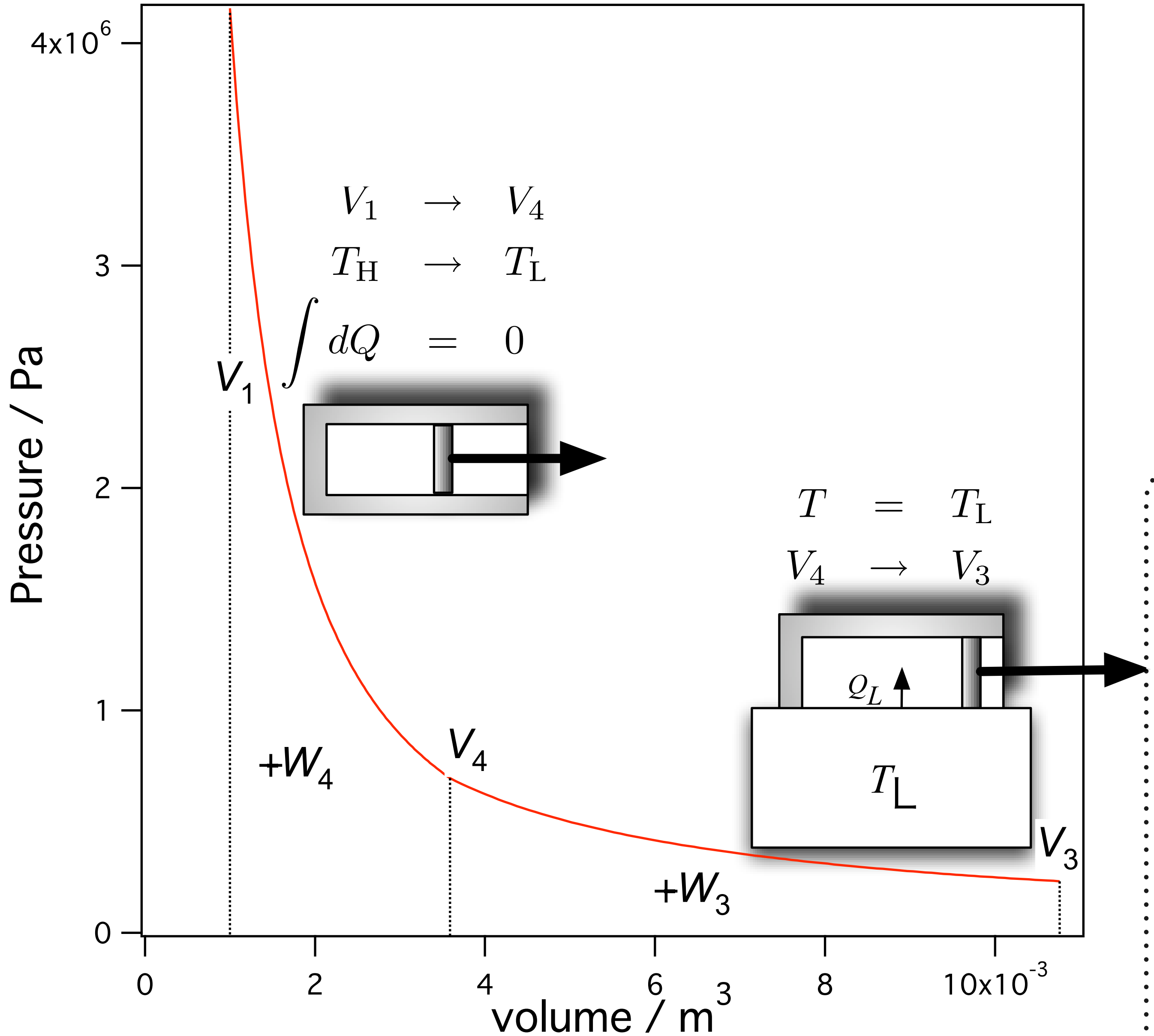
Carnot reverse cycle：逆回転



熱・仕事のすべての

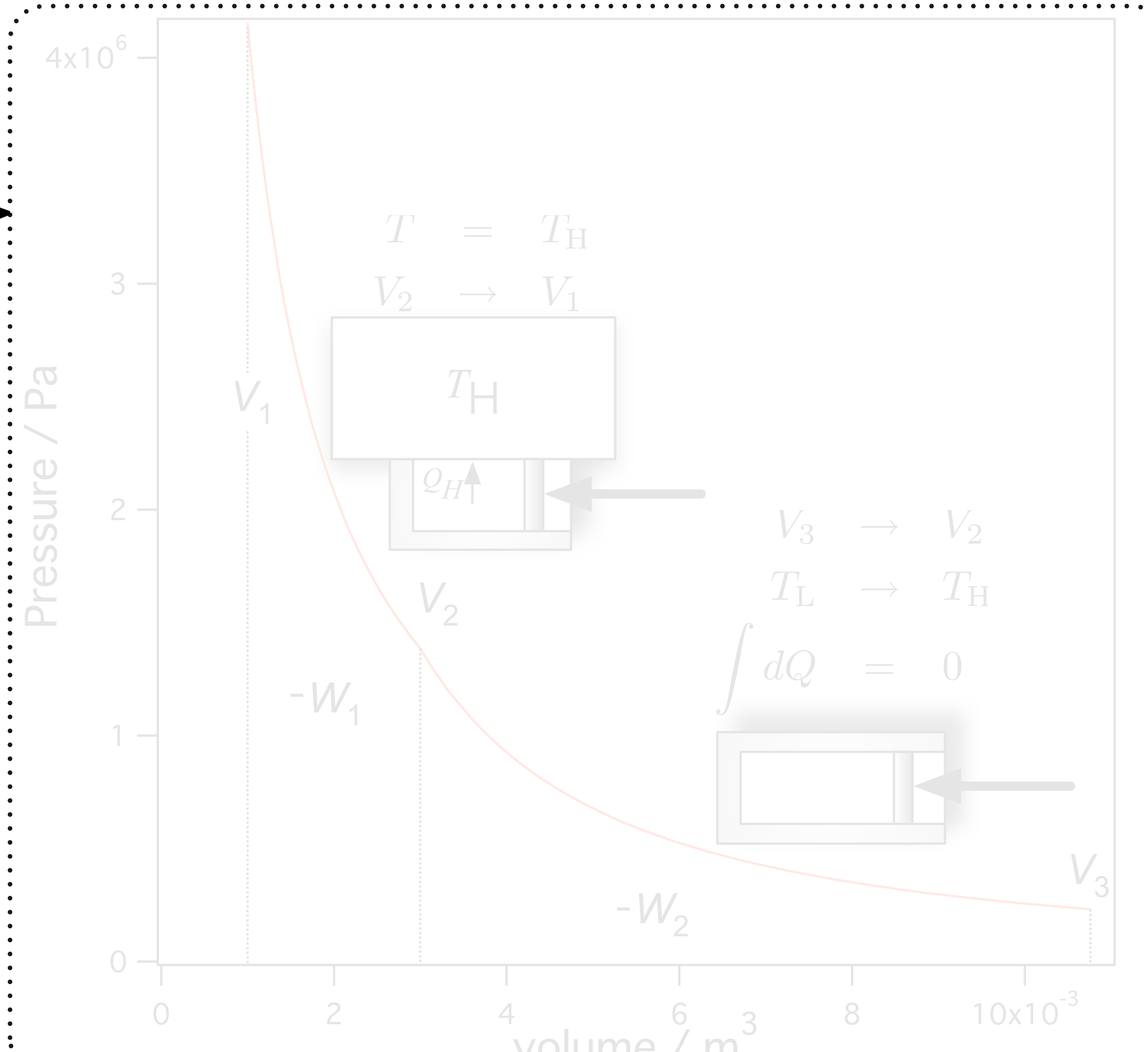
符号が逆転する

仕事を系に対して行い

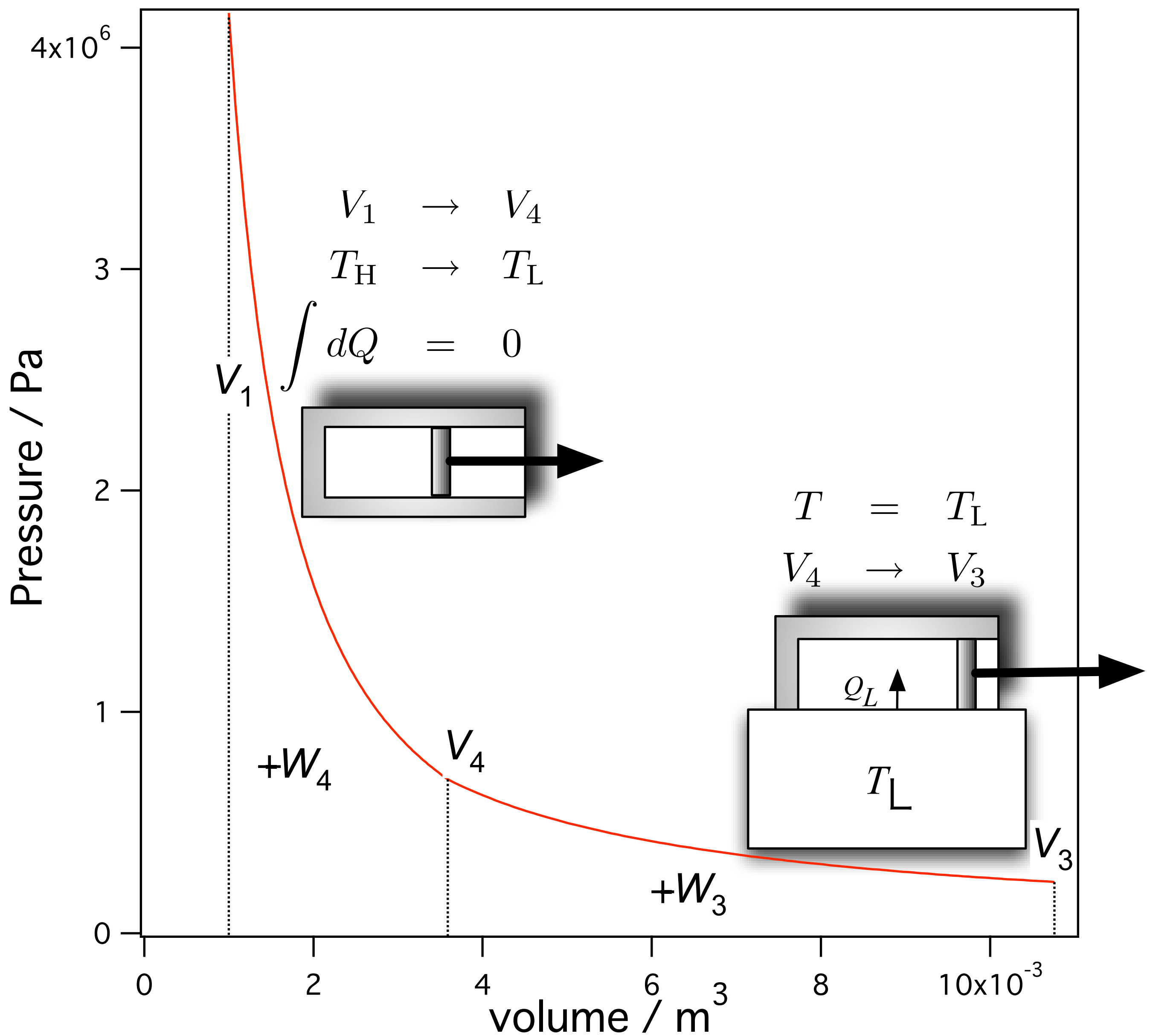
低温から高温の熱源へ熱を移動させる

ヒートポンプ：クーラー

QとWは大きさは同じで反対符号になる

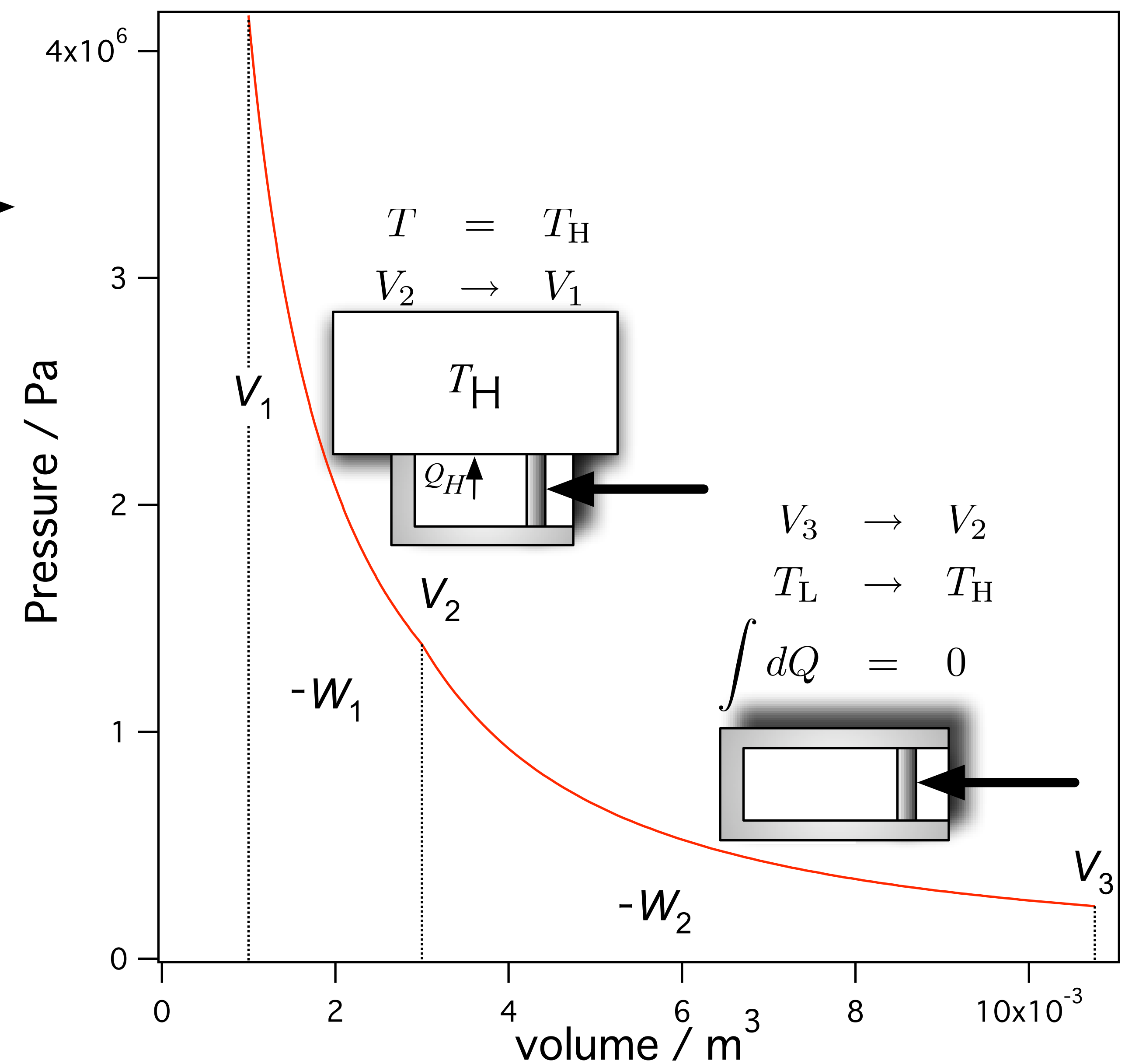


Carnot reverse cycle：逆回転



熱・仕事のすべての

符号が逆転する



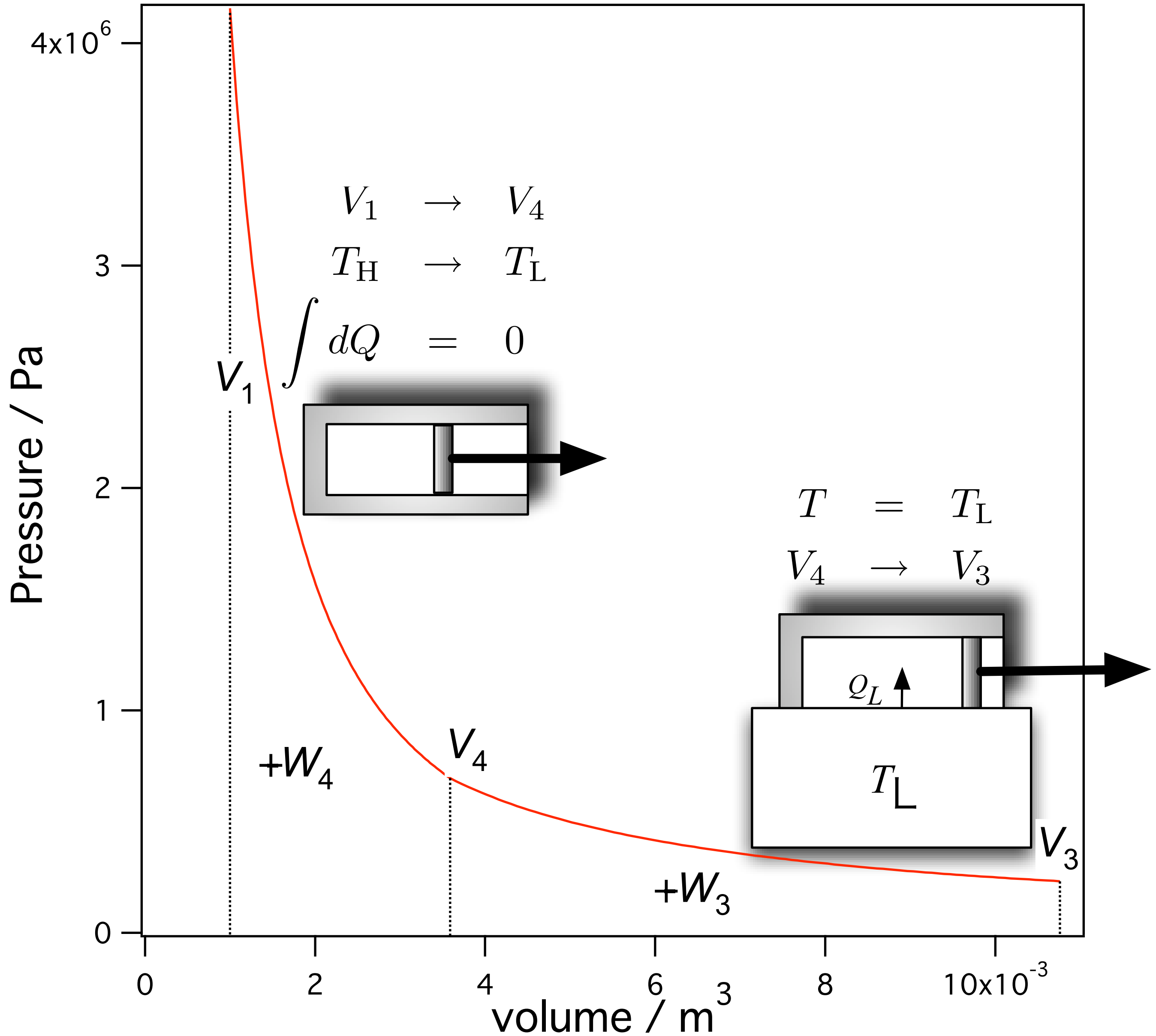
仕事を系に対して行い

低温から高温の熱源へ熱を移動させる

ヒートポンプ：クーラー

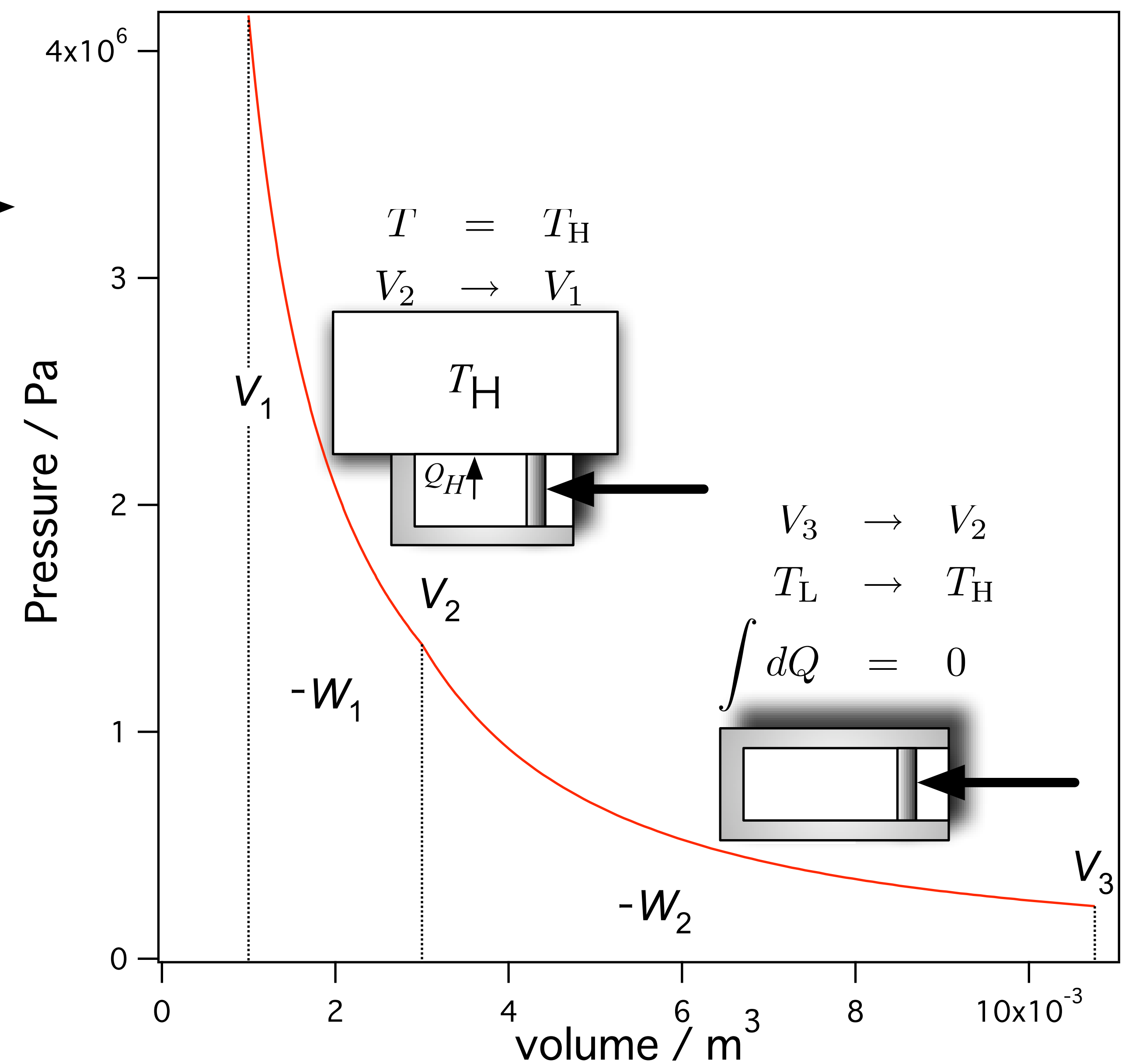
QとWは大きさは同じで反対符号になる

Carnot reverse cycle：逆回転



熱・仕事のすべての

符号が逆転する

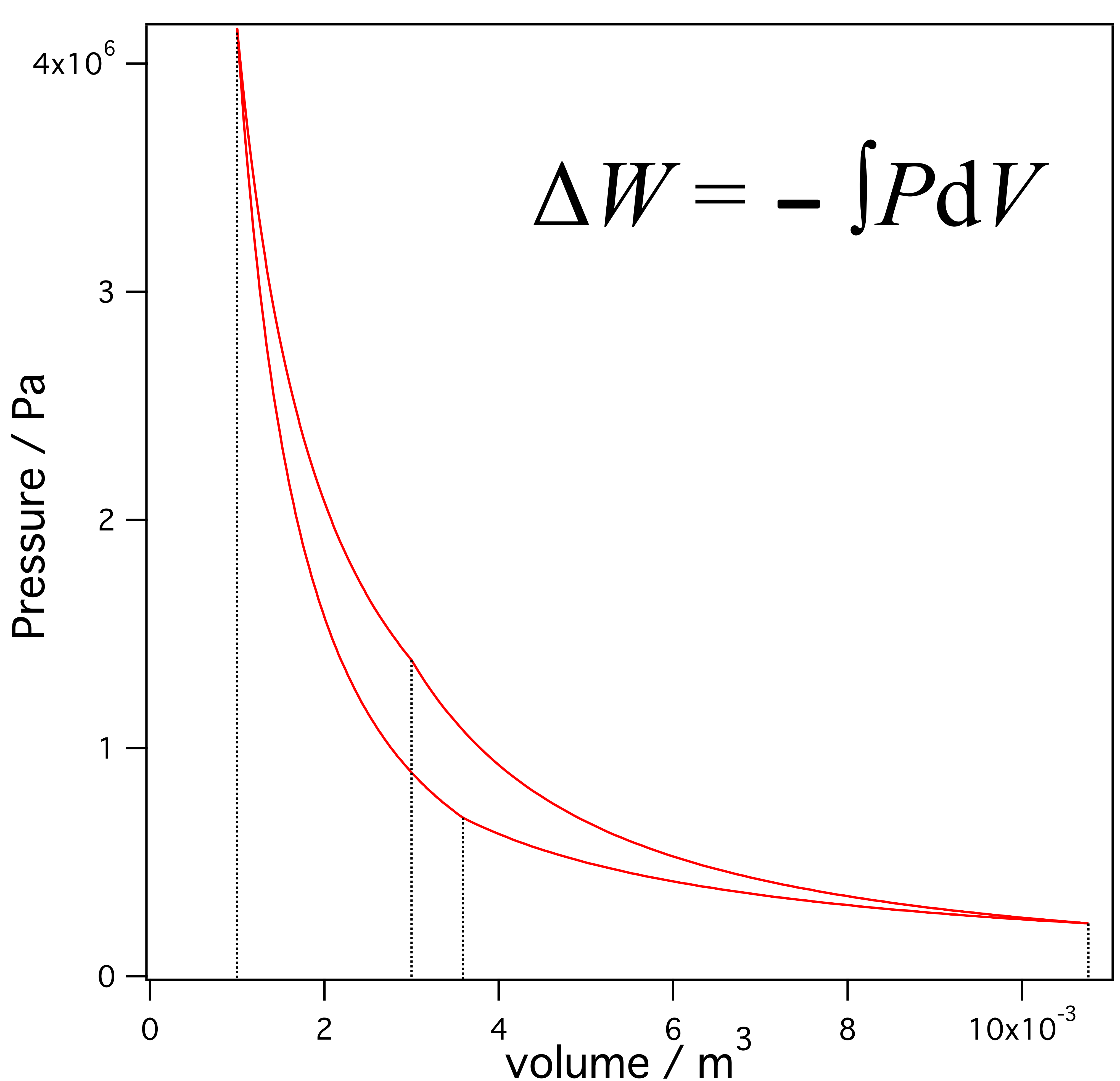


仕事を系に対して行い

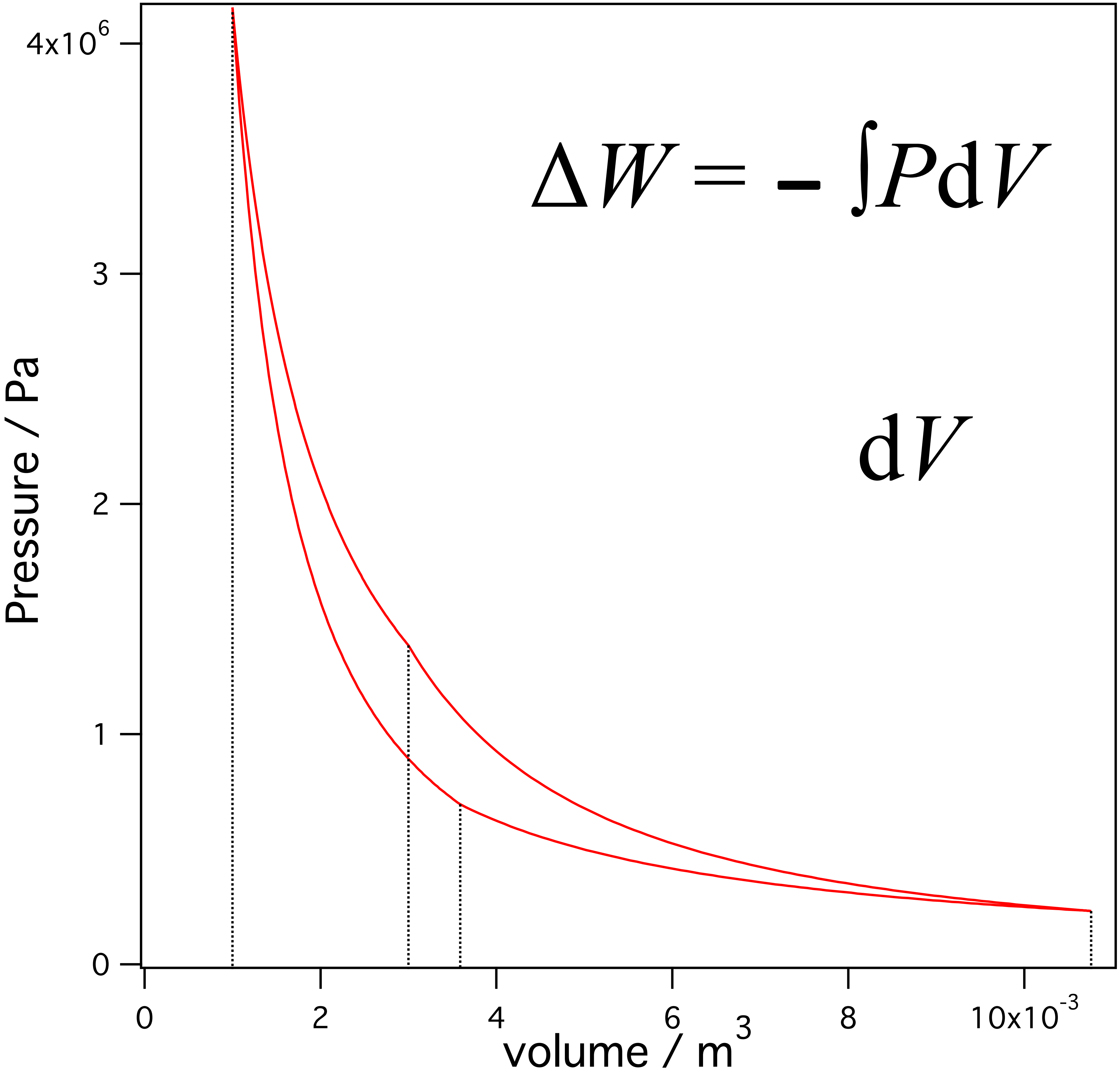
低温から高温の熱源へ熱を移動させる

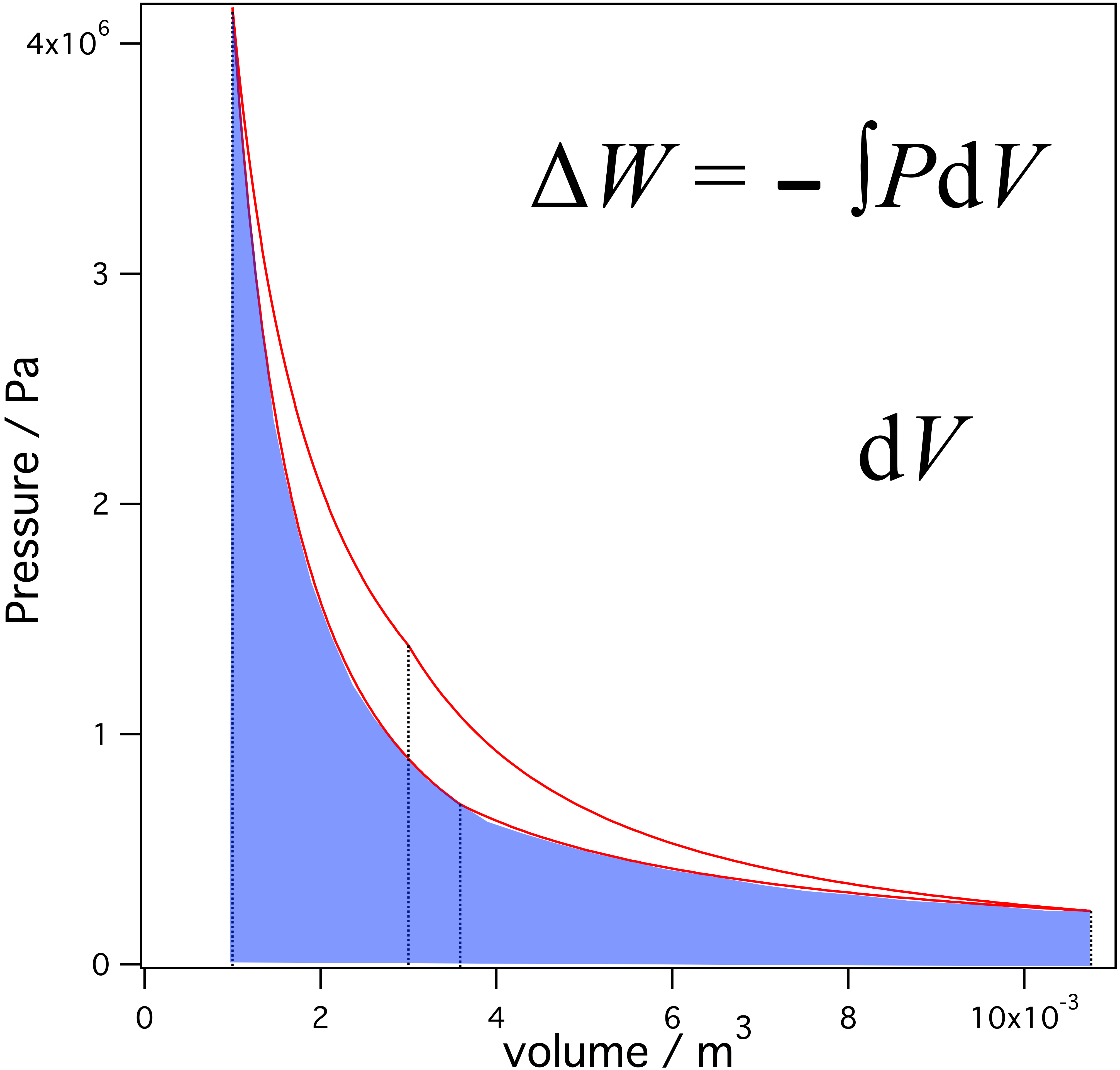
