

成層水域からの熱エネルギー抽出に関する試算

Preliminary Computation on Potential Thermal Energy

Intake from Thermally Stratified Water Areas

道奥康治*

By Kohji MICHIOKU

In recent years development of high performance of heat pumps enables us to efficiently use the unused potential thermal energy naturally stored in water areas such as rivers, coastal waters, lakes, reservoirs, etc.. The present study deals with thermal energy intake from a thermally stratified water bodies. Considering energy conservation in waters and intake systems, preliminary computation of possible amount of thermal energy intake, average coefficient of performance (COP) of heat intake facilities and so on are carried out.

Keyword: thermal energy intake, unused energy, heat pump.

1. はしがき

水域に潜在する熱エネルギーは低レベルではありながらもその包蔵量は大きい。これを抽出することによって水域周辺の環境を保全し得るクリーンエネルギーを得ることができる。ここでは、貯水池や湖沼の熱エネルギーを水域周辺諸施設の熱源として利用することを考える。本論では鉛直次元モデル¹⁾に基づいて池内の水温構造を解析し、水域から抽出し得る冷熱・温熱エネルギー量を評価する。次に、河川水を利用した地域冷暖房モデル地区等の実績に基づいて単位施設面積あたりの熱需要量を概算し、ある水域を想定して熱エネルギー抽出量を試算する。

2. 水域からの熱エネルギー抽出量の算定法

2.1 水温解析の概要¹⁾

水温分布モデルは後述の図-1, 2などに示されるように一様な水温 T_m の表層、温度ジャンプ ΔT を有する躍層そして連続的に成層化した下層とからなる。水面での熱フラックス $F(t)$ は、正弦的に季節変化する平衡水温 T_s と表層水温 T_m との差より熱交換係数 K を介して、 $F(t)=K(T_s-T_m)$ のように与えられる。水体の熱保存則を考慮の上、受熱による水温成層の形成過程ならびに風応力や水面冷却にともなう鉛直混合過程を著者らの解析手法¹⁾に基づいて評価し水温分布の季節変化を再現する。解析手法の詳細と結果については紙面の都合

* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

上割愛せざるを得ないので文献1)を参照されたい。なお、実際の現象では水面での熱収支に加えて熱抽出も池内の水温構造を変化させる要因であり、これを考慮して水温解析を行う必要がある。しかし、本文では水面熱収支のみを考慮して得られたある時点での水温分布状態に対して抽出可能熱量の推算を行っている。すなわち、水温分布の季節変化の解析において熱抽出の影響は考慮されていない。

2.2 賦存熱エネルギー： W_u^u , W_H^u

抽出した水温が全て熱エネルギーに変換されると考えた場合、これを“賦存熱エネルギー”と定義する。

(1) 冷熱利用の場合の賦存熱エネルギー： W_c^u

利用水温を T_0 (°C)，気温を T_a (°C)，抽出流量を $Q_{0,u}$ (m³/hr) とすれ 図-1 冷熱抽出の場合の水温場

$$W_c^u = \int_{u,c} (T_a - T_0) \rho c Q_{0,u} dt = \rho c A_H \int_0^H \{T_a - T(z, t)\} dz \quad (1)$$

上式中、 $\int_{u,c} dt$: $(T_a - T_0) \geq 0$ の関係を保ち得る期間を対象とした時間積分、 ρ, c : 冷房用媒体の密度および定圧比熱、 A_H (m²) : 水域面積、 H (m) : 水深、 $T(z, t)$: 熱抽出時点での水温分布、 $\int_0^H dz$ は被積分関数 $\{T_a - T(z)\}$ が正值をとる範囲の条件付積分である。実際には水域の熱量と熱抽出量とのつりあ

(2) 温熱利用の場合の賦存熱エネルギー： W_H^u

賦存温熱エネルギー W_H^u (kcal·hr) は次のように算定される。

$$W_H^u = \int_{u,H} (T_0 - T_a) \rho c Q_{0,u} dt = \rho c A_H \int_0^H \{T(z, t) - T_a\} dz \quad (2)$$

ここで、 $\int_{u,H} dt$ は $(T_0 - T_a) \geq 0$ の関係を保つ期間における時間積分である。

2.3 抽出可能熱エネルギー： W_c^*

水温 T_0 と気温 T_a の間にある程度以上の水温差がなければシステムは稼働しない。また、取水流量にも限界がある。これらを考慮した実際に抽出可能な冷熱、温熱エネルギーを“抽出可能熱エネルギー”と定義する。

