経済産業省原子力安全・保安院委託

平成15年度

大規模発電所取放水影響調查

(取水生物影響調查)

報告書

- 平成8~15年度調査結果のまとめ -

平成16年3月

財団法人 海洋生物環境研究所

はじめに

この報告書は,経済産業省原子力安全・保安院から財団法人海洋生物環境研究所に委託された平成8~15年度取水生物影響調査の実施成果をとりまとめたものである。

本調査は、「発電所の冷却水用海水とともに取り込まれた魚類等の卵稚仔等が全滅するのではないか」との漁業関係者の不安に対し、発電所に取り込まれた魚類等の卵稚仔及び動・植物プランクトンの生存実態を調査するとともに、調査結果を基に今後の環境影響予測・評価モデルを開発し環境審査に反映させることを目的とする。

上記の目的を達成するため「取り込み影響実態調査」として,卵仔稚等の生物連行後の生残率,影響の実態を把握するため現地調査を行った。「影響要因解析調査」として,取り込み影響要因別,生物分類別に影響程度を把握するため野外調査及び室内実験を行った。「生物影響予測モデル開発・評価」として,発電所の取水が生物に与える影響を予測する発電所内通過影響及び取り込み影響モデルを開発した。「生物生態・分布調査」として,発電所周辺海域に分布する生物の生態及び特定生物の分布に関する知見を整理した。

また、調査の実施に当たっては、調査の円滑的、効果的運営を図るため、学識経験者等からなる検討委員会を設け調査の計画及び結果について検討等を戴いた。

報告に先立ち,常に適切なご指導,ご助言をいただいた委員諸氏,調査の実施に当たり 多大なご協力とご支援を戴いた北海道電力株式会社,九州電力株式会社,関西電力株式会 社をはじめ,多くの関係機関,関係各位に対し,厚く御礼を申し上げる。

平成16年3月

財団法人 海洋生物環境研究所

目 次

結	論	1
	. 課題の所在と本課題への取り組み	3
)経緯	3
) 調査の目的と構成	5
	. 調査の方法	7
	. 調査結果	9
)植物プランクトン	9
	1 . 植物プランクトンに対する影響の調査方法	9
	2.冷却水路通過後の活性度	10
	3.海水に注入された塩素の挙動	12
	4 . 植物プランクトンに対する塩素の作用	13
	5 . 出現量 , 活性度の日変動	14
	6.放水口でみられる細胞数の減耗	16
) 動物プランクトン	18
	1.動物プランクトンに対する影響の調査方法	18
	2.冷却水路通過後の生残率	18
	3 . 放水口でみられる個体数の減耗	21
	4.付着生物に捕食される可能性	23
)魚卵,稚仔魚	27
	1.魚卵,稚仔魚に対する影響の調査方法	27
	2.冷却水路通過後の生残率低下	28

	3 .	出現分布層と生残率	 29
	4 .	冷却水路通過時に作用する要因	 31
	5 .	放水口でみられる個体数の減耗	 32
) 取	り込み影響モデル	33
	1 .	通過影響予測モデル	33
	2 .	取り込み確率モデル	35
付	録		37
検討	委員	名簿	71
文	献		 72

-

結論

平成8~15年度の8年間,全国の沿岸を北方,中部,南部の3海域に分け,それぞれの海域ごとに1カ所の代表発電所を選定し,取水口,放水口において採集した標本を比較するなどの方法により発電所の冷却水路に取り込まれた動・植物プランクトン,魚卵,稚仔魚に対する取放水系通過の影響を調査した。その結果,

- 1.植物プランクトンの死亡率は,塩素注入時に大きく約30%であった。
- 2.動物プランクトンの死亡率は,わずか数%であった。
- 3.動・植物プランクトンの減耗量は、水路長が長ければ大きく、水温が高ければ大きいが、海域、発電所の構造などによって減耗量の程度は異なる。
- 4.この減耗の主要因は付着生物による捕食と考えられた。この影響は,水路内で受ける他の要因(機械的,化学的,昇温)による影響に比べ大きい。
- 5.水路通過時に何らかの影響を受けた動・植物プランクトンは,放水口から放流された後は,速やかに周辺の群と混合して,活性度,生残率,細胞密度,個体数密度は回復した。
- 6.動・植物プランクトンへの水路通過影響が検出される範囲は,放水口近傍の温排水内に限られた。
- 7. 魚卵,稚仔魚が受ける水路通過による影響は,従来,動・植物プランクトンより大きく,100%死亡するものとして扱われてきたが,放水口から放出されたときの生存率は少なくても30%以上であると推定された。

