５．電圧変動率と変圧器の損失と効率
5. Voltage Regulation , Loss and Efficiency of the Transformer

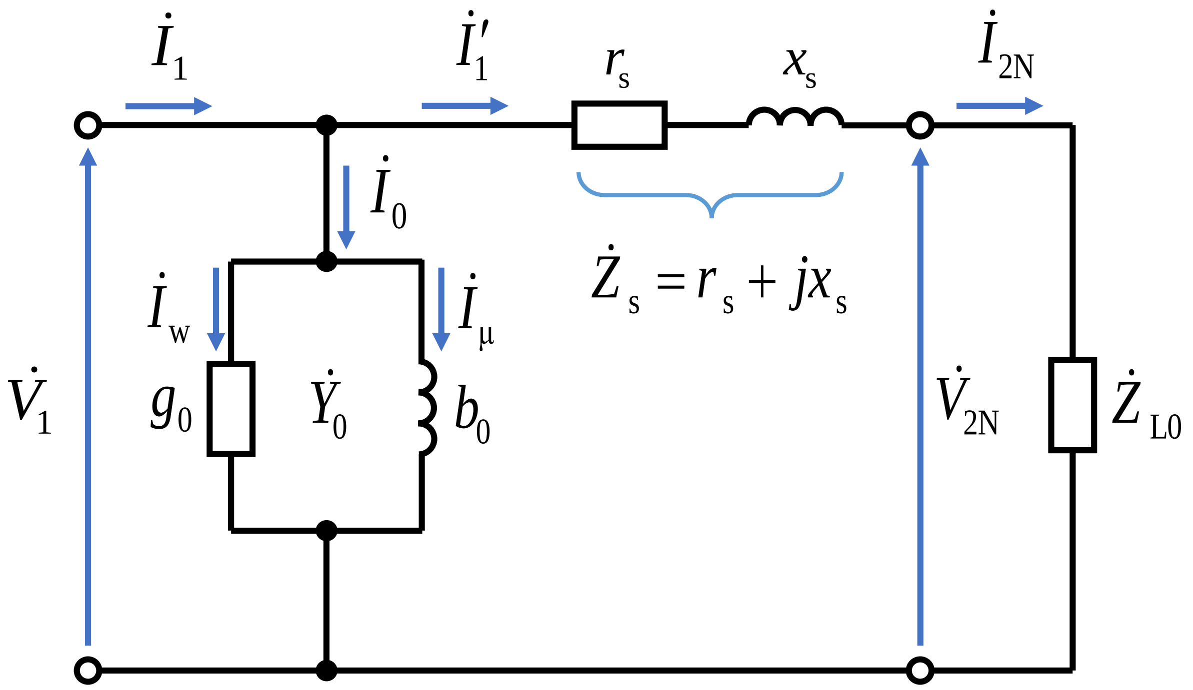
講義内容

１．電圧変動率
２．各種損失
３．各種効率

電圧変動率

変圧器は，**1次** 電圧が一定でも **負荷** 電流の大きさにより **2次** 電圧が変化する

➡ **短絡** インピーダンスによる電圧 **降下** が **負荷** 電流により **変化** する



電圧変動 率

無負荷 電圧

定格負荷 時の

2次電圧

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2N}}{V_{2N}} \times 100[\%]$$

$$\approx q_r \cos\theta + q_x \sin\theta$$

変圧器の損失

変圧器の **損失** P_{loss}

負荷を繋いでいない時にも発生している ：**無負荷** 損
負荷を繋いだ時に新たに発生する ：**負荷** 損

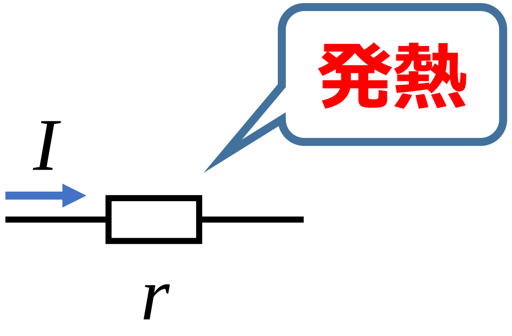
変圧器の **損失** P_{loss}

- **無負荷** 損 P_{NL}
  - **鉄** 損 P_{i}
    - **ヒステリシス** 損 $P_{\mathrm{h}} = K_{\mathrm{h}} f B_{\mathrm{m}}^{1.6}$
    - **渦電流** 損 $P_{\mathrm{e}} = K_{\mathrm{e}} f^2 B_{\mathrm{m}}^2$
  - 漂遊無負荷損（誘電体損を含む） → **漂遊** 損 P_{st}
- **負荷** 損 P_{L}
  - **銅** 損 $P_{\mathrm{c}} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$
  - 漂遊負荷損 → **漂遊** 損 P_{st}