(1) 冷熱利用の場合の抽出可能熱エネルギー： W_c^* , W_H^*

図-1に示すような水温分布を持つ水域からの熱エネルギー抽出を考える。まず、気温 T_a がある限界気温 $T_{a,c}$ より高くなければ、冷熱需要はない。また、作業水温 T_0 は少なくとも気温 T_a よりある水温差 δ_{Tc} だけ低くなければ冷房システムが効果を発揮しない。よって、 $T_0 \leq T_a - \delta_{Tc}$ なる条件を満足する範囲において流量 Q_i^* で取水する。冷熱の場合、湖底より取水する。冷熱使用後、昇温した水は水域に還元され、底から“Fill-ing Box Process”によって図-1の斜線部のように再貯留され、これに相当する熱エネルギーが抽出されたことになる。単位時間あたりに抽出すべき冷熱フラックス（一定）を $Q_0 \delta_{Tc}$ とおく。図-1に示すように取水水温（水底での水温）は T_0 でこれは時間とともに変化するので、実際の取水流量 Q_i^* は次式で与えられる。

$$Q_i^* = Q_0 \delta_{Tc} / (T_a - T_0) \quad (3)$$

図-1を参考にして、熱保存式は次式のようにあらわすことができる。

$$A_H \frac{d}{dt} [T_0(H - z_0) - \int_{z_0}^H T(z, t_0) dz] = Q_0 \delta_{Tc} = Q_i^* (T_a - T_0) \quad (4)$$

上式を冷房運転時間 $t_0 \leq t \leq t_E$ の期間で積分すれば、 W_c^* が次式のように得られる。

$$W_c^* = \int_{t_0}^{t_E} \rho c Q_i^* (T_a - T_{0,E}) dt = \rho c Q_0 \delta_{Tc} (t_E - t_0) = \rho c A_H [T_{0,E}(H - z_{0,E}) - \int_{z_{0,E}}^H T(z, t_0) dz] \quad (5)$$

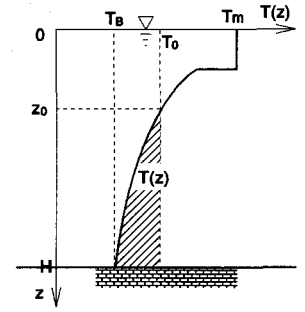


図-1 冷熱抽出の場合の水温場

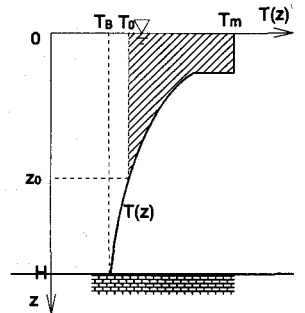


図-2 温熱抽出の場合の水温場

ここで、 $t_0 : T_0 \geq T_{a,cr}$ となった（冷熱需要が生じた）時の時間、 t_E : 作業水温が $T_0 = T_{0E}$ にまで昇温した時の時間、 $z_{0E} = T^{-1}(T_{0E}) : T(z, t_0) = T_{0E}$ に相当する水深 z 、である。

(2) 温熱利用の場合の抽出可能熱エネルギー：

$$W_H^*$$

図-2のような水温場に対し、冷熱の場合と同様にして熱保存を考える。作業水温 T_0 が気温 T_a よりある水温差 δ_{TH} だけ高い—すなわち、 $T_0 \geq T_a + \delta_{TH}$ の条件が満足されるとき温熱抽出が可能と考え、流量 Q_t^* で取水する。温熱の場合には、水温の高い表層より取水すればよい。温熱使用后、冷却された水は湖に回収され、水表面より図-2の斜線部のように貯留される。これに相当する熱エネルギーが水域より抽出されたと考え、温熱フラックスを $Q_0 \delta_{TH}$ とおけば、実際の取水流量 Q_t^* は次式で与えられる。

$$Q_t^* = Q_0 \delta_{TH} / (T_0 - T_a)$$

熱保存式は、

$$\Lambda_H \cdot \frac{d}{dt} [T_0 z_0 - \int_0^{z_0} T(z, t_0) dz] = -Q_0 \delta_{TH} = -Q_t^* (T_0 - T_a) \quad (7)$$

