

水中温水噴流について

大 西 外 明*

はじめに

最近、原子力・火力発電所の温排水問題が社会的に大きな関心を集めており、温排水の影響を低減するための努力と共に、影響範囲を適確に予測する手法の確立がいそがれている。

温排水問題は究極的にはエコロジーとの関連で論じなければならないが、“影響範囲”を狭義に“拡散範囲”としてとらえれば、水理学あるいは流体力学の問題となる。

温排水が自然環境におよぼす影響を低減する方法の一つとして、水中放流方式（深層放流方式）が米国を中心とした諸外国において採用され、わが国においても最近とみに注目を集め始めている。著者らは、かねてから、密度成層流体内における流体の拡散現象を数値シミュレーションすることを研究してきた。本論では、その成果を水中放流のなかでも特に混合希釈効果のすぐれた多孔管放水口からの温水噴流に適用する考えについてのべる。また、水中放水口からの温水噴流に関する現地観測結果の例を紹介し、あわせて多孔管放水口が採用されるに至った背景につき説明する。

1. 水中放流と表層放流

冷却水等を放流する方式は、放水口の位置のいかんによって、水中放流方式と表層放流方式に分類することができよう。水中放流方式は、放水口を海底付近に置いて冷却水を噴出するもので、周囲の水との混合を強制して短時間内に水温の低下を期待するものである。表層放流方式は、放水口を沿岸部におき、水面に沿って冷却水を放流するもので、周囲の水との混合と大気との熱交換とによって水温の低下を期待するものである。水中放流方式のもっとも単純なものは、大口径の放水管を水中に開口させる方式である。一方、米国等では温水噴流の混合希釈をより有効に促進するために多孔管放水口が注目されつつある。

図-1 は、表層放流、大口径水中放水口、多孔管放水口から冷却水を放流した場合の水面における等温線を示すものである¹⁾。放流量は $20\text{ m}^3/\text{sec}$ である。大口径水中放水口は直径 3.3 m の円管を水平に対して 20° 上向きにおいたものであり、水深は約 10 m である。多孔管放水口は直径 2.4 m の主管管の頂部に垂直ノズルを取りつけたものであり、放流速度は約 $2\text{ m}/\text{sec}$ である。放

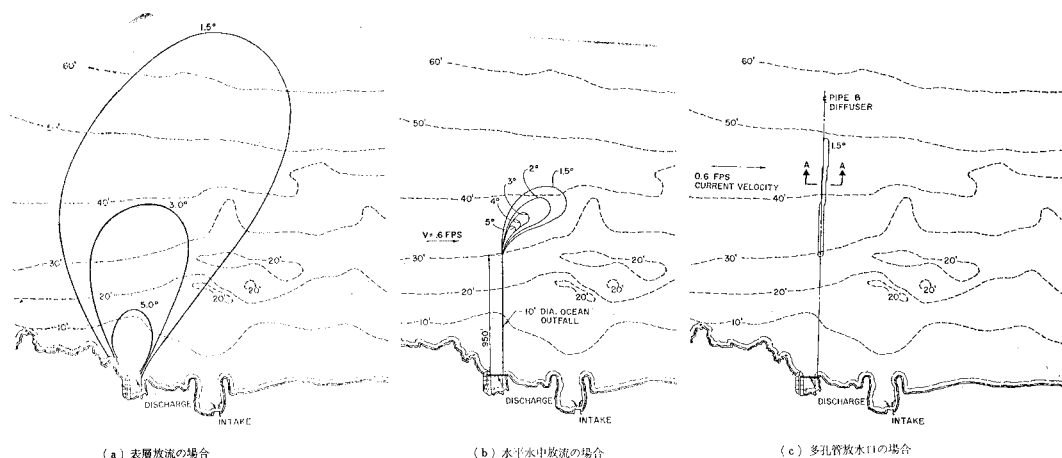


図-1 各種放水口の比較

似することの妥当性を知ることができる。

次に、多孔管放水口の場合、図-4 に示すように主水管の両側に噴出孔を千鳥状に取りつける設計方法が考えられる。この場合には主水管の両側から出た噴流は、横方向で干渉し合い浮力をうけながら上昇していく。両側の噴流に囲まれた領域では圧力が低下して、その結果、噴流は次第に彎曲して主水管上にかぶさるようになる。

