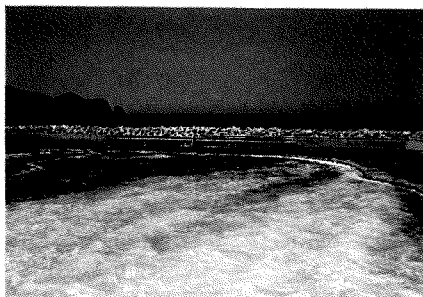


原子力発電所の稼働状況による温排水拡散域の違い

和田 洋 藏



高浜原子力発電所を対象に、温排水量や放水方式の違いによって温排水の拡散状況がどの様に異なるかについて検討した。各観測点における基準水温（環境水温）からの上昇温度によって温排水拡散域を判断した。温排水量の増加に伴って、内浦湾口から北東へ温排水拡散域が拡がり、拡散域内での水温が高くなった。また、各観測定点での温排水の出現確率も高くなった。原子炉の3機稼働時において放水方式の違いによる温排水の拡散状況をみると、表層放水方式の2機稼働時の方が内浦湾内での温排水の出現確率が高くなったが、湾外での拡散面積は深層放水方式2機稼働時の方が大きくなった。

関西電力高浜原子力発電所は、京都府舞鶴市に隣接する福井県高浜町に立地しており、現在加圧水型軽水炉1～4号機が営業運転中である。このうち、1、2号機では有孔斜堤排水口による表層付近からの放流（表層放水）方式、3、4号機では沿岸パイプによる約10m深からの水中放流（深層放水）方式により温排水が放出されている。高浜発電所では音海半島基部東側の高浜湾に設けられた取水口から取水し、西側の内浦湾へ放水しているが、復水器を通過し7～8℃程度昇温した温排水は、降温しながら内浦湾内から湾外へ拡散する。温排水の拡散する内浦湾内外では定置網や採貝・採藻など様々な漁業が営まれており、原子炉から放出される温排水が魚介類の生息環境やそれらを対象とする漁業へ与える影響について懸念されている。

京都府立海洋センターでは、この海域での温排水の拡散状況を調べるために、1985年4月から現在に至るまで年4～11回の頻度で内浦湾湾口部および湾外においてCTD観測を実施してきた。その結果、内浦湾外での温排水は北ないし北東方向へ拡散していることが多く、周辺海域の表層水温に比べ1℃以上昇温した海域が湾口から約3km沖合でもみられる場合のあることなどが明らかにされてきた（昭和60年度～平成6年度高浜原子力発電所に係る温排水影響調査結果報告書、1986～1995、京都府）。

近年、様々な社会的事情により原子力発電所の新規立地が困難な状況にあり、既設の発電所に原子炉の増設される事例が多い。その際には、温排水放水量の増加に伴い、温排水拡散域が拡大したり、拡散域内での水温がより高くなったりすることが予想される。また、発電所からの温排水の放水方法には原子炉ごとに様々な方式が用いられていて、発電所の設計時にはシミュレーションによる拡散予測などが行われている（須藤ほか、1981；日本水産資源保護協会、1974）。しかし、異なった放水方式による温排水の拡散状況について、実際の観測値に基づいて解析した報告

は少ない。ここでは、高浜原子力発電所を対象に、原子炉の稼働状況および放水方式の違いによって温排水の拡散範囲や対象水域との水温差がどの程度異なるかについて検討した。

方法

海洋観測資料 今回の報告に用いた資料は、1985年4月から1997年4月までの期間に年4～11回の頻度で京都府立海洋センター所属の調査船平安丸（228トン）により実施された延べ116回の高浜原子力発電所温排水影響調査に基づくものである。調査では、Fig. 1に示された内浦湾湾口部と湾外の25定点および高浜湾側の取水口前面の定点（Stn. 26）において、CTD（Niel Brown Mark III B）により水深20mまでの水温・塩分を測定した。なお、Stn. 25から観測を開始し、Stn. 24の観測終了までに要した時間は3～4時間であった。