であり、 $Q_0 \delta_{TH}$ が一定であるという条件のもとに、温熱供給時間 $t_0 \leq t \leq t_E$ の期間で上式を積分すれば、 W_H^* が次のように得られる。

$$W_H^* = \int_{t_0}^{t_E} \rho c Q_t^* (T_0 - T_a) dt = \rho c Q_0 \delta_{TH} (t_E - t_0) = -\rho c \Lambda_H [T_0 z_0 - \int_0^{z_0} T(z, t_0) dz] \quad (8)$$

2.4 需要側利用可能エネルギー： W_c 、 W_H

ヒートポンプ・熱交換器・取水ポンプ・循環系などを稼働させるのに要するエネルギーの収支を考慮して、実際に需要側で利用可能な冷熱、温熱エネルギーを”需要側利用可能エネルギー”と定義する。

(1) 冷熱利用の場合

(a) 冷熱抽出にともなう熱エネルギー収支

冷熱使用后貯水池へ回収される熱エネルギーを W_i とする。また、需要側で冷房除去される熱エネルギーを W_c とする。冷凍機（ヒート

ポンプ）ならびにポンプ・循環システムを運転するために系内へ供給すべき電気エネルギーとして、①冷凍機（ヒートポンプ）を稼働させるためのエネルギー（熱量換算、実際は電気エネルギー） W_e 、②取水ポンプと循環システムを稼働させるためのエネルギー（熱量換算） W_p 、③その他のエネルギー損失等が含まれる。熱エネルギーの収支は 図-3(a) のようである。よって、次式の関係が成立つ。

$$W_i = W_c + W_e + W_p \quad (9)$$

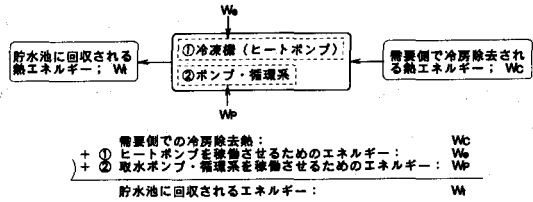
(b) 冷房運転時の冷凍機（ヒートポンプ）の成績定数（COP）

冷凍機（ヒートポンプ）の成績定数（COP）は次式で定義される。

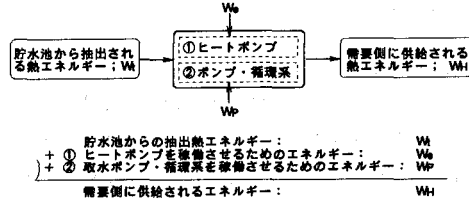
$$COP = W_c / W_e \quad (10)$$

冷凍機により COP の値は異なるが、一般に水温 T_0 の単調減少関数である。ここでは次式であらわす。

$$COP = a \cdot T_0^{-m} \quad (11)$$



(a) 冷熱利用の場合の熱収支



(b) 温熱利用の場合の熱収支

図-3 熱抽出にともなう熱エネルギー収支

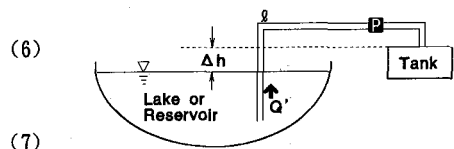


図-4 ポンプ・循環システムの模式図

上式の定数(a, m)はa=132.0, m=1.0程度の値をとる²⁾。

(c) 取水ポンプ・循環システムにおける損失エネルギーの評価

図-4のような取水システムを考える。湖水面と貯水槽水面の水頭差を Δh , 送水流量を新たに Q_t' (m^3/sec)= Q_t (m^3/hr)/3,600, とおけば, 揚程 H_F は, $H_F=H_L+\Delta h$, で与えられる。損失水頭 H_L は管路計算より Q_t' の関数として算定される。結局, ポンプの効率を η とすれば, 単位時間あたりにポンプに供給すべきエネルギー $-(dW_F/dt)$ の熱フラックスへの換算値, F_F ($m^3\text{C}/hr$)が次式のように得られる。

$$F_F = \frac{(dW_F/dt)}{\rho c} = 0.86 \frac{g Q_t' H_F}{\eta} \quad (m^3\text{C}/hr) \quad (12)$$

