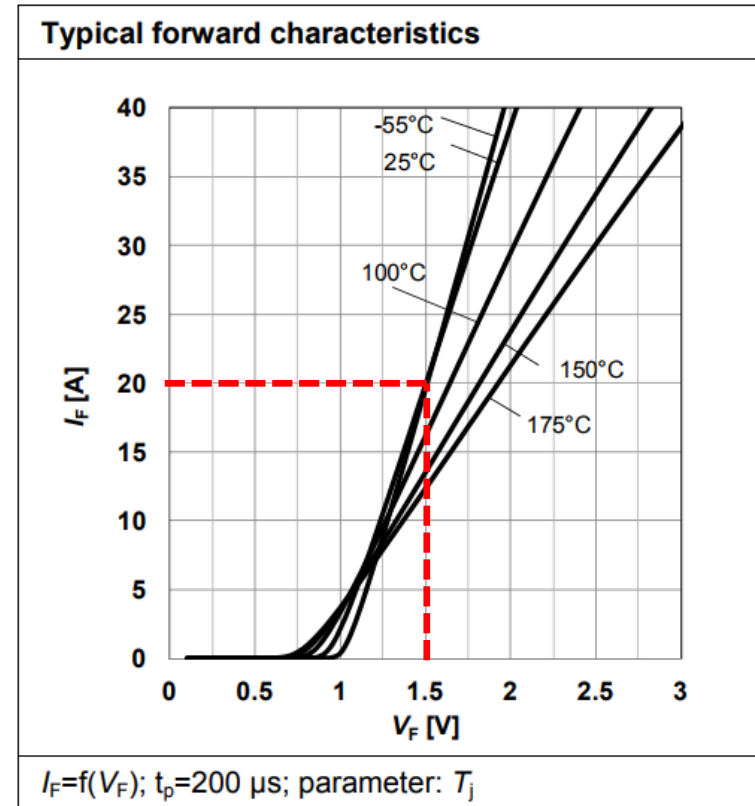
簡易的な損失計算例：昇圧型DC-DCコンバータ

MOSFET : IRF640NPbF(HEXFET)

SiC-SBD : IDH20G65C5 (thinQ!)

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	200	—	—	V	V _{GS} = 0V, I _D = 250μA
ΔV _{(BR)DSS/ΔT_J}	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.25	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D = 1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.15	Ω	V _{GS} = 10V, I _D = 11A ③
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	6.8	—	—	S	V _{DS} = 50V, I _D = 11A ③
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} = 200V, V _{GS} = 0V
		—	—	250	μA	V _{DS} = 160V, V _{GS} = 0V, T _J = 150°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	V _{GS} = -20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	67	nC	I _D = 11A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	11	nC	V _{DS} = 160V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	33	nC	V _{GS} = 10V, See Fig. 6 and 13
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	10	—	ns	V _{DD} = 100V
t _r	Rise Time	—	19	—	ns	I _D = 11A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	23	—	ns	R _G = 2.5Ω
t _f	Fall Time	—	5.5	—	ns	R _D = 9.0Ω, See Fig. 10 ③
L _D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L _S	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	
C _{iss}	Input Capacitance	—	1160	—	pF	V _{GS} = 0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	185	—	pF	V _{DS} = 25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	53	—	pF	f = 1.0MHz, See Fig. 5



$$r_{DS(25^\circ C)} = r_{on} = 150[m\Omega]$$

$$r_{D(25^\circ)} = \frac{V_F}{I_F} = \frac{1.5}{20} = 75[m\Omega]$$

簡易的な損失計算例：昇圧型DC-DCコンバータ

設計値：入力電圧 $V_i = 5[\text{V}]$, 出力電圧 $V_o = 12[\text{V}]$, 出力電力 $P_o = 20[\text{W}]$

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{12 - 5}{12} = \frac{7}{12} = 0.583 \quad \text{インダクタの等価直列抵抗 } r_L = 350[\text{m}\Omega]$$