$K_{\mathrm{h}}, K_{\mathrm{e}}$ ：損失係数
B_{m} ：最大磁束密度

銅損(Copper Loss)

電気機器用の巻線には **抵抗** の小さい **銅** 線やアルミ線を用いる



$$P_c = r \cdot I^2$$

- I：電流
- r：導体の抵抗
- P_c：**銅損**

$$r_T = r_t \cdot \frac{234.5 + T}{234.5 + t}$$

- T：**基準** 温度[℃]
- t：**測定時** の温度[℃]
- r_t：測定した抵抗
- r_T：基準抵抗

物体の抵抗率は **温度** により変化するため
抵抗値を **温度** 換算して **銅損** を評価

※234.5は銅における温度係数なので，材料に応じて変化する必要あり

鉄損（Iron Loss）

磁性体には **磁束** により生じる損失があり，
これを **鉄損** と呼ぶ（下式は実験式）

Charles
Proteus
Steinmetz

$$P_\mathrm{i} = P_\mathrm{h} + P_\mathrm{e} = K_\mathrm{h} \cdot f \cdot B_\mathrm{m}{}^{1.6} + K_\mathrm{e} \cdot f^{\,2} \cdot B_\mathrm{m}{}^{2}$$

鉄 損

ヒステリシス 損

渦電流 損

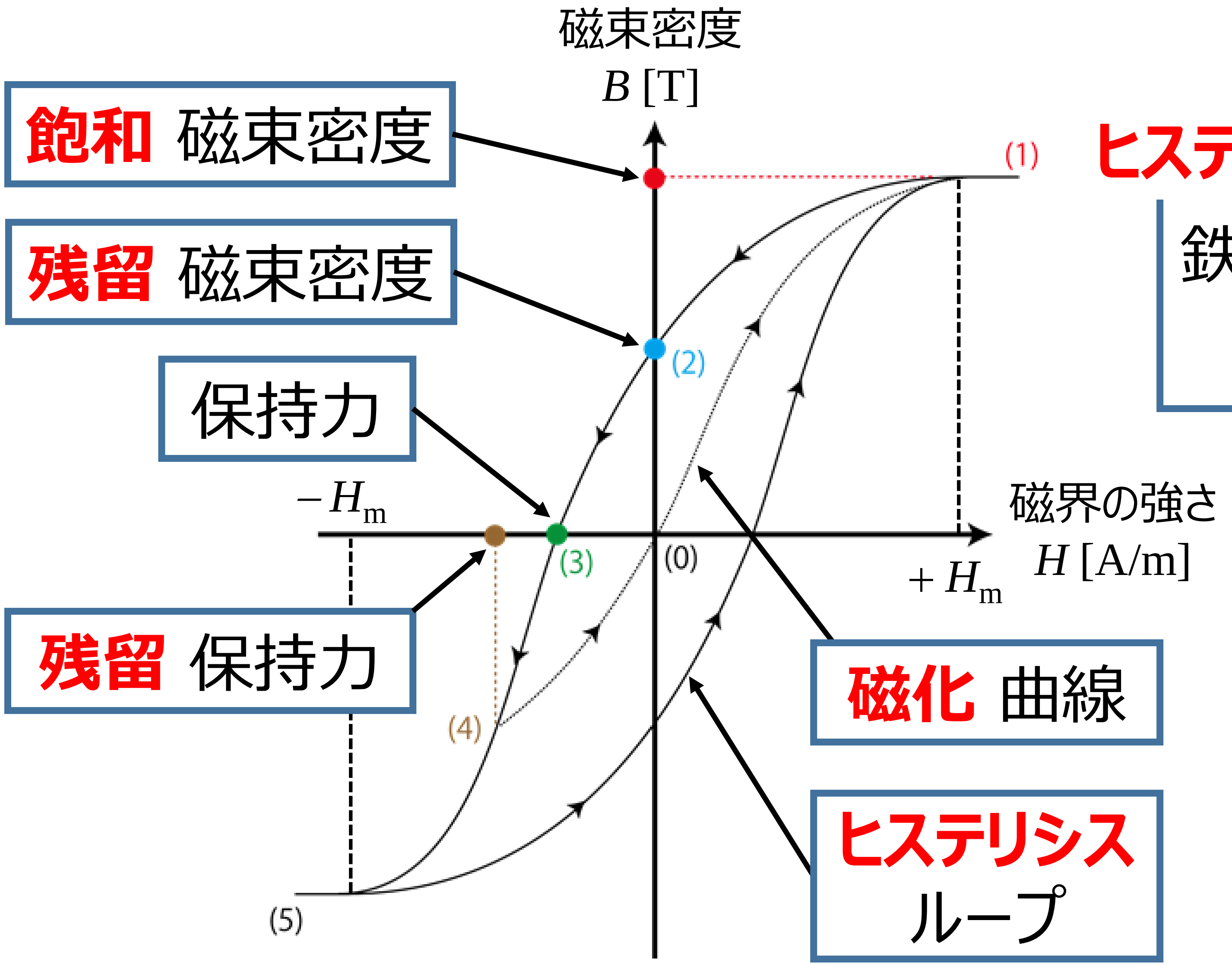
最大磁束密度

周波数

損失係数

鉄 損は **無負荷** 損に相当し，磁性体の **材料** や
鉄心の **構造** によって各種損失を低減することが可能となる

ヒステリシスループとヒステリシス損

