

外洋に面した沿岸部での温水放流に伴う 海水温分布の一実例

大 西 外 明*・小 西 勇*

1. ま え が き

最近、原子力発電開発の気運は急激に高くなり、その規模も次第に大型化していく傾向にある。これら大規模な原子力発電所では、大量の冷却水を必要としており、四辺海に囲まれたわが国では、海水は安定した冷却水供給源として用いられている。海水を冷却水として使用する場合、設計上の重要な検討事項として、波力や海底地形変動、洗掘等に対する構造物の安定性、漂砂対策、深層取水に関連した密度流の問題、復水器冷却後の放流温水の海水中における拡散、各種海生物に対する対策が考えられる。そのうちで、放流温水の拡散の問題は冷却水の再循環防止、漁業補償との関連上とくに重要な研究課題であることから、この面での研究も最近次第に多くなっているが、その研究方法は、理論解析や数値モデルによるものがほとんどであり、現地実測を基にした取り扱い扱いは、数少ないように思われる。この種の問題解決へのアプローチは、理論、実験、現地実測が相互に欠陥を補いつつ、なされなくてはならない。静穏な海域への放流は、比較的解析されやすいものと考えられるが従来の火力発電所におけるように港湾内で放流を行なう場合などがこの種のケースに近いものといえる。しかし原子力発電所は、周辺環境を放射能による被害から高度の安定に保つ必要から、遠隔地に設置されるケースが多く、冷却水の取放水も、常に恵まれた条件下のみで行なえるとはいえず、外洋から直接取放水する設計をとらざるをえないことが多くなっていくであろう。放流温水そのものは、原子力発電と火力発電とは、異なるところはないが、水深が深い静穏な港湾内等での温水拡散状況と、たとえば砕波帯が存在し、沿岸流がある海域でのそれとはその様相は大きく異なるものと予測される。東海発電所では、昭和 43 年 2 月から 44 年 2 月にかけて、約 1 年間にわたり、放水口周辺の海水温測定を実施したが、その結果は、従来あまり論じられていない複雑な海底地形と、沿岸流が存在する海域における一例として有意義な資料を提供するものと考えられる。また、東海発電所計画時には、冷却水再循環の問題は、沿岸流の分布状況より推定して、とくに問題はないものとして取り扱われたが、この点についても、上記調査は具体的な資料をわ

れわれに示してくれるものである。

2. 発電所の概要

東海発電所は茨城県東海村に、日本原子力発電（株）によって建設された日本初の原子力による商業用発電所であり、昭和 42 年 7 月に 166 000 kW の全出力運転を開始し、現在に至っている。当発電所の面している東海村海岸は、南北に直線的に延びる汀線を有し、汀線から 200 m 沖合までの範囲は、砕波高 1 m くらいの砕波帯となっている。この砕波帯部分の海底地形は、一般に、不安定で変動しやすく、台風などの大波浪が作用すると砂洲地形の変動が著しくなる。一方、汀線から約 400 m 離れた水深 6~7 m 地点から沖合では、異常波浪が発生しない限り地形変動を生じることはないとされている。このような地形の外洋から、直接冷却用循環水を取水するにあたり、取水口施設は、海底変動および漂砂等の影響の少ない、沖合 500 m、水深 9 m の海底に設けられ、海面下 5 m の地点から 15 m³/sec の海水を取水する設計となっている。取水口から取水された海水は、海底に埋設された直径 2.5 m、長さ 500 m の鋼管 2 条により導かれ、陸部水路、4 台の循環水ポンプ等を経て、復水器に達し、復水器冷却後の温水は汀線付近に設けた放水口から海洋に放流される。放流温水の再混入については、取水口位置が放水口から 500 m も離れており、かつ、海面下 5 m の地点から取水しているので、冷却水の水温には影響がないと考えられた。また、放流水は砕波帯部分で拡散され、汀線沿いの沿岸流によって流されるものとして、建設計画に際しては、とくに問題として取り上げるに至らなかった。

