

電力中央研究所 正会員 和田 明  
同 上 正会員 ○ 片 野 尚 明

本報告は火（原子）力発電所の冷却水取放水に関する一連の研究として実施してきた研究結果の一部で、特に潮流による移流効果に着目して湾内水が潮汐の干満によつて湾外にどの程度排熱されるかを熱収支論によるアナコム計算結果より推量せんとするものである。

## 1. 緒 言

従来著者が実施してきた湾内水熱収支に関する研究成果は、現場実測データをもとに大気との熱収支項のみを考慮した初歩的な計算方法（第20回講演会発表）に手を加えて、湾内に位置している取放水口、あるいは地形条件により一次的に多連ブロックに分割して潮汐、熱拡散効果を考慮したシミュレート計算方式（第21回講演会発表）を開発してきた。これらの計算の仮定としては、(1) 夏季7・8月の平均気象条件下で湾内水には躍層面の形成が確認され、しかも潮汐などによつて乱されず安定であること、(2) 温水放流水は表層を拡散して躍層面下には潜りこまないこと、(3) 潮汐は1日2周期の正弦波で単なる連続の式を満足するにとどまつていること、(4) 取水に伴なり表層からの温水混入は潮位の変化にかかわらず一定値をとること、(5) 湾外水は温水排熱の影響を受けない自然状態時の平衡水温とするなどである。つぎに実際のシミュレート計算に必要な手順を示せばつぎのとおりである。第1に復水器設計温度としてもつとも苛酷な夏季の現場実測による水温、流速分布、そして潮汐のデータなどの入手が必要とされる。これによつて先の仮定と照応し、その適否と計算の妥当性がある程度決定することができる。計算の妥当性が確認されれば、第2に取放水口の位置と湾の地形条件（平面積、形状、水深）により適当な多連ブロック割りを行ない、熱収支模型図、基礎方程式を作成し、さらにアナコム計算に便利なブロック線図を作成する。第3にその地点の気象条件（輻射量、気温、湿度、風速、風向）、海象条件（潮汐、水温分布、拡散係数）、冷却水条件（使用水量、混入率、復水器によつて与えられる温度上昇）などから計算のための係数を求め、計算の実施段階となる。

## 2. 熱収支モデルの概要

これらの仮定と検討にもとづいた取放水口配置の異つた二三の地点にわたつて湾内水温の算定を実施してきた。これらのシミュレート計算において、各ブロック別の熱収支項の役割を検討すると、冷却水放出流と潮流による移流効果が極めて大きく、湾内全域に放流熱エネルギーを拡散させ、湾内外の熱交換に重要な役割をなしていることが明かとなつた。そこで、特に潮流による移流効果に着目して湾内水が潮汐の干満によつて湾外にどの程度排熱されるかを検討する目的で、つぎのような熱収支モデルを考えた（図-1参照）。モデルは取水口が湾奥、放水口が湾中間部に位置する場合であつて、潮汐、熱拡散効果を考慮した熱収支基礎方程式はつぎのように表わされる。

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{C_w \rho (H_{w1} + \gamma_1)} \{ (q_{rs} + q_a - q_{r1}) + \frac{1}{A_1} (-Q_i - Q_{i1} - Q_{k1}) \}$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{1}{C_w \rho (H_{w2} + \eta_2)} \left[ (q_{ps} + q\alpha - q_{T2}) + \frac{1}{A_2} \{ Q_0 + (Q_{t1} - Q_{t2} - Q_{t2}') + (Q_{k1} - Q_{k2}) \} \right]$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{1}{C_w \rho (H_{w3} + \eta_3)} \left[ (q_{ps} + q\alpha - q_{T3}) + \frac{1}{A_3} \{ (Q_{t2} + Q_{t2}' - Q_{t3} + Q_{t4}) + (Q_{k2} - Q_{k3} + Q_{k4}) \} \right]$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{1}{C_w \rho (H_{w4} + \eta_4)} \left\{ (q_{ps} + q\alpha - q_{T4}) + \frac{1}{A_4} (-Q_{t4} - Q_{k4}) \right\}$$

$$\frac{d\theta\eta}{dt} = \frac{1}{C_w \rho H_{wn}} (q_{ps} + q\alpha - q_{Tn})$$