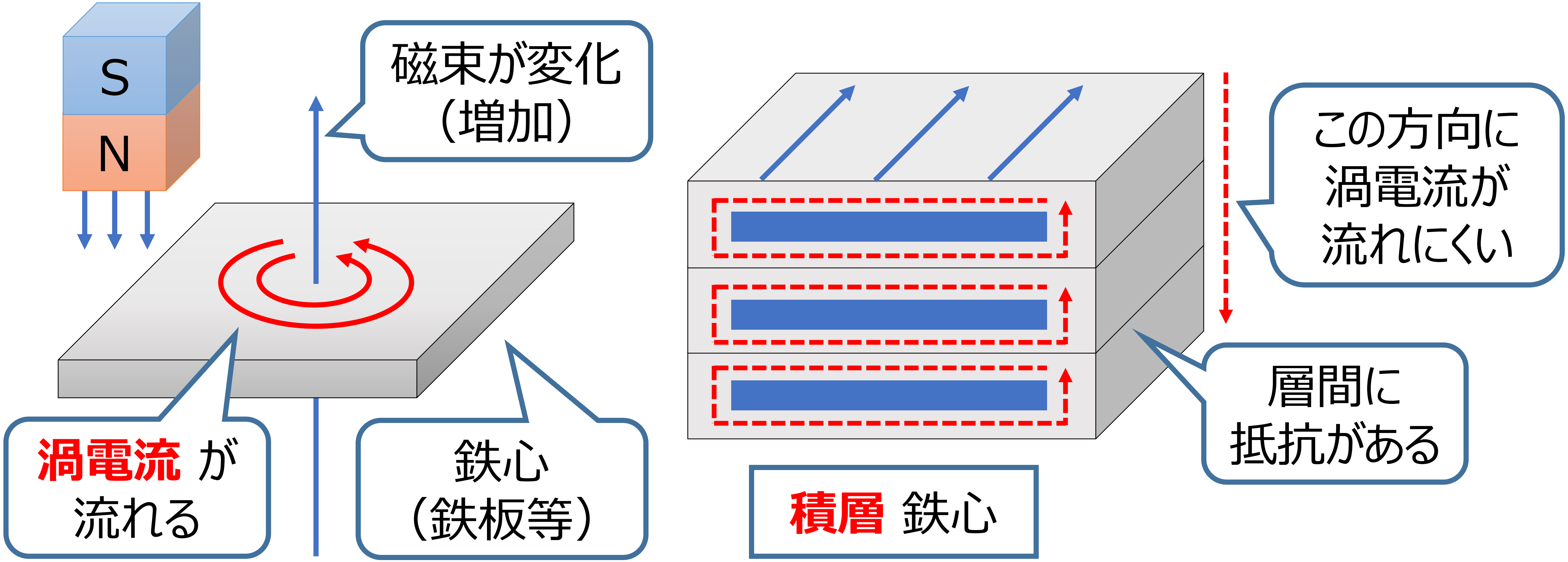


ヒステリシス 損

鉄心の **磁区** が **交番** 磁界によって磁界の向きを変えるときの損失

ヒステリシス ループの **面積** が損失に相当する

渦電流(Eddy Current)と積層鉄心



磁石を近づけると，それに反発するように **渦電流** が流れ反作用磁束が生じる

例題：変圧器の損失

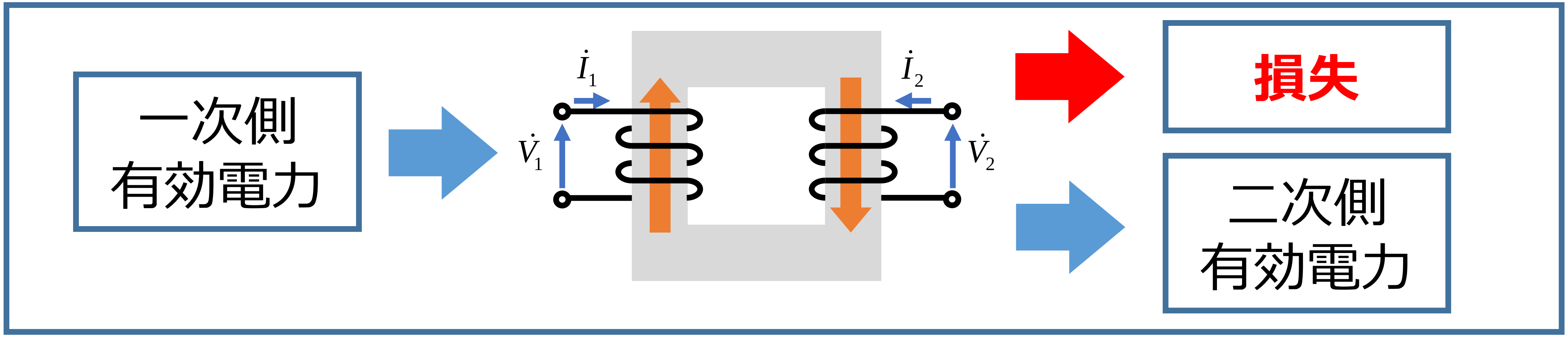
定格容量10[kVA]，一次定格電圧6.6[kV]，二次定格電圧200[V]の変圧器に60[Hz]の定格電圧を印加する。最大磁束密度が1.5[T]となって，無負荷損が50[W]の時，ヒステリシス損と渦電流損が同じだと仮定する。このときの損失係数 K_h，K_e を求めよ。
ここで，漂遊損は非常に小さく，無視できるものとする。

題意より，ヒステリシス損 P_h と渦電流損 P_e が等しいとし，更に漂遊損も無視できるので，無負荷損 $P_\mathrm{NL} = P_\mathrm{h} + P_\mathrm{e} = 50[\mathrm{W}]$，　$P_\mathrm{h} = P_\mathrm{e} = 25[\mathrm{W}]$ となる。

$$\begin{cases} K_\mathrm{h} = \dfrac{P_\mathrm{h}}{f \cdot B_\mathrm{m}^{1.6}} = \dfrac{25}{60 \times 1.5^{1.6}} = 0.217[\mathrm{J/T^2}] \approx 0.22[\mathrm{m^4/(\Omega \cdot s)}] \\ K_\mathrm{e} = \dfrac{P_\mathrm{e}}{f^2 \cdot