ヒートポンプ：クーラー

QとWは大きさは同じで反対符号になる

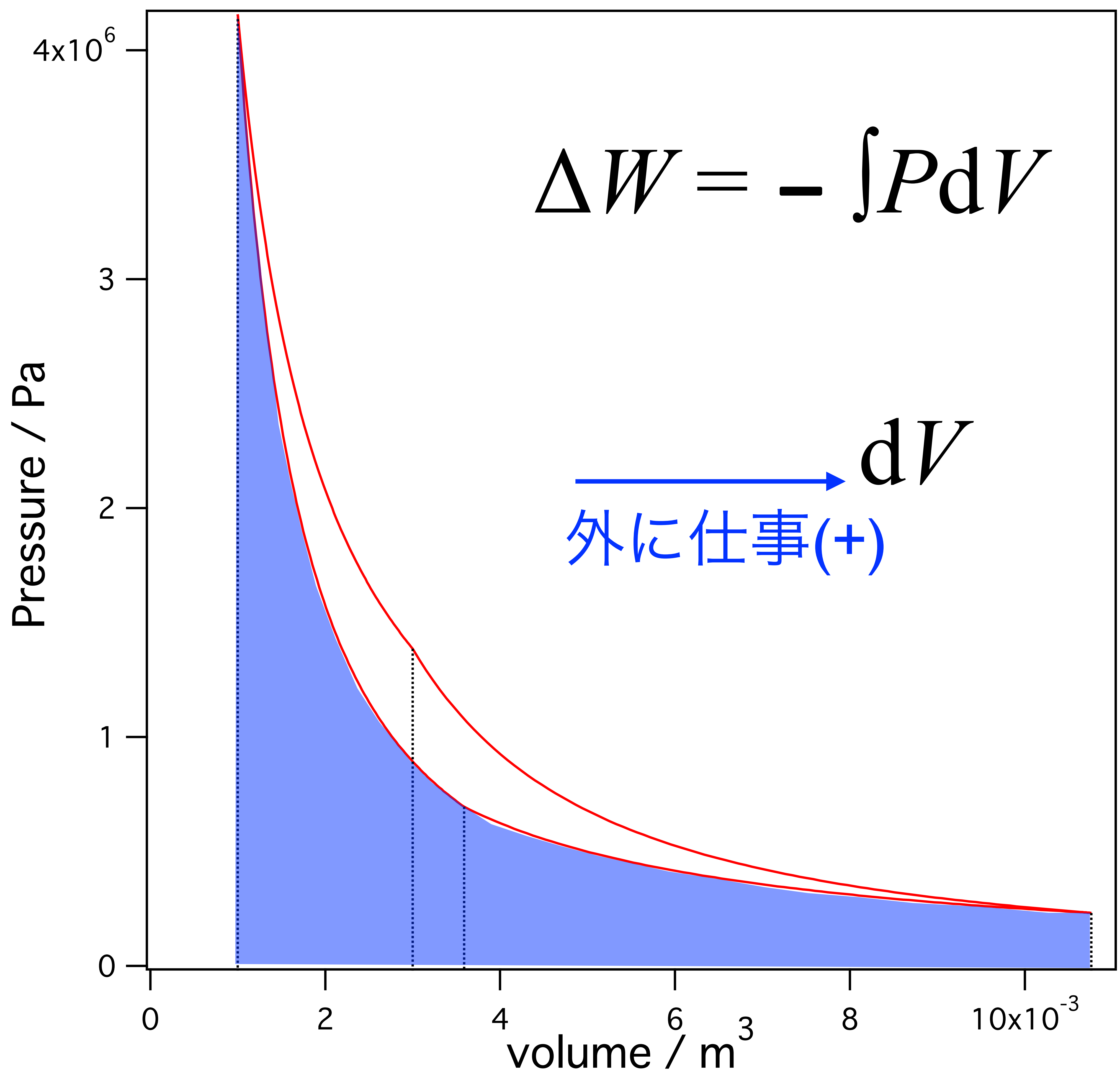


$\Delta W = -\int P\mathrm{d}V$
Pressure / Pa
4x10^6
3
2
1
0
volume / m^3
0
2
4
6
8
10x10^-3

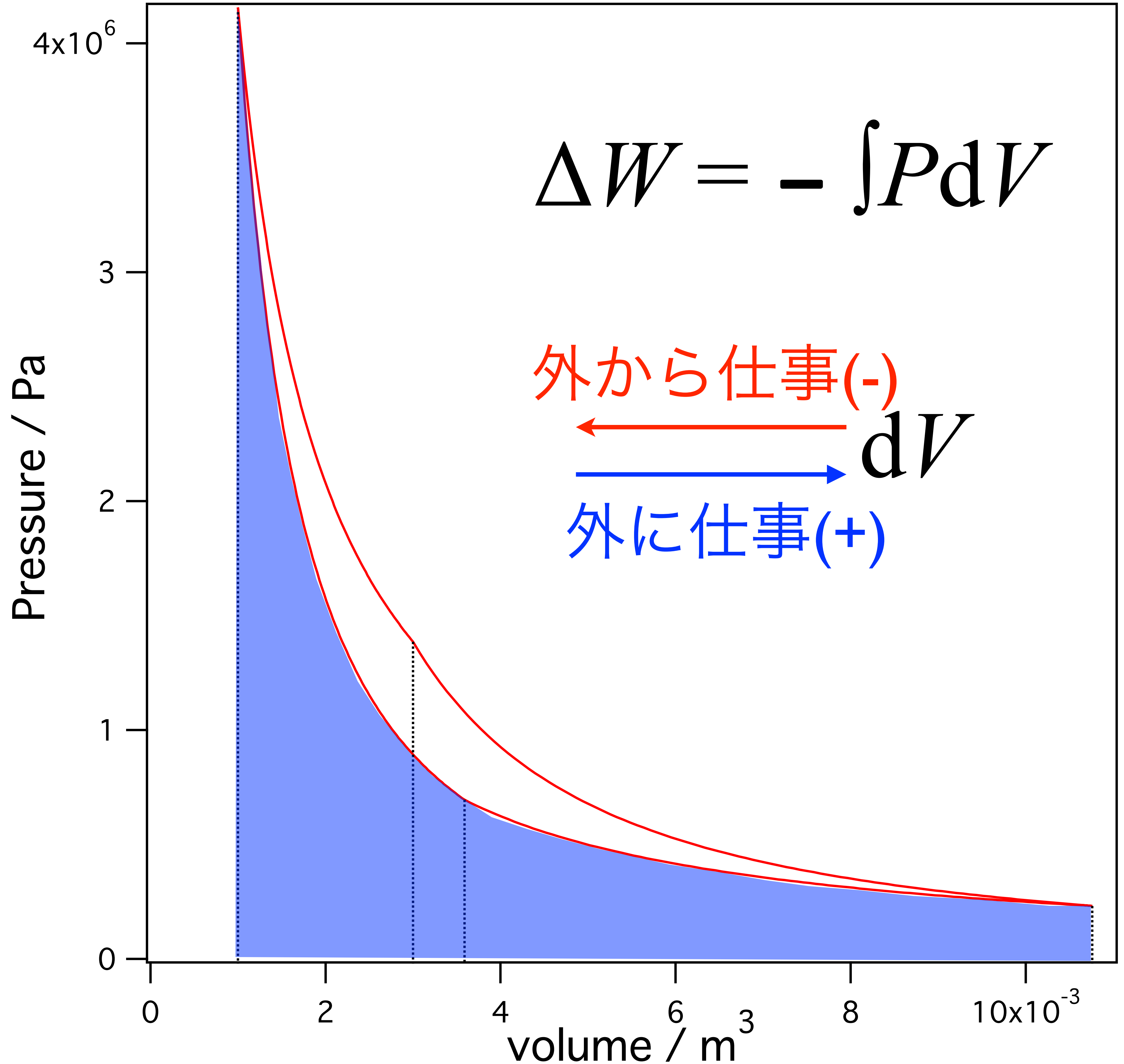

$\Delta W = -\int P \mathrm{d}V$
$\mathrm{d}V$
Pressure / Pa
$4x10^6$
3
2
1
0
0
2
4
6
8
$10x10^{-3}$
volume / m^3



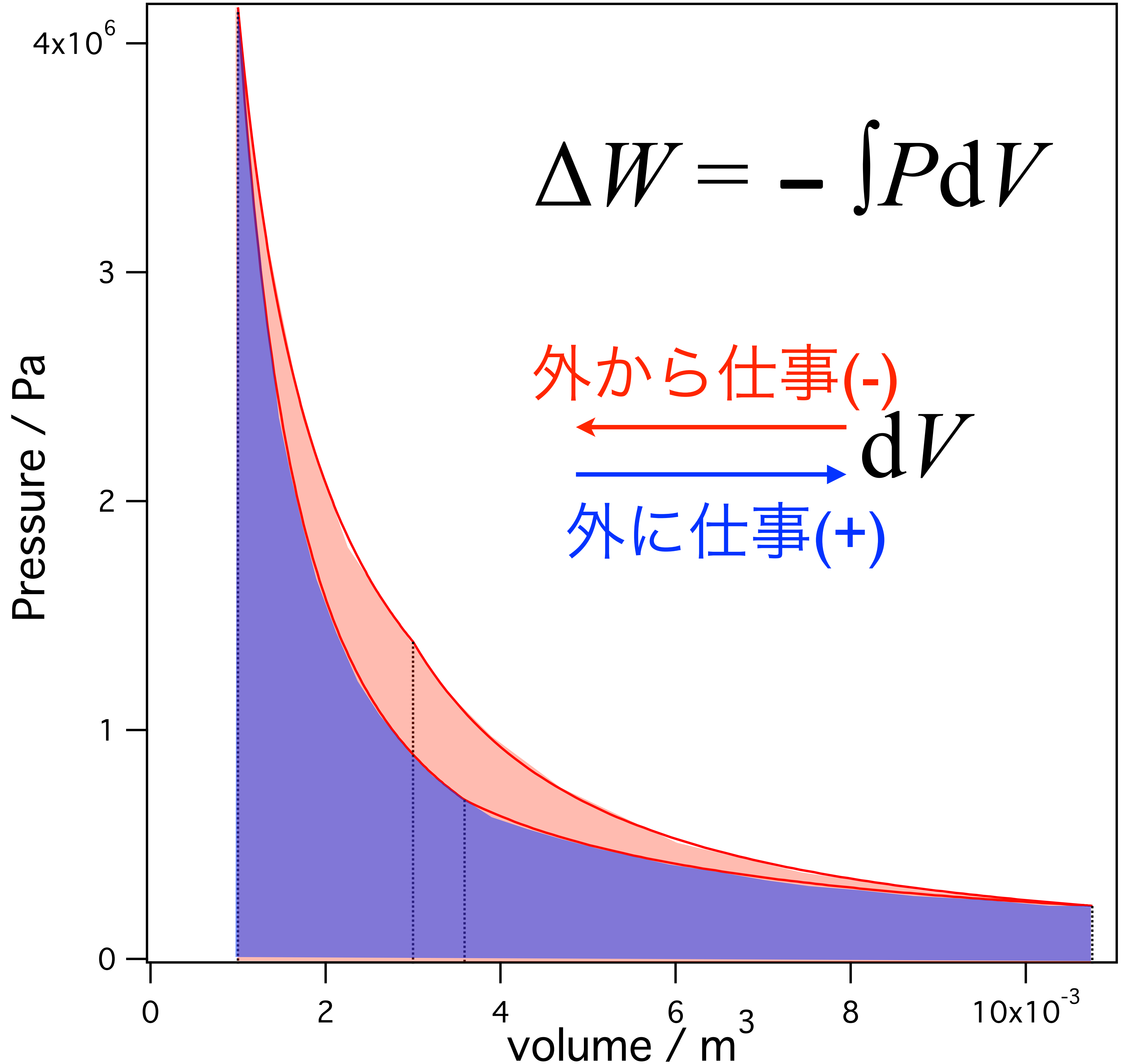
$\Delta W = -\int P \mathrm{d}V$
$\mathrm{d}V$
Pressure / Pa
$4\mathrm{x}10^{6}$
3
2
1
0
volume / m^3
0
2
4
6
8
$10\mathrm{x}10^{-3}$



$\Delta W = -\int P\mathrm{d}V$
$\mathrm{d}V$
外に仕事(+)
Pressure / Pa
volume / m^3
4x10^6
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10x10^{-3}