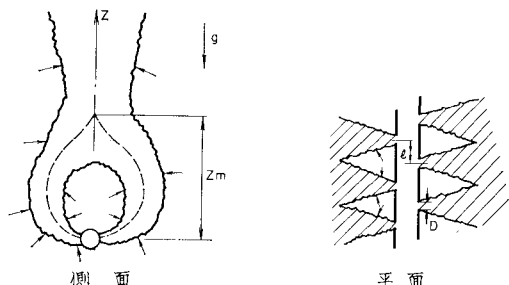


図-4 千鳥状多孔管放水口の流れ（水平放流の場合）

両側の噴流が重なり合ったのちは、流れは二次元温水噴流の様相を呈する。二つの温水噴流が重ね合さる位置 Z_m (図-4 参照) は Liseth⁷⁾ によると

$$\frac{Z_m}{l} \approx \frac{u_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} g D\right)^{1/2}} \cdot \left(\frac{4l}{\pi D}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

の関係がある。

Z_m より上部の領域では、温水噴流は二次元流と近似的に考えることができる。

3. 有限水深水域での水中温水噴流

われわれが現場で遭遇する問題では、水面の影響を無視しえないことが多い。水中放水口から出た温水噴流が水面付近に達すると水面を若干隆起させたあと、ある厚さをもって水面ぞいに横方向に拡がっていくことは、一般によく知られている。図-5 は海底に開口した鉛直管

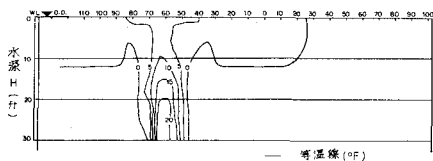


図-5 Heysham 発電所水中温水噴流

からの水中温水噴流の温度分布の一例である。これは Heysham 原子力発電所の温排水計画に関連して、Anwer⁹⁾ が行った実験結果である。この図にみられるように、温水噴流が水面付近で水平方向に転じた直後に、等温線は水面に最も接近し、その後はなだらかに低下して、ほぼ一様厚さの表層流になって横方向に拡がっていく。似たような現象は二次元温水噴流に関する著者らの

解析結果²⁾ でも認められた。Jirka と Harleman⁹⁾ も同様な等温線形状が生じることを報告している。このような有限水深の水域での水中噴流を取り扱う場合には、表層の温水流の厚さの下面までは自由水面の影響を無視した噴流理論を適用できるものと考えられることができる。表層流の厚さについては、たとえば Abraham¹⁰⁾ の実験値がある。Abraham によると、二次元水中温水噴流の表層流厚さは、噴流長のおよそ 1/4 である。また、Jirka と Harleman は二次元水中温水噴流を 図-6 のように、特性を異にする 5 つの領域に分けて考えている。領域 ① は水面の影響を無視して従来の噴流理論を適用できる領域である。領域 ② は水中温水噴流が水平方向に流向をかえる遷移領域である。この領域より下流の表層温水流は、この領域の流れの特性により大きく影響される。