B_\mathrm{m}^2} = \dfrac{25}{60^2 \times 1.5^2} = \dfrac{1}{324}[\mathrm{J \cdot s/T^2}] \approx 3.09 \times 10^{-3}[\mathrm{m^4/\Omega}] \end{cases}$$

変圧器の効率

変圧器の **効率** ：一次側の有効電力 P_1 と二次側の有効電力 P_2 の比



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\mathrm{loss}}} = \frac{P_2}{P_2 + \left(P_{\mathrm{L}} + P_{\mathrm{NL}}\right)} = \frac{V_2 I_2 \cos\theta}{V_2 I_2 \cos\theta + \left(P_{\mathrm{i}} + P_{\mathrm{c}} + P_{\mathrm{st}}\right)}$$

定格負荷(V_2=$V_{2\mathrm{N}}$, I_2=$I_{2\mathrm{N}}$)
の効率： **規約効率**

鉄 損　**銅** 損　**漂遊** 損

※漂遊損は計算上合わない損失の辻褄合わせ

変圧器の部分負荷効率

変圧器を定格容量で使用は稀 ⇒ 変圧器の負荷：全負荷の **1/*n***

負荷電流： $I_{2\mathrm{N}} \Rightarrow \dfrac{I_{2\mathrm{N}}}{n}$

銅損： $r \cdot {I_{2\mathrm{N}}}^2 \Rightarrow r\left(\dfrac{I_{2\mathrm{N}}}{n}\right)^2 = \dfrac{P_{\mathrm{cN}}}{n^2}$