(d) 需要側利用可能冷熱エネルギー: W_c

Eq. (10)を考慮してEq. (9)を時間微分すると次式を得る。

$$\{(C_{OP}+1)/C_{OP}\} \cdot (dW_c/dt) + (dW_F/dt) = (dW_t/dt) \quad (13)$$

需要側で求められる単位時間あたりの冷熱エネルギー (dW_c/dt) は一定で, 次式とする。

$$(dW_c/dt) = \rho c Q_0 \cdot \delta T_c \quad (14)$$

一方, 水域内の熱収支式は,

$$(dW_t/dt) = \rho c Q_t (T_s - T_0) = \rho c A_H \cdot \frac{d}{dt} [T_0(H - z_0) - \int_{z_0}^H T(z, t_0) dz] \quad (15)$$

である。Eqs. (12), (14), (15)をEq. (13)に代入し, 整理すると次式が得られる。

$$Q_t (T_s - T_0) = \{(C_{OP}+1)/C_{OP}\} \cdot (Q_0 \cdot \delta T_c) + F_F \quad (16)$$

一方, Eq. (15)の第二・三式より, 作業水温 T_0 に関する方程式が次のように得られる。

$$\frac{dT_0}{dt} = \frac{Q_t (T_s - T_0)}{A_H (H - z_0)} \quad (17)$$

Eq. (16)中の C_{OP} および F_F は各々Eqs. (11), (12)によって与えられ, Eq. (16)は流量 Q_t に関する三次方程式である。水温分布形 $T(z, t_0)$ より, Eq. (17)中の z_0 は水温分布を介して T_0 の関数として与えられる。結局, Eqs. (16), (17)を初期条件,

$$T_0 = T_B \quad (\text{or } z_0 = H) \quad \text{at} \quad t = t_0 \quad (18)$$

のもとに積分すれば, T_0, z_0, Q_t などの経時変化が得られる。冷熱抽出の開始・終了時刻を各々 t_0, t_E とすると, 熱エネルギー諸量は次のように得られる。

$$\text{＜需要側の利用可能冷熱エネルギー＞} : W_c = \int_{t_0}^{t_E} \rho c Q_0 \cdot \delta T_c dt = \rho c Q_0 \cdot \delta T_c (t_E - t_0) \quad (19)$$

$$\text{＜水域へ回収される熱エネルギー＞} : W_t = \int_{t_0}^{t_E} \rho c Q_t (T_s - T_0) dt = \rho c A_H [T_{0E} (H - z_{0E}) - \int_{z_{0E}}^H T_i(z) dz] \quad (20)$$

$$\text{＜ポンプ・循環系を稼働させるためのエネルギー（熱エネルギー換算）＞} : W_F = \int_{t_0}^{t_E} \rho c F_F dt \quad (21)$$

$$\text{＜ヒートポンプを稼働させるためのエネルギー（熱エネルギー換算）＞} : W_s = W_t - W_F - W_c \quad (22)$$

$$\text{＜ヒートポンプの平均成績係数＞} : COP_M = W_c / W_s \quad (23)$$

$$\text{＜システム全体の平均成績係数＞} : COP_T = W_c / (W_s + W_F) \quad (24)$$

(2) 温熱利用の場合

冷熱利用の場合と同様に考えて, 以下のように諸量を算定することができる。

(a) 温熱エネルギー W_H の抽出にともなう熱エネルギーの収支

温熱エネルギー W_H の抽出にともなう熱エネルギー収支は図-3(b)のようであり, 次式であらわされる。

$$W_H = W_t + W_s + W_F \quad (25)$$

(b) 暖房運転時のヒートポンプのCOP

$$COP_F = W_H / W_s \quad (26)$$

表-1 熱エネルギー試算の対象水域の諸元

(A) 循環システムの諸元	
取水管の損失係数	入り口: $\zeta_1=0.3$, 曲がり: $\zeta_2=0.5$
底層からの管路系延長 (冷水取水の場合)	$g_c = \beta H$ ($\beta=5.0$, H : 水深)
表層からの管路系延長 (温水取水の場合)	$g_w = 100(\text{m})$
管径	$D=0.3(\text{m})$
管路の摩擦損失係数	$f=124.5n^4D^{-1/3}$ ($n=0.015$ はManningの粗度係数)
取水ポンプの効率	75(%) ($\eta=0.75$)
ヒートポンプの成績定数 (COP)	冷房の場合: $\text{COP}=aT_0^{-m}$, $a=132.0$, $m=1.0$
[作業流体温度 $T_0(^{\circ}\text{C})$ の関数]	暖房の場合: $\text{COP}=bT_0^{-k}$, $b=1.86$, $k=0.3$