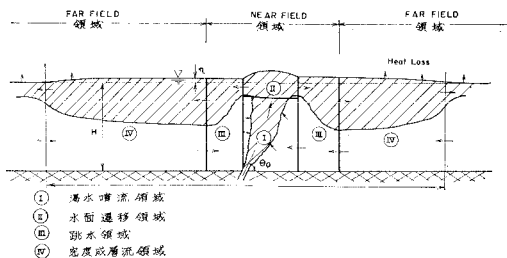


図-6 二次元温水噴流の水利構造

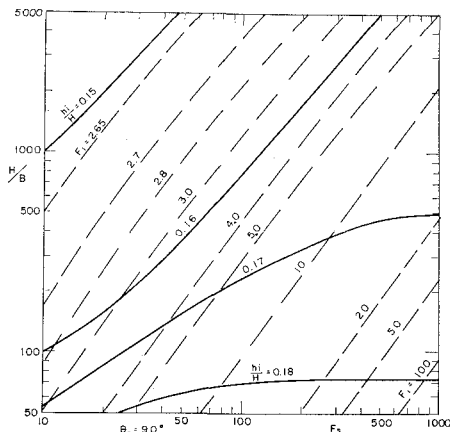


図-7 表層流の厚さ h_i とフルード数 F_1

図-7 は、直線型放水口から鉛直方向に放流した水中温水噴流について Jirka らが解析した結果を示す。図中の記号の意味は次のとおりである。

- B: 放水口幅
- H: 放流水域の水深
- h_i : 領域 ② の平均厚さ

$$F_1 = u_1 \left(\frac{\rho_1 - \rho_a}{\rho_a} g h_i \right)^{-1/2} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 u_1 は領域 ② の平均流速、 ρ_1 は領域 ② の流

体密度である。また、図中の F_s は式 (4a) により定義される温水噴流のフルード数である。

図-7 から、領域 ② の平均厚さ h_i が F_s と H/B によって影響をうける度は少なく、ほぼ全水深 H の 1/6 程度であることがわかる。また、この図から実際上の多くの場合において、 $F_1 \gg 1$ であると考えられる。

いま、表-1 に示す特性を有する二層密度成層流を考えると

$$F = F_1'^2 + F_2'^2 \dots\dots\dots (7)$$

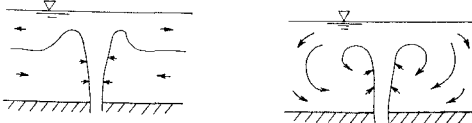
表-1 二層密度成層流の特性

	表 層 流	下 層 流
流 速	u_1'	u_2
流水の密度	ρ_1'	ρ_a
流れの厚さ	h_1'	h_2
フルード数	$F_1' = u_1' \left(\frac{\rho_1' - \rho_a}{\rho_a} g h_1' \right)^{-1/2}$	$F_2' = u_2 \left(\frac{\rho_1' - \rho_a}{\rho_a} g h_2 \right)^{-1/2}$

によって定義される F が、 $F > 1$ の場合に跳水現象が生じることがよく知られている。先にのべたように、 $F_1 \gg 1$ したがって $F > 1$ であることから、領域 ② の下流部で跳水が生じて跳層面が下方に移動することになる。

跳水領域より下流の流れの状態は、放水の条件のいかんによって、図-8 に示す二通りのパターンが存在しうる。Jirka と Harleman は、この二つの流れのパターンが存在しうる限界条件について検討し、図-9 の関係があることを示している。

領域 ④ は上層と下層で流れの方向が逆になる密度成



(a) 安定状態 (b) 不安定状態

図-8 温水噴流の安定性

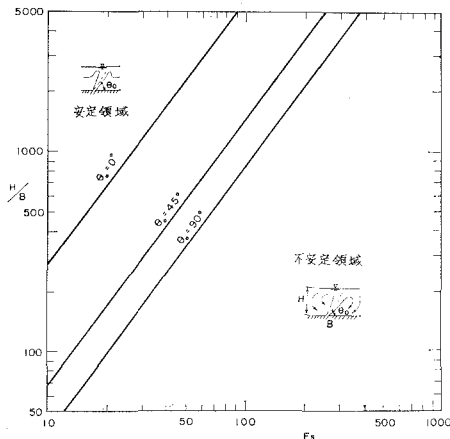


図-9 温水面層流の安定性

層流存在するいわゆる far-field に属する水域である。上層には浮力をうける温水流が流れ、下層には温水噴流内への冷水の連行加入に伴って誘起される放水口の方向に向う流れが存在する。

領域 ①, ②, ③ で構成される“near-field 領域”では放流水の水温低下は混合希釈によって支配される。また、領域 ④ の“far-field 領域”では主として水面における大気中への熱放出と自然水域中の乱れによって水温が低下していくことになる。