3. 調査計画

静穏な港湾内に比し、荒海において海水温を測定する場合には、その測定方法に非常に制約をうける。東海村海岸には、さきに述べたように汀線から約 200 m 沖合までの範囲には、常時、砕波帯が発生しており、観測船が立入るのは危険であり、不可能に近い。また、うねりが高いときには、砕波帯より沖合における観測を行なう場合であっても相当の危険が伴う。したがって海上の測定点は、陸側から測定のできる汀線沿いと、沿岸沿いの砕波帯を離れた沖合に選定し、かつ、測定を行なう場合

* 正会員 日本原子力発電（株）技術本部土木建築課

には、うねりの小さい時期を選ぶこととした。測定方法については種々検討してみたが、静穏な港湾内における測定方法のように、放水口周辺を密に、かつ、測定の同時性を重んずる方法で測定することには困難が多いと判断されたため、今回は調査の第1段階として温水が海中に拡散する大きな傾向を把握できるような測定を行なうこととした。また、調査期間は季節による水温変化を考慮して約1カ年間とし、2～3カ月の間隔をおいて、5回の測定を行なうこととした。

放流温水の拡散は、発電所の取排水量、気象、海象、海底変動等、種々の条件に支配されることが予想されるが、これらの要素をすべて満足させるような調査を行なうことは、技術的にも困難であるとみられたので、今回の調査は上記のように、温水が海中にどのように拡散するかという大きな目安をうることを主眼としているので、測定範囲を大きくとり、測定点の数は必要最少限にとどめた。

4. 調査方法

調査範囲は図-1に示すとおり、放水口を中心に、北側、久慈川寄りへ2.5km、南側、新川寄りへ2.5kmであり、沖合へは1.5kmの範囲である。測定点は放水口の近くでは間隔を狭く、離れるにしたがって広くし、海上に27点、汀線沿いには21点を設定した。またこの海域の海底の一般地形は図-2に示すとおりであり、碎波帯には砂洲地形が形成される。

海上の測点では水深1mごとの海水温を測定することとし、観測に際しては、観測船から、あらかじめ陸上

に設定した基準点を見通し、放水口位置にセットしたトランシットにより観測船を誘導し、海上部の測点位置を決定した。冷却用循環水の取水量と発電所出力との関係は、夏期と冬期によって異なり、ポンプ運転台数によっても違うのは当然であるが、海水温測定は、全出力運転時(166 000 kW, $Q=15 \text{ m}^3/\text{sec}$)もしくは、全出力運転に近い状態の続いた時期に実施することを原則とした。測定項目、器材および人員等を列挙すればつぎのとおりである。

測定項目 気温、湿度、風向、風速、水温、電気伝導度、色素および漂流プイによる流れの追跡

測定用器材

(i) 観測船(小型漁船)	2隻
(ii) SY式通風乾湿球温度計	1台
(iii) 風車型風程式風速計	1台
(iv) ET 3型電気温度計	4台
(v) EST 3型電気水質計	4台
(vi) 測深器	2台
(vii) トランシット	2台
(viii) トランシーバー	5組
(ix) 距離計	3台
(x) 巻尺、色素、プイ、信号用旗など	

観測班の編成

本部(放水口基点)	4人	} 計 14人
海上(観測船) 3人×2班	6人	
陸上(汀線沿い) 2人×2班	4人	

5. 測定時の状況および本海域の流れ等の特徴

海水温の測定は、昭和43年5月から昭和44年2月にかけて合計5回実施した。このほか昭和44年2月には、発電所停止中にリハーサルを兼ねた測定を試みた。また、昭和44年4月の調査では、うねりが高く途中で観測を中断せざるを得なかった。海水温測定時における発電所運転状況は、表-1に示すとおりである。表-1からわかるように、発電所の運転出力は、測定日の3日前にさかのぼっても、ほとんど変動がなく、使用水量もほぼ一定である。したがって、各回とも、温水は量的にも質的にも一定の条件で海中に放流されているものと考えられる。