(B) 熱需要の元単位	
ピーク時の冷熱需要 (単位施設面積あたり)	$D_{QFC}=500.0(\text{kcal}/\text{m}^2/\text{hr})$
ピーク時の温熱需要 (単位施設面積あたり)	$D_{QPH}=300.0(\text{kcal}/\text{m}^2/\text{hr})$

(C) 水域・施設諸元					
ケース	施設面積 $A_F(\text{m}^2)$	水域面積 $A_W(\text{m}^2)$	水深 $H(\text{m})$	平衡水温の 年平均値: $T_{..}$	平衡水温の 年較差: ΔT_s
Case-1	10^4	10^4	50	15.0	24.0
Case-2	10^4	10^4	30	15.0	24.0
Case-3	10^4	10^4	10	15.0	24.0

この場合, COP は次式のような水温 T_0 の単調増加関数である²⁾.

$$\text{COP}(T_0) = b \cdot T_0^k \quad (27)$$

上式中の係数は, $b=1.86$, $k=0.3$, 程度である.

(c) 需要側利用可能温熱エネルギー: W_H

熱エネルギー諸量は次のように得られる (ここで, t_0, t_E は各々温

熱抽出の開始・終了時刻である).

<需要側の利用可能温熱エネルギー>

$$W_H = \int_{t_0}^{t_E} \rho c Q_0 \cdot \delta T_H dt = \rho c Q_0 \cdot \delta T_H (t_E - t_0) \quad (28)$$

<水域へ回収される熱エネルギー>

$$W_t = \int_{t_0}^{t_E} \rho c Q_t (T_0 - T_s) dt = -\rho c A_H [T_{0E} Z_{0E} - \int_0^{z_{0E}} T(z, t_0) dz] \quad (29)$$

<ポンプ・循環系の稼働エネルギー (熱エネルギー換算)>

W_F (Eq. (12)と同じ)

<ヒートポンプの稼働エネルギー (熱エネルギー換算)>

$$W_* = W_H - W_t - W_F \quad (30)$$

<ヒートポンプの平均成績係数>

$$\text{COP}_M = W_H / W_* \quad (31)$$

<システム全体の平均成績係数>

$$\text{COP}_T = W_H / (W_* + W_F) \quad (32)$$

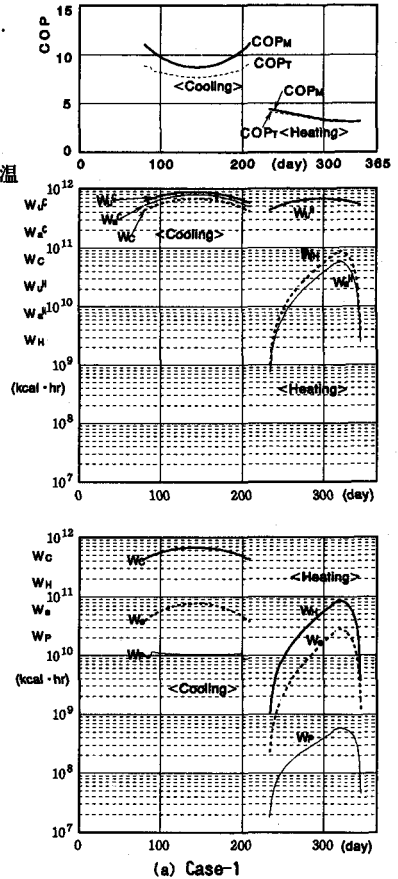
3. 熱エネルギー抽出量の試算

3.1 地域冷暖房モデル地区の熱需要実績³⁾

地域冷暖房モデル地区における実績報告³⁾に基づいて, 単位施設面 図-5 熱エネルギー諸量の年周変化積あたりのピーク熱需要量を概算するとおおよそ, 冷熱: $D_{QFC}=300 \sim 1,000(\text{kcal}/\text{m}^2/\text{hr})$, 温熱: $D_{QPH}=300 \sim 600(\text{kcal}/\text{m}^2/\text{hr})$ の範囲であった. ここでは, 表-1 (B) の元単位を用いる.