基準水温の定義 温排水の拡散域を判断する際の基準水温（環境水温または自然水温）には（1）温排水の影響を受けない、できるだけ近接した海域の水温または（2）取水水温（復水器入口水温）が一般に用いられている。そのほか、放水口水温（復水器出口水温）を用いて水温の降下状況から温排水拡散域を判断する場合もあるが、複数の原子炉が設置されている発電所では原子炉ごとに復水器出口の水温が異なるので、基準水温を一義的に決定できない。高浜発電所の場合には、取排水がそれぞれ別の湾から行われており、取水水温を基準水温とするには不適と考えられる。ここでは、調査海域の西側に位置する由良川系水の影響を受けやすい定点（Stn. 25）を除く内浦湾外の9定点（Stn. 16～24）での表層水温値のうち最高値と最低値を除く7定点の平均値を基準水温として取り扱った（Fig. 1）。

原子炉の稼働状況 高浜原子力発電所1～4号機におけ

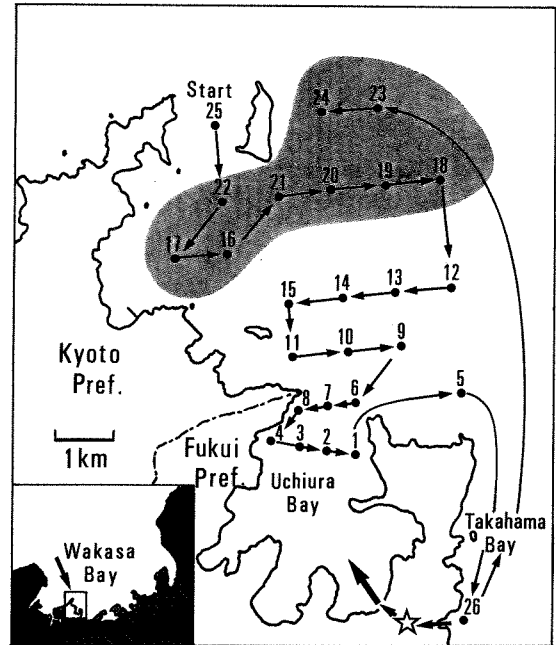


Fig. 1. Map showing the survey area with 26 CTD observation stations (solid circles). A Survey course is marked arrows. The shaded zone shows the area where the standard sea surface temperature (SSST) is calculated. A star shows Takahama nuclear power plant.

る各原子炉の出力（稼働率）、温排水量、取水口水温などの発電所の稼働状況については関西電力株式会社の資料に基づいた。高浜原子力発電所の1号機と2号機は同型炉で、出力（826 MW）、放水量（1機あたり約 51.1 m³/s）が同じで、共通の放水口による表層放水方式が用いられている。3号機と4号機も同型炉であり、出力（870 MW）、放水量（1機あたり約 61.7 m³/s）が同じで温排水は共通

Table 1. Characteristics of the nine discharge patterns.

Pattern	Number of operating unit			Capacity (MWe)	Quantity of flow (m ³ /s)	Frequency of observations
	No. 1 or No. 2	No. 3 or No. 4	Total			
A	2	2	4	3,392	225.6	17
B	1	2	3	2,566	174.5	37
C	2	1	3	2,522	163.9	11
D	0	2	2	1,740	123.4	1
E	1	1	2	1,696	112.8	8
F	2	0	2	1,652	102.2	0
G	0	1	1	870	61.7	1
H	1	0	1	826	51.1	0
I	0	0	0	0	0	0

の放水口から深層放水される。そのため、原子炉の稼働・放水のパターンは Table 1 に示す A~I の 9 つに分けられる。すなわち、4 機稼働 1 パターン、3 機稼働 2 パターン、2 機稼働 3 パターン、1 機稼働 2 パターンと全機が稼働しない場合の 1 パターンである。ただし、出力調整運転時とバイパスを使用して希釈水を放水している場合はこれらのパターンに含めず、今回の解析から除外した。

結果

基準水温 本報告で環境水温として取り扱った内浦湾外の 9 定点における基準水温と高浜湾にある取水口前面の定点 (Stn. 26) での表面水温との差および取水口水温との差の頻度分布をそれぞれ Fig. 2 に示した。基準水温と取水口前面での表層水温を比べると、平均値では取水口前面の水温が約 0.2°C 高く、最大で 1.6°C の差がみられた。調査期間中 116 回の調査で両者の水温差が 0.5°C 以内であったのは約 71%、 1°C 以内では約 95% を占めていた (Fig. 2)。一方、関西電力株式会社が測定している取水口水温との比較では、水温差の平均値は 0.01°C と小さかったものの、両者の水温差の最大値は 2.5°C あり、取水口前面の表層水温とを比べた場合より大きな水温差がみられた。この場合に、水温差が 0.5°C 以内であったのは全調査の約 64%、 1°C 以内では約 91% を占めていた。すなわち、内浦湾口前面海域の表層水温と高浜湾の表層水温とには、5~10% の頻度で 1°C 以上の水温差のあることが判った。