式中の符号はブロックに入る熱量を+，出る熱量を-とする。  
 式中の記号について説明をすれば， $\theta_i$ ：ブロックの表層水温，  
 $C_w$ ：海水の比熱， $\rho$ ：海水の密度， $H_{wi}$ ：躍層水深， $\eta_i$ ：潮位  
 の変化， $A_i$ ：ブロックの平面積， $q_{ps}$ ：純輻射量， $q\alpha$ ：顕熱，  
 潜熱量のうち気温に関する項， $q_{Ti}$ ：顕熱，潜熱量のうち水  
 温に関する項， $Q_0$ ：温水放流熱量， $Q_i$ ：表層からの取水によ  
 る移動熱量， $Q_{ti}$ ：温水放流，潮流による移流熱量， $Q_{ki}$ ：  
 拡散による移動熱量である。なお，脚添字  $i$  はブロック番号を示し， $n$  は湾外を示す。

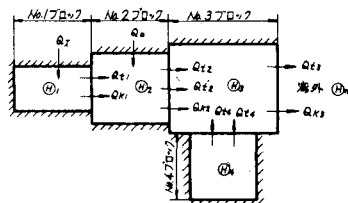


図-1 熱収支模型図

つぎにこの地点の計算条件を列举すれば表-1 のようになる。

表-1 計 算 条 件

|         |                                                                                                                                                                                                           |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 気 象 条 件 | 輻射量：平均日量 $492 \text{ cal/cm}^2$ ，最大 $1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ ，風速： $3.3 \text{ m/sec}$<br>気 温：平均 $26.9^\circ\text{C}$ ，最高 $30.9^\circ\text{C}$ ，最低 $23.3^\circ\text{C}$ ，湿度： $78\%$           |
| 海 象 条 件 | 潮位の変化： $\eta = 108, 217, 325 \text{ cm}$ ，躍層水深： $H_w = 3 \text{ m}$ ，<br>潮流速： $U_1 = 2.08, 4.17, 6.25$ ， $U_2 = 2.50, 5.00, 7.80$ ， $U_3 = 1.56, 3.13, 4.59$<br>$U_4 = 1.20, 2.39, 3.59 \text{ cm/sec}$ ， |
| 冷却水条件   | 放流流量： $20, 40, 60, 80, 100 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，<br>混 入 率： $0, 20, 40, 60, 80, 100\%$ ，復水器によつて与えられる温度： $8^\circ\text{C}$                                                                              |

### 3. 計算結果とその検討

計算結果の一部である潮汐の大きさをパラメータにとつた混入率20%における温水放流流量／湾平面積と表層水温の関係を図-2に示す。これより  $\eta = 108 \text{ cm}$  に対して  $\eta = 325 \text{ cm}$  になると  $Q/A = 1.39 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$  ( $60 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) において  $0.7^\circ\text{C}$  の低下がみられる。しかし，湾奥部は逆に熱の蓄積が生じて  $0.2^\circ\text{C}$  程度の水温の上昇がある。