3. 水中温水噴流の現地実測例

温排水に関する水理現象を解明するためには、数値シミュレーション、水理模型実験や理論解析等の手法と共に、現地観測がきわめて重要な役割を果たすことは広く知られている所である。表層放流の場合については、わが国においても相当な技術的蓄積があり、各地の火力・原子力発電所における水温分布の現地実測結果がまとめられつつある。一方、水中放流式放水口については、わが国のいくつかの発電所で計画中であると伝えられるものの、実際に操業されているものはない。米国ではこの方式の歴史が古く、したがって実測資料の蓄積も多いようである。たとえば、カリフォルニア沿岸で現在運転中のサン・オノフレ1号炉 (PWR, 出力 450 MW, 1964 年完成) では、図-10 に示すような鉛直単管放流方式を

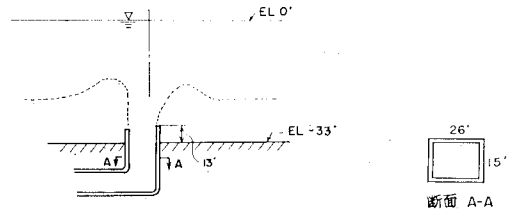
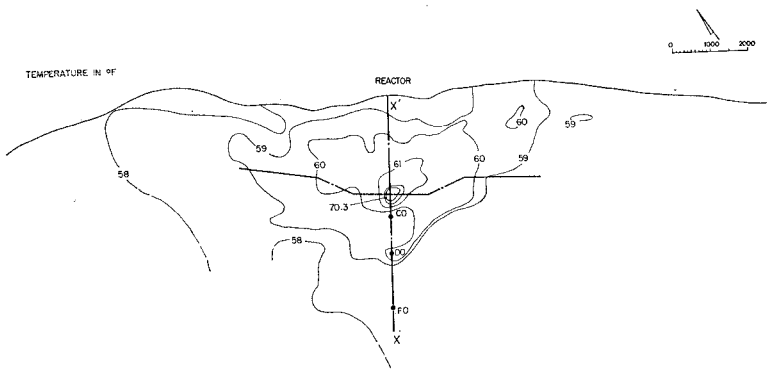


図-10 サン・オノフレ1号発電所放水口略図

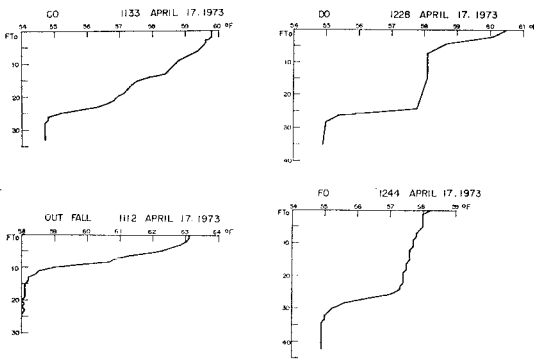
採用し、隔月ごとに水温分布等を測定して州政府に報告している。図-11, 図-12 は 1973 年 4 月の実測例を示すものである。測定時の発電所運転条件および水温が上昇する水面積をまとめると表-2 のとおりである。なお、測定時の冷却水流量は 350 000 gal/min である。

表-2 サン・オノフレ1号炉における海水温の変化

出力 (MW)	450
潮位 (ft)	4.2
海の自然表面水温	58
復水器通過時の水温上昇 ΔT	18
水温 $1^\circ F$ 上昇位置の最大距離 (ft)	5 000
水温 $1^\circ F$ 上昇の水面積 (ft ²)	505
水温 $2^\circ F$ 上昇位置の最大距離 (ft)	2 900
水温 $2^\circ F$ 上昇の水面積 (ft ²)	162
水温 $3^\circ F$ 上昇位置の最大距離 (ft)	1 350
水温 $3^\circ F$ 上昇の水面積 (ft ²)	26
水温 $4^\circ F$ 上昇位置の最大距離 (ft)	400
水温 $4^\circ F$ 上昇の水面積 (ft ²)	5