放水パターン 原子炉の稼働・放水の 9 パターンを温排

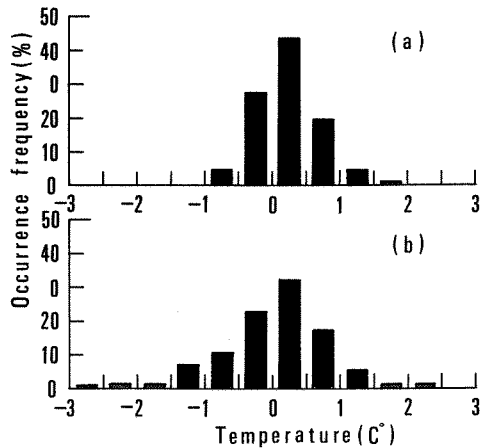


Fig. 2. Frequency distributions of temperature difference. (a) The standard sea surface temperature (SSST) minus observed value of sea surface temperature at Stn. 26. (b) SSST minus cooling water temperature.

水放水量の多いものから順にパターン A~I とした (Table 1)。1~4 号機がすべて稼働する際の放水パターンであるパターン A の場合には、調査期間中 17 回観測された。深層放水方式を用いている 3、4 号機が両方稼働し、表層放水方式である 1、2 号機のうち 1 機のみが稼働する際の放水パターン B 時の観測が最も多く 37 回の観測が行われた。また、1、2 号機のうちの 1 機と 3、4 号機の両方が稼働するパターン C 時の観測は期間中 11 回行われた。パターン B とパターン C ではどちらも稼働する原子炉は 3 機であるが、温排水の放水量は前者の方が 6% 程度多かった (Table 1)。

2 機稼働時の放水パターンには 3 通りあるが、観測が行われたのは表層放水方式 1 機と深層放水方式 1 機のパターン E の場合に 8 回、深層放水方式 2 機のみを放水パターン D には 1 回だけであった。また、深層放水方式である 3、4 号機のうち 1 機のみが稼働するパターン G では観測

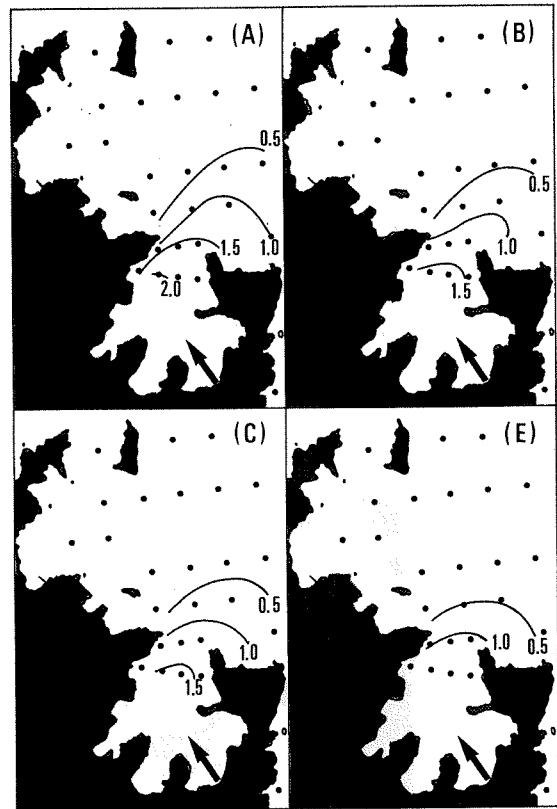


Fig. 3. Diffusion areas of thermal effluent in varied discharge pattern (shows Table 1). Contours show the mean of a temperature difference between the SSST and the surface temperature at each station in varied pattern.