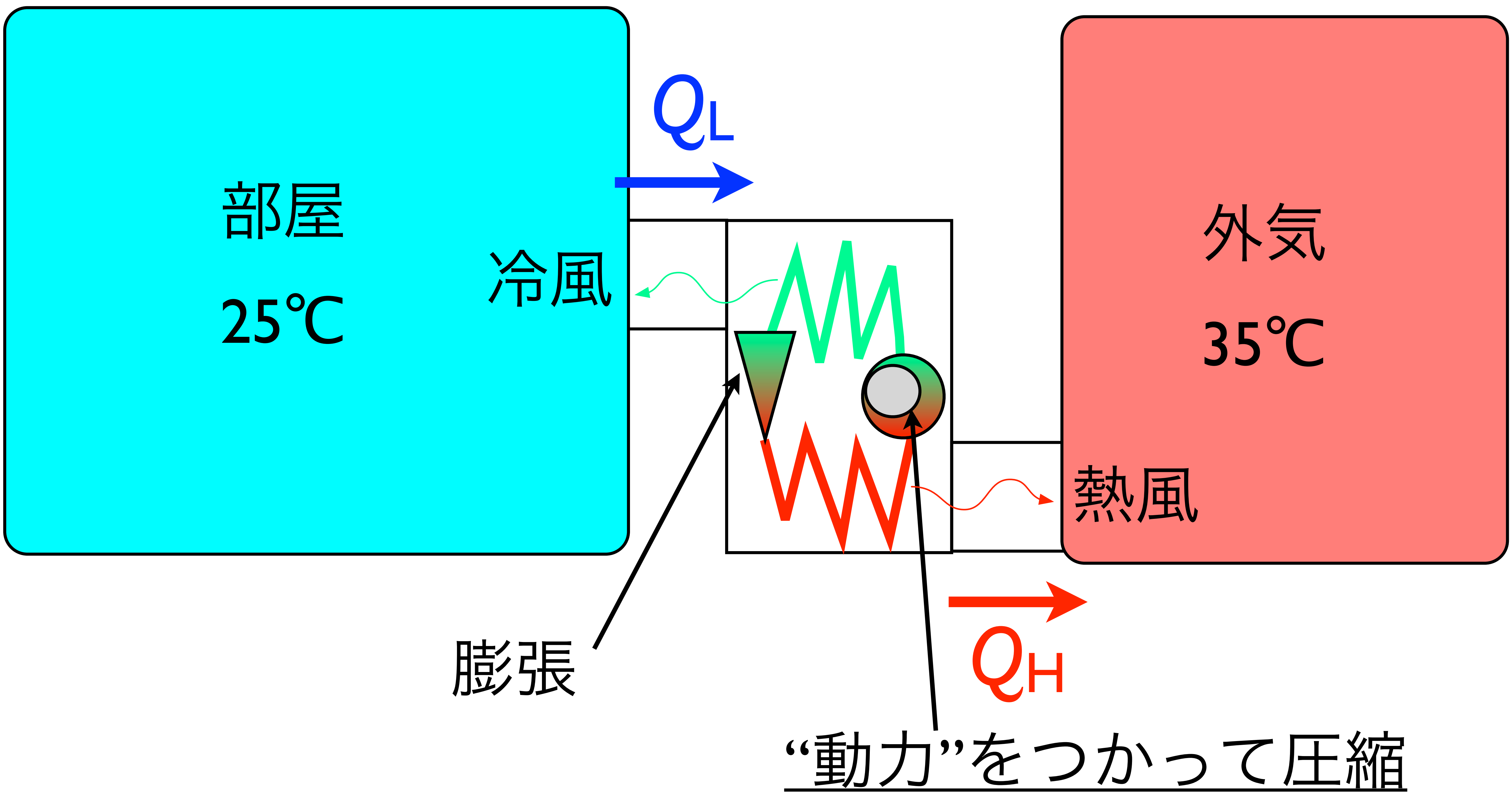
$\Delta W = -\int P \mathrm{d}V$
外から仕事(-)
dV
外に仕事(+)
Pressure / Pa
volume / m^3
4x10^6
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10x10^{-3}



$\Delta W = -\int P \mathrm{d}V$
外から仕事(-)
dV
外に仕事(+)
Pressure / Pa
4×10^6
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10×10^{-3}
volume / m^3

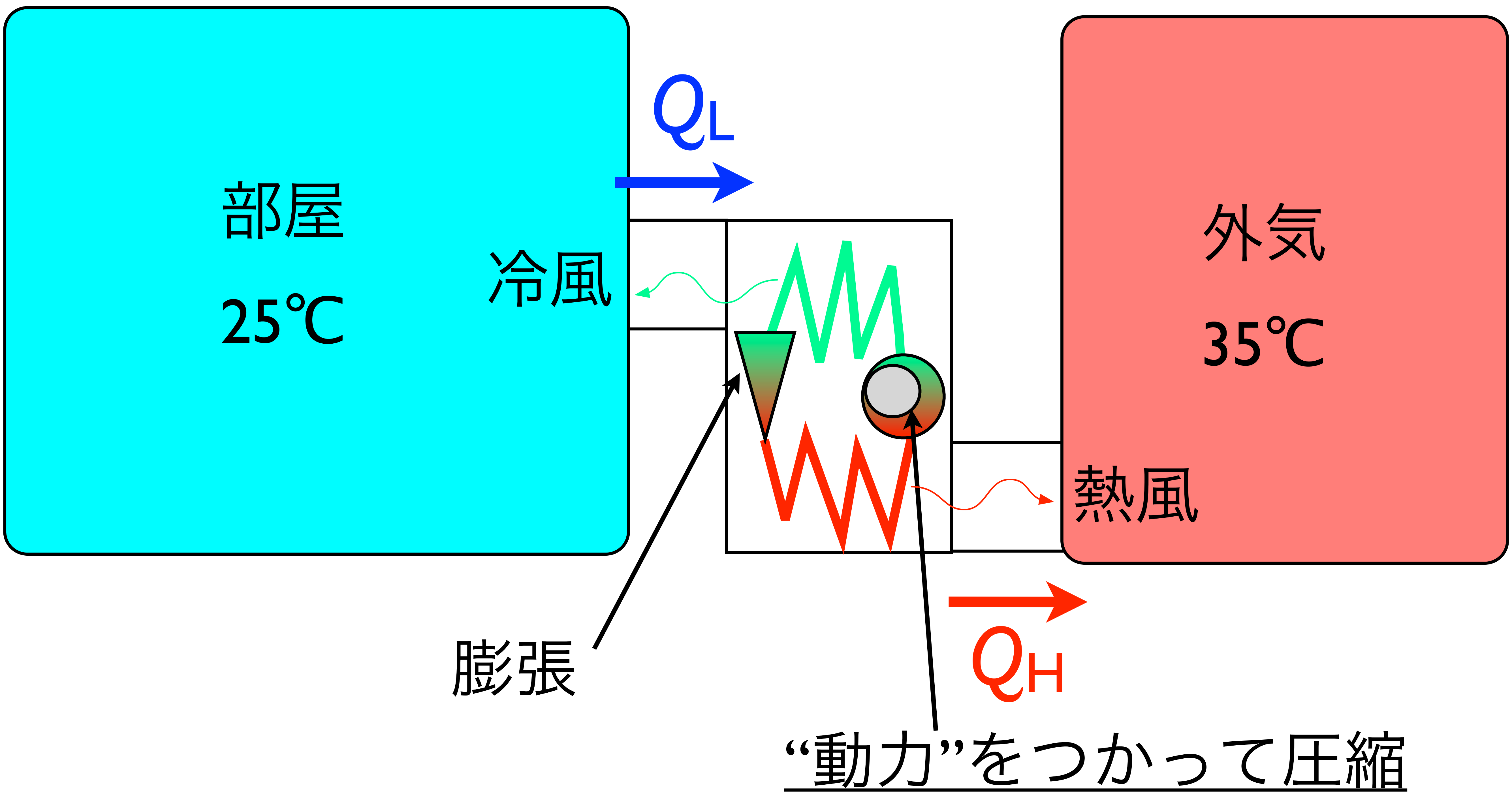
代替フロンガスを圧縮して液化 温度上昇 コンプレッサー

代替フロンガス液体を気化,膨張 温度下降 膨張弁



代替フロンガスを圧縮して液化 温度上昇 コンプレッサー

代替フロンガス液体を気化,膨張 温度下降 膨張弁



Qの本来の定義：$dU = dQ + dW$

系（気体）に入る熱量を正に

Carnotサイクル：$Q_{\mathrm{H}} = +|Q_{\mathrm{H}}|$, $Q_{\mathrm{L}} = -|Q_{\mathrm{L}}|$

$$\frac{Q_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} = \frac{|Q_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} - \frac{|Q_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} = 0$$

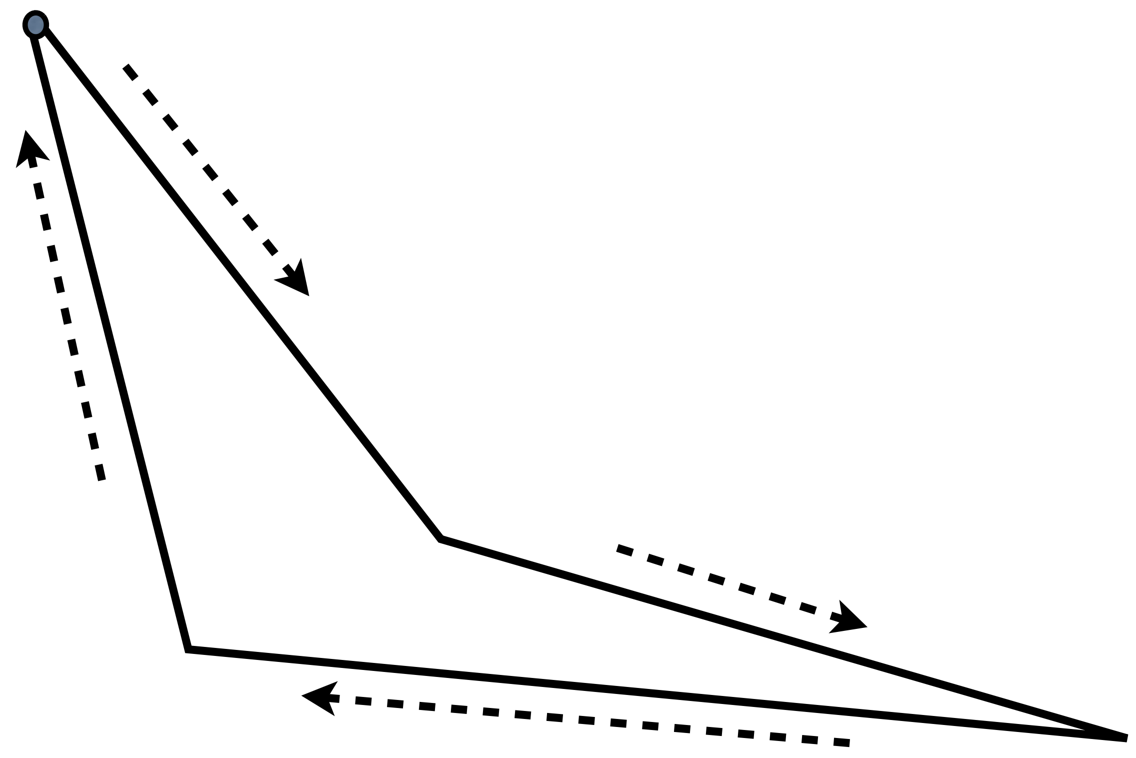
Carnot逆サイクル：$Q_{\mathrm{H}} = -|Q_{\mathrm{H}}|$, $Q_{\mathrm{L}} = +|Q_{\mathrm{L}}|$

$$\frac{Q_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} = -\frac{|Q_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{|Q_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} = 0$$

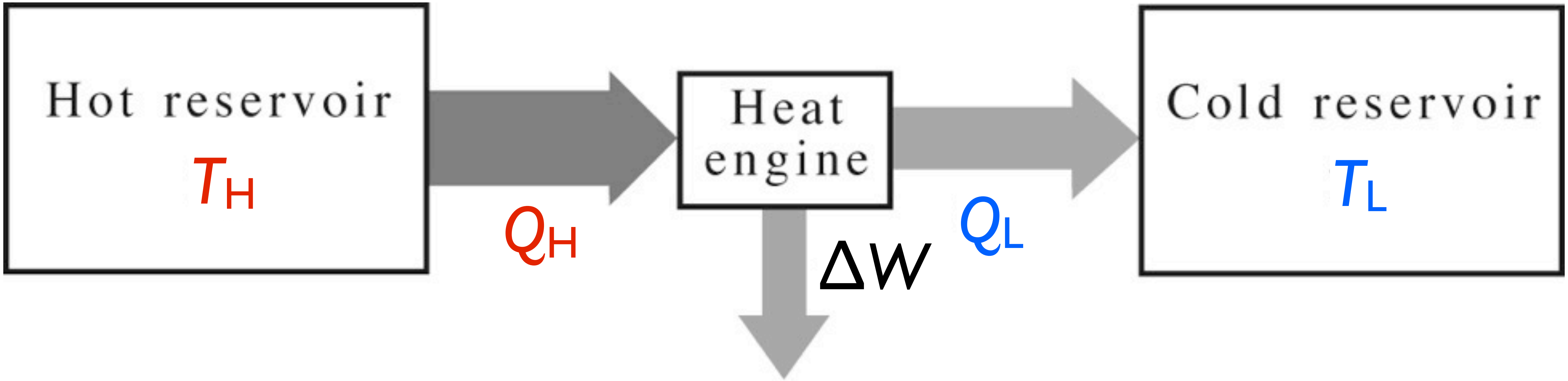
効率:

$$\eta(\mathrm{Carnot}) = \frac{Q_{\mathrm{H}} + Q_{\mathrm{L}}}{Q_{\mathrm{H}}} = \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$$

一般のサイクルに対して,効率はどのように表される？



$$\Delta U_{\mathrm{cycle}} = 0$$
$$= Q_{\mathrm{H}} + Q_{\mathrm{L}} + \Delta W$$
$$Q_{\mathrm{H}} = -\Delta W - Q_{\mathrm{L}}$$



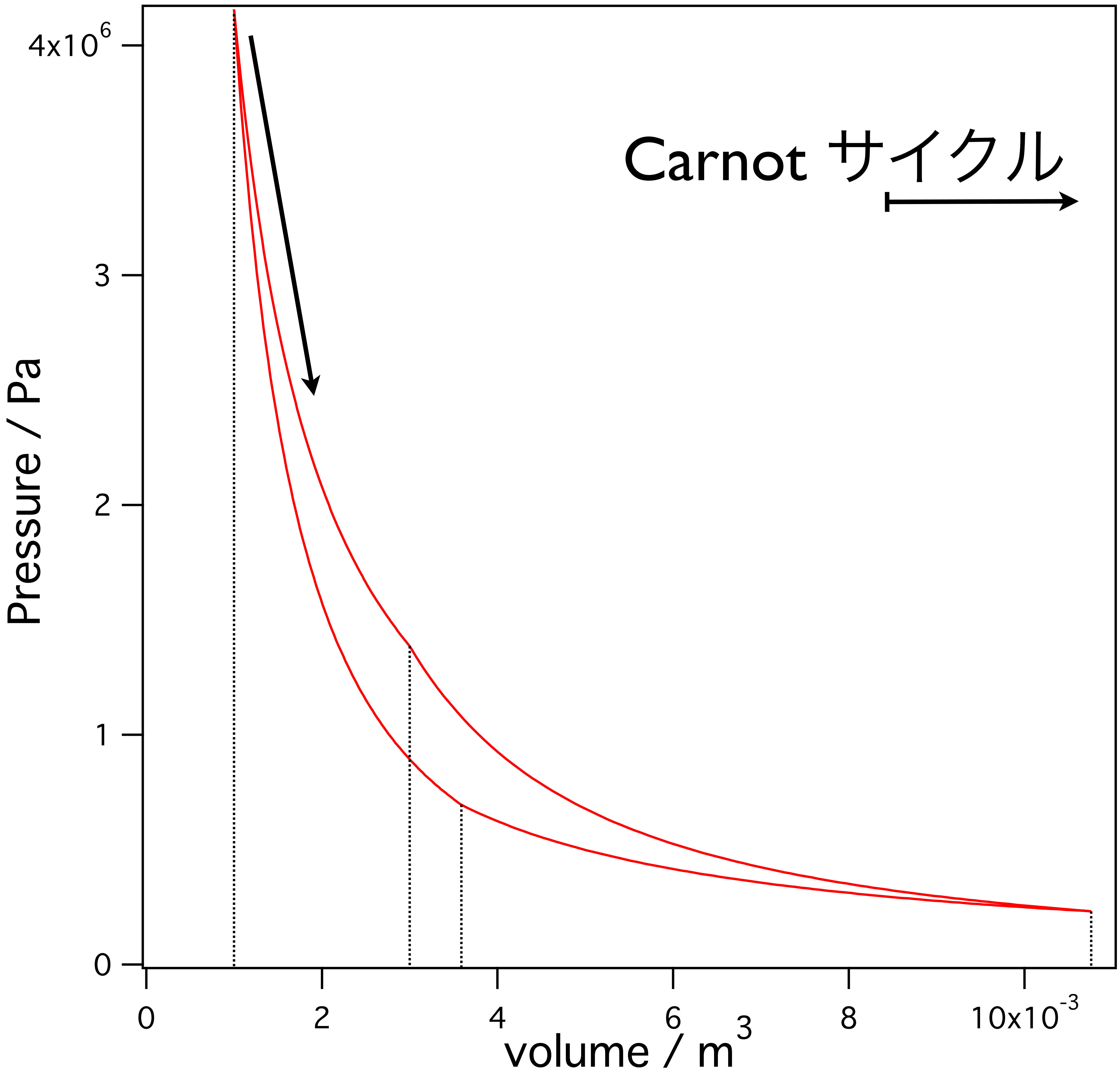
$$Q_{\mathrm{H}} = -\Delta W - Q_{\mathrm{L}}$$

$$-\Delta W = Q_{\mathrm{H}} + Q_{\mathrm{L}}$$

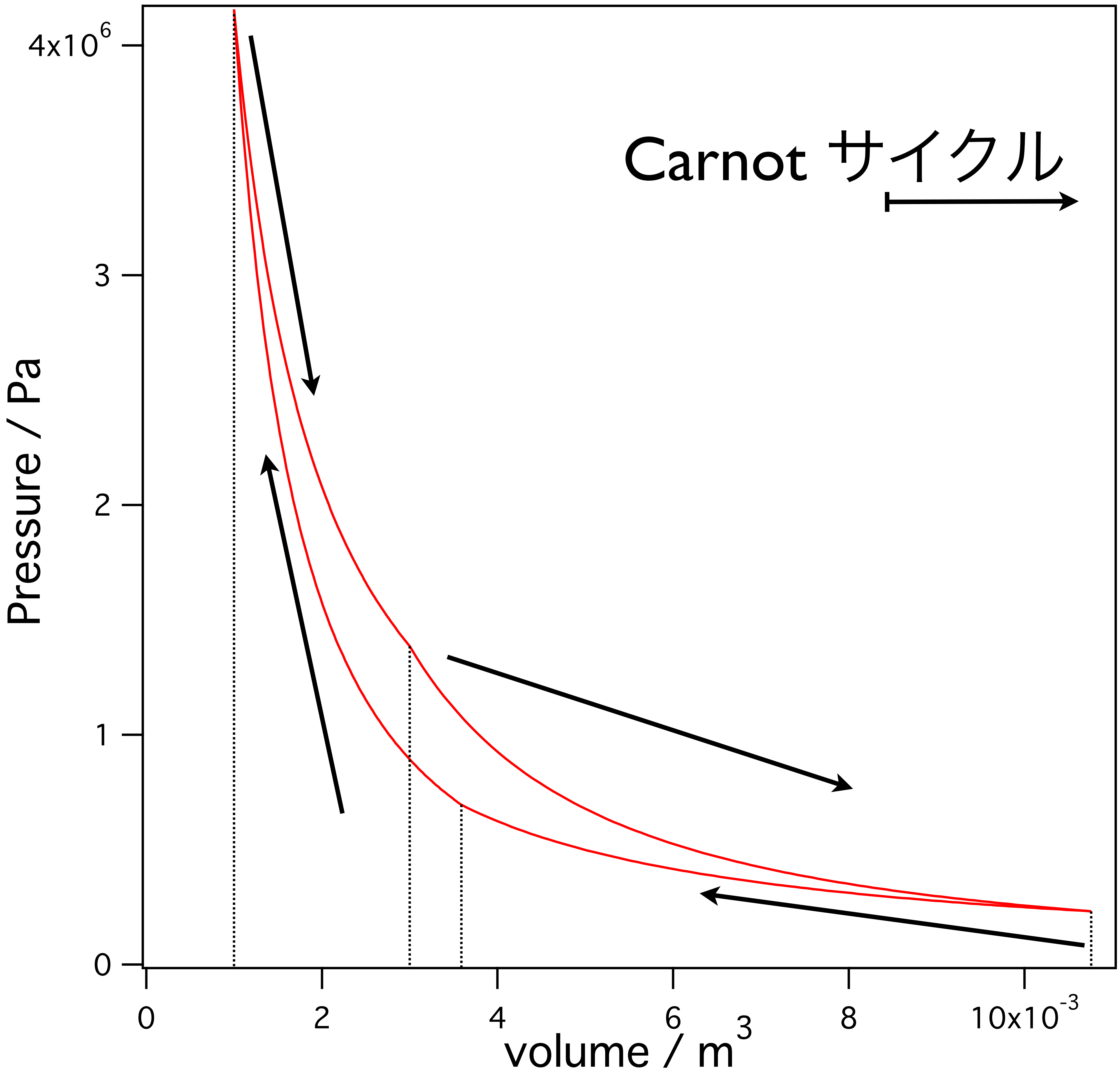
$$\eta = \frac{-\Delta W}{Q_{\mathrm{H}}}$$

$$= \frac{Q_{\mathrm{H}} + Q_{\mathrm{L}}}{Q_{\mathrm{H}}}$$

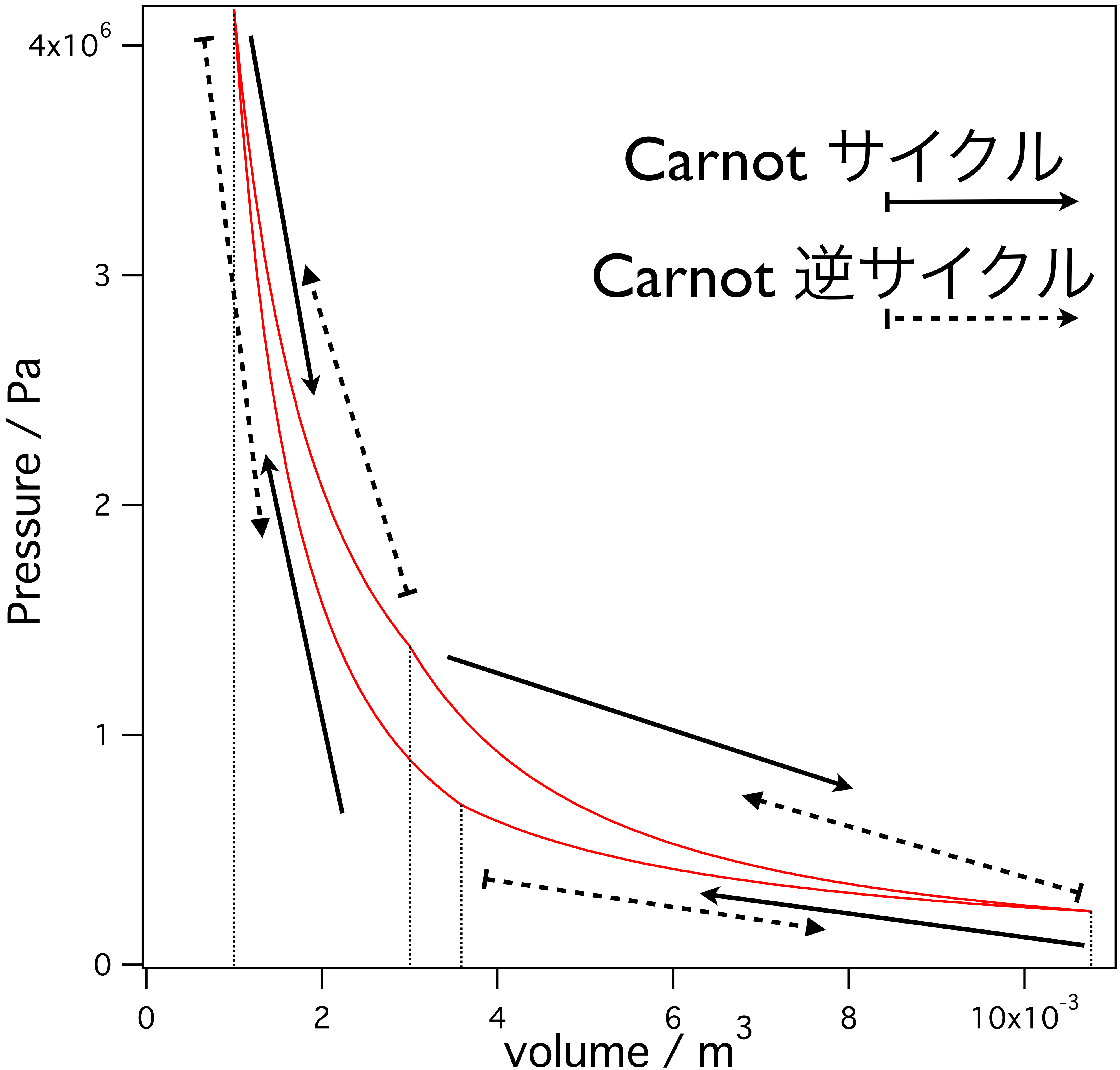
さらに，Carnotの場合：　$\eta = 1 - \dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$