3.2 熱エネルギー抽出量の試算例

冷熱・温熱の需要量 $Q_0 \cdot \delta T_C$, $Q_0 \cdot \delta T_H$ は各々, D_{QFC} , D_{QPH} に施設面積を乗ずることにより概算する. 表-1



(C)に示すような諸元の水域と熱利用施設を想定して、熱エネルギー諸元の試算を行った。熱エネルギー諸量の年周変化を試算例を図-5に示す。各図の最上段は(COP_M, COP_T)を、中段は($W_U, C^{(H)}, W_a^{(H)}, W_c^{(H)}$)を、最下段は($W_c^{(H)}, W_p, W_o$)を各々表わしている。

4. むすび

本論では、冷熱・温熱利用に供し得る熱エネルギーの試算に重点をおいて議論をすすめたが、熱抽出にともなう熱収支を組み入れた水温解析を行って熱エネルギー量をより厳密に算出する必要がある。また、物理過程のみならず、設備投資の費用便益など経済要因を考慮した上で、代替エネルギーとしての熱エネルギーの価値を考えていく必要がある。熱抽出によって

水温成層が一様化すると底層水と上層水はより混合しやすくなり、池内の水質循環を促進するという副次的効果も期待できる。その反面、栄養塩や汚濁物質の分布状況を勘案しながら熱抽出を行わなければ、逆に水質環境を悪化させる事象も生じ得る。エネルギー需要と水環境の双方に意を配した運用を図る必要があることは言うまでもない。熱エネルギーの利用に際する距離的ミスマッチを解消するためには貯水池周辺諸施設を集中配備して熱需要を向上させる必要がある。寒冷地においては、水辺周辺の諸施設への熱供給のみならず、融雪・消雪への熱エネルギー利用が可能である。管理用発電施設や余剰水力を有するダム貯水池においては水力駆動式のヒートポンプを導入することによって、電力利用の効率化が期待できる。時間的ミスマッチに対処するためには、蓄熱式ヒートポンプの導入が必要となろう。本研究の遂行にあたり大阪産業大学室田明学長より貴重なご助言を頂くとともに、河川環境管理財団から平成3年度河川整備基金助成を受けた。

参考文献

- 1) 道奥康治：温帯湖の密度成層特性と熱サイクル，水工学論文集，第37巻，pp.337-342, 1993年。
- 2) 朴柄植：未利用エネルギーの種類と特質，賦存量とその省エネルギー効果，エネルギー・資源，Vol.13, No.2, pp.149-156, 1992。
- 3) 通産省資源エネルギー庁監修，「21世紀を目指す未利用エネルギー汎用システム」，通産政策広報社，1990。

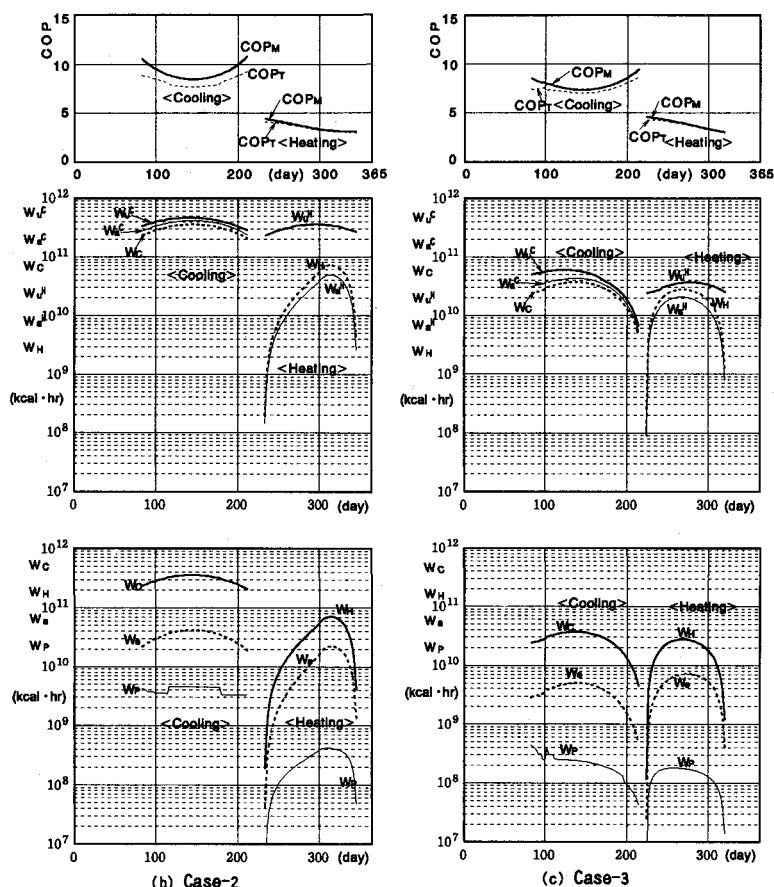


図-5 (つづき)