が1回だけ行われた。

各放水パターンにおける温排水の拡散 各定点における表面水温と湾外基準水温との差の平均値をA, B, C, Eの各放水パターンごとに取りまとめ Fig. 3 に示した。基準水温に比べ平均値で2°C以上の昇温域は、4機稼働時のパターンAでは内浦湾内にみられたが、他のパターンではみられなかった。平均値で1.5°C以上の昇温域は、パターンAでは湾口部までみられたのに対して、3機稼働時のパターンBとパターンCの場合には内浦湾内のみのみみられ、2機稼働時のパターンEでは内浦湾内にもみられなかった。1°C以上の昇温域については、パターンAでは湾口から北東へ約1.5 km 沖合まで、パターンBとパターンCでは1 km 程度沖合までみられたが、パターンEでは湾口付近までであった。さらに、平均値で0.5°C以上の昇温域は、内浦湾口から北東方向へ広がっており、パターンAで約3 km、パターンBとパターンCで約2 km、パターンEでは約1 km 沖合までそれぞれみられた。

3機稼働時におけるパターンBとパターンCとを比べると、湾内における表層での1.5°C以上の昇温域にはほとんど違いがみられなかったものの、湾外での1°C以上または0.5°C以上の昇温域はパターンBの方がやや広がっていた。

深層放水方式である4号機が1機のみ稼働していたパターンG時の観測は、1991年4月1日に1回だけ行われた。この観測時には0.5°C以上の昇温域が内浦湾内のみのみみられ、湾外への温排水の拡散はなかった (Fig. 4)。

上記の様に、各定点における基準水温からの上昇温度の平均値は、原子炉の稼働機数が増えるほど高くなっていた。このため、基準水温との水温差を2, 1.5, 1, 0.5°C



Fig. 4. The diffusion of thermal effluent at pattern G (Only No. 4 site was operated) that was observed in April 1, 1991.

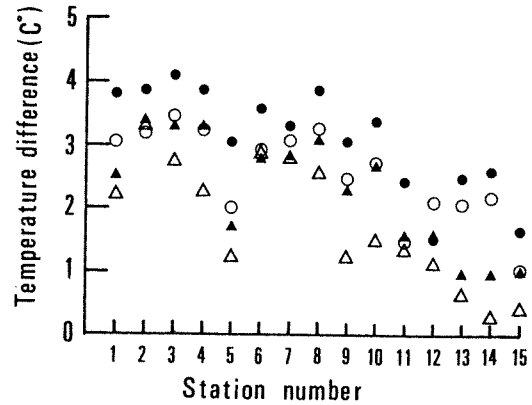


Fig. 5. Maximum value of temperature difference between the SSST and sea surface temperature at each station (●: pattern A; ○: pattern B; ▲: pattern C; △: pattern E).

とした時、それぞれの温度での昇温域は、内浦湾内から湾外北東方向へと拡がり、原子炉の稼働機数または温排水量の増加につれて昇温域の面積も大きくなった。また、各パターンとも湾口から北東へ2~3 km 離れると約1°C 降温していた。

各定点における基準水温との差の最大値を放水パターンごとに Fig. 5 に示した。水温差の最大値は、パターンAの場合、内浦湾内の定点 (Stns. 1~4) で3.8~4.1°C、湾口部の定点 (stns. 6~8) で3.3~3.9°C、湾口前面 (Stns. 9~11) では2.4~3.4°C、湾外 (Stns. 12~15) では1.5~2.6°Cであった。パターンBおよびパターンCでは、内浦湾内で2.6~3.5°C、湾口部では2.8~3.3°C、湾口前面では1.5~2.7°Cの水温差の最大値を示した。パターンEの場合には、内浦湾内で2.3~3.3°C、湾口部では2.6~2.9°C、湾口前面では1.3~1.5°Cとなっていた。すなわち、いずれの放水パターンにおいても、基準水温との差の最大値は湾内から湾口、湾口前面、湾外へと順に値が小さくなっており、湾内と湾口から2~3 km 離れた湾外の定点とでは2°C程度の違いがみられた。パターンBとパターンCとを比較すると、大部分の定点での値に顕著な違いはみられなかったが、湾内西側の Stn. 1 で約0.5°C、湾外の Stn. 12 でも約0.5°C、Stn. 13 と Stn. 14 では1°C程度パターンBの方が値が大きかった (Fig. 5)。

内浦湾外において等温線が閉じる海域の境界水温は、環境水温 (基準水温) より0.5~1.0°Cの昇温域と一致することが報告されている (須藤ほか, 1981)。そこで、各定点において1°C以上の昇温がみられる確率を各放水パターンごとに取りまとめ Fig. 6 に示した。原子炉の稼働機数の増加に伴って、高い確率での出現範囲が広がる傾