	2	
-		-

. 課題の所在と本課題への取り組み

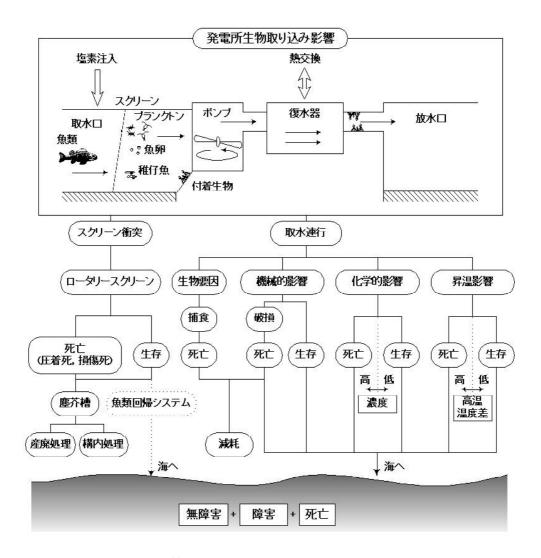
)経 緯

海水と共に取り込まれる魚卵,稚仔魚や動・植物プランクトンが,発電所冷却水路を通過する際に受ける影響には,取水ポンプ,冷却水路壁面への接触,衝突,圧力変化,乱流による機械的なショック,水路への生物付着防止のために注入される塩素による化学的影響,及び復水器における昇温などの他,生物間の被食,捕食関係があると考えられる(第1図)。当研究所の成果を含めこれまでにこの分野で取り組んできた研究には,実際の発電所で行われた野外研究と,主に昇温影響の有無を明らかにするため行われた室内実験研究がある。当研究所では,野外研究として復水器通過後の動物プランクトンに現れる影響に関する調査,冷却水路に取り込まれる魚卵,稚仔魚,幼魚の出現量の実態調査,冷却水路に連行される量と周辺海域の分布量の調査などを実施してきた。

それらの結果によると、動物プランクトンであるカイアシ類の復水器通過後の遅発的影響調査における生残日数、産卵数、次世代の孵化率は、取水口で採集された対照群に比べて若干の低下が認められたが周辺海域現存量への影響は認められなかった。また、冷却水路に取り込まれる魚卵、稚仔魚の種類、数量は、周辺海域の出現量の変化と同様に、季節や時刻によって大きく変化するなど海域の特性をよく反映しており、取り込まれるものの多くは発電所取水口のごく近傍で生み出されたものであることが明らかにされてきた。それら取り込まれた魚卵等の減耗が周辺の現存量に対してどの程度の比率になるのかについて評価が試みられ、取り込まれた魚卵稚仔の全てが死亡すると仮定しても、自然死亡率などに比べ比較的小さいとの結果が得られている。

室内実験では、様々な海生生物の様々な発育段階について高温耐性実験が行われ、それぞれの種毎に高温致死水温と曝露時間の関係や適水温の範囲が求められている。

しかし,発電所に冷却水とともに取り込まれた動物・植物プランクトン,魚卵,稚仔魚,幼魚等の微小な生物が水路内で何らかの影響を受け,このことによって発電所前面の海に 悪影響を及ぼすのではないかという懸念には根強いものがある。



第1図 取り込み影響の概念

環境影響調査書の地元公開・周知時に提出された意見の中に,例えば次のようなものがある。「冷却水が復水器を通過することによる卵・稚仔,プランクトンへの影響が心配である。復水器前後での影響の程度を教えてほしい。(他に同趣旨の意見5件)(関西電力,舞鶴火力発電所,H.6.8)」これに対する事業者の見解は,「冷却水の取水に伴い,取水口付近の海に漂う卵・稚仔やプランクトンの一部が取り込まれ,復水器を通過することにより,機械的な影響や温度上昇によって多少の影響を受けることも考えられますが,これらの卵・稚仔やプランクトンは調査海域に広く分布していることから,海域全体としてみれば,冷却水の取放水が卵・稚仔やプランクトンに及ぼす影響は少ないものと考えております。」というものであった。