つぎに、海水中の放流温水の拡散は、測定時の気象および海象状況に左右されることが予測されるが、各測定時における気象および海象状況は表-2に示すとおりである。測定に要した時間は2～4時間であるが、表-2からわかるように、風向、風速および気温は、いずれの測定時においてもほぼ一定しているので、このような条件下で測定した海水温の分布は、測定時間のずれがあるものとしても、ほぼ実際の状況を示すものと考えてよいであろう。

図-1 海水温測定点

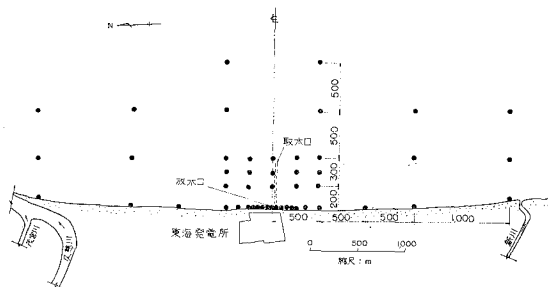


図-2 放水口付近の海底地形断面

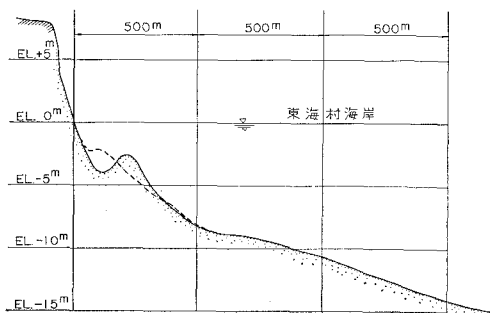


表-1 海水温測定時における発電所運転状況

測定 No.	測 定 日 時		運転出力 (kW)	使用水量 (m³/sec)	冷 却 水 温 度 (°C)			測定日前における使用水量 (m³/sec)		
	月 日	時 分			復水器入口	復水器出口	放 水 口	前 日	2 日 前	3 日 前
第 1 回	43. 5.25	8 : 40 ~ 13 : 00	155 000	9.5	16.6	26.7	26.1	9.5	9.5	9.5
第 2 回	43. 7.12	8 : 50 ~ 12 : 10	156 000	13.2	19.6	29.0	26.8	10.0	6.8	12.8
第 3 回	43. 9.13	6 : 40 ~ 10 : 00	118 400	13.3	21.0	29.5	28.8	14.0	14.5	14.5
第 4 回	43.11.29	8 : 30 ~ 11 : 00	165 000	10.0	18.8	30.1	25.4	9.8	9.7	9.7
第 5 回	44. 2.22	8 : 50 ~ 10 : 30	166 000	6.6	14.2	29.2	24.5	6.6	6.6	6.6

表-2 海水温測定時における気象および海象状況

測定 No.	測定月日	気象 (放水口にて観測)			潮位 (那珂湊観測所の記録)		備考
		気温 (°C)	風向	風速 (m/sec)	干(時分) = (cm)	満(時分) = (cm)	
第1回	43. 5.25	17 ~18	E~SE	3.2~5.8	8:04=11	15:14=120	海面やや静穏, 150 m 沖に砕波帯
第2回	43. 7.12	19.5~20.5	NE	4 ~5	12:00= 8	4:20=156	海面うねりあり, 200 m 沖に砕波帯
第3回	43. 9.13	19.5~22	NW~NNW	1.5~2.5	1:20=29	7:20=103	海面静穏, 30 m 沖に砕波帯
第4回	43.11.29	10 ~12	NW~NNE	2 ~6	4:50=56	12:00=112	海面やや静穏, 180 m 沖に砕波帯
第5回	44. 2.22	0.4~ 0.7	NE~NNE	3 ~4	13:30=33	6:30=123	海面うねりあり, 400 m 沖に砕波帯

東海発電所放水口からは、海水温より 8°C 程度高い 10~15 m³/sec の温水が放流されているが、温水放流に伴う海域の水温分布を理解するためには、本海域沿岸部の流れの特徴について知る必要があると考えられるので、以下その点について概述しておこう。