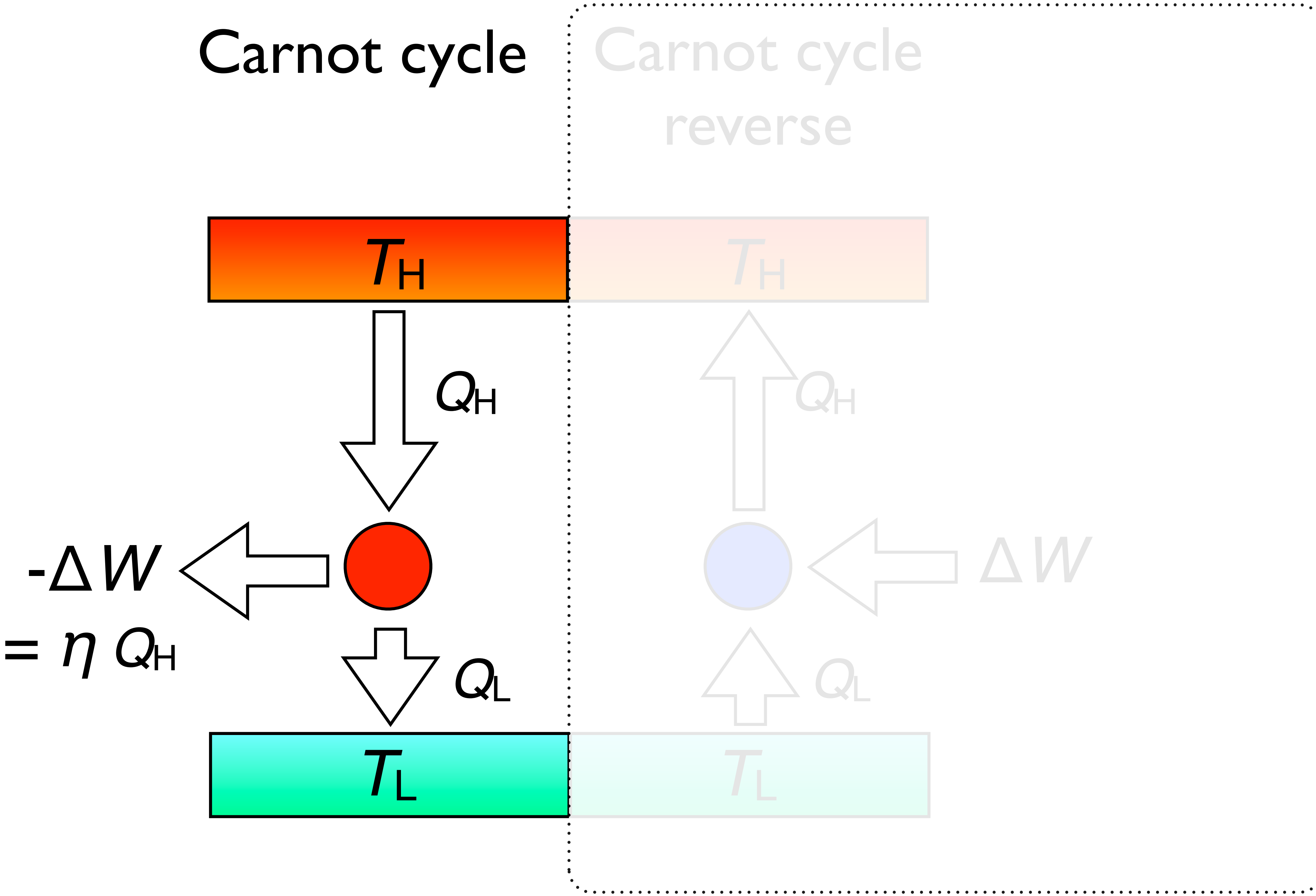
Carnot サイクル
Pressure / Pa
volume / m3
4x10^6
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10x10^-3



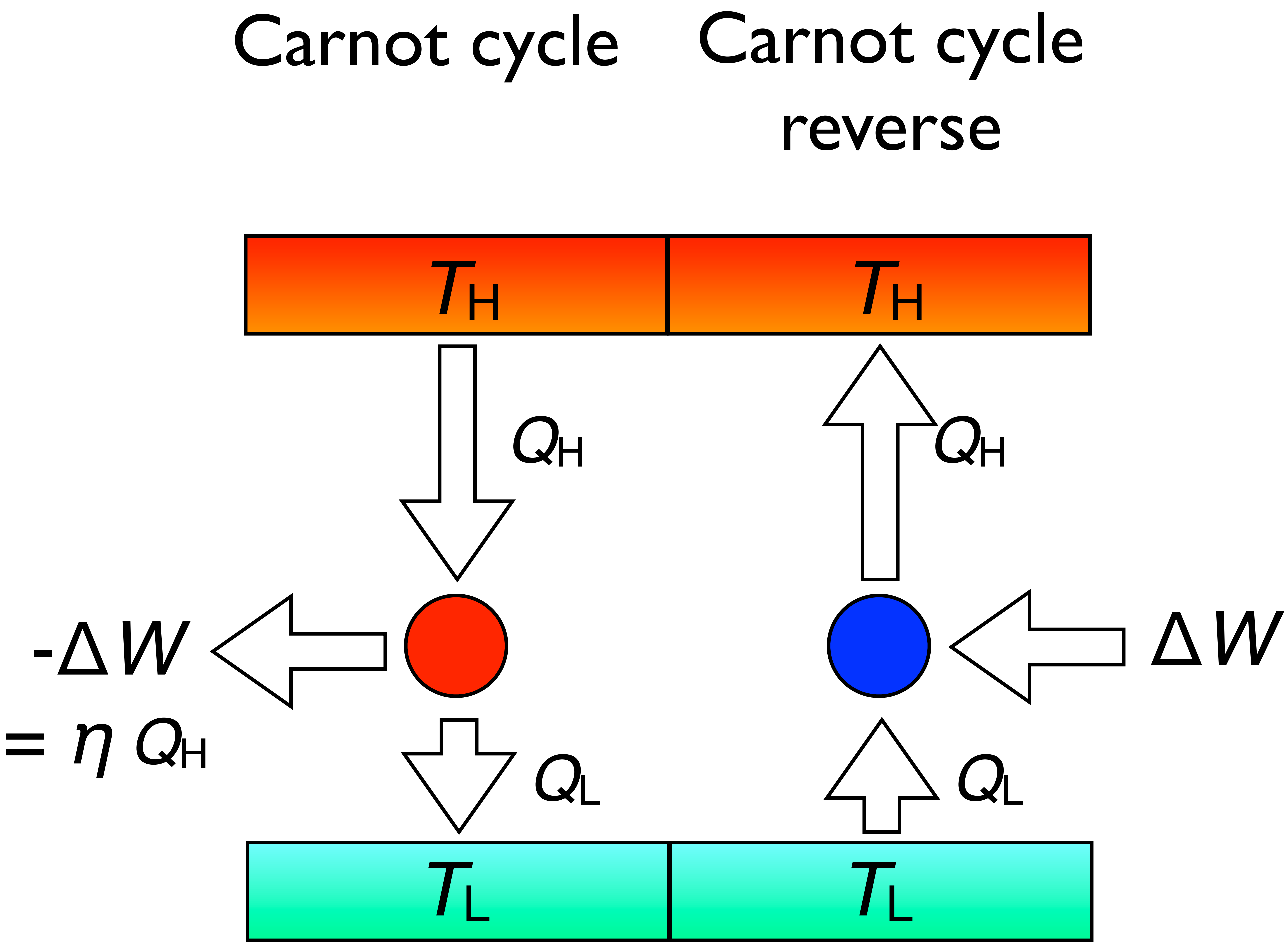
Carnot サイクル
Pressure / Pa
4x10^6
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10x10^-3
volume / m^3

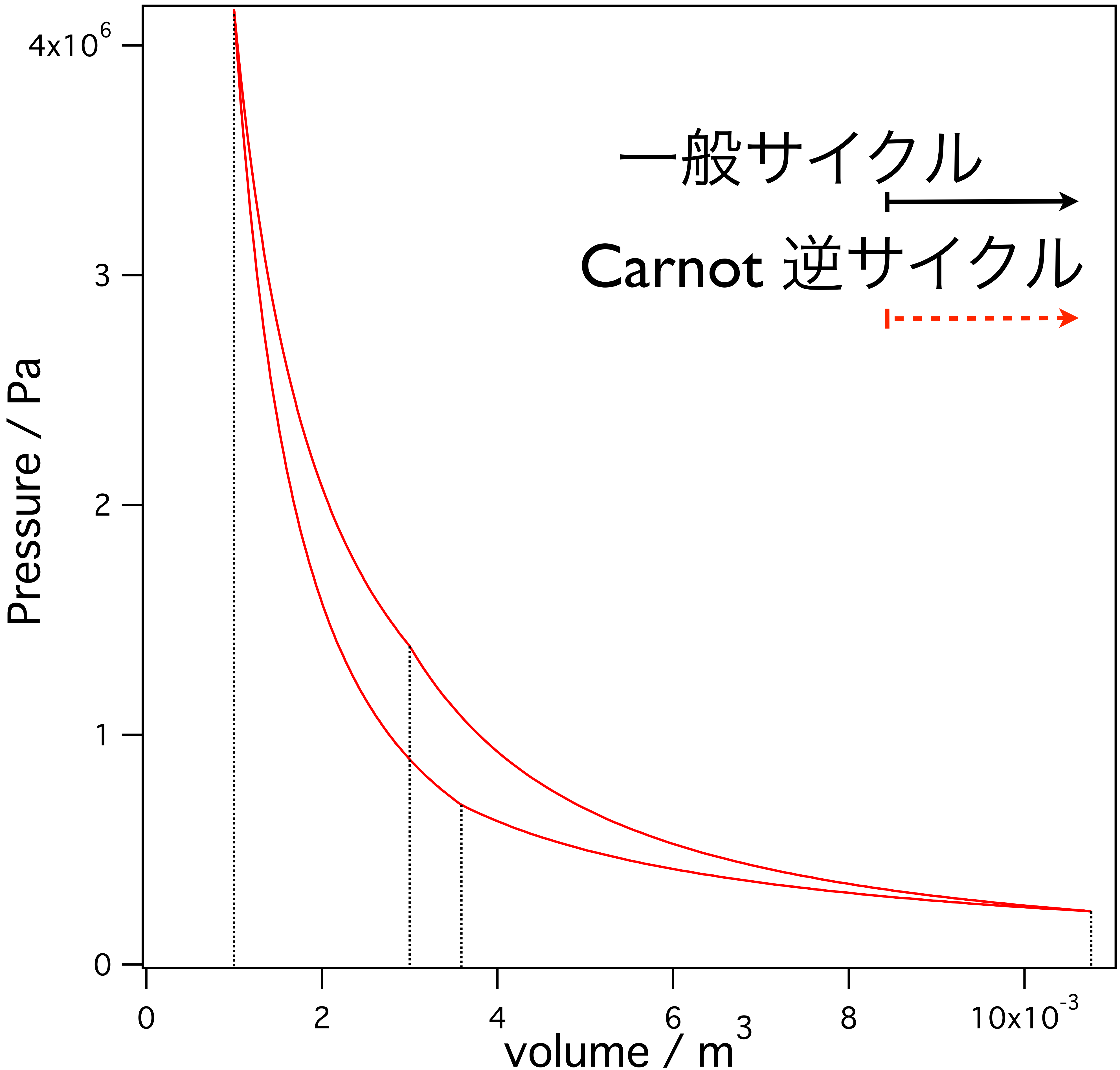


Carnot サイクル
Carnot 逆サイクル
Pressure / Pa
volume / m3
4x10^6
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10x10^-3

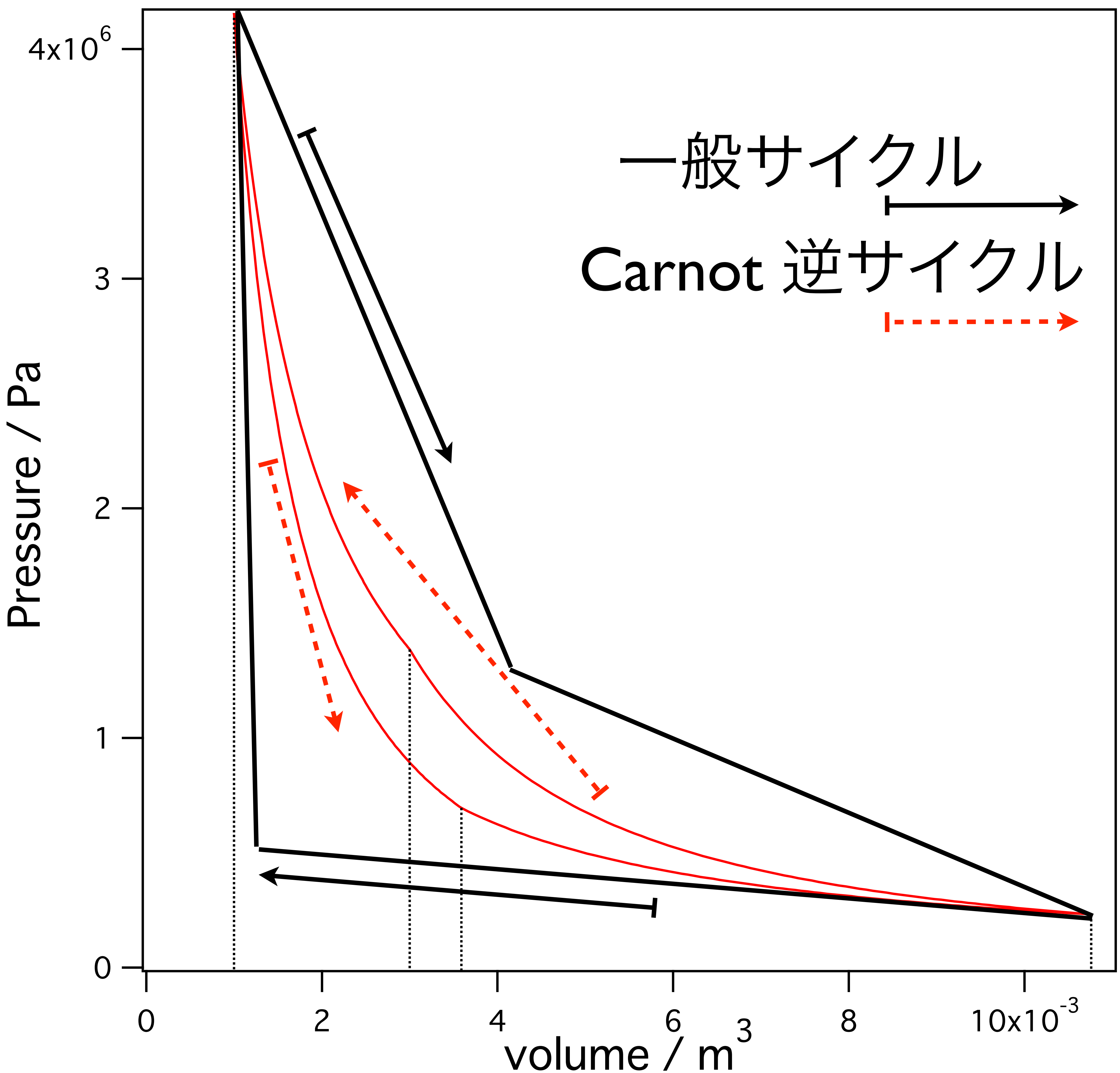


Carnot cycle
Carnot cycle
reverse
T_H
T_H
Q_H
Q_H
$-\Delta W$
$= \eta\, Q_H$
ΔW
Q_L
Q_L
T_L
T_L

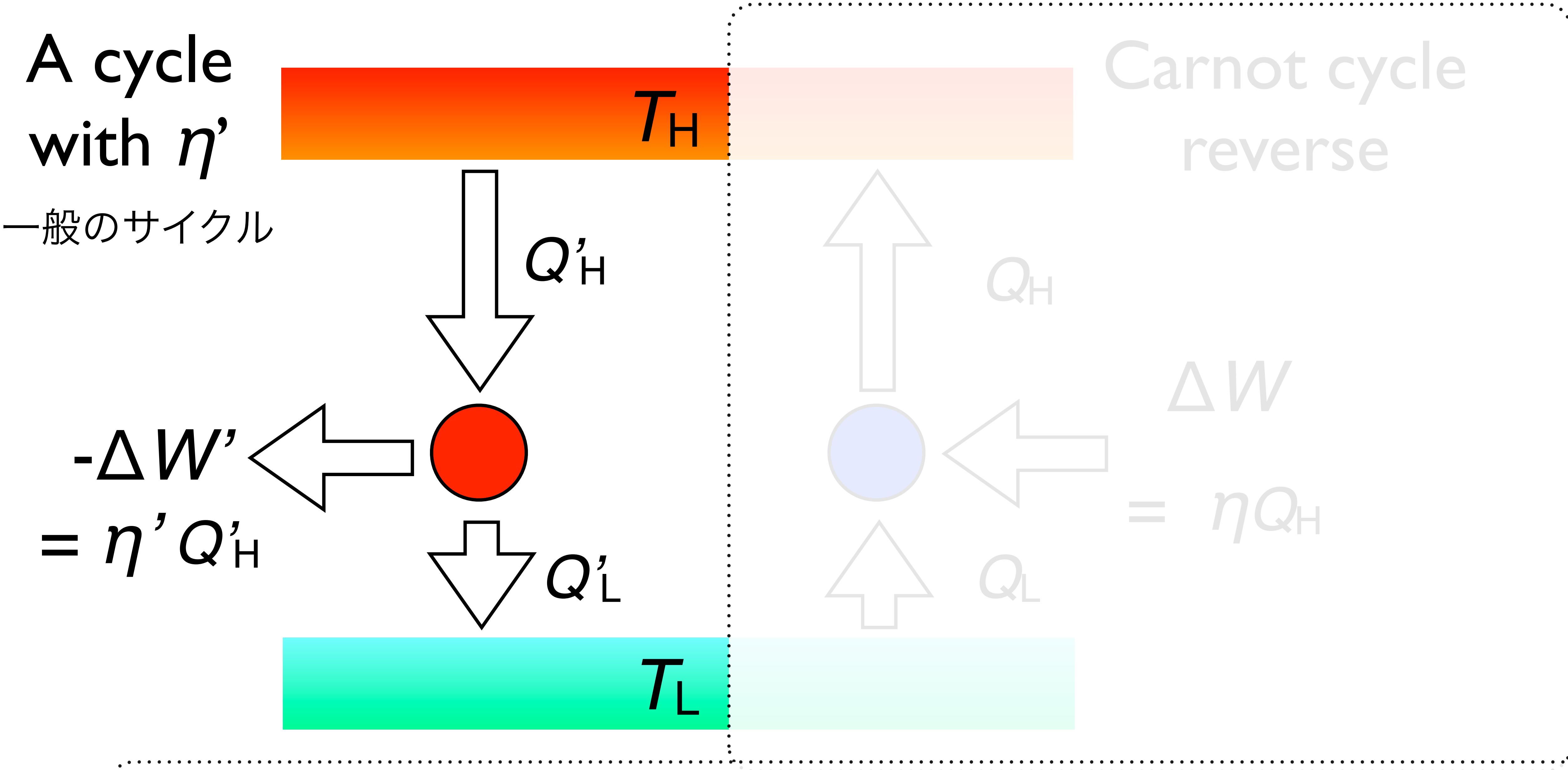

Carnot cycle
Carnot cycle reverse
T_H
T_H
Q_H
Q_H
$-\Delta W = \eta Q_H$
ΔW
Q_L
Q_L
T_L
T_L



一般サイクル
Carnot 逆サイクル
Pressure / Pa
4x10^6
3
2
1
0
volume / m^3
0
2
4
6
8
10x10^-3



一般サイクル
Carnot 逆サイクル
Pressure / Pa
volume / m3
4x10^6
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10x10^-3



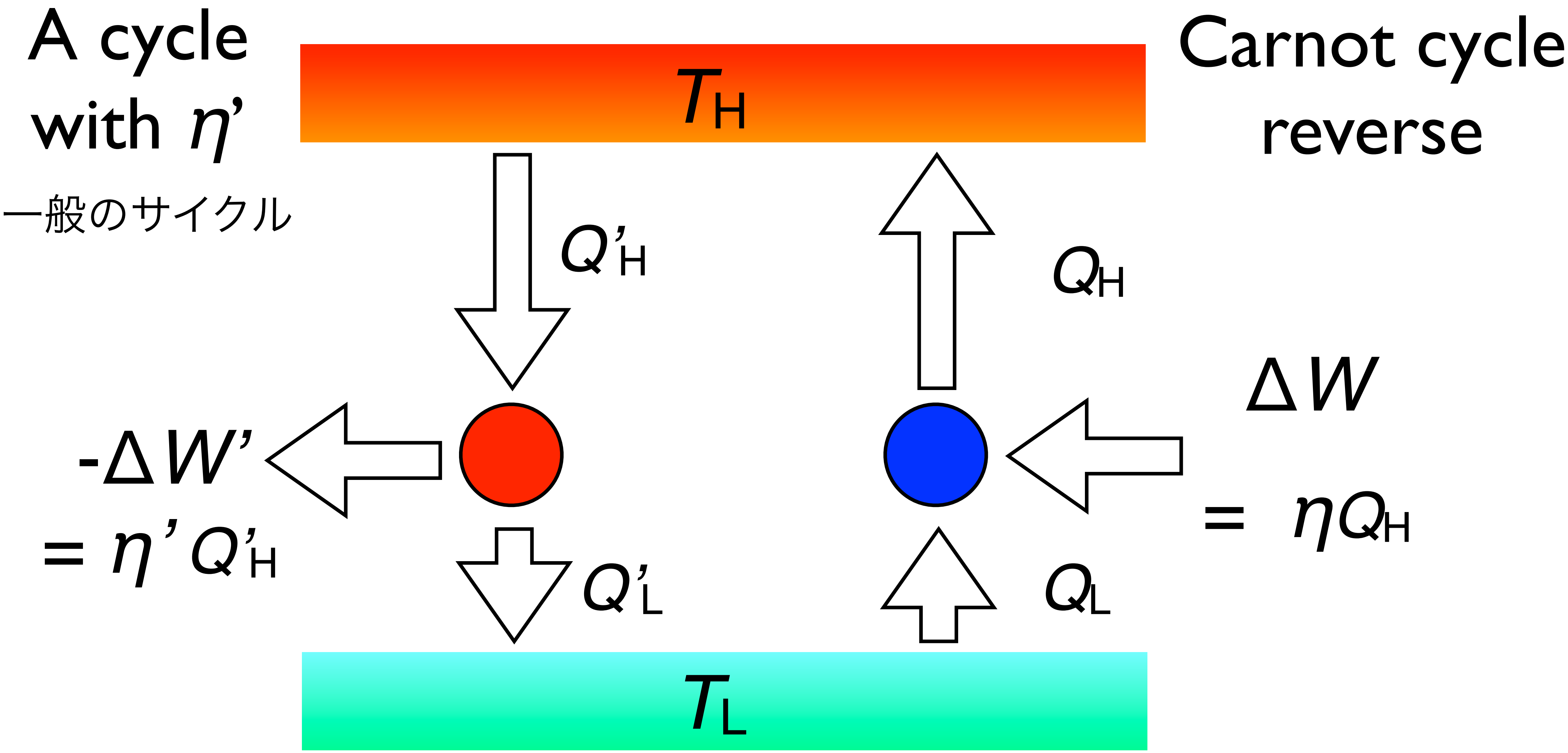
$Q'_H = \alpha Q_H$ とする：高温源からの熱の出入りの総和はゼロにする