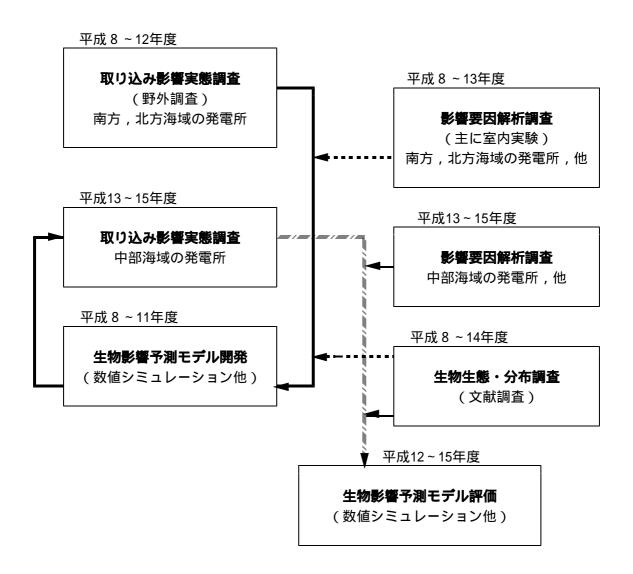
発電所の水路に生物の付着を防止するために行われている塩素処理に対する懸念があわせて述べられることがある。やはり説明会等において出された意見で、「復水器冷却水について、新設7号系列、8号系列の冷却水への塩素注入は行わないとあるが、そのかわりに強力で有害な殺菌剤などを使うのではないか。いずれにしても、塩素注入を行わずにすむ理由も記載すべきである。(中部電力、新名古屋火力発電所(7・8号系列)H.6.8)」というものがあり、それに対する回答は、「復水器冷却水系への生物の付着抑制・除去方法としては、塩素を注入する方法、ボールクリーニング等による機械的方法等があります。7・8号系列では機械的方法等によって除去する計画であり、ご指摘のような殺菌剤は使用しません。」というものであった。以上のような意見は、発電所の規模にかかわらずいずれの地域においてもしばしば出されてきた。これらの懸念に対して、科学的定量的な評価とその周知を行う必要性は古くから認められ、客観性を高めるためのより系統だった調査が必要であると考えられてきた。

)調査の目的と構成

本調査は、「発電所の冷却水用海水とともに取り込まれた魚類等の卵稚仔等が全滅するのではないか」との漁業関係者の不安に対し、発電所に取り込まれた魚類等の卵稚仔及び動・植物プランクトンの生存実態を調査するとともに、調査結果を基に今後の環境影響予測・評価モデルを開発し環境審査に反映させることを目的としている。この目的を達するため、当所ではこの調査を「取り込み影響実態調査」、「影響要因解析調査」、「生物影響予測モデル開発・評価」、及び「生物生態・分布調査」の4調査に分けて実施してきた。

第2図にそれぞれの課題の関係を示した。「取り込み影響実態調査」では,実際の発電所において野外調査を行い,動・植物プランクトン,魚卵,稚仔魚などが発電所内に取り込まれた場合に受ける影響の実態を,発電所の運転条件とともに把握した。「影響要因解析調査」は,「取り込み影響実態調査」で得られたデータを解析する場合の参考とするため,「機械的影響」,「化学的影響」,「昇温影響」,「生物要因」の取り込み影響の要因別,また,「植物プランクトン」,「動物プランクトン」,「魚類」の生物分類の別に,それぞれの要因がどのような影響を与えるかを,主に室内実験及び文献調査によって明らかにしてきた。「生物生態・分布調査」では主に既存の文献情報から,発電所に取り込まれやすく

かつ海域の生物生産上重要な生物分類群について整理した。「生物影響予測モデル開発・評価」では、これら一連の調査から得られた知見を総合して、取り込み影響を予測するモデルを開発するとともに現地調査結果などとの比較により検証し、モデルの一般化を図った。