東海村海岸沖を占める海水は「くろしお」、「おやしお」および津軽海峡をまわる「対馬暖流」の3つの海水と陸水の混合したものであり、これらの水塊の混合比は季節によって異なる。また、沿岸部では久慈川、新川、那珂川などの陸水の影響を大きく受ける。陸水は海水に比して密度が小さいので、海に流入すると表面に浮かび、適当な深さに躍層のできることが多いが、躍層の深さは流入する河川流量や拡散の大小によって異なる。また、沿岸水は外洋と同様、各種の気象要素のほか、潮流、水深、風などによる上昇および下降流の影響を受け、陸上における気温、地温の影響も考えられる。

本間・堀川¹⁾によれば、東海村海岸沖合では、北ないし南寄りの風があると、たとえ卓越波浪が汀線に直角に入射するうねりであっても、その上に重複する風波のために、風向きと一致した沿岸流が生ずる。風波の著しい場合には、汀線から沖合約 150 m 付近までの磯波帯一帯に流れが分布するが、弱い風波の場合には、うねりのあるなしにかかわらず、流れは主として汀線付近に限られる。この沿岸流は、本間・堀川が昭和 33 年 11 月 8 日、波高 70 cm、風向 NE、風速 8 m/sec の時に、過マンガン酸カリを投入して調査した結果、流向は吹送方向と一致し、流速は 30~50 cm/sec であり、この流れに投入された過マンガン酸カリは、1 200 m の長距離を走る間、沖合方向への拡散はほとんど行なわれないこと、すなわち、流れは明確な境界を有し、その境界を通して沖合との間に活発な質量交換は行なわれないことが知られた。また谷川²⁾が 1963 年から 1966 年の 4 年間で、東海村の海岸より 700 m~1 400 m 沖合で測定した結果では、こ

表-3 東海村外洋域における表面海水温

月	表面水温 (°C)	月	表面水温 (°C)
1 月中旬	12 ~ 13	7 月中旬	15 ~ 18
2 月 "	10 ~ 11	8 月 "	23 ~ 24
3 月 "	7 ~ 10	9 月 "	21 ~ 22
4 月 "	8 内 外	10 月 "	18 ~ 19
5 月 "	12 ~ 13	11 月 "	14 ~ 15
6 月 "	15 ~ 17	12 月 "	13 ~ 14

(東海区水産研究所漁況月報による)

の海域の海流の流向はほとんど南北方向に集中し、流速は 10 cm/sec オーダーのものが大半を占めており、北流の場合は、流速が南流のより大きくなる傾向があり、また、岸側 700 m の方が 1 400 m におけるものより流速が大ききことを示している。また、東海村外洋域における海表面の水温は、1959~63 年の 4 年間の資料によると表-3 のとおりである。

6. 観測結果と考察

今回の観測は、いずれも比較的海面の静穏な時期に行なわれたことから、どの結果をとってみても、特異な現象の現われたものではなく、温水は海表面を扇状に広がり、ある限られた範囲で海水固有の水温近くまで低下する。海水固有の水温は比較的小さい海域であっても 1°C 前後のバラツキがあり、放流温水が影響をおよぼすはっきりした境界を見出すことは、3. 項の調査計画で述べたように、この種の調査では無理がある。

したがって、ここでは、東海村海岸の固有水温と考えられる平均的海水温より 1°C 程度高いと考えられる範囲を温水による影響範囲と考えることとした。ここで、各回の観測により得られた結果を大まかに述べておこう。まず、昭和 43 年 2 月 29 日、発電所停止中に行なった場合の海水温分布は沿岸部全域にわたり、平面的にも鉛直的にも 9°C 前後の値を示し、久慈川河口部で 2°C 程度低い値を示した。昭和 43 年 7 月 12 日に実施した第