系が外界にする仕事の総和は $\eta' Q'_H - \alpha\eta Q_H = (\eta' - \eta)\, Q'_H$

高温熱源から熱をもらわずに外に仕事するのは不可能なので，

外界にする仕事の総和 ≦ 0　(外から仕事をされる)　→　$\eta' - \eta \leqq 0$

$$\eta' \leqq \eta$$



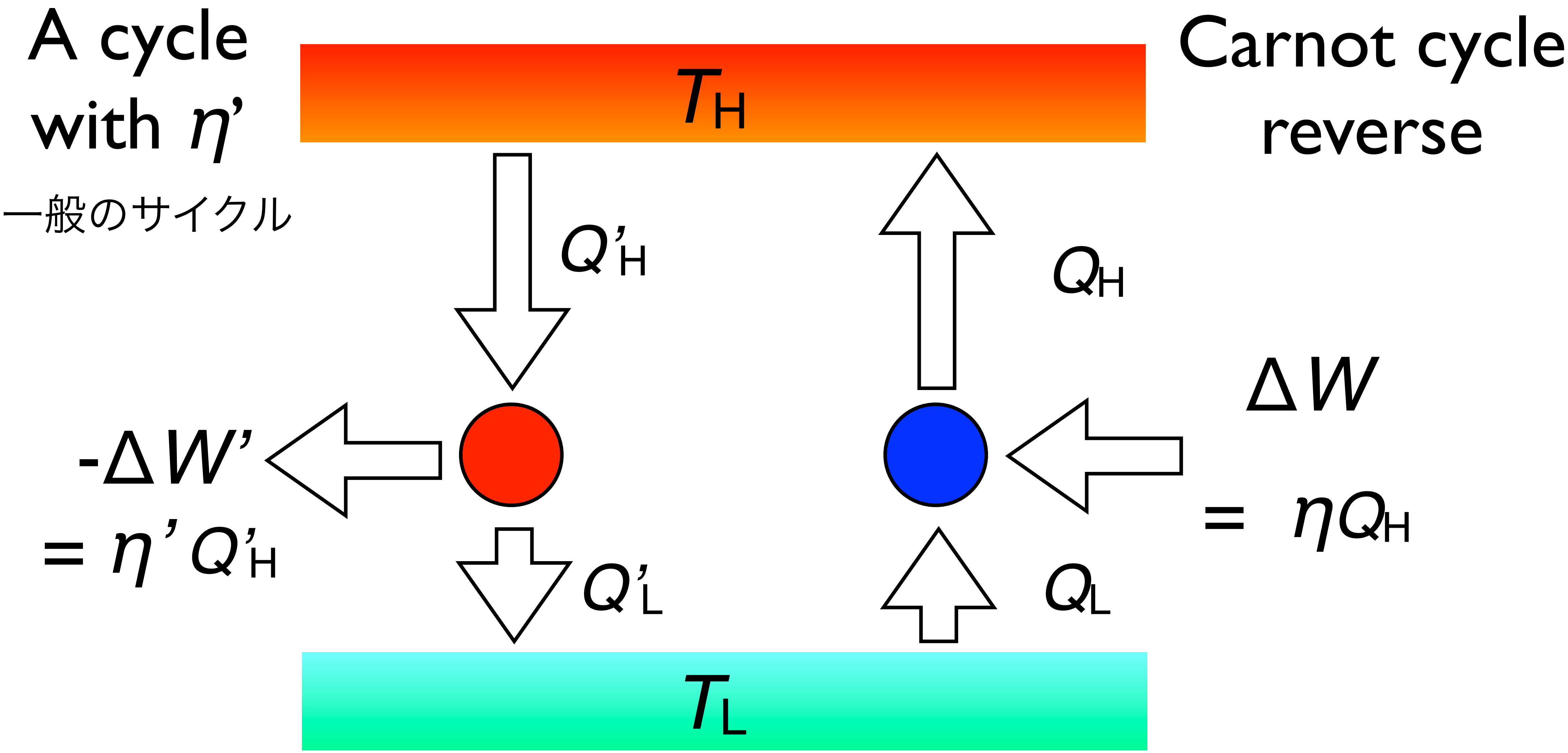
$Q'_H = \alpha Q_H$ とする：高温源からの熱の出入りの総和はゼロにする

系が外界にする仕事の総和は $\eta' Q'_H - \alpha\eta Q_H = (\eta' - \eta)\, Q'_H$

高温熱源から熱をもらわずに外に仕事するのは不可能なので，

外界にする仕事の総和≦0　(外から仕事をされる)　→　$\eta' - \eta \leqq 0$

$$\eta' \leqq \eta$$



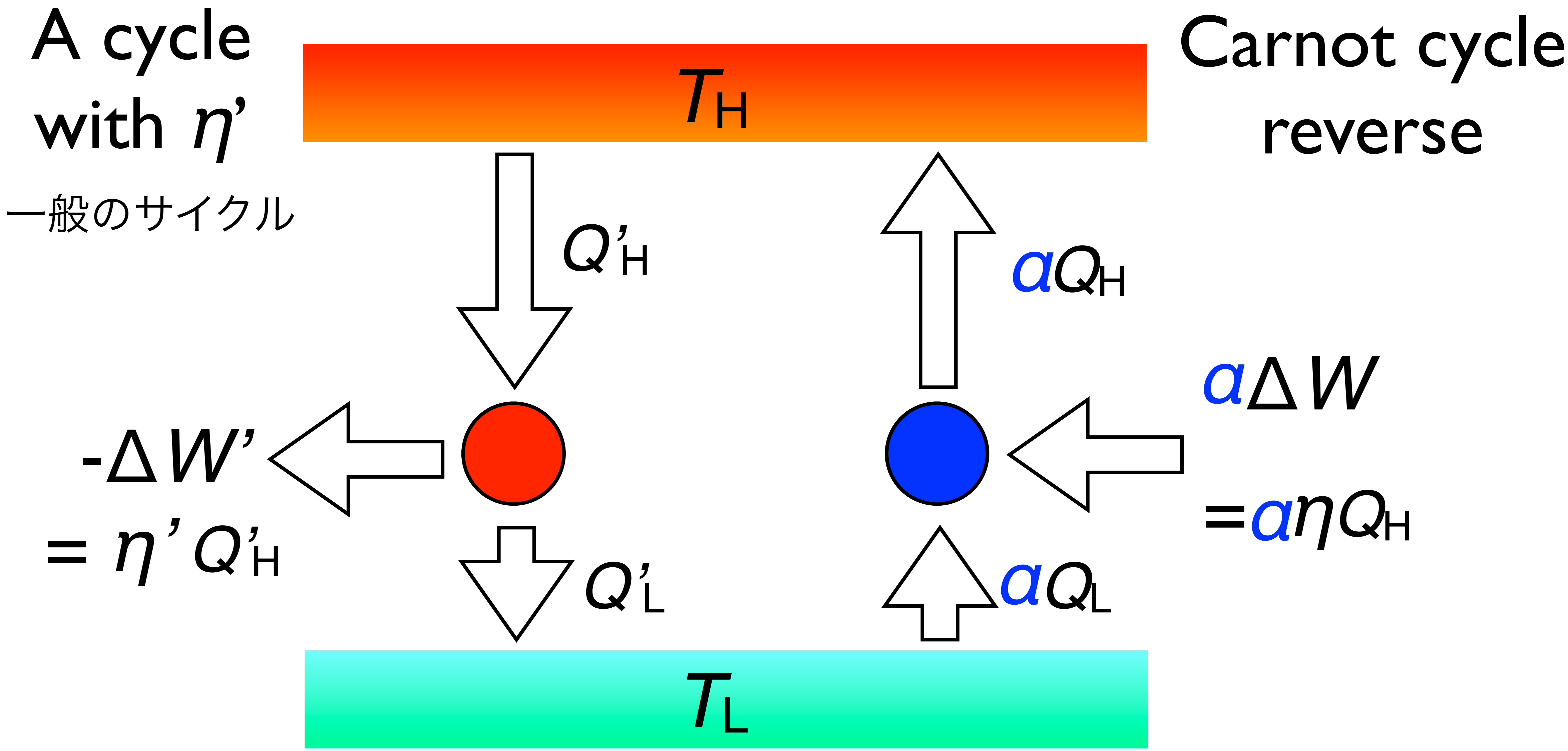
$Q'_H = \alpha Q_H$ とする：高温源からの熱の出入りの総和はゼロにする

系が外界にする仕事の総和は $\eta' Q'_H - \alpha\eta Q_H = (\eta'-\eta)\, Q'_H$

高温熱源から熱をもらわずに外に仕事するのは不可能なので,

外界にする仕事の総和 $\leqq 0$ (外から仕事をされる) → $\eta'-\eta \leqq 0$

$$\eta' \leqq \eta$$



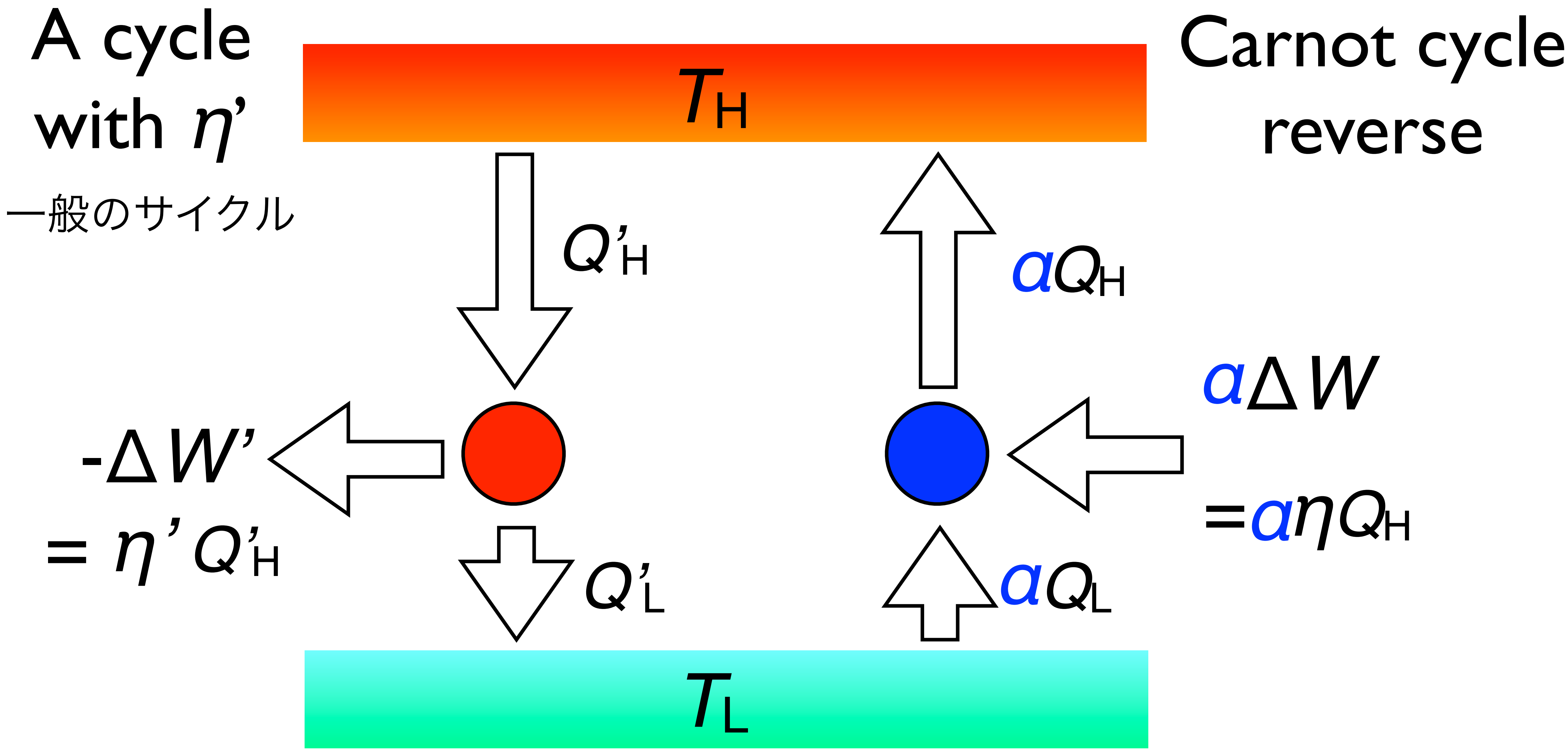
$Q'_H = \alpha Q_H$ とする：高温源からの熱の出入りの総和はゼロにする

系が外界にする仕事の総和は $\eta' Q'_H - \alpha\eta Q_H = (\eta' - \eta)\, Q'_H$

高温熱源から熱をもらわずに外に仕事するのは不可能なので，

外界にする仕事の総和≦0　(外から仕事をされる)　→　$\eta' - \eta \leqq 0$

$$\eta' \leqq \eta$$



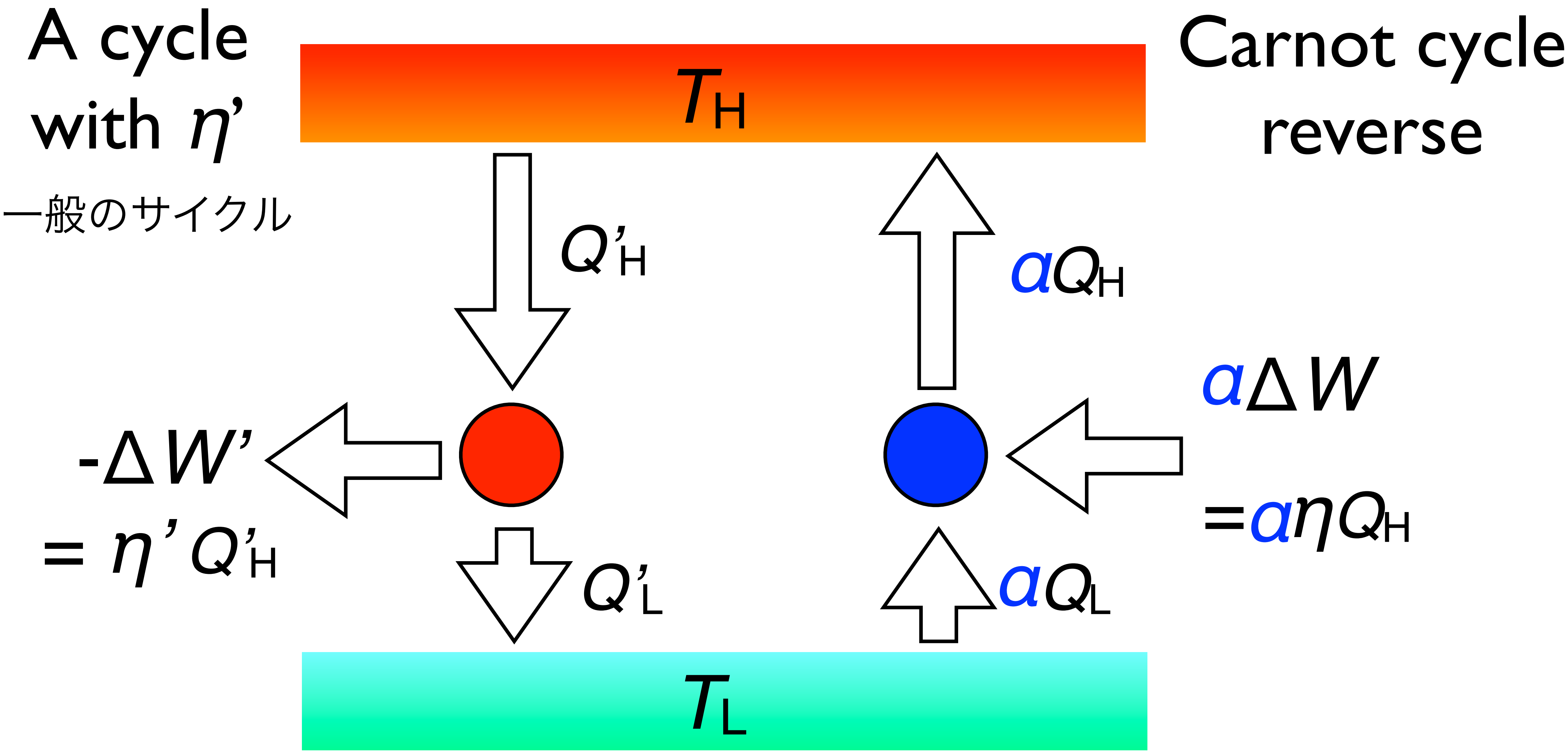
$Q'_H = \alpha Q_H$ とする：高温源からの熱の出入りの総和はゼロにする

系が外界にする仕事の総和は $\eta' Q'_H - \alpha\eta Q_H = (\eta' - \eta) Q'_H$

高温熱源から熱をもらわずに外に仕事するのは不可能なので，

外界にする仕事の総和≦0　(外から仕事をされる)　→　$\eta' - \eta \leqq 0$

$$\eta' \leqq \eta$$



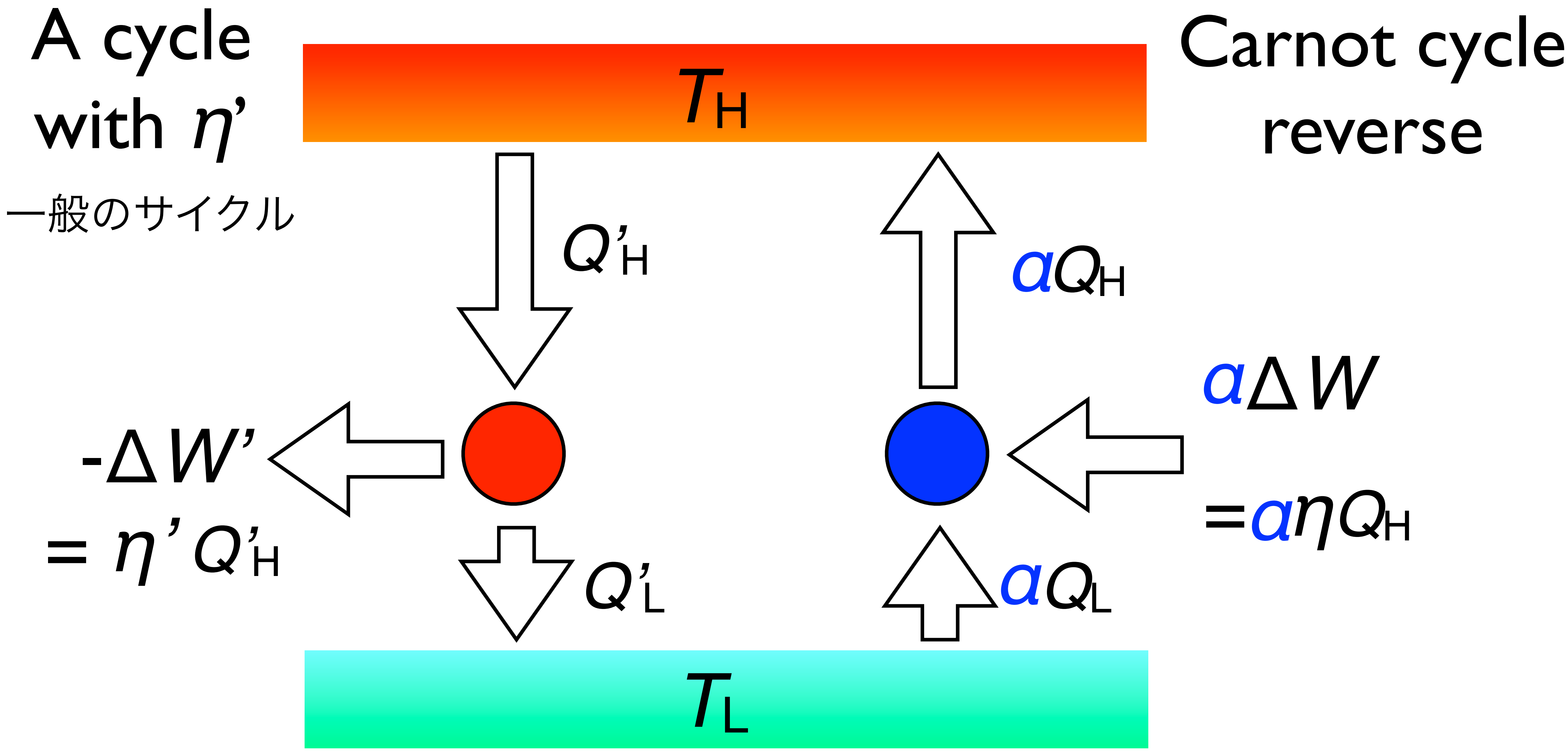
$Q'_H = \alpha Q_H$ とする：高温源からの熱の出入りの総和はゼロにする

系が外界にする仕事の総和は $\eta' Q'_H - \alpha\eta Q_H = (\eta' - \eta)\, Q'_H$

高温熱源から熱をもらわずに外に仕事するのは不可能なので,

外界にする仕事の総和 ≦ 0　(外から仕事をされる)　→　$\eta' - \eta \leqq 0$

$\eta' \leqq \eta$



$Q'_H = aQ_H$ とする：高温源からの熱の出入りの総和はゼロにする

系が外界にする仕事の総和は $\eta' Q'_H - a\eta Q_H = (\eta' - \eta)\, Q'_H$

高温熱源から熱をもらわずに外に仕事するのは不可能なので,

外界にする仕事の総和 ≦0　(外から仕事をされる)　→　$\eta' - \eta \leqq 0$

$$\eta' \leqq \eta$$

$$\eta' \leqq \eta$$

カルノーサイクルの

効率η(Carnot)は最大

である

$\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$ のサイクルを考える

$$\parallel$$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}}}{Q'_{\mathrm{H}}} \quad < \quad \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} \qquad Q'_{\mathrm{H}} > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} < 0$$

$$(Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} \quad < \quad Q'_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}})$$

$$Q'_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} \quad < \quad 0$$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$