第2図 「取水生物影響調査」の「取り込み影響実態調査」、「影響要因解析調査」、「生物生態・分布調査」及び「生物影響予測モデル開発・評価」の関係

. 調査の方法

日本列島は南北に長いため海域を北方,南方,中部の3海域に分け,それぞれの海域毎に選定した調査対象発電所において動・植物プランクトン,魚卵,稚仔魚等を採集し分析した。プランクトン類の出現には季節変動があることが知られているため,調査は原則として四季に行うこととし必要な場合には繰り返し調査を行った(第1表)。四季の調査を行う前に各発電所において予備調査を行った。発電所の構造や海域の差によって標本の採集方法や処理の仕方を検討するためである。表内で中部海域の発電所で春季の調査が欠けているのは,この期間の運転が行われていなかったためである。

第1表 「取り込み影響調査」実施実績

海	域	予備調査	春季	夏季	秋季	冬季	実施回数計	調査年度
南	方	2	2	2	1	2	9	平成 8 ~ 10
北	方	1	1	2	1	2	7	平成10~12
中	部	1	-	2	2	1	6	平成13~15

注:表中の数値は実施回数を示す。

各発電所では,発電所の運転状況が異なる条件下で採集を行った。GESAMP,1984(訳;海生研1985,p.53)には,「(発電所の)異なった運転条件,例えば,汚損生物防汚剤の使用・不使用,発電中,発電休止中,流量と流速の変化,の下で採集した標本から,有効な知見が得られる場合もある」と述べられている。今回の調査はまさにこのことに期待して設計したものであり,発電が行われていないが通水は行われている場合(条件 a),塩素注入はないが発電が行われている場合(条件 b),塩素は注入されているが発電が行われていない場合(条件 c),塩素を注入し発電も行われていた場合(条件 d)の4条件を想定した。本調査の一環として行ったアンケートの調査結果では全国の稼働中の発電所の約半数が海水の電気分解による塩素注入を行っており,このような発電所では「d」の運転がいわば通常の運転である。それ以外の塩素注入を行わない発電所では「b」.が通常の

運転となる。

生物の採集は、3カ所の発電所ともに原則として取水口、取水ピット(スクリーンや取水ポンプの直前)、放水口の3カ所で行うようにした。取水口での採集はこれから発電所に取り込まれるであろう生物の一部を採集することで、自然死亡やハンドリング(採集や検鏡など試料を人為操作すること)による影響をみるため、いわば対照区として行ったものである。放水口での採集は、冷却水路通過により様々な影響を受けた後の生物の採集を目的に行ったものである。取水ピットにおける採集は、それらの中間的な影響をみることを目的として行ったものである。中部海域の発電所においては、取水口直前での採集が可能であったが、南方海域及び北方海域の発電所では取水管方式であったため、揚油桟橋上に設けた取水口に最も近い地点において採集を行った。揚油桟橋上の採集地点から取水口までの距離は南方海域の発電所では約40m、北方海域の発電所では約150mであった。以下の解析では、この地点での採集物を「取水口」における採集物と同等のものとして扱っている。

(付録 1.調査対象発電所の概要:p.39~41参照)

. 調査結果の概要

) 植物プランクトン

本調査で得られた結果は、「植物プランクトンの活性は、北方海域、中部海域及び南方海域のいずれにおいても自然の変動が大きいが、冷却水路通過後の活性は塩素注入時に低下することを確認した」また、「通過後にクロロフィル量が減少することが観察された。これは、冷却水路内に生息する付着生物の捕食がその要因であることを示唆しており、その影響は活性度の低下率に比べても必ずしも小さくはないと推論される」というものである。

1.植物プランクトンに対する影響の調査方法

冷却水路通過後の植物プランクトンが受ける影響を評価しようとする時に,植物プランクトンは動物プランクトンと異なり運動能力はほとんどないため,発電所内を通過によって受ける影響を「生死の比率」で論ずることは難しい。そこで,従来行われてきた調査法の中で「迅速,簡便に植物プランクトンの生死を判定する方法」の模索から開始した。新しい方法は,従来行われてきた方法との比較を行う必要があり,その他にもできるだけ調査時のハンドリング(採集や検鏡時の操作など)の影響を少なくすることも重要であった。