2回の測定結果では温水の拡散範囲が狭く、碎波帯付近の沖合で、ほぼ海水固有の水温にまで低下していた。また、昭和44年2月22日に実施した第5回の測定結果では、うねりが高く、一部の測定を省略したので、水温分布図の作成には不適当であった。したがって、ここでは第1回、第3回および第4回の測定結果を主体にして述べることにする。

第1回(昭和43年5月25日)、第3回(昭和43年9

図-3 海面下水深0mにおける水温分布
(第1回測定: 昭和43.5.25)

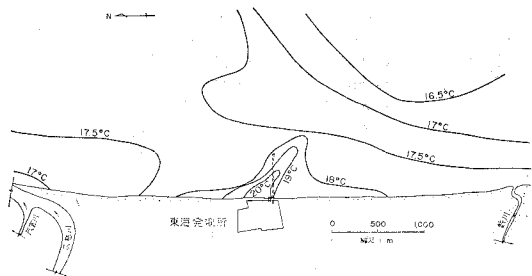


図-4 海面下水深2mにおける水温分布
(第1回測定: 昭和43.5.25)

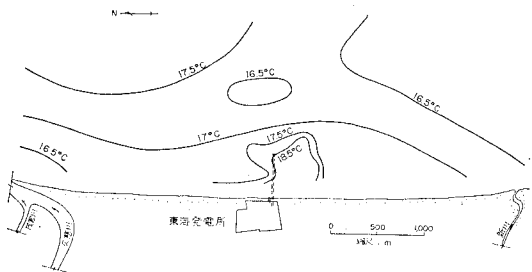


図-5 海面下水深3mにおける水温分布
(第1回測定: 昭和43.5.25)

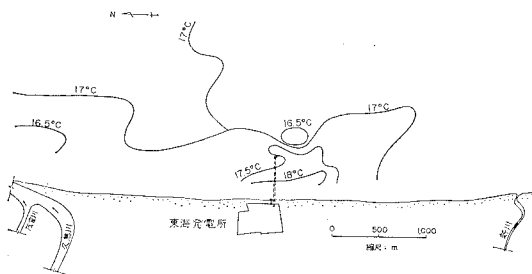


図-6 海面下水深0mにおける水温分布
(第3回測定: 昭和43.9.13)

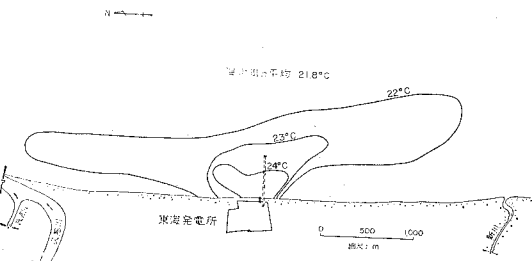


図-7 海面下水深2mにおける水温分布
(第3回測定: 昭和43.9.13)

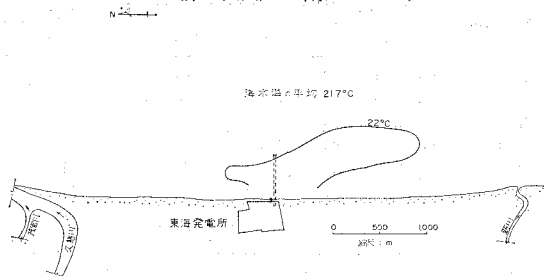


図-8 海面下水深3mにおける水温分布
(第3回測定: 昭和43.9.13)

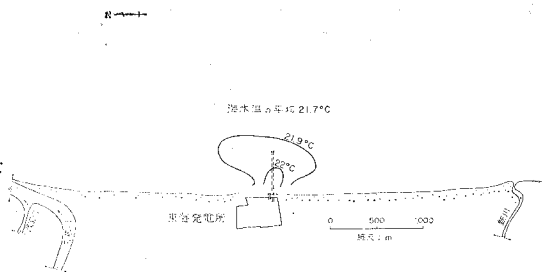


図-9 海面下水深0mにおける水温分布
(第4回測定: 昭和43.11.29)