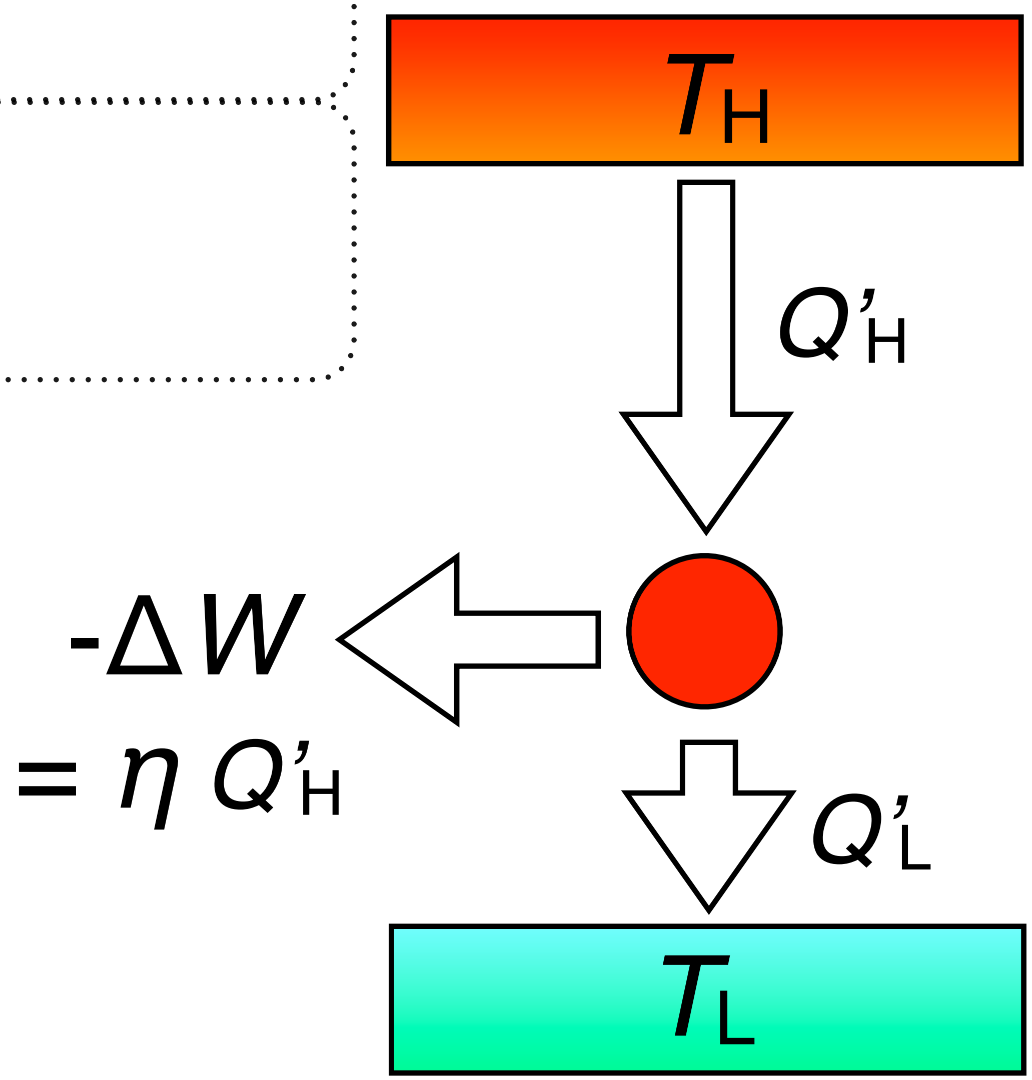
$\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$ のサイクルを考える

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}+Q'_{\mathrm{L}}}{Q'_{\mathrm{H}}} \quad < \quad \frac{T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} \qquad Q'_{\mathrm{H}}>0, \quad Q'_{\mathrm{L}}<0$$

$$(Q'_{\mathrm{H}}+Q'_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} \quad < \quad Q'_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}})$$

$$Q'_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}}+Q'_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} \quad < \quad 0$$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}}+\frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$



$\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$ のサイクルを考える

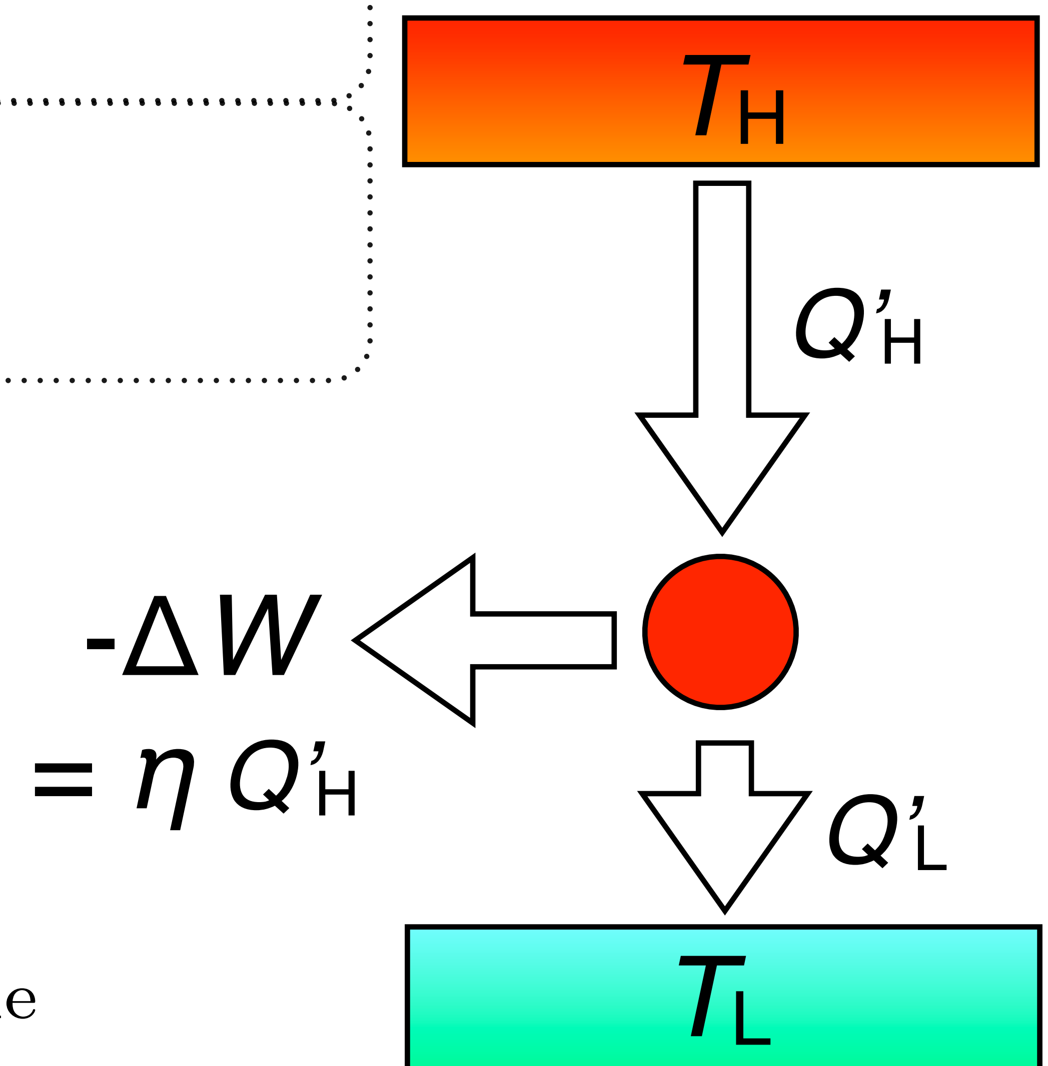
$$\parallel$$

$$\frac{Q'_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{L}}{Q'_\mathrm{H}} \quad < \quad \frac{T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L}}{T_\mathrm{H}} \qquad Q'_\mathrm{H} > 0, \quad Q'_\mathrm{L} < 0$$

$$(Q'_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{L})T_\mathrm{H} \quad < \quad Q'_\mathrm{H}(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L})$$

$$Q'_\mathrm{L}T_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{H}T_\mathrm{L} \quad < \quad 0$$

$$\frac{Q'_\mathrm{H}}{T_\mathrm{H}} + \frac{Q'_\mathrm{L}}{T_\mathrm{L}} \quad < \quad 0$$



$$\begin{aligned} \Delta U_\mathrm{cycle} &= 0 \\ &= \Delta Q_\mathrm{cycle} + \Delta W_\mathrm{cycle} \\ -\Delta W_\mathrm{cycle} &= \Delta Q_\mathrm{cycle} = Q'_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{L} \end{aligned}$$

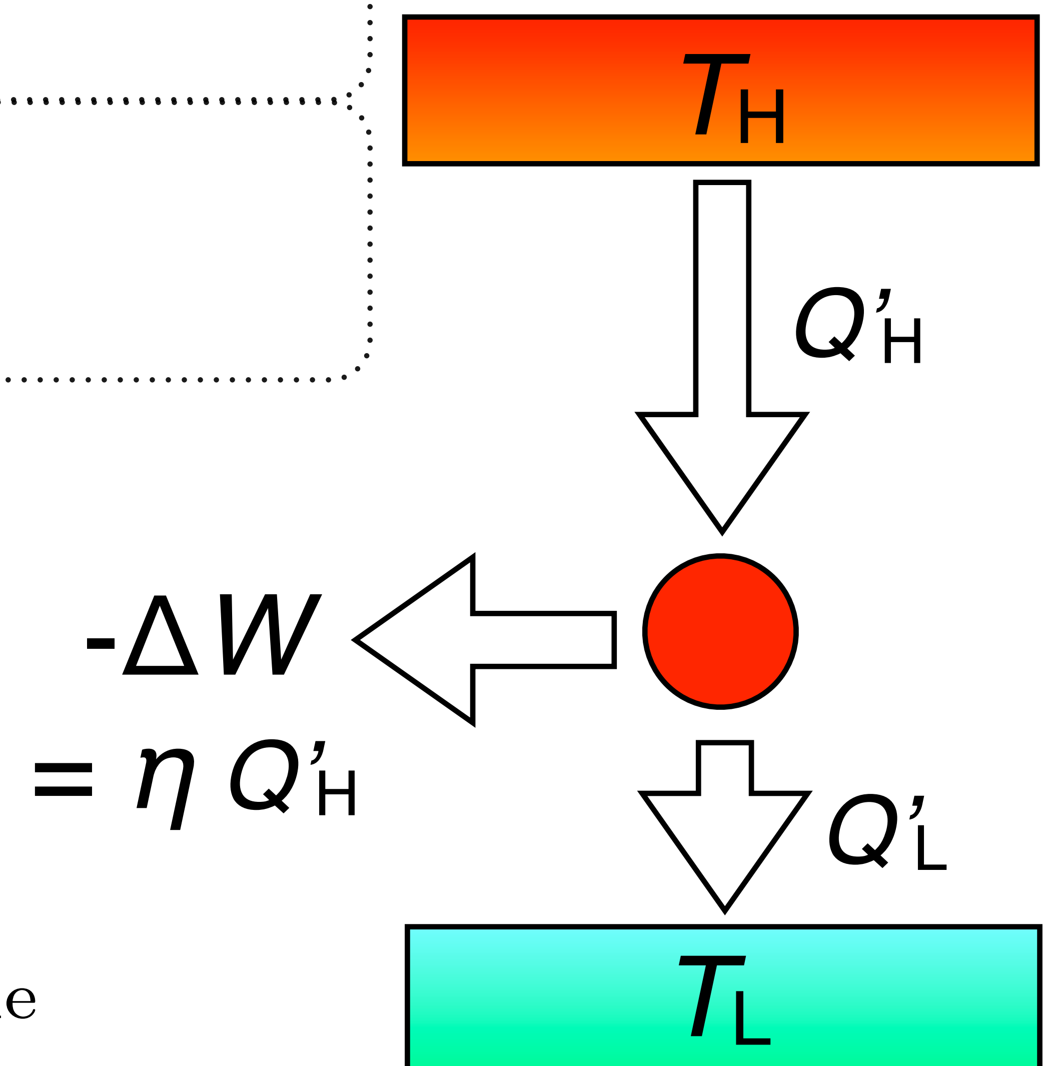
$$\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$$ のサイクルを考える

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}}}{Q'_{\mathrm{H}}} \quad < \quad \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} \qquad Q'_{\mathrm{H}} > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} < 0$$

$$(Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} \quad < \quad Q'_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}})$$

$$Q'_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} \quad < \quad 0$$

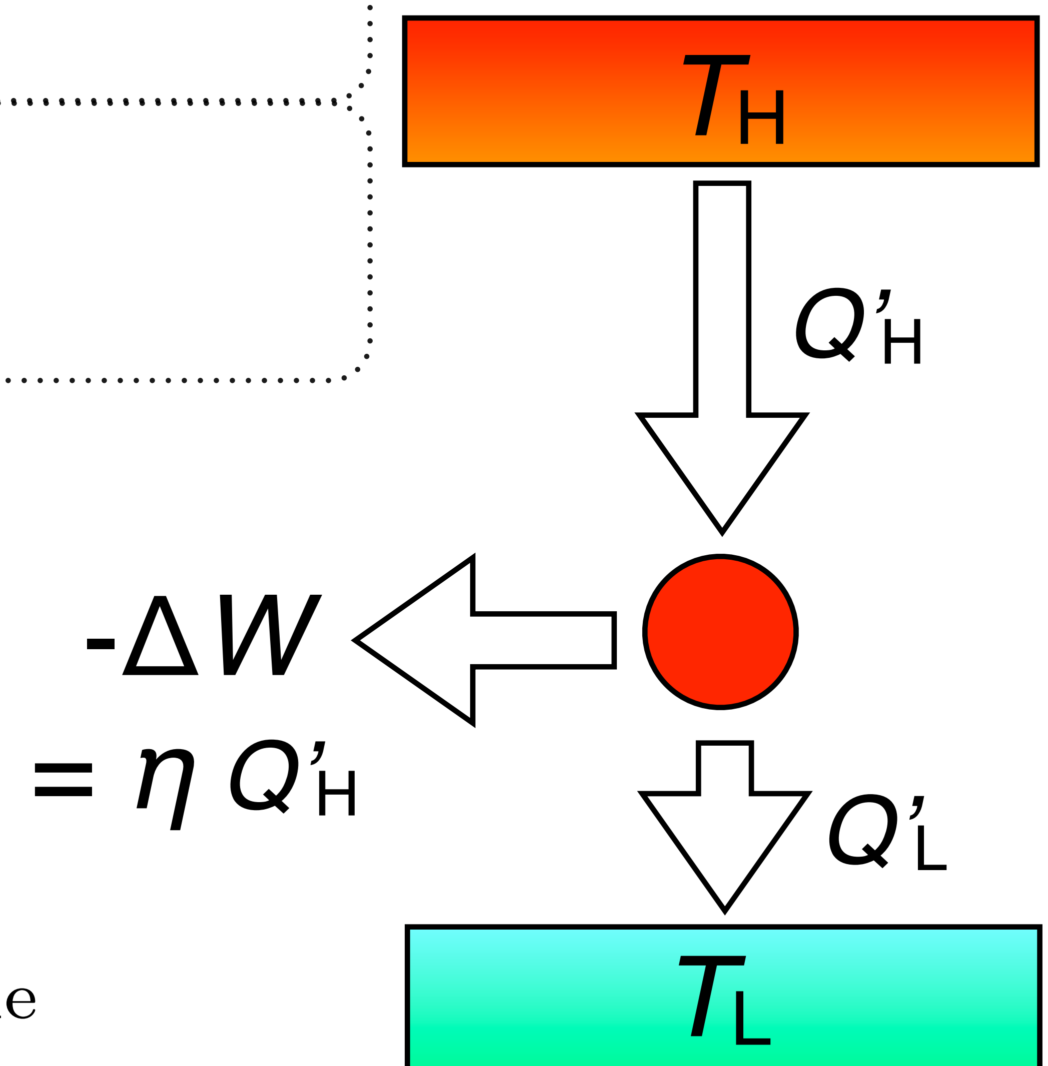
$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$



$$\Delta U_{\mathrm{cycle}} = 0$$
$$= \Delta Q_{\mathrm{cycle}} + \Delta W_{\mathrm{cycle}}$$
$$-\Delta W_{\mathrm{cycle}} = \Delta Q_{\mathrm{cycle}} = Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}}$$

$\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$ のサイクルを考える

$$
\begin{aligned}
\frac{Q'_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{L}}{Q'_\mathrm{H}} \quad &< \quad \frac{T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L}}{T_\mathrm{H}} \qquad Q'_\mathrm{H} > 0, \quad Q'_\mathrm{L} < 0 \\
(Q'_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{L})T_\mathrm{H} \quad &< \quad Q'_\mathrm{H}(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L}) \\
Q'_\mathrm{L}T_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{H}T_\mathrm{L} \quad &< \quad 0 \\
\frac{Q'_\mathrm{H}}{T_\mathrm{H}} + \frac{Q'_\mathrm{L}}{T_\mathrm{L}} \quad &< \quad 0
\end{aligned}
$$



$$
\begin{aligned}
\Delta U_\mathrm{cycle} &= 0 \\
&= \Delta Q_\mathrm{cycle} + \Delta W_\mathrm{cycle} \\
-\Delta W_\mathrm{cycle} &= \Delta Q_\mathrm{cycle} = Q'_\mathrm{H} + Q'_\mathrm{L}
\end{aligned}
$$

$\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$ のサイクルを考える

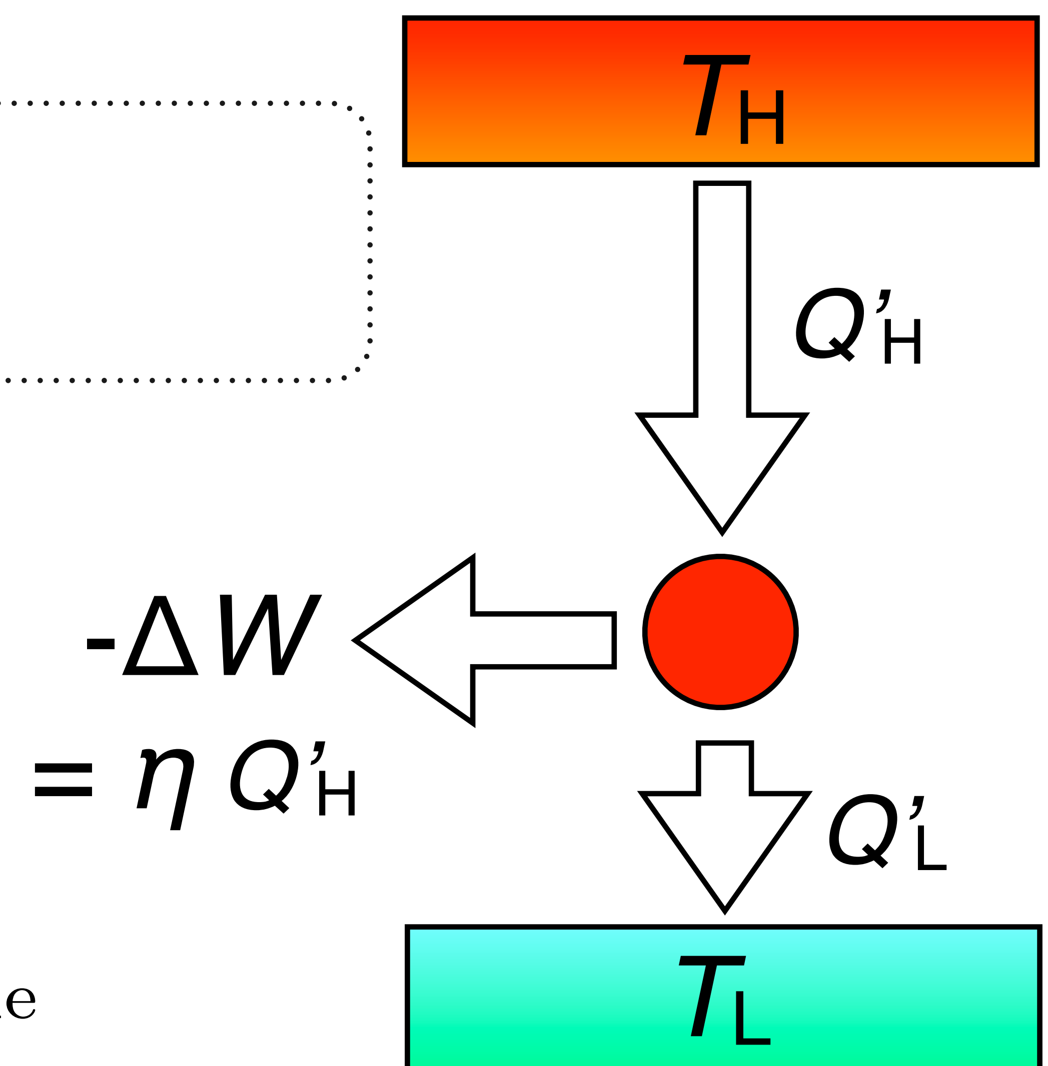
$$\frac{Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}}}{Q'_{\mathrm{H}}} \quad < \quad \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$$

$$Q'_{\mathrm{H}} > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} < 0$$

$$(Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} \quad < \quad Q'_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}})$$

$$Q'_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} \quad < \quad 0$$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$

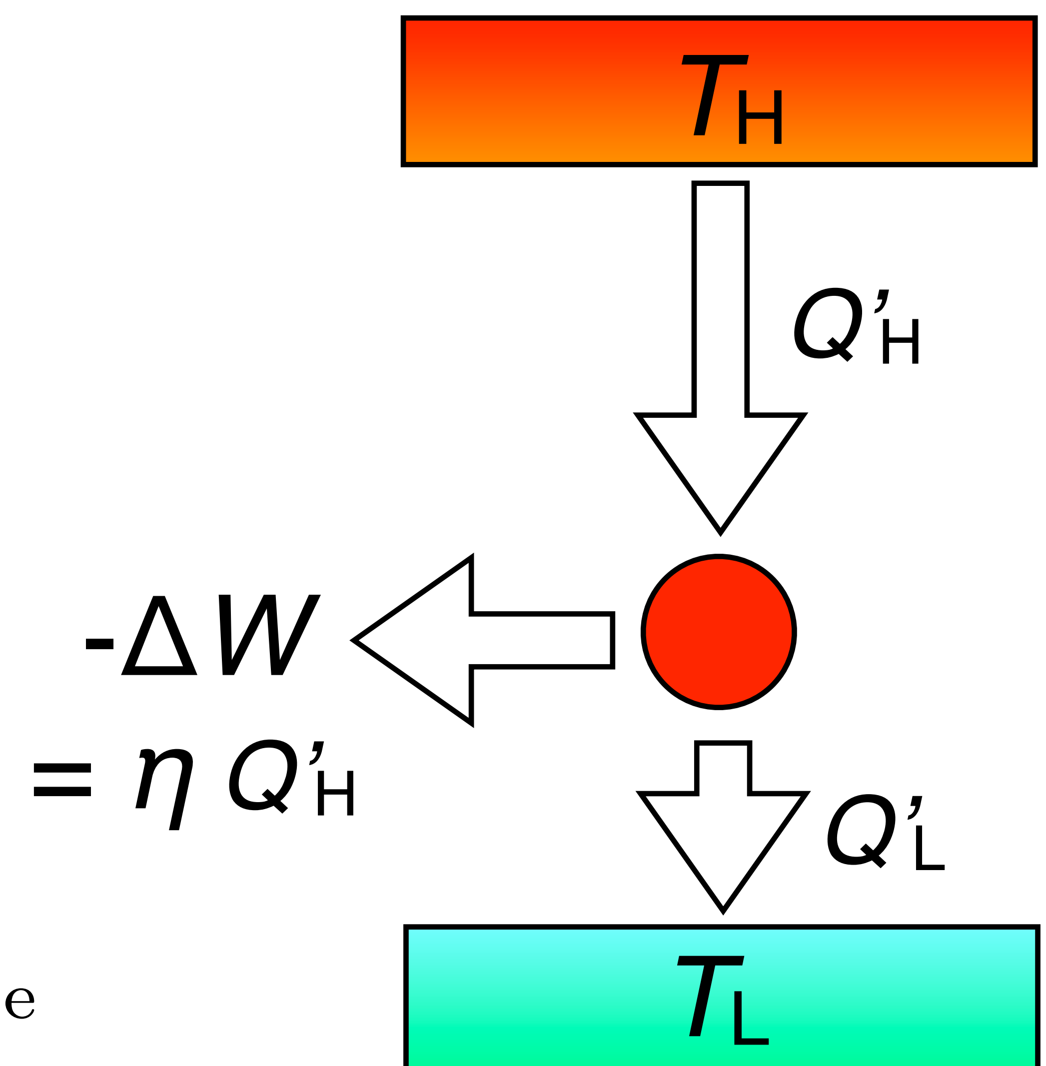


$$\Delta U_{\mathrm{cycle}} = 0$$
$$= \Delta Q_{\mathrm{cycle}} + \Delta W_{\mathrm{cycle}}$$
$$-\Delta W_{\mathrm{cycle}} = \Delta Q_{\mathrm{cycle}} = Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}}$$