プランクトンの活性を調べる方法について,エバンスブルー染色とFDA(フルオレッセンジアセテート)染色の比較,及びFDA法とプランクトンが同化した放射性同位体量を測定する ¹⁴C法の比較を室内実験で行った(山田ら,1999)。その結果,発電所内通過の影響を調査するためには,迅速かつ簡便なFDA染色法が適していると考えられた。すなわち,植物プランクトンの影響評価にはFDA法による個々の細胞の生死判定結果を用いることとした。この方法は,動物プランクトンの評価に用いる「生残率」と判定の方法が異なるためこれを区別し「活性度」と呼ぶこととした。

活性度(%)=FDA染色により発光した細胞数/検鏡した全細胞数×100

植物プランクトンの採集には、レシプロポンプを用いた。レシプロポンプはピストンを持つ加圧式のポンプであり、19 L / 分の揚水能力のあるものを 1 台 ~ 数台使用した。汲み上げた海水は、あらかじめ海水を張った濾過水槽内に設置した目合い20 μ mのプランクトンネットに導入し、ネットに当たる衝撃をできるだけ減ずる工夫をした。標本の運搬時には、衝撃を減らし水温を維持するなどの工夫をした。採集物は、発電所構内に設けた仮設実験室内で直ちに検鏡した。植物プランクトンは様々な分類群を含むが、海域においては珪藻類が優占しているので珪藻類を対象とした。

ところで、冷却水路通過時に何らかの原因で植物プランクトンの細胞数が減少するような場合、量的な扱いが必要となる。FDA染色法で種毎に計数しながら植物プランクトンの出現密度を把握するのは、事実上不可能といって良い。このため、クロロフィル法も併用することした。クロロフィルは光合成に必要な光エネルギーを捕捉する生体色素の一つで、海水中のCh-a量を測定することにより単位水量あたりのすべての藻類に含まれるクロロフィル色素量を計測することができる。この量は、概ね植物プランクトンの総量を表すと考えられている。測定はアセトンまたはDMF(ジメチルホルムアミド)で抽出した液を分光光度計または蛍光光度計を用いて行うが、直接海水中の蛍光光度を測定することもできる。測定に使用した機器は、励起波長 455nm、蛍光波長 685nmのWET Labs社製 WETSTAR Miniature Fluorometer Model ws-1-mf、流量センサー Model FS-3A-1j-B 付きであった。

(付録 2.植物プランクトンの生死判定方法:p.42~43参照)

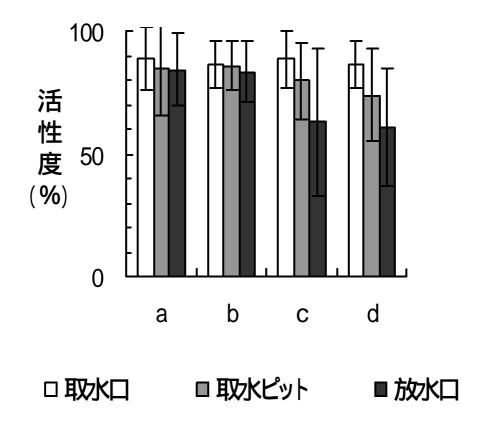
(付録 3.発電所における標本採集方法の検討結果:p.44~45参照)

2.冷却水路通過後の活性度

発電所の取水口,取水ピット,放水口において植物プランクトンを採集し,冷却水路通過前と後の活性度を比較してきた。その結果,塩素(海水電解液)の注入時と無注入時の比較で,塩素注入により活性度が低下することが明らかになった。これらのことは,調査対象とした3海域とも同様であり,いずれの季節にも共通していた(第3図)。

これまで調査を行った3発電所の全てのデータを集めて,発電所内での採集場所別運転条件別に活性度の平均値(第2表)を求めた。この表で取水口における活性度は,水路を通過する前の標本の活性度を測っていることから運転条件の違いには左右されず,いずれも高い数字を示し,海域による差も小さい。ここでみられる死亡の原因はハンドリングに