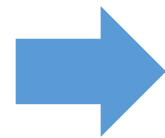
$$\begin{aligned} r_{\text{loss}} &= r_L + D \cdot r_{\text{on}} + (1 - D) \cdot r_D \\ &= 350 \times 10^{-3} + 0.583 \times 150 \times 10^{-3} + (1 - 0.583) \times 75 \times 10^{-3} \approx 468.7[\text{m}\Omega] \end{aligned}$$

実際に出力された各種測定値

$$V_{o_real} = 10[\text{V}]$$

$$I_{o_real} = 1.25[\text{A}]$$

$$P_{o_real} = 12.5[\text{W}]$$

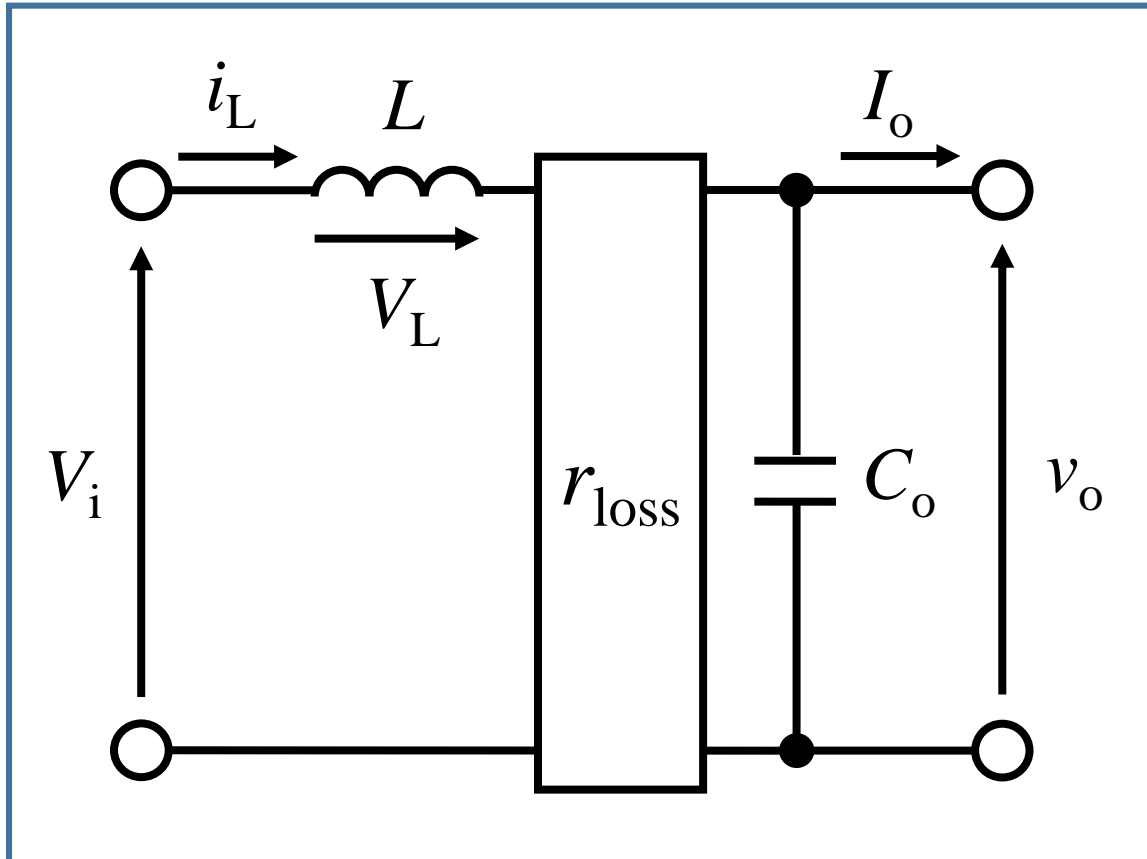


$$\eta = \frac{P_{o_real}}{P_{o_design}} = \frac{12.5}{20} = 0.625 = 62.5[\%]$$

この式及び計算結果は **間違い!**
(**効率** 計算は **入力** 対 **出力** で行われる)