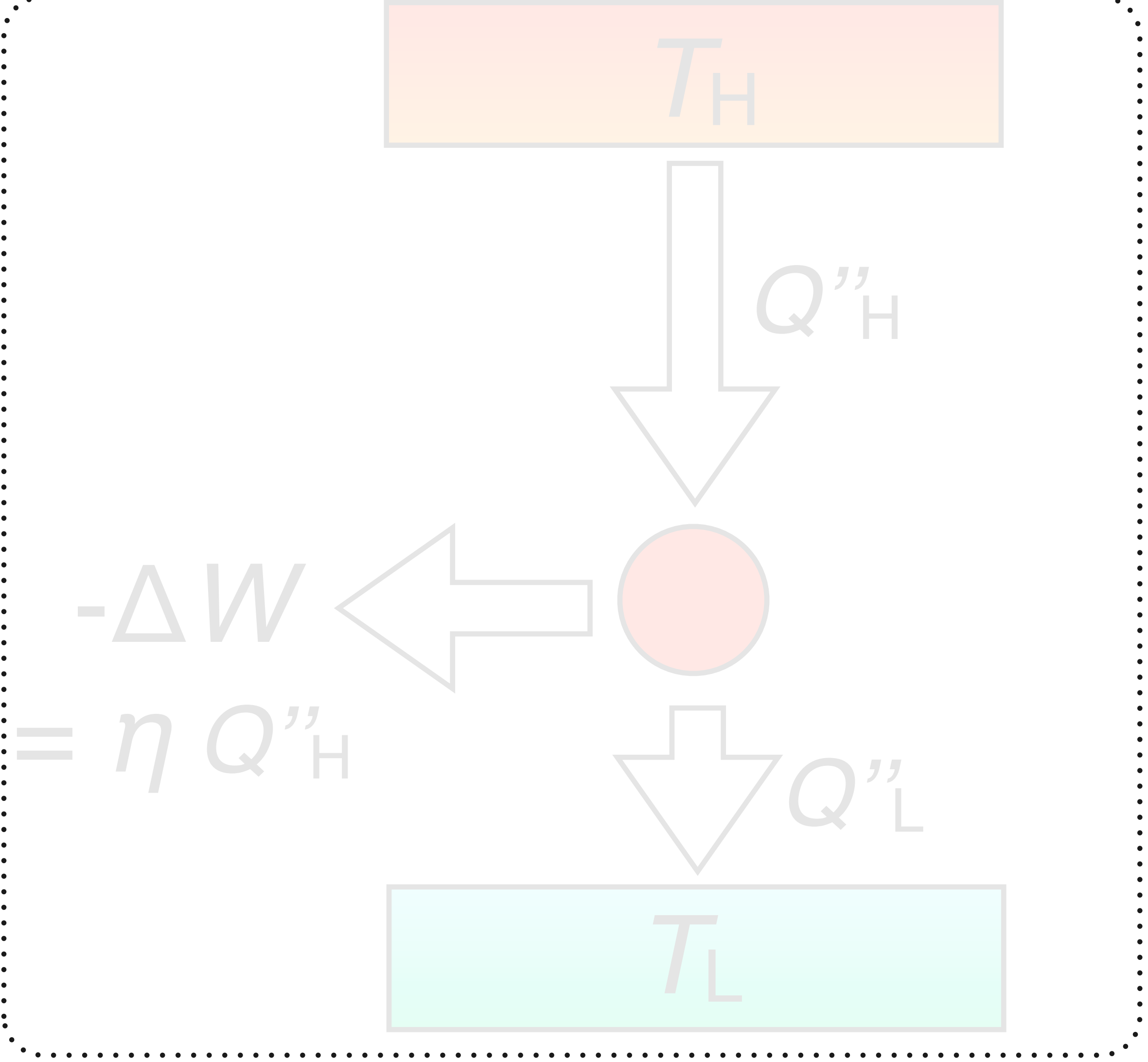
$\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$ のサイクルを考える

$$
\begin{aligned}
& \qquad\qquad\quad \parallel \\
\frac{Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}}}{Q'_{\mathrm{H}}} \quad &< \quad \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} \\
(Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} \quad &< \quad Q'_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}) \\
Q'_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} \quad &< \quad 0 \\
\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} \quad &< \quad 0
\end{aligned}
$$

$$Q'_{\mathrm{H}} > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} < 0$$



$$
\begin{aligned}
\Delta U_{\mathrm{cycle}} &= 0 \\
&= \Delta Q_{\mathrm{cycle}} + \Delta W_{\mathrm{cycle}} \\
-\Delta W_{\mathrm{cycle}} &= \Delta Q_{\mathrm{cycle}} = Q'_{\mathrm{H}} + Q'_{\mathrm{L}}
\end{aligned}
$$



ありえないことであるが

$$\eta > \eta(\mathrm{Carnot})$$

のサイクルを考える

$$\frac{Q"_{\mathrm{H}} + Q"_{\mathrm{L}}}{Q"_{\mathrm{H}}} > \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$$

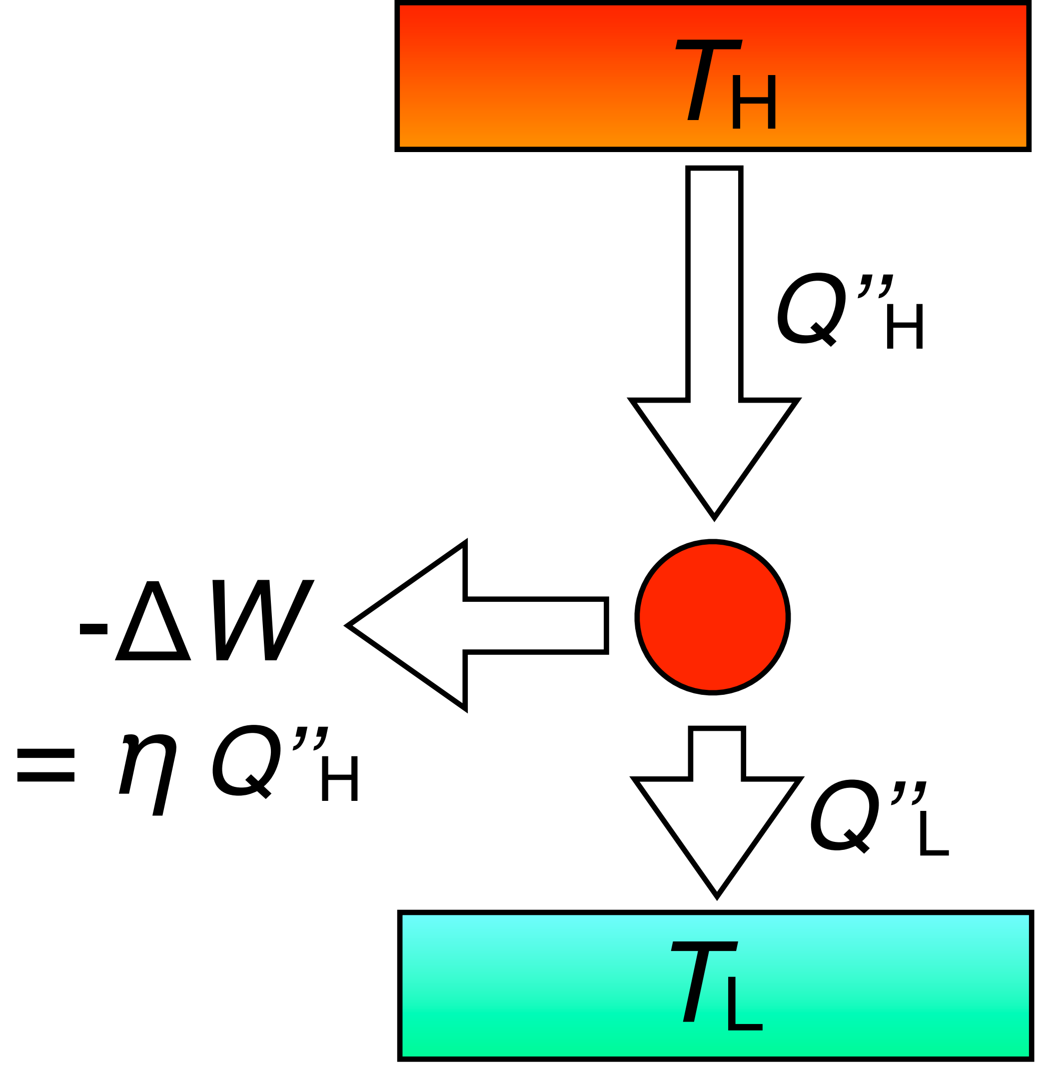
$$(Q"_{\mathrm{H}} + Q"_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} > Q"_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}})$$

$$Q"_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}} + Q"_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} > 0$$

$$\frac{Q"_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q"_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} > 0$$

この不等式はありえない

ということが明らかに



ありえないことであるが

$$\eta > \eta(\mathrm{Carnot})$$

のサイクルを考える

$$\frac{Q''_{\mathrm{H}} + Q''_{\mathrm{L}}}{Q''_{\mathrm{H}}} > \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$$

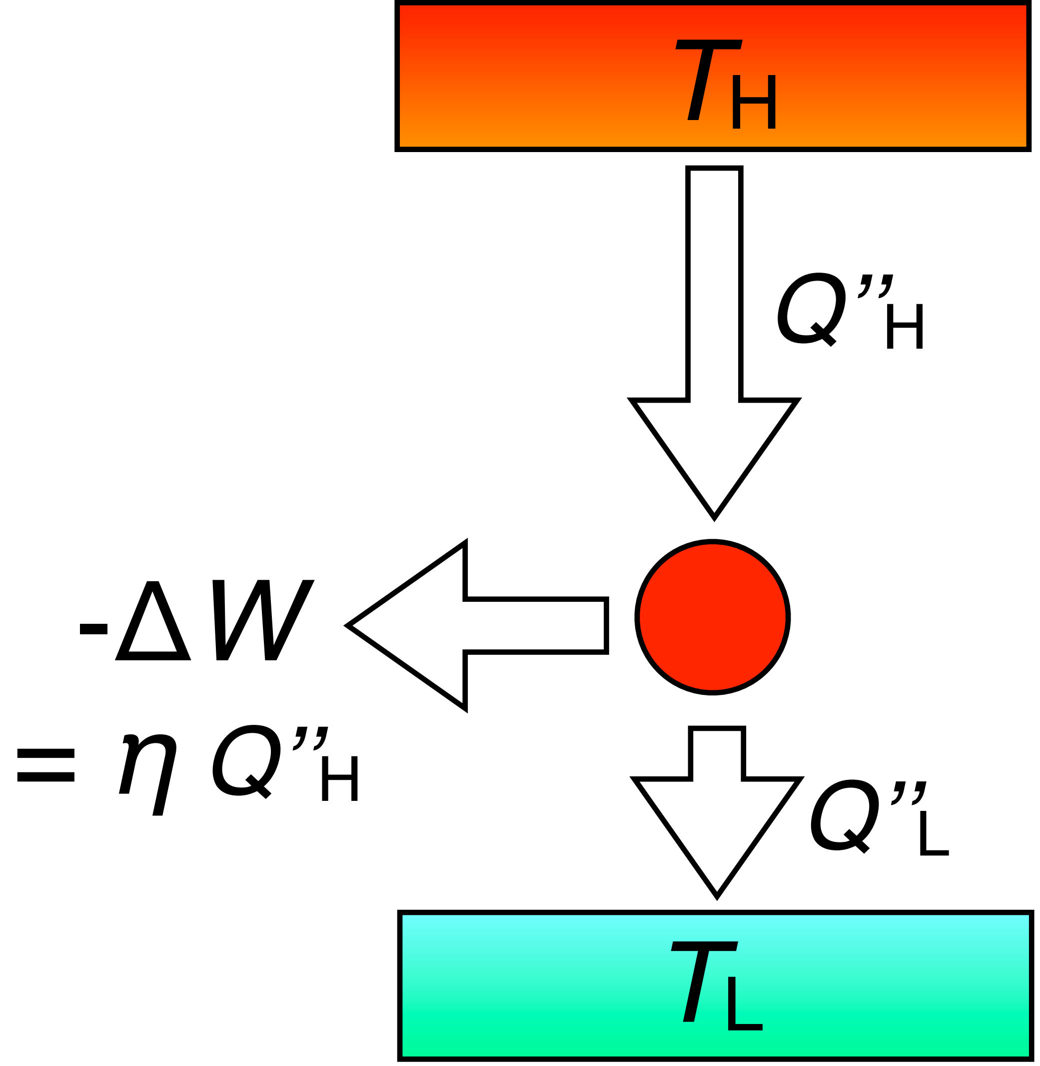
$$(Q''_{\mathrm{H}} + Q''_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} > Q''_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}})$$

$$Q''_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}} + Q''_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} > 0$$

$$\frac{Q''_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q''_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} > 0$$

この不等式はありえない

ということが明らかに



ありえないことであるが

$$\eta > \eta(\mathrm{Carnot})$$

のサイクルを考える

$$\frac{Q''_\mathrm{H} + Q''_\mathrm{L}}{Q''_\mathrm{H}} > \frac{T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L}}{T_\mathrm{H}}$$

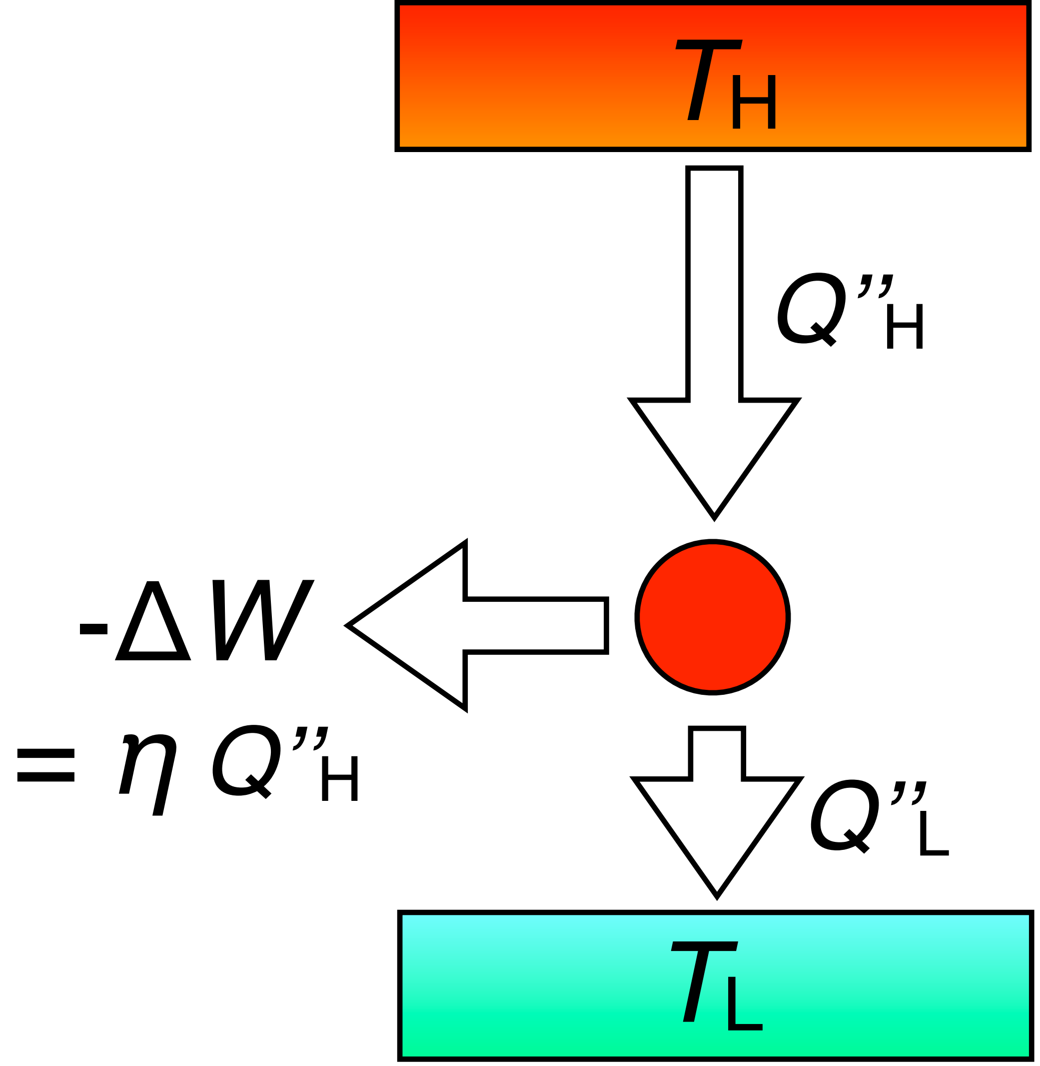
$$(Q''_\mathrm{H} + Q''_\mathrm{L})T_\mathrm{H} > Q''_\mathrm{H}(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L})$$

$$Q''_\mathrm{L}T_\mathrm{H} + Q''_\mathrm{H}T_\mathrm{L} > 0$$

$$\frac{Q''_\mathrm{H}}{T_\mathrm{H}} + \frac{Q''_\mathrm{L}}{T_\mathrm{L}} > 0$$

この不等式はありえない

ということが明らかに



ありえないことであるが

$$\eta > \eta(\mathrm{Carnot})$$

のサイクルを考える

$$\frac{Q"_\mathrm{H} + Q"_\mathrm{L}}{Q"_\mathrm{H}} > \frac{T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L}}{T_\mathrm{H}}$$

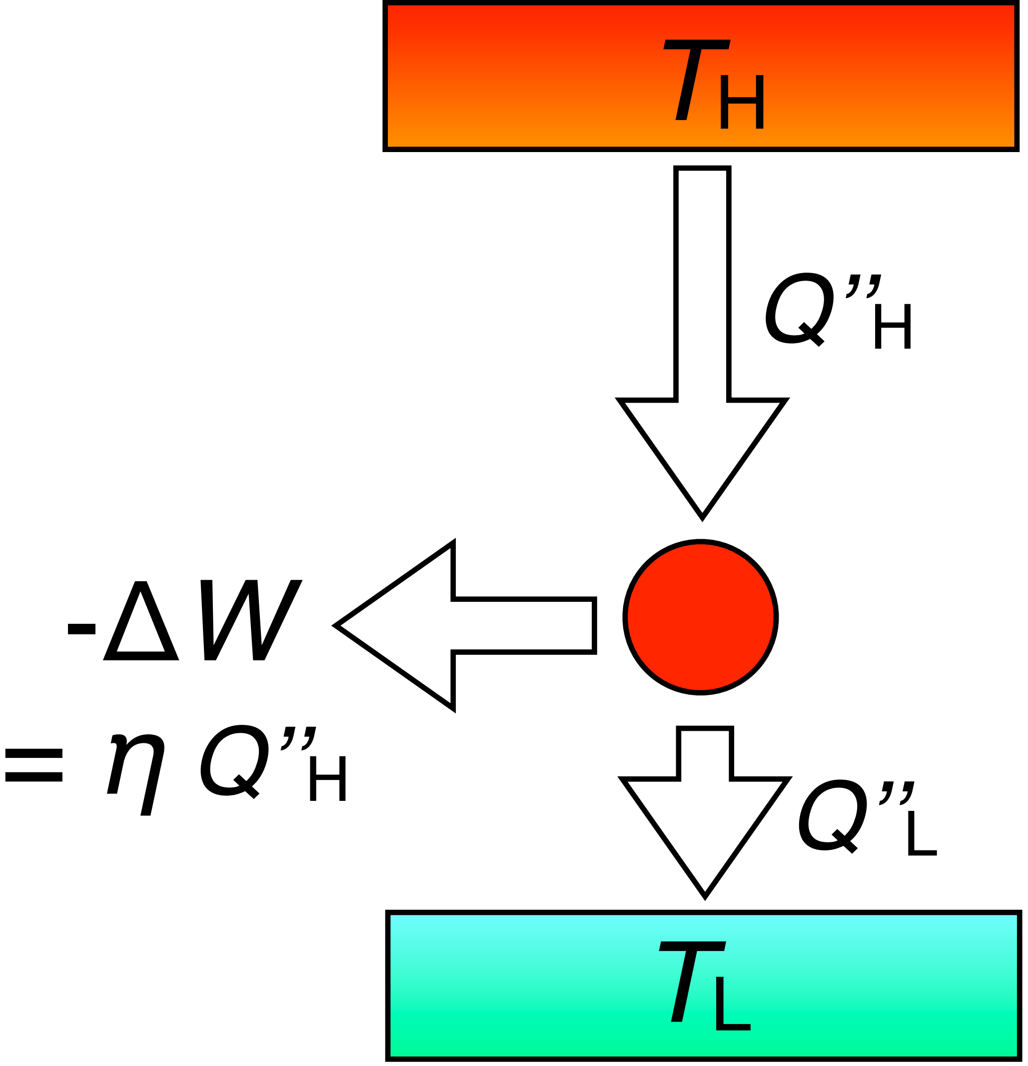
$$(Q"_\mathrm{H} + Q"_\mathrm{L})T_\mathrm{H} > Q"_\mathrm{H}(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L})$$

$$Q"_\mathrm{L}T_\mathrm{H} + Q"_\mathrm{H}T_\mathrm{L} > 0$$

$$\frac{Q"_\mathrm{H}}{T_\mathrm{H}} + \frac{Q"_\mathrm{L}}{T_\mathrm{L}} > 0$$

この不等式はありえない

ということが明らかに



ありえないことであるが

$$\eta > \eta(\mathrm{Carnot})$$

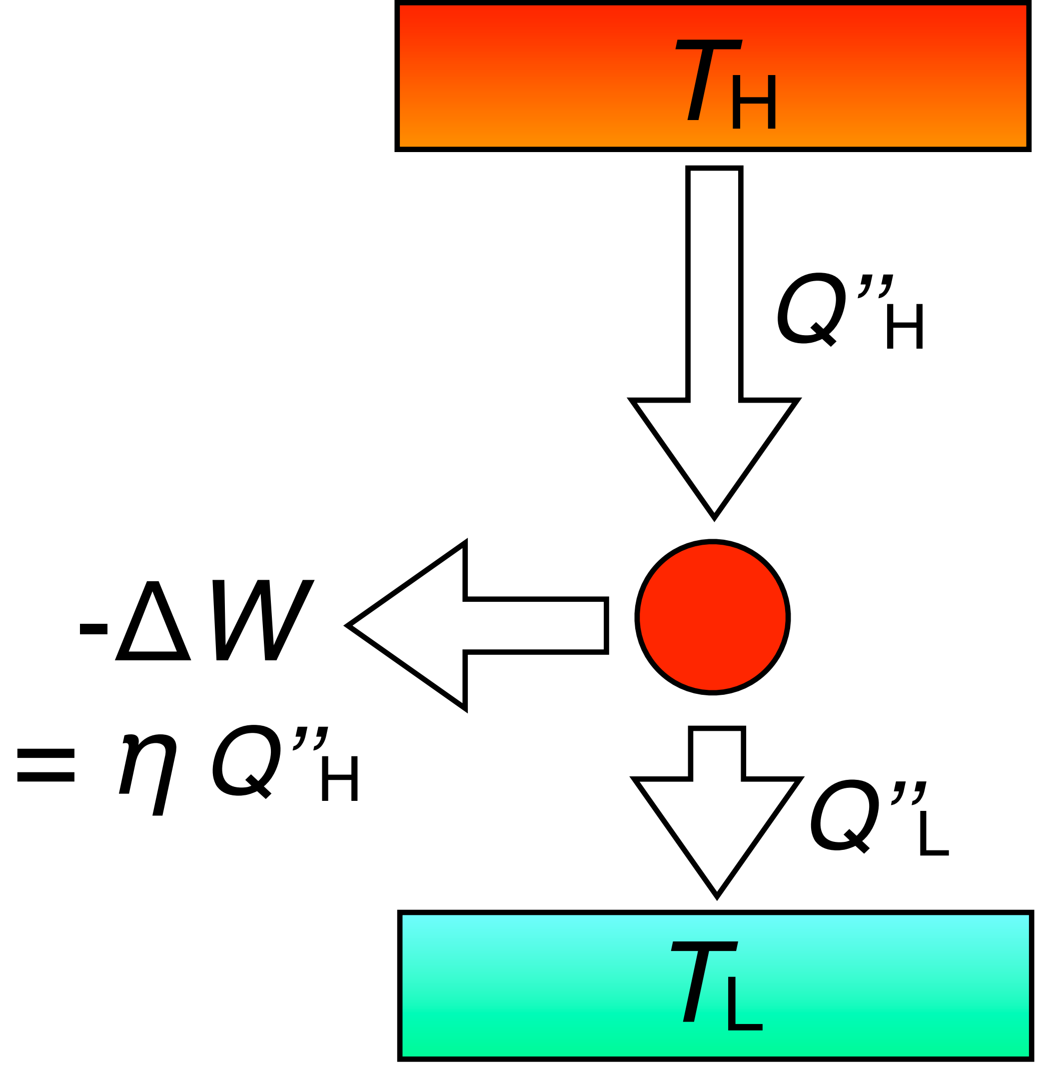
のサイクルを考える

$$\begin{aligned}
\frac{Q''_\mathrm{H} + Q''_\mathrm{L}}{Q''_\mathrm{H}} &> \frac{T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L}}{T_\mathrm{H}} \\
(Q''_\mathrm{H} + Q''_\mathrm{L})T_\mathrm{H} &> Q''_\mathrm{H}(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{L}) \\
Q''_\mathrm{L}T_\mathrm{H} + Q''_\mathrm{H}T_\mathrm{L} &> 0
\end{aligned}$$

$$\frac{Q''_\mathrm{H}}{T_\mathrm{H}} + \frac{Q''_\mathrm{L}}{T_\mathrm{L}} > 0$$