鉄損：負荷電流に関係なく **一定**

漂遊損：負荷電流に関係なく
一定であると仮定

$$\eta_{\frac{1}{n}} = \frac{\dfrac{1}{n}V_{2\mathrm{N}}I_{2\mathrm{N}}\cos\theta}{\dfrac{1}{n}V_{2\mathrm{N}}I_{2\mathrm{N}}\cos\theta + \left(P_{\mathrm{i}} + \dfrac{1}{n^2}P_{\mathrm{cN}} + P_{\mathrm{stN}}\right)}$$

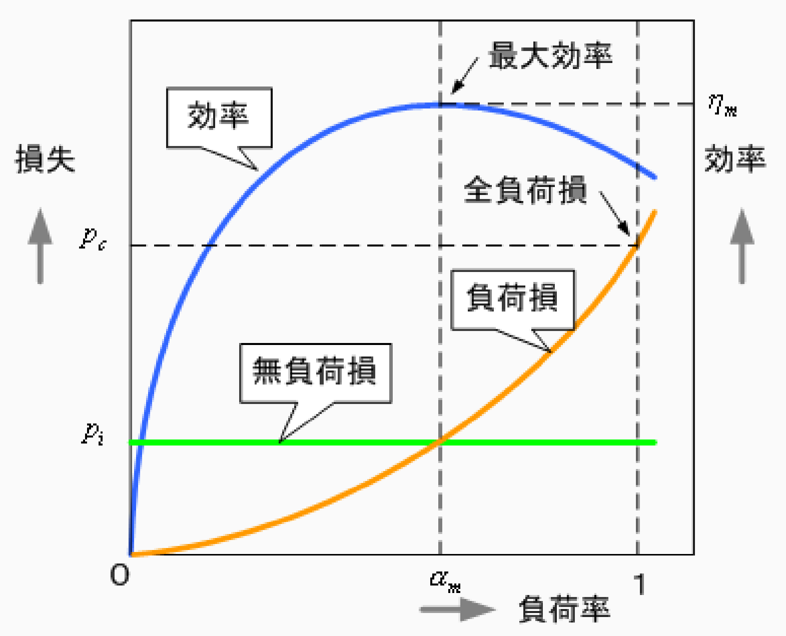
部分負荷 効率

※定格負荷でなくとも同じ式

変圧器の最大効率（定格）

変圧器の二次側の定格電圧をV_{2N}，定格電流をI_{2N}，二次側に換算した全抵抗をr_{12}とし，漂遊損を無視すると負荷損は銅損のみとなるので，

$$\eta=\frac{V_{2N}I_{2N}\cos\theta}{V_{2N}I_{2N}\cos\theta+\left(P_i+r_{12}I_{2N}{}^2\right)}=\frac{V_{2N}\cos\theta}{V_{2N}\cos\theta+\left(\dfrac{P_i}{I_{2N}}+r_{12}I_{2N}\right)}$$



この時，負荷の大きさによって変化するのは分母の括弧内の式であり，これらが **最小** になればよい

$$\therefore\frac{P_i}{I_{2N}}\times r_{12}I_{2N}=P_i\cdot r_{12}\text{（一定）}$$ と考えると，

$$\frac{P_i}{I_{2N}}=r_{12}I_{2N}$$

$P_i=r_{12}I_{2N}{}^2$（鉄損＝銅損）が **最大効率** 条件となる

※A×B＝一定ならば，A＝Bの時にA+Bは最小となる

変圧器の最大効率

変圧器に流れる二次電流は負荷の大きさによって異なり，
定格時に銅損と鉄損が等しくなるとは限らない

$$\eta = \frac{V_{2N} I_{2N} \cos\theta}{V_{2N} I_{2N} \cos\theta + \left(P_i + r_{12} {I_{2N}}^2\right)} = \frac{V_{2N} \cos\theta}{V_{2N} \cos\theta + \left(\frac{P_i}{I_{2N}} + r_{12} I_{2N}\right)} \Rightarrow \eta = \frac{V_2 \cos\theta}{V_2 \cos\theta + \left(\frac{P_i}{I_2} + r_{12} I_2\right)}$$

$\therefore \frac{P_i}{I_2} = r_{12} I_2$ より，

最大効率時の2次電流は

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_i}{r_{12}}} = \sqrt{\frac{P_i}{\left(\frac{P_c}{{I_{2N}}^2}\right)}} = \sqrt{\frac{P_i}{P_c}} I_{2N} \Rightarrow I_2 = \sqrt{\frac{P_i + P_{stN}}{P_c}} I_{2N}$$

二次側換算した全抵抗は負荷損（銅損）を**定格** 二次電流で割った値であることに注意！

漂遊 損も考慮した最大効率時のI_2