簡易的な損失計算例：昇圧型DC-DCコンバータ

インダクタ電流の平均値 $I_{Lave} = I_i$ より $I_i = I_{Lave} = \frac{I_{o_real}}{1-D} = \frac{1.25}{1-0.583} = 2.998[\text{A}]$



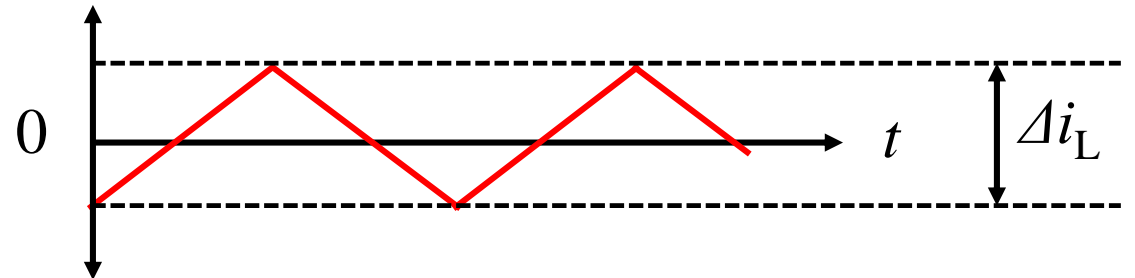
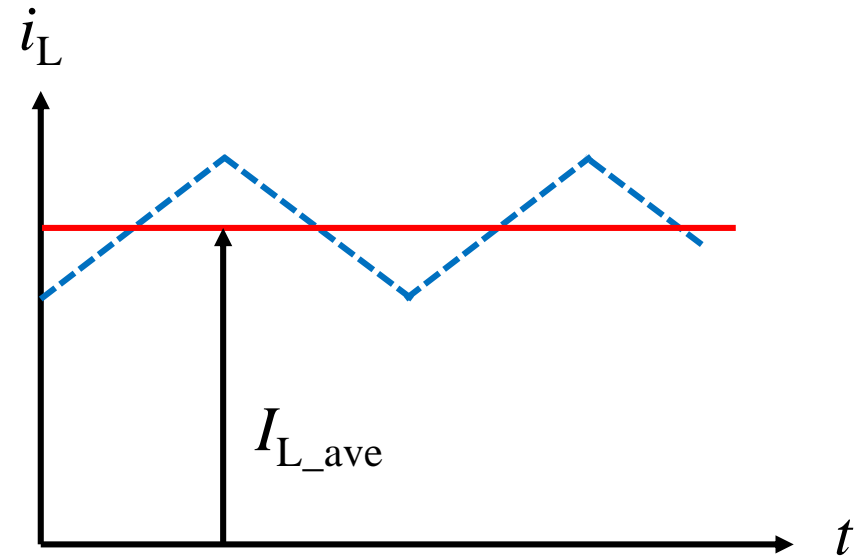
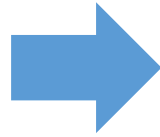
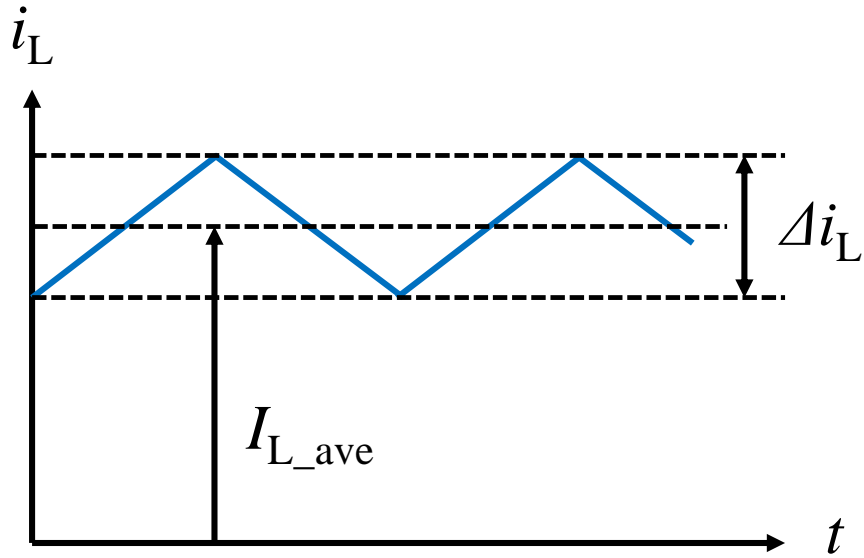
簡易等価回路より（**導通** 損失のみ）