よるよりも、珪藻類が形成する細胞連鎖の一部が死亡したまま浮遊していることが大きい と考えられる。



第3図 発電所運転条件が異なる場合の植物プランクトン活性度の比較例 南方海域の発電所,全てのデータの平均,縦バーは標準偏差,a,bの条件下 では塩素は注入されていない。a,cは無発電,b,dは発電中である。

放水口の生残率は水路通過による影響を受けた結果であり,運転条件によって変化し海域によっても差があるものと考えられた。第3図でも明らかであるが表中のcとdの条件下で活性度は低下しているので,塩素注入の影響が比較的大きいことが分かる。取水ピットにおける活性度は,取水ピットの位置が取水口と放水口の間にあるように両者の中間の値を示している。取水口,取水ピット,放水口に至り活性度は下がり,取水口に対する放水口での下がり方はどの海域も同程度であった。しかし,取水ピットまでの下がり方やそこから放水口に至る間の下がり方には差があり,発電所の構造の差,塩素注入の方法の差や,次項に述べるように塩素を注入した後の挙動,これを左右する水質の差が大きいものと思われる。

第2表から,要因別の影響度を計算した(第3表)。影響度は100%から活性度を差し引いた残りで,死亡率と同じ意味合いである。計算方法の詳細は省くがここに示した数字は, どの要因が作用するか相対的に求めたものである。3要因の中では塩素注入の影響が大き く,機械的影響や昇温の影響は,自然死亡よりも小さかった。

第2表 植物プランクトン活性度データの運転条件・場所別に求めた平均値

-				活性	度 (%	,)			
運転条件	J	取水口		取	R水ピッ	\	放水口		
	北方	中部	南方	北方	中部	南方	北方	中部	南方
a:通水のみ	93	89	89	92	89	85	92	89	84
b:塩素注入なし発電	91	89	86	90	88	86	92	83	83
c:通水に塩素注入	92	86	89	85	58	80	89	57	63
d:通常発電	92	92	86	74	73	74	64	76	61

第3表 要因別に求めた植物プランクトンへの影響度(%)

要因	自然死亡等*	機械的影響	化学的影響	昇温影響
北方海域	9	0	32	-1 ~ 1
中部海域	11	0	36	7
南方海域	12	1 ~ 5	24 ~ 27	0 ~ 7

^{*} 等には,ハンドリングが含まれる。

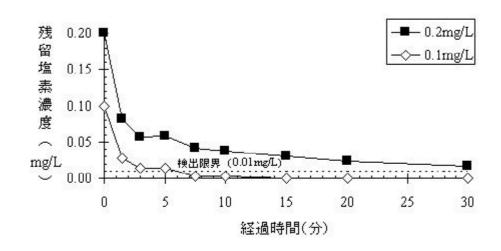
機械的刺激に対する耐性を調べるために,植物プランクトンをフードミキサーで5秒間処理しても活性度は下がらなかった。ハンドリングを含め,機械的影響は無視できるものと考えられる。また,植物プランクトン9種の高温耐性を実験で求めた結果,前培養温度が15 の群を15分高温に接触した場合,影響が現れない最低の温度は種によって異なり,30~39 であった(海生研,1997)。植物プランクトンの場合,機械的影響,昇温の影響は受けにくいと考えられる。

(付録 4.動・植物プランクトン活性度,生残率の統計解析:p.46~47参照)

3.海水に注入された塩素の挙動

塩素の減衰について室内実験を行っている。発電所で塩素が使用されているのは付着生物を防除するためであり、注入されているのは海水を電気分解して得られたものである。

海水に添加された塩素は,海水中に存在する金属イオンなど様々な物質と速やかに反応するため比較的短時間で減衰する(第4図)。また,発電所で注入される塩素の濃度は,季節などにより変化するが注入率で0.2mg/L前後,またはそれ以下であることが多い。



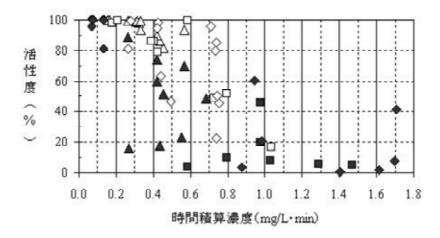
第4図 室内実験で求めた海水に添加した塩素の減衰過程の例 中部海域,秋季,水温25 ,添加濃度0.2及び0.1mg/L