図—11 サン・オノフレ1号発電所温排水時の水温水平分布



図—12 サン・オノフレ1号発電所水温の鉛直分布

現在、この発電所に隣接してサン・オノフレ2号炉、3号炉（おのおの PWR, 出力 1100 MW）が建設中であるが、この両発電所では放水口形式として、多孔管放水口を採用することになっている。この形式の採用の理由として、一つは発電所規模の大型化と、もう一つは、温排水の規制に合致させるための努力とがあげられる。

カリフォルニア州では、サン・オノフレ1号炉が完成したのちに発電所を対象とした温排水基準を設けて、1000 ft×1000 ft の混合領域の外側水域では $\Delta T \leq 4^\circ F (2.2^\circ C)$ の条件を満たすべきことを要求した。同発電所1号炉では、表—2 に示したように、 $\Delta T = 4^\circ F$ の水面積は放水口のごく近い部分に限られており、また $\Delta T = 4^\circ F$ 以上に水温が上昇する層の厚さは、水表面部の比較的うすい、つまり、2m 以下の層部分に限られており、州規制にてらして特に問題となる点はない。しかし、2号、3号炉では、冷却水量が大幅に増加するために、1号炉と同形式の放水口の採用が不可能となり、検討の結果、多孔管放水口を採用することになったものである。いまの計画では、ノズル数を 64 個として、放流方向を水平に対して 20° 上向きにすることになっている。なお、この 20° という放水角度は、希釈混合を有効にすすめるために好

ましい角度と目されている。

おわりに

本報告は、昨秋渡米の折、米国環境庁 Shirazi 博士、MIT の Harleman, Stolzenbach 両教授および Hirst 博士、CIT の Brooks 教授、Bechtel 社 Ryan 博士、南カリフォルニア電力等を訪問、討論した内容を基にまとめたものである。筆者の思い違いの点もあろうかと危惧して

いるが各位の御指摘を願うものである。上記の方々の親切な討論に心から謝意を表したい。また、アポイントメントの面でも多くの方々の力をおかりしたが、特に、東京工業大学日野幹雄教授、東京大学玉井信行助教授に面倒をお願いした。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) Riesbol, H.S. (1972): Zone of mixing for Kahe power plant, Testimony of Department of Health, Public Hearing.
- 2) 日野幹雄・大西外明・羽生正範 (1974): Deardorff モデルによる乱流のシミュレーション, 第 18 回水理講演会講演集.
- 3) 日野幹雄・大西外明・羽生正範 (1975): 水中温水噴流の数値シミュレーション, 第 22 回海岸工学講演会論文集.
- 4) Koh, R.C.Y. and Fan, L.N. (1970): Mathematical models for the prediction of temperature distributions resulting from the discharge of heated water in large bodies of water, EPA Water Pollution Control Research Series, 16130 DWO.
- 5) Cederwall, K. (1971): Buoyant slot jets into stagnant or flowing environments, W.K. Keck Lab. for Water Res. and Hydro. Report No. KH-R-25. CIT.
- 6) Shirazi, M.A. and Davis, L.A. (1972): Workbook on thermal plume prediction, Vol. 1, Submerged discharges. EPA Water Pollution Control Research Series, 16130 FHH.
- 7) Liseth, P. (1970): Mixing of merging buoyant jets from a manifold in stagnant receiving water of uniform density, Hydr. Eng. Lab. CIT. Rep. No. HEL 23-1.
- 8) Anwer, H.O. (1969): Hysham power station model study of outfall, Report No. Ex 429. Hyd. Resr. St. Wallingford.
- 9) Jirka, G. and Harleman, R.F.: The mechanics of submerged multipoint diffusers for buoyant discharge in shallow water, Ralph M. Parsons Lab. MIT. Rep. No. 169.
- 10) Abraham, G. (1963): Jet diffusion in stagnant ambient fluid, Delft Hyd. Lab. Publ. No. 29.