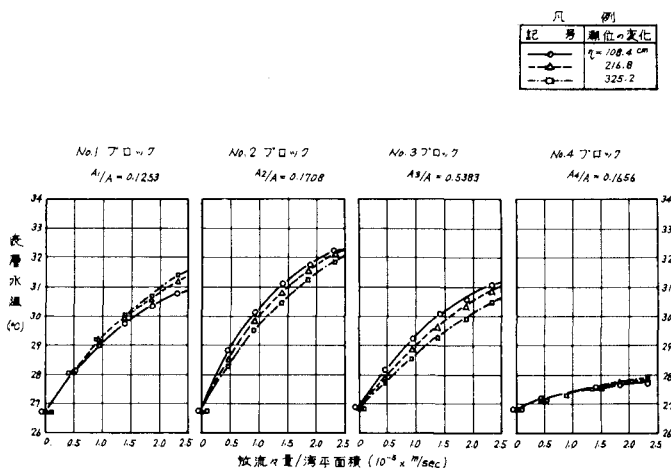


図-2 潮汐の変化による表層水温と  $mc/A$  との関係

温水冷却水放出によつて湾内表層水温が平衡状態に達するまでは、日射量、気温、潮位、潮流、下マ潮、上げ潮、下マ潮、上げ潮、この放水熱エネルギーはそれぞれ海面からの冷却過程、湾外への逸散過程および湾内表層水の蓄熱作用に置き代えられる。しかるに、平衡状態に達した後は熱エネルギーの一部は海面からの冷却作用、残りは湾口での内外湾水の交換現象により逸散される。図-3は平衡状態における熱エネルギーの日変化の様相の一例 ( $Q = 2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $r = 0.2$ ) を示したものである。図より明かなように移流と拡散効果による湾外へ逸散する熱エネルギーは落潮時、特に潮流の速度が最大となる時点において最大値を示し、漲潮時には湾内への流入がわずかに認められるだけである。この傾向は冷却水使用水量が増すに従い強調される。湾口へ向う流れは基礎方程式の仮定から放水と潮汐との流れの和であり、また湾内水温は湾外水温より常に高いため、湾外逸散熱エネルギーは落潮時において当然大きな値を有する。また、海表面からの熱収支は輻射量、気温の変化にほぼ対応した形状をなし、日中は受熱、夜間は放熱の状態をくり返す。水温の変化は自然状態の変化に類似し、潮流による移流効果の影響は特に湾奥に表われている。

平衡状態における1日の大気へ逸散する熱量、湾外へ逸散する熱量のそれぞれ温水放流熱量との比を逸散エネルギー分担配分比と名付ける。表-2は平衡時での温水放流熱量の逸散エネルギー分担配分比を計算した結果を示したものである。表には湾外へ逸散する熱エネルギーをさらに落潮時と漲潮時に分けてその配分比をも示してある。また、平衡までに要した温水総熱エネルギーがどのような割合で湾内に蓄熱され、大気、あるいは湾外に逸散されるかを示したのが表-3である。

これより一般的につきのことがいえる。(1) 冷却水使用水量が同量であるとき、潮汐効果が大きければ湾外への逸散熱量は増加する。それに伴つて海面からの大気への冷却効果は減少する。(2) 湾に出入りする潮流による移流流量を同量としたとき、冷却水使用水量が増加するにつれて湾外への逸散熱量が大きな値を有する。このことは使用水量が大きくなるにつれ湾内蓄熱比が減少すること、あ