発電所において塩素注入は取水口で行われ、水路を通過する間に減衰し、多くの場合放水口では検出限界以下に管理されている。海水とともに発電所の冷却水路に取り込まれた生物は、常に減衰する濃度に曝露され、放水後には曝露から解放される。このことからそれぞれの海域、季節でどのような減衰の仕方をするか室内実験的手法で調査してきた。またあわせて、塩素の減衰は、海域の水質で異なること、初期の減衰を決める塩素要求量にアンモニアが強く働くことが知られていることから、その寄与と塩素の毒性の関係について継続的な実験を行ってきた。その結果、やはり海域毎に塩素減衰の仕方には差があり塩素要求量が異なることが分かった。さらに、塩素要求量とアンモニア態窒素濃度には相関関係があり、海域によっては、塩素を消費する還元性物質のほとんどがアンモニア態窒素で占められる場合がある。

4.植物プランクトンに対する塩素の作用

植物プランクトンの塩素耐性については数多くの研究があり、対象種、実験方法の差などにより結果も様々である(Marcy,1971, Mattice & Zittel,1976,EPRI,1980etc.)。 残留塩素濃度が0.1mg/L以下であれば¹⁴Cの摂取量が回復するという研究もあれば、このレ ベルで影響があるとする研究もある(GESAMP, 1984)。

塩素要求量と生物の塩素耐性の関係について調査した。植物プランクトンとして単細胞性の珪藻類の一種Chaetoceros sp.を用い、フローサイトメーターでFDA染色後の蛍光量を計測した結果、塩素の添加濃度が海水の塩素要求量かそれ以上の場合には、塩素要求量を差し引いた積算濃度・時間 = {(添加濃度 - 要求量)×曝露時間}が、植物プランクトンの活性度の閾値を決定していることが示唆された(第5図)。



- 洗い有り-0.4 △洗い有り-0.5 □洗い有り-0.6 ◇洗い有り-0.7
- 洗い無し-0.4 ▲ 洗い無し-0.5 洗い無し-0.6 ◆ 洗い無し-0.7

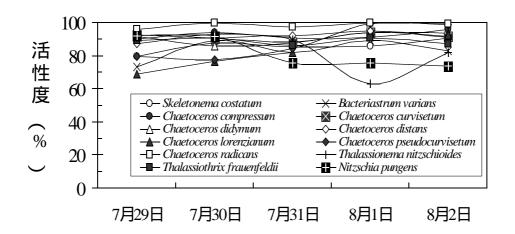
第5図 積算濃度・時間と植物プランクトンの活性度との関係供試材料は、Chaetoceros sp.,凡例中「洗い有り」は、曝露後、正常海水に戻したもの、数値は、各試験区の塩素添加濃度を示す。

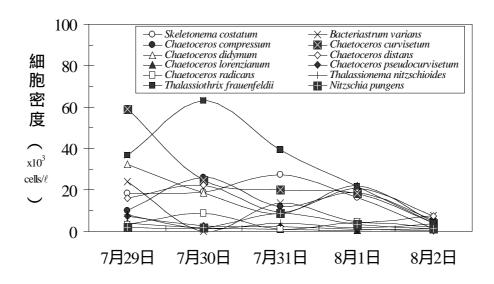
5. 出現量,活性度の日変動

発電所の揚油桟橋は海上に突き出ているため、そこで採集した植物プランクトンの活性度は、対照となる周辺海域のプランクトンの活性度を表しているとみなせる。そこで調査の間、出現種の活性度を連続的に毎日測定した。その結果、活性度は種によって大きな変動を示していた(第6図)。

一方,標本のなかの一部を検鏡して細胞数を数えると,一定量の海水中の出現密度が分かる。その結果,活性度が変動するように出現密度も大きく日変動していた。これは,光度,海域の栄養塩の量,水温などにより活性度に変動があることが原因として考えられた。図の例では快晴であった天候が7月31日から曇り始め,翌日には雨が降り翌々日にはまた

晴れるというような天候であった。晴れると光合成によって細胞数を増やし,天気