$$P_{loss} = r_{loss} \cdot I_{Lave}^2 \\ = 468.7 \times 10^{-3} \times 2.998^2 = 4.21[\text{W}]$$

実際の効率（**スイッチング** 損失は除く）

$$\eta = \frac{P_{o_real}}{P_{i_real}} = \frac{P_{o_real}}{P_{o_real} + P_{loss}} \\ = 0.748 \approx 74.8[\%]$$

電流成分の分解



回路に流れる電流は **直流** と **交流** 成分に分かれる
交流 成分の電流は **実効値** に直して損失計算する

各電流の詳細：昇圧型DC-DCコンバータ

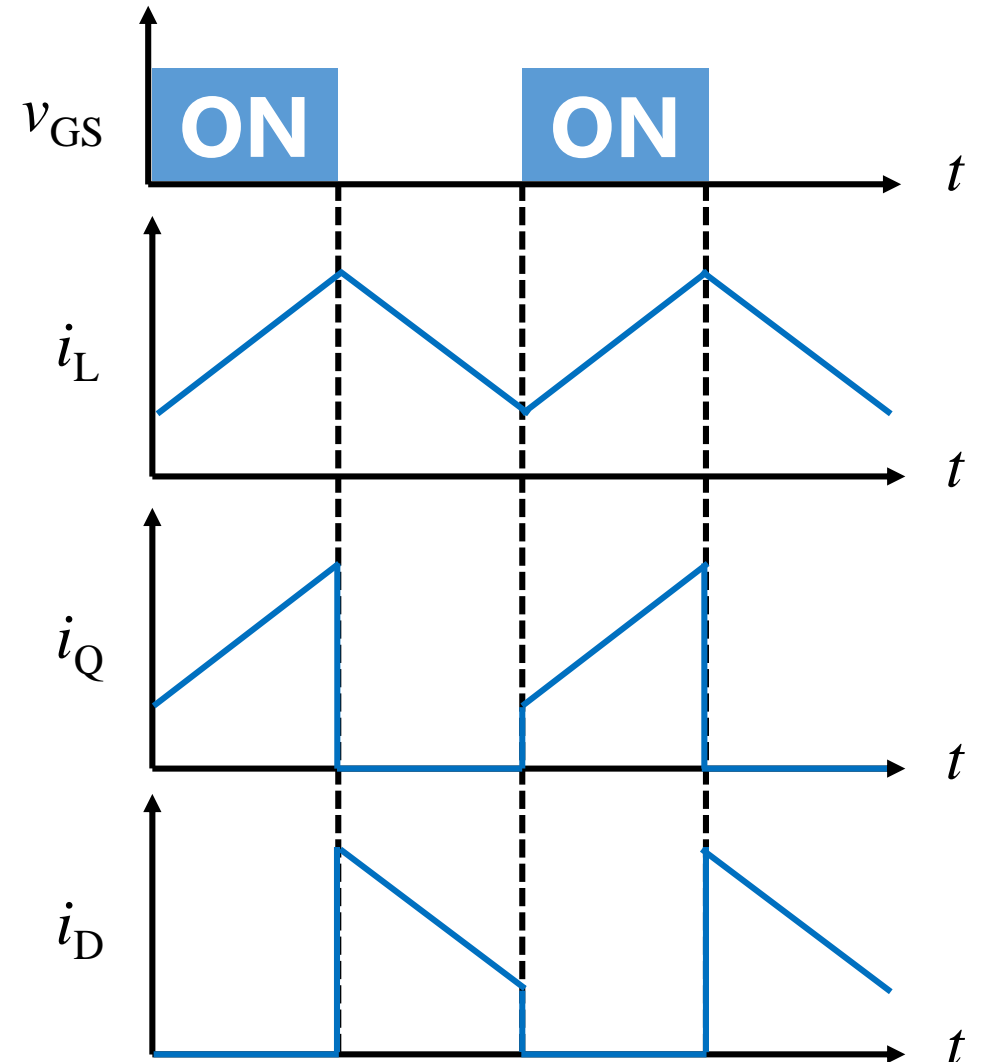
$$i_{Q_rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \{i_Q(t)\}^2 dt} \approx I_{L_ave} \sqrt{D \left(1 + \frac{k^2}{12}\right)}$$