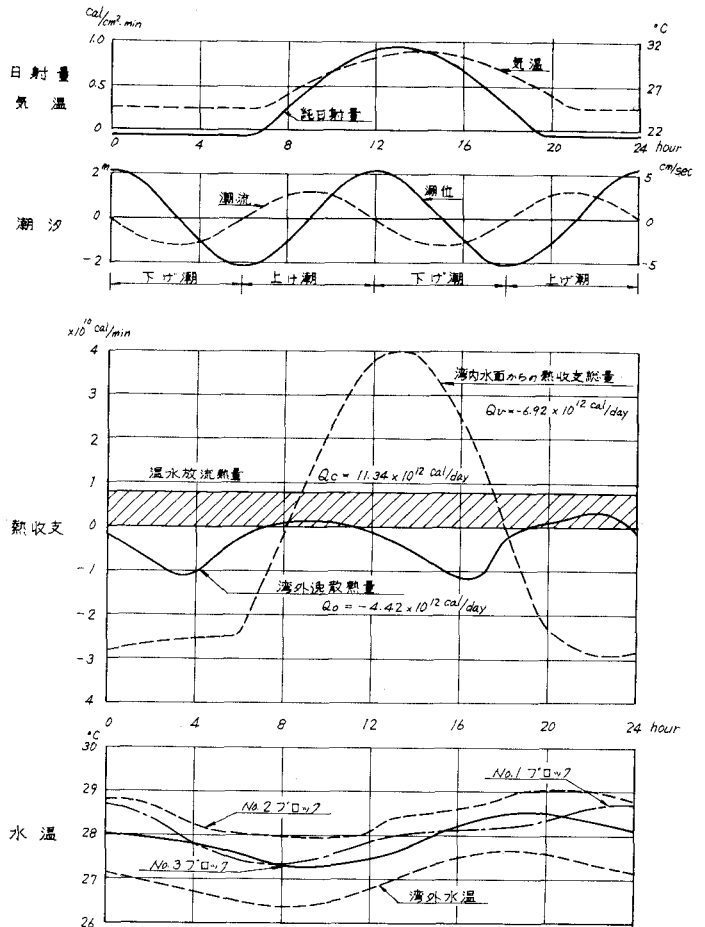


図-3 平衡状態における熱エネルギーの日変化

$$Q/A = 0.46 \times 10^{-5} \text{ m/sec} \quad r = 0.2$$

るいは水温が飽和曲線形態をとることを説明している。従つて水面からの表面冷却エネルギー比は湾奥を除いて減少する。(3) 冷却水放出熱エネルギーの湾外へ逸散する割合は、上層温水層からの混入率を20%以内におさえれば、潮位変化 $\eta = 107 \sim 217 \text{ cm}$ 、 $Q/A = 0.46 \sim 1.38 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ の値に対して、平衡時においては30~50%の値を有し、残りは海面からの冷却効果が受けもつ。(4) 上層温水層からの混入率による変化は逸散分担比にはほとんど影響を及ぼさない。(5) 湾外へ逸散する熱エネルギーはほとんど落潮時において放出され、漲潮時には潮汐が大であれば湾内への給熱が生じ、その値は落潮時の10%程度である。(6) 温水冷却水放出によつて、湾内表層水温が平衡状態に達するまでに、全放水熱エネルギーは湾内表層水に10~25%、大気への逸散過程に45~55%、湾外への逸散過程に20~40%程度費やされる。しかし、取水地点の前面の水深が浅く、混入率が増すと水温が上昇するため湾内蓄熱比と大気

表一 2 温水放流熱量の逸散熱エネルギー分担配分比  
(平衡状態時)

| 使用水量<br>$Q(m^3/s)$ | 混入率<br>$r$ | 潮位の変化<br>$\eta$ | 大気に逸散する熱エネルギー比 | 湾外に逸散する熱エネルギー比 |       |       |
|--------------------|------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------|
|                    |            |                 |                | ebb            | flood | total |
| 20                 | 0.2        | 108cm           | -0.68          | -0.28          | -0.04 | -0.32 |
|                    |            | 217cm           | -0.61          | -0.45          | +0.06 | -0.39 |
|                    | 0.6        |                 | -0.63          | -0.50          | +0.13 | -0.37 |
|                    |            | 60              | 0.2            | 108cm          | -0.52 | -0.38 |
| 217cm              | -0.49      |                 |                | -0.55          | +0.04 | -0.51 |
|                    | 0.6        |                 | -0.50          | -0.56          | +0.06 | -0.50 |

表一 3 平衡までに要した放出温水熱エネルギー配分比

| 使用水量<br>$Q(\text{m}^3/\text{s})$ | 混入率<br>$r$ | 潮位の変化<br>$\eta(\text{cm})$ | 湾内蓄熱比 | 大気への逸散比 | 湾外への逸散比 |       |       |
|----------------------------------|------------|----------------------------|-------|---------|---------|-------|-------|
|                                  |            |                            |       |         | 移流分     | 拡散分   | 計     |
| 20                               | 0.2        | 108                        | 0.232 | 0.560   | 0.165   | 0.043 | 0.208 |
|                                  |            | 217                        | 0.257 | 0.460   | 0.251   | 0.031 | 0.282 |
|                                  | 0.6        |                            |       | 0.296   | 0.498   | 0.177 | 0.030 |
|                                  | 60         | 0.2                        | 108   | 0.136   | 0.483   | 0.344 | 0.037 |
| 217                              |            |                            | 0.119 | 0.457   | 0.390   | 0.033 | 0.423 |
|                                  |            | 0.6                        |       | 0.174   | 0.496   | 0.296 | 0.035 |

への逸散比が増加する。(7) 湾外へ逸散する熱エネルギーのうち拡散による効果は10~20%を占め、その逸散熱エネルギーの大きさは条件が変わってもほぼ一定である。移流熱量のうち潮汐作用の占める割合は湾外へ逸散するエネルギーの60%に達する。従つて潮汐作用によつて湾外へ運ばれるエネルギー比は20~30%程度であることが明かとなつた。