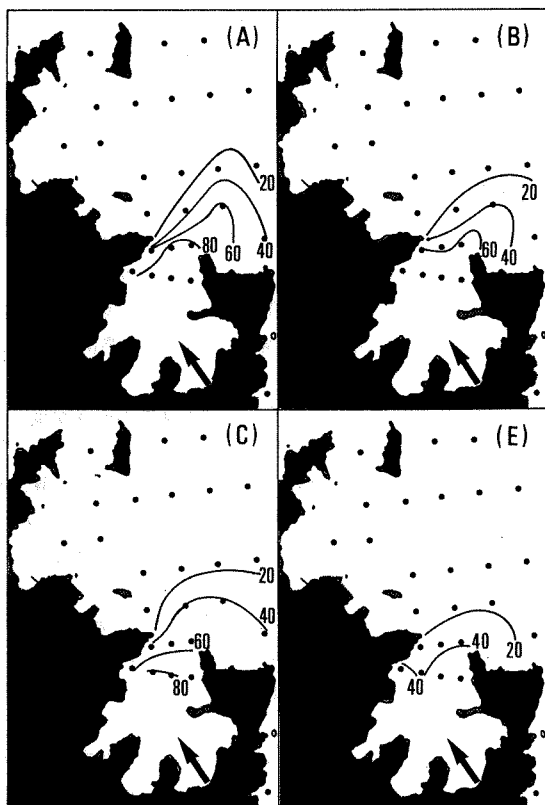


Fig. 6. Probability distribution of a rising more than 1 degree in comparison with the SSST in varied pattern. Numeral s show percent.

向がみられた。特にパターンAでは湾口部まで80%以上の確率の出現点がみられた。3機稼働の場合の2つのパターンを比べると表層放水方式の1, 2号機が2機とも稼働するパターンCでは80%以上の確率の点が湾内にみられたのに対してパターンBではみられなかった。

以上の結果から、原子炉稼働機数の増加すなわち温排水量の増加と温排水拡散域との関係については、次の様にまとめられた。各観測点における基準水温からの上昇温度をみると、温排水量の増加に伴って平均値、最大値とも高くなっていった。また、各観測点で1°C以上昇温する確率も高くなった。3機稼働時における温排水の拡散については、放水方式によって違いがみられた。すなわち、表層放水方式の1, 2号機が2機とも稼働する場合の方が内浦湾内において1°C以上昇温する確率が高くなったが、深層放水方式の3, 4号機が2機とも稼働する場合の方が湾外での温排水拡散域が広がる傾向がみられた。

考察

温排水拡散域については、一般に(1)閉じた等温線で囲まれた水域であること(2)塩分などで指標される水塊の性質が周辺海域と異なる水域であること(3)周辺海域の水温(自然水温または環境水温)より昇温した水域であることなどにより判断されている。等温線が閉じる範囲により温排水拡散域を求めるには、基準となる境界水温を観測中に決定しなければ、かなり多くの観測点が必要になる。また、予測される拡散範囲に比べ調査範囲を予め広く設定しなければならない。広範囲の調査には多くの労力を要するし、観測時間が長くなるほど同時性を損なうことになる。一方、高浜原子力発電所を対象にしたこれまでの温排水拡散状況調査では、表層における高温域と高塩分域とに良い対応のみられる場合が多く観測されている(昭和60年度~平成6年度高浜原子力発電所に係る温排水影響調査結果報告書, 1986~1995, 京都府)。これは、内浦湾内に温排水が拡散する過程で、表層に比べ塩分の高い下層の水塊と鉛直混合が起きるためである。しかし、このような対応関係が常にみられるとは限らない。高浜発電所の場合、それぞれ異なる湾から取水と放水が行われている。そのため、取放水される水の性質によっては、水塊構造による分析が温排水の拡散範囲を確認するのに有効でない場合もある。

温排水の拡散状況調査において、どこまでの範囲を対象にどのような調査点で観測を行うかについては、様々な条件により制約を受けることになる。京都府では従来から26定点でのCTD観測を行っているが、この調査海域では温排水拡散域を十分に覆い切れていない場合もある。しかし、今回解析を行ったように、基準水温と比較した各観測点での統計値を用いれば、少数の観測点の資料からでも温排水の出現頻度や昇温の度合いを示すことができる。温排水拡散調査はいくつかの目的を持って実施されているが、各海域における平均的な水温の特性を知る上では、温排水の拡散面積を調査ごとに直接求める方法に比べて実用的な方法の一つであると考えられる。