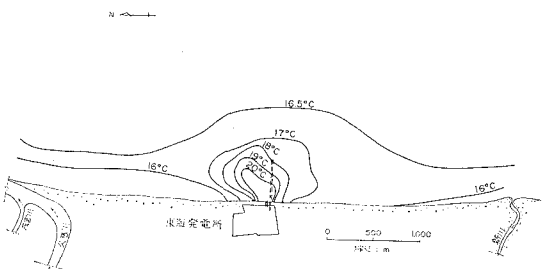


図-10 海面下水深2mにおける水温分布
(第4回測定: 昭和43.11.29)

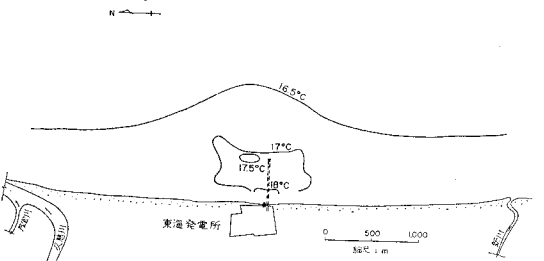
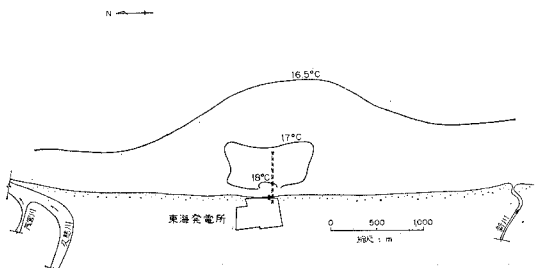


図-11 海面下水深3mにおける水温分布
(第4回測定: 昭和43.11.29)



月 13 日) および第 4 回(昭和 43 年 11 月 29 日)の測定結果から、海面下 0 m, 2 m, 3 m の水温分布図を描けば、図-3 から図-11 までに示すとおりである。

温水の放流が行なわれている場合、放水口から 500 m 程度離れた測点における海水温の鉛直分布は、一般に、つぎのようになっている。すなわち、海面下 0 m から 1 m までの上層における水温は一定しており、海面下 1 m から 3 m にかけて直線的に下がり、海面下 3 m で海水固有の温度に近い値となる。水深に 1 m の余裕を見込めば、海面下 4 m 以深には温水の影響がおよばないと判断できる。当発電所の取水口は、海面下約 5 m のところに開口し、取水を行なっているので放流温水の再混入はないものと考えてよいであろう。また、取水口付近の測点における海面下 4~5 m の海水温と復水器入口温度がほぼ同じ値を示していることから、取水口から海面上層の温水が引き込まれることは全くないことを示しているものと考えられる。一方、温水放流の影響が最も顕著に現われるのは海表面であるが、図-3、図-6、図-9 にみられるようにその影響範囲は放水口から 500~600 m 程度であると判断される。

海上における温水分布と同様に、第 1 回、第 3 回および第 4 回観測の汀線沿いの温度分布を示せば、図-12~図-14 のとおりである。これらの図からわかるように、汀線沿いでは、500 m 付近で温水の影響は消滅し、それを離れる地点では、海水固有の水温と同程度のバラツキを示した。また、汀線沿いの測定区域内には各種の雑排

図-12 汀線沿い水温分布 (第 1 回測定: 昭和 43.5.25)

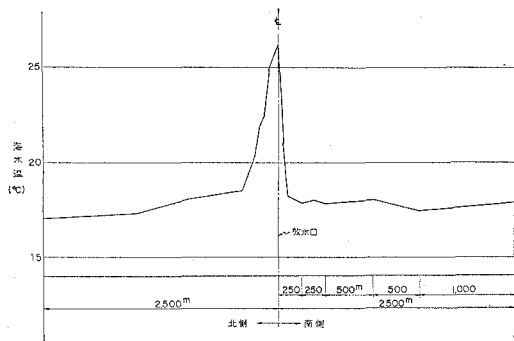


図-13 汀線沿い水温分布 (第 3 回測定: 昭和 43.9.13)