$$i_{D_rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \{i_D(t)\}^2 dt} \approx I_{L_ave} \sqrt{(1-D) \left(1 + \frac{k^2}{12}\right)}$$

ここで、 k はインダクタ電流の **リップル** 率を表す

リップル 率の影響が小さい (0.1 ~ 0.3) とすると

$$i_{Q_rms} \approx I_{L_ave} \sqrt{D} \quad , \quad i_{D_rms} = I_{L_ave} \sqrt{1-D}$$

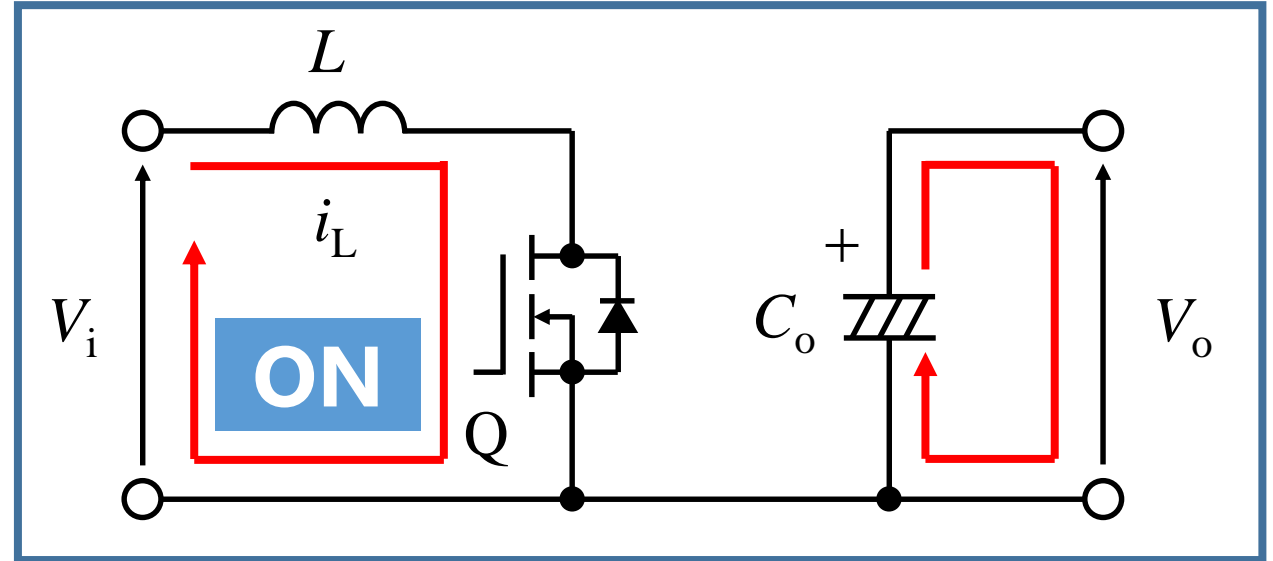


各経路における要素の分解

ON 時 ($Q = \mathbf{ON}$)