この不等式はありえない

ということが明らかに



ありえないことであるが

$$\eta > \eta(\mathrm{Carnot})$$

のサイクルを考える

$$\begin{aligned}
\frac{Q''_{\mathrm{H}} + Q''_{\mathrm{L}}}{Q''_{\mathrm{H}}} &> \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} \\
(Q''_{\mathrm{H}} + Q''_{\mathrm{L}})T_{\mathrm{H}} &> Q''_{\mathrm{H}}(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}) \\
Q''_{\mathrm{L}}T_{\mathrm{H}} + Q''_{\mathrm{H}}T_{\mathrm{L}} &> 0 \\
\frac{Q''_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q''_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} &> 0
\end{aligned}$$

この不等式はありえない

ということが明らかに

効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

をもつサイクル $Q'_{\mathrm{H}} = |Q'_{\mathrm{H}}| > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} = -|Q'_{\mathrm{L}}| < 0$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} = \frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} - \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$

の逆行サイクル（もし可能なら）を考える。

$$\begin{aligned} Q'_{\mathrm{H}} &= -|Q'_{\mathrm{H}}| < 0 \\ Q'_{\mathrm{L}} &= +|Q'_{\mathrm{L}}| > 0 \\ \frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} &= -\frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} > 0 \end{aligned}$$

となり，効率上ありえないことになる。

すなわち，効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

を持つサイクルは不可逆である。

効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

をもつサイクル $Q'_{\mathrm{H}} = |Q'_{\mathrm{H}}| > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} = -|Q'_{\mathrm{L}}| < 0$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} = \frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} - \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$

の逆行サイクル（もし可能なら）を考える。

$$\begin{aligned} Q'_{\mathrm{H}} &= -|Q'_{\mathrm{H}}| < 0 \\ Q'_{\mathrm{L}} &= +|Q'_{\mathrm{L}}| > 0 \\ \frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} &= -\frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} > 0 \end{aligned}$$

となり，効率上ありえないことになる。

すなわち，効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

を持つサイクルは不可逆である。

効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

をもつサイクル $Q'_{\mathrm{H}} = |Q'_{\mathrm{H}}| > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} = -|Q'_{\mathrm{L}}| < 0$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} = \frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} - \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$

の逆行サイクル（もし可能なら）を考える。

$$\begin{aligned} Q'_{\mathrm{H}} &= -|Q'_{\mathrm{H}}| < 0 \\ Q'_{\mathrm{L}} &= +|Q'_{\mathrm{L}}| > 0 \\ \frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} &= -\frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} > 0 \end{aligned}$$

となり，効率上ありえないことになる。

すなわち，効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

を持つサイクルは不可逆である。

効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

をもつサイクル $Q'_{\mathrm{H}} = |Q'_{\mathrm{H}}| > 0, \quad Q'_{\mathrm{L}} = -|Q'_{\mathrm{L}}| < 0$

$$\frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} = \frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} - \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} \quad < \quad 0$$

の逆行サイクル（もし可能なら）を考える。

$$\begin{aligned} Q'_{\mathrm{H}} &= -|Q'_{\mathrm{H}}| < 0 \\ Q'_{\mathrm{L}} &= +|Q'_{\mathrm{L}}| > 0 \\ \frac{Q'_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{Q'_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} &= -\frac{|Q'_{\mathrm{H}}|}{T_{\mathrm{H}}} + \frac{|Q'_{\mathrm{L}}|}{T_{\mathrm{L}}} > 0 \end{aligned}$$

となり，効率上ありえないことになる。

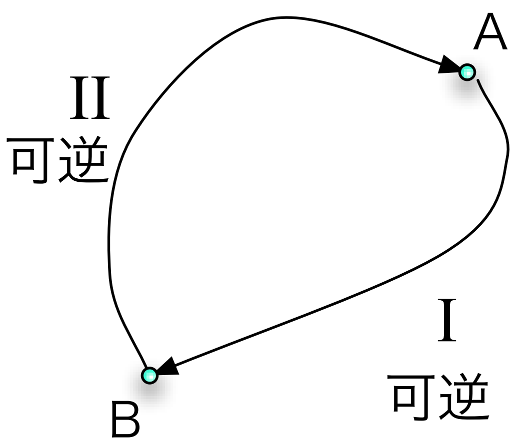
すなわち，効率 $\eta \quad < \quad \eta(\mathrm{Carnot})$

を持つサイクルは不可逆である。

行きはよいよい
帰りはこわい

準静的可逆サイクル $\displaystyle \oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$

微小なCarnot cycleの
重ね合わせ



$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = 0$$

(#)

逆行

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = 0$$

例えば，path IIを等温可逆膨張（圧縮）過程とすると，
path IIで順行と逆行で熱の出入りの符号は逆転するので

$$\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = -\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$$

(#)より $\displaystyle 0 = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) - \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$

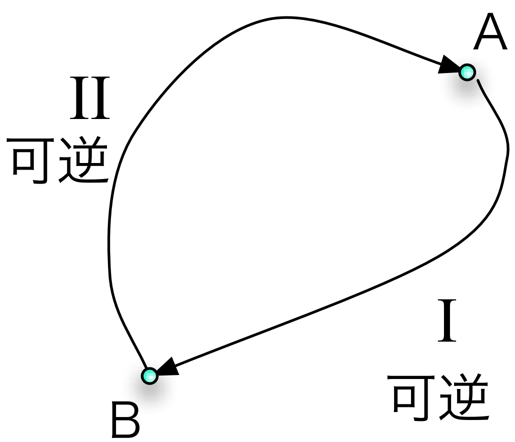
$$\boxed{\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})}$$

経路によらない
状態関数

準静的可逆サイクル

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

微小なCarnot cycleの重ね合わせ



$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = 0 \qquad (\#)$$

逆行

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = 0$$

例えば，path IIを等温可逆膨張（圧縮）過程とすると，

path IIで順行と逆行で熱の出入りの符号は逆転するので

$$\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = -\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$$

(#)より $0 = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) - \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$

$$\boxed{\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})}$$

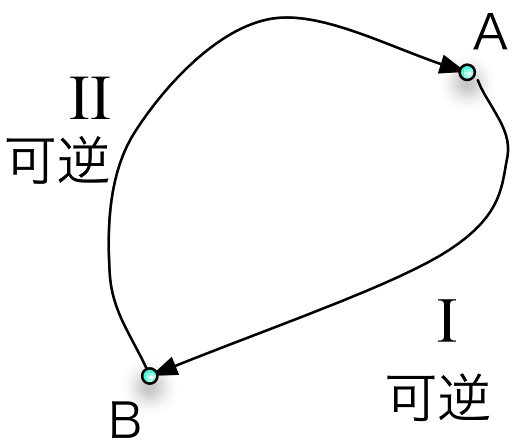
経路によらない

状態関数

準静的可逆サイクル

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

微小なCarnot cycleの
重ね合わせ



$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = 0 \qquad (\#)$$

逆行

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = 0$$

例えば，path IIを等温可逆膨張（圧縮）過程とすると，
path IIで順行と逆行で熱の出入りの符号は逆転するので

$$\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = -\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$$

(#)より $0 = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) - \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$

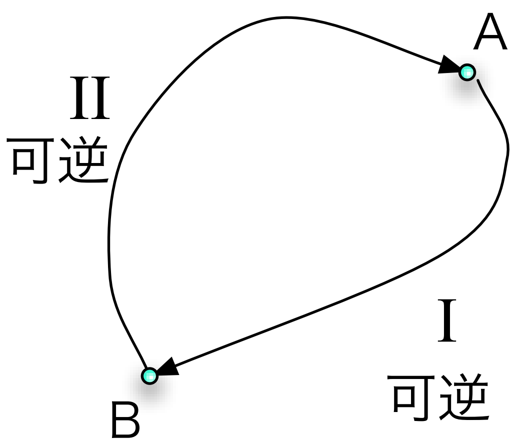
$$\boxed{\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})}$$

経路によらない
状態関数

準静的可逆サイクル

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

微小なCarnot cycleの
重ね合わせ



$$\oint \frac{dQ}{T} \;=\; \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = 0$$

(#)

逆行

$$\oint \frac{dQ}{T} \;=\; \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = 0$$

例えば，path IIを等温可逆膨張（圧縮）過程とすると，

path IIで順行と逆行で熱の出入りの符号は逆転するので

$$\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = -\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$$

(#)より $0 = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) - \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$

$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$$

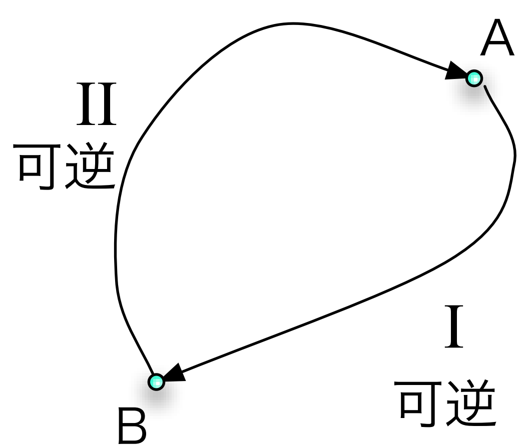
経路によらない

状態関数

準静的可逆サイクル

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

微小なCarnot cycleの
重ね合わせ



$$\oint \frac{dQ}{T} \quad = \quad \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} (\text{path I}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T} (\text{path II}) = 0$$

(#)

逆行

$$\oint \frac{dQ}{T} \quad = \quad \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} (\text{path II}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T} (\text{path I}) = 0$$

例えば，path IIを等温可逆膨張（圧縮）過程とすると，

path IIで順行と逆行で熱の出入りの符号は逆転するので

$$\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T} (\text{path II}) = -\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} (\text{path II})$$

(#)より $\quad 0 = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} (\text{path I}) - \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} (\text{path II})$

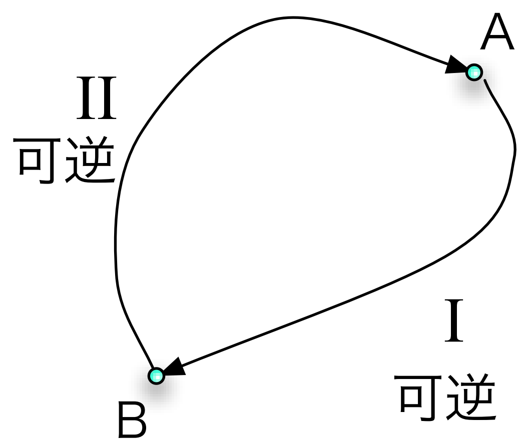
$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} (\text{path I}) = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} (\text{path II})$$

経路によらない

状態関数

準静的可逆サイクル $\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$

微小なCarnot cycleの
重ね合わせ



$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = 0 \qquad (\#)$$

逆行

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = 0$$

例えば，path IIを等温可逆膨張（圧縮）過程とすると，

path IIで順行と逆行で熱の出入りの符号は逆転するので

$$\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}(\text{path II}) = -\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$$

(#)より $0 = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) - \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})$

$$\boxed{\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path I}) = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}(\text{path II})}$$

経路によらない
状態関数

不可逆過程があると

η<η(Carnot)

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad \le \quad 0$$

path IIが可逆過程で，path Iが不可逆過程であるとする。

path IIでは, $S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) \quad = \quad \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$

↑が計算可能

サイクルでは,

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} + \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$$

$$= \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} - \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} \le 0$$

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} \le \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} = S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

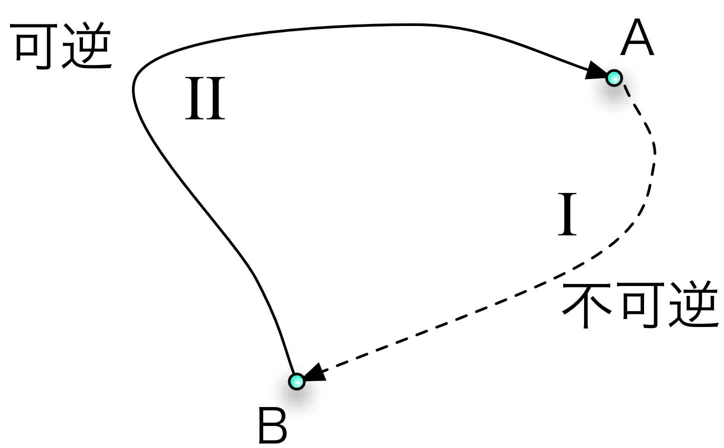
$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} \quad \le \quad S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

$$\frac{dQ}{T} \quad \le \quad dS$$

不可逆過程があると
η＜η(Carnot)

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad \leq \quad 0$$

path IIが可逆過程で，path Iが不可逆過程であるとする。



path IIでは, $S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) \quad = \quad \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$

↑が計算可能

サイクルでは,

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} + \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$$

$$= \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} - \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} \leq 0$$

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} \leq \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} = S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

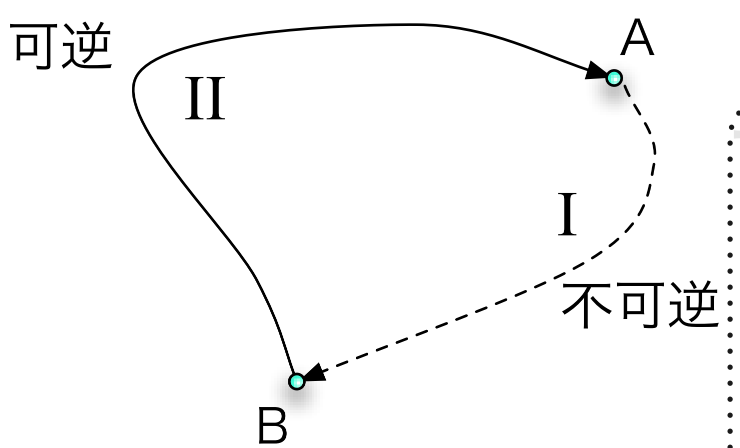
$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} \leq S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

$$\frac{dQ}{T} \leq dS$$

不可逆過程があると
η<η(Carnot)

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad \leq \quad 0$$

path IIが可逆過程で， path Iが不可逆過程であるとする。



path IIでは, $S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) \quad = \quad \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$

↑が計算可能

サイクルでは,

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} + \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$$

$$= \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} - \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} \leq 0$$

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} \leq \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} = S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

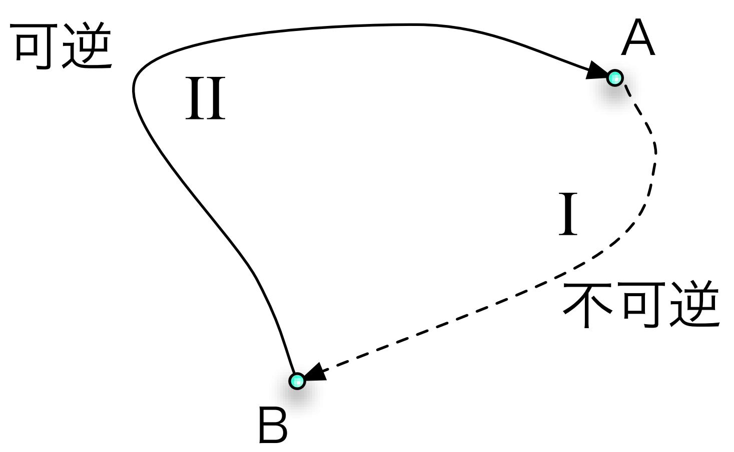
$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} \leq S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

$$\frac{dQ}{T} \leq dS$$

不可逆過程があると
η＜η(Carnot)

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad \leq \quad 0$$

path IIが可逆過程で，path Iが不可逆過程であるとする。



path IIでは, $S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) \quad = \quad \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}}$

↑が計算可能

サイクルでは,

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{irreversible}} + \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}}$$

$$= \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{irreversible}} - \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}} \leq 0$$

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{irreversible}} \leq \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}} = S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

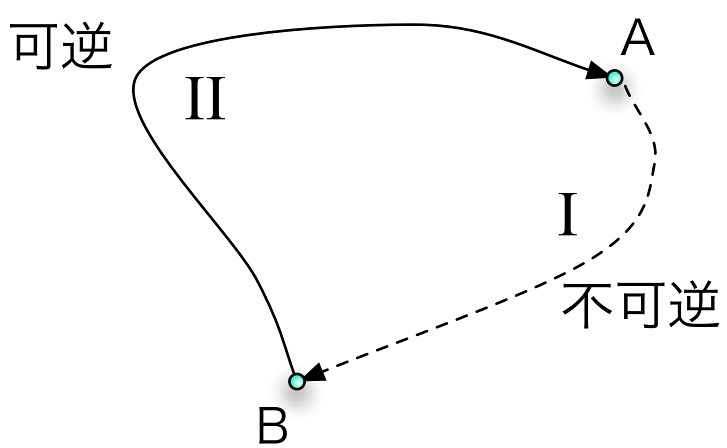
$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} \leq S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

$$\frac{dQ}{T} \leq dS$$

不可逆過程があると
η<η(Carnot)

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad \leq \quad 0$$

path IIが可逆過程で,　path Iが不可逆過程であるとする。



path IIでは, $S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) \quad = \quad \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}}$

↑が計算可能

サイクルでは,

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{irreversible}} + \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}}$$

$$= \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{irreversible}} - \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}} \leq 0$$

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{irreversible}} \leq \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\text{reversible}} = S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

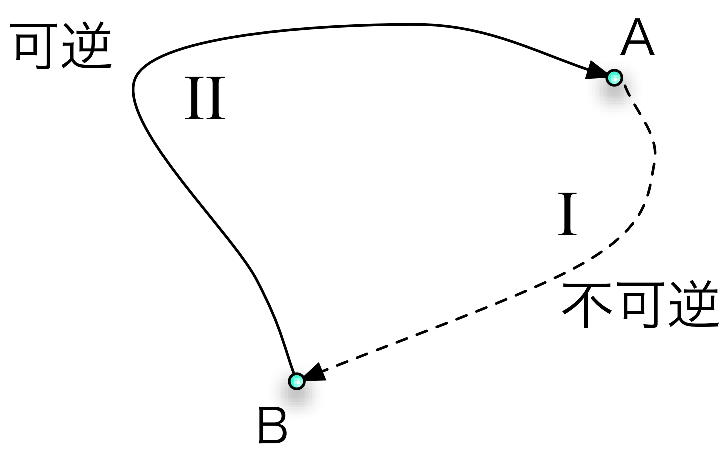
$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} \quad \leq \quad S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

$$\frac{dQ}{T} \quad \leq \quad dS$$

不可逆過程があると
η<η(Carnot)

$$\oint \frac{dQ}{T} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad \leq \quad 0$$

path IIが可逆過程で，path Iが不可逆過程であるとする。



path IIでは, $S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) \quad = \quad \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$

↑が計算可能

サイクルでは,

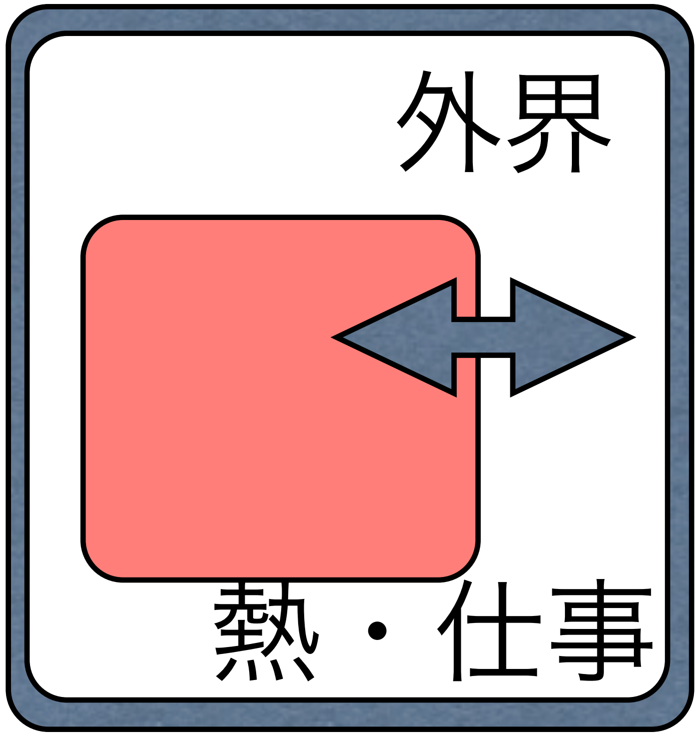
$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} + \left(\int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{A}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}}$$

$$= \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} - \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} \leq 0$$

$$\left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{irreversible}} \leq \left(\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T}\right)_{\mathrm{reversible}} = S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A})$$

$$\boxed{\begin{aligned} \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \frac{dQ}{T} \quad &\leq \quad S(\mathrm{B}) - S(\mathrm{A}) \\ \frac{dQ}{T} \quad &\leq \quad dS \end{aligned}}$$

一般の系では



$$dS \geq \frac{d\!\!\!{}^-Q}{T}$$

等号：可逆

不等号：非可逆