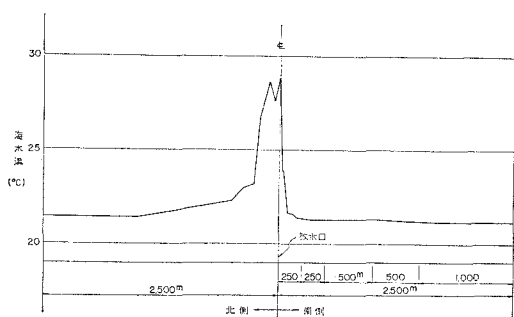
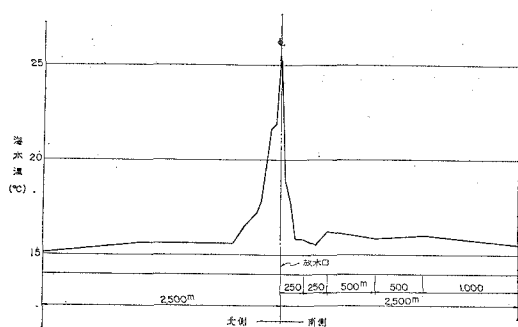


図-14 汀線沿い水温分布 (第 4 回測定: 昭和 43.11.29)



水が放流されており、局部的には、海水より 4~5°C 高い温度が記録されたが、放流量がきわめて少ないので、その影響を無視して分布図を作成した。

昭和 43 年 4 月 27 日、温水放流量 15 m³/sec、風向 NNE、風速 5.5 m/sec、上げ潮時に行なった色素(ローダミン B)投入調査によれば、色素は汀線より約 100 m 沖合の碎波帯の中を汀線沿いに南方向へ流され、投入後約 10 分で 200 m の距離に達し消滅した。この場合の流速は約 30 cm/sec であり、流向は風向にほぼ一致していたが、海水温の測定は、うねりが高く中止せざるをえなかった。一方、昭和 44 年 2 月 22 日、風向 NNE、風速 3~4 m/sec の条件下で実施した漂流ブイによる流れの追跡によれば、放水口に投入したブイは、放流水の流れに乗って汀線に直角(東方)に約 300 m まで流れ、そこで向きを南へ変えて汀線沿いに流れた。この時の流速は 30 cm/sec 程度であり、流向は風向とほぼ一致していた。

以上が今回の調査結果における大要であるが、つぎに、第 1 回、第 3 回および第 4 回の個々の場合について若干くわしく述べてみたい。

(1) 第 1 回測定(昭和 43 年 5 月 25 日)

図-3~図-5 の水平分布図にみられるように、この時期の海水温分布はかなり複雑であり、海岸の沖合では、北側・久慈川寄りの海面水温が南側の水温にくらべて約 1°C 高い値を示している。このことは、塩素量分布状態をチェックした結果から久慈川の影響によるものであると考えられる。すなわち、塩素量は久慈川河口において 7% のものが徐々に高くなり放水口中心沖合で 11% に増加しているからである。また、この時期における海水温分布は図-4、図-5 にみられるような冷水塊となって現われているのが特徴的である。これは、海底地形、碎波帯、沿岸流の複雑な動き等によるものと思われるが、放流温水との関係づけを行なうにはさらに詳細な調査が必要であろう。

海水温の鉛直分布に関しては、放水口を離れた沖合ではそれほどはっきりした躍層はみられないが、放水口付近および久慈川河口付近ではかなり明瞭に現われてい

る。

図-3 にみられるように、海表面においては、放水口から放出される温水の分布状況は砕波帯を横断して、やや SE 方向へ張り出している。この時の風向は E~SE であるから風向きに逆らって分布していることになり、沿岸流は必ずしも風向と一致するとは限らず複雑に分布するものと考えられる。放流水の温度が海水固有の水温近くまで低下する状態が明瞭に現われる範囲は、放水口から 700 m 程度であり、その範囲を越えるところでは、測定値にかなりのバラツキを伴って、沖合温度に溶け込む。一方、汀線沿いでは図-12 にみられるように、放流水の温度は北側 400 m、南側 100 m の範囲で海水固有水温に近い値にまで低下している。図-4 および図-5 にみられるように、海面下 2 m における、放水口を離れた沖合の温度分布には、海表面と同程度に久慈川の影響が現われているが、水面下 3 m になれば沖合全体がほぼ一定の温度になる。また、この場合の放水口付近における温度分布は、温度差も小さくなり、等温線間隔はなくなる。