流れる電流 : $i_{Q_rms} \approx I_{L_ave} \sqrt{D}$

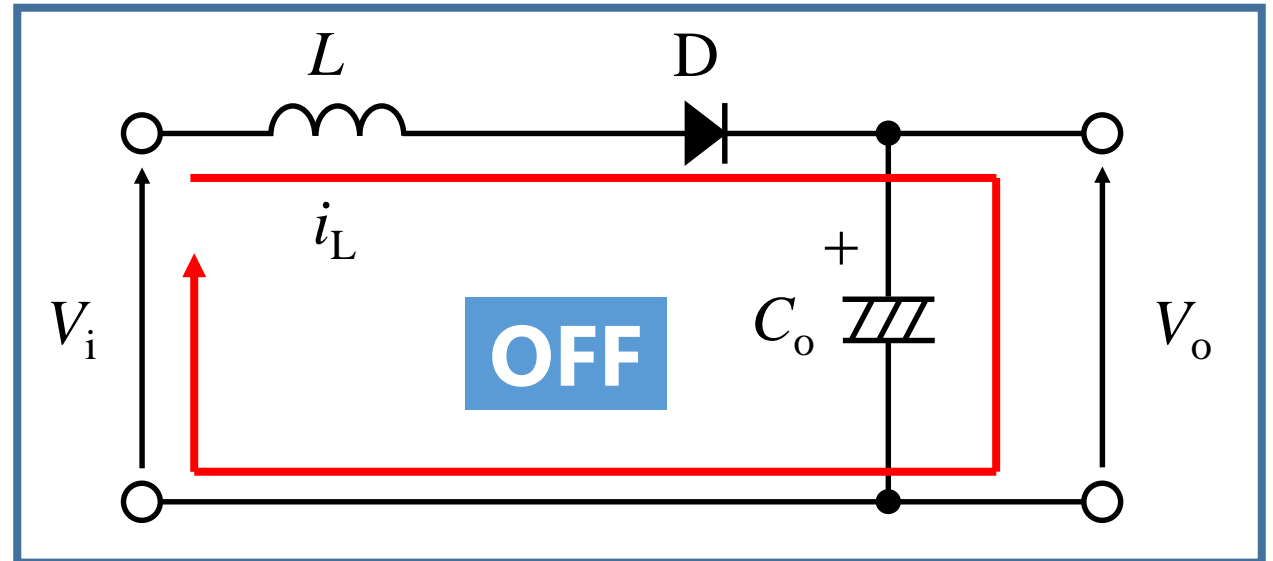
経路上の抵抗 : $r_{loss_ON} \approx r_L + r_{on}$



OFF 時 ($Q = \mathbf{OFF}$)

流れる電流 : $i_{D_rms} \approx I_{L_ave} \sqrt{1-D}$

経路上の抵抗 : $r_{loss_OFF} \approx r_L + r_D$



要素ごとに分割した損失の複合

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{loss_ON}} + P_{\text{loss_OFF}}$$

ON 時と OFF 時の損失

$$= r_{\text{loss_ON}} (i_{\text{Q_rms}})^2 + r_{\text{loss_OFF}} (i_{\text{D_rms}})^2$$

$P = RI^2$

$$= (r_L + r_{\text{on}}) \cdot D I_{\text{L_ave}}^2 + (r_L + r_D) \cdot (1-D) I_{\text{L_ave}}^2$$

前述の式を代入

$$= \{ r_L + D \cdot r_{\text{on}} + (1-D) r_D \} I_{\text{L_ave}}^2$$

式をまとめる

$$= r_{\text{loss}} \cdot I_{\text{L_ave}}^2$$

7~8ページ目の式と同じとなる

電流値を **実効値** 換算したものをを用いるとより **詳細** な値が出る