温排水拡散域を判断する際の基準水温として取水口での水温値を用いている報告も多くみられる。しかし、今回の解析結果では取水口での水温と放水口側とに1°C以上の差がある場合もあった。温排水の周辺環境に与える影響を把握する意味では、温排水の拡散する放水口側での環境水温を用いる方が適切であると考えられる。また、環境水温に比べ高温の水を取水することは、復水器での水温の上昇に加えて、より高温の温排水が放水されることになり、温排水の拡散範囲や上昇温度が予測値(平野, 1966;

平野, 1971; 新田, 1966) を越えることにも繋がり注意を要する。

表層放水方式と深層放水方式とを比較した場合、内浦湾内では前者の方が、湾外では後者の方が表層における温排水の拡散がより顕著になる傾向がみられた。深層から温排水を放水する方が、相対的に密度の低い温排水が表層へ浮上する過程において、より鉛直混合が大きくなると考えられ、湾内での拡散に違いがみられたものと想定される。須藤ら(1981)は、内浦湾内では鉛直拡散、湾外においては水平拡散が主となって温排水が拡散すると報告しており、上記の想定を支持する。深層放水方式である3、4号機の方が1、2号機に比べ放水量が多く、湾外における両者の拡散域の違いは、温排水量の差による可能性も考えられる。

内浦湾の湾口部は狭く、水平拡散が起こりにくい。深層放水方式である3、4号機の増設・稼働に伴い、内浦湾口付近でも水深5m程度まで温排水の影響がみられる場合も観測されている。深層放水方式では、表層放水方式に比べ鉛直混合が大きくなるので、より深くまで温排水の影響を受ける。温排水の下層への広がりについては、今後さらに検討を加える必要があると考えられる。

温排水の拡散する過程において、排出される海域の海洋構造や潮汐、海上風など影響を受けることが知られている。しかし、今回の解析結果によれば、温排水拡散域の広がりや拡散域での昇温は、排出される温排水量の増加に

伴って顕著にみられた。これら諸条件が温排水の拡散に与える影響については、同じ稼働条件での事例を収集することによって解析を進める必要がある。

文 献

- 平野敏行. 1966. 熊野灘沿岸開発に伴う芦浜付近の温排水拡散について, 原子力発電所建設が熊野灘沿岸海域の環境及び生物の生産に及ぼす影響予察報告, 三重県熊野灘沿岸工業開発調査委員会漁業関係専門部会: 77-81.
- 平野敏行. 1971. 閉鎖的海湾における温排水拡散分布の考察, 水産海洋研究会報, 18: 72-74.
- 新田忠雄. 1966. 熊野灘沿岸開発に伴う温排水の拡散, 原子力発電所建設が熊野灘沿岸海域の環境及び生物の生産に及ぼす影響予察報告, 三重県熊野灘沿岸工業開発調査委員会漁業関係専門部会: 75-76.
- (社)日本水産資源保護協会. 1974. 福井県若狭海域における原子力発電所温排水環境と漁業生産におよぼす影響に関する調査報告—内浦および大飯地先海域—: 1-136.
- 須藤英雄, 松川康夫, 益永典昭. 1981. 大量温排水に対する水産環境アセスメント総合調査, 昭和50~55年度総括報告書, I 海洋環境, 水産庁東海区水産研究所: 11-85.

Synopsis

Diffusion Patterns of Thermal Effluent from Nuclear Power Plants in Varied Operation Conditions

Yozo WADA

This paper deals with differences of warmed water diffusion between surface discharging system and submarine discharging system, discharged from the Takahama nuclear power plant having 4 sites (No. 1 and 2 being surface system and No. 3 and 4 submarine system) at the Uchiura Bay belonging to the Wakasa Bay, Japan Sea. Investigations of temperature were carried out in the sea of the Uchiura Bay and the adjacent area from April 1985 to April 1997.

In the case of surface discharge system, the warmed water spreaded out mainly at the surface layer on the inside area of the bay, and clear horizontal thermal-cline generally appeared in the boundary area between the warmed water and non-warmed water. On the other hand, in the case of submarine system, the end of the warmed water usually reached to outside of the bay and the thermal-cline was not strongly compared with the case of the surface system. These different results on the diffusion pattern between two discharging systems might depend upon the mixing process of the warmed water after discharged.