(2) 第 3 回測定 (昭和 43 年 9 月 13 日)

本来ならば、9 月といえば台風シーズンであり、うねりの高い季節であるが、第 3 回の測定は、風向 NW~NNW、風速 1.5~2.5 m/sec、下げ潮の条件下で行ない、全調査期間を通じて海面の最も静穏な時期であった。図-6~図-8 にみられるように汀線から沖合までほとんど一定した値を示し、放水口付近の放流温水の分布だけが顕著に現われている。海表面における温水の拡散は、放水口から扇状に広がっており、第 1 回の測定時におけるものと大差はない。図-6 によれば、水温分布は放水口を中心に南北方向に扁平に張り出している。ただし、この外側の分布線は海水との温度差が 0.2°C 程度であり、温水の影響範囲を示すものではないと考えられる。温度分布線が沖合へ張り出すことはなく、沿岸沿いに伸びる傾向のあるのは、このような時期においても、沿岸沿いの沿岸流が発達しているものと考えられる。海面下 2 m では、温度分布は沿岸沿いに南へ広がるが、この時の温度差は 0.3°C 程度に減少し、海面下 3 m になれば、0.3°C の温度差は放水口から 300 m 以内になる。一方汀線沿いの温度分布は図-13 にみられるように、北側

500 m、南側 100 m であり、第 1 回とほとんど同様な様相を呈する。

(3) 第 4 回測定 (昭和 43 年 11 月 29 日)

風向 NE~NNE、風速 2~6 m/sec、上げ潮時に実施したもので、海表面の水温分布は図-9 にみられるように、放流温水の中心はいったん北東へ進み、つぎに放水口前面で、放水口中心線に対称的な広がりを示す。沖合の海水温には、バラツキは認められないが、放水口中心の沖合では、海水温分布線を押し出した様相を呈している。これは、沖合の海水が上げ潮時に沿岸へ押し寄せる際、放水口沖合部だけは、放流温水に阻止されて近寄れないということを示しているかのようである。図-10 および図-11 にみられるように海面下 2 m の水温分布図は、沿岸沿いの長い長方形を示し、その中に温水塊が現われているのが特色である。海面下 3 m になれば、その温水塊は消失するが、水温分布は海面下 2 m の場合とほぼ同じ形を呈する。一方、図-14 にみられるように、汀線沿いの温度分布は、北側 500 m、南側 150 m まで温水の影響があることを示しているが、第 1 回および第 3 回の場合と大差はない。

7. む す び

東海発電所では、岸寄りの磯波帯内に、沿岸流が発達しているのので、放流温水は、この沿岸流に乗って流動しそれより沖合へ進む割合はかなり小さいものと考えられ、したがって、この磯波帯内の沿岸流の存在により汀線沿いの昇温範囲はかなり大きいのではないかと予測していたのであるが、実測の結果によると、その範囲は、そう大きいものではなく、汀線沿いにおける放流温水の影響範囲は放水口を中心に 500 m 程度と考えられる。今回の調査結果から、初期の目的である温水放流の大きな傾向は、つかめ得たと考えられるが、今回、観測のできなかった放水口近辺の砕波帯部分の測定を行なうことが望ましいと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 本間 仁・堀川清司：“東海村海岸調査報告書”，日本原子力発電 (株)，調査資料，1959 年 8 月
- 2) 谷川芳郎：“東海村沖の流速と流向の解析”，日本原子力研究所，JAERI 4044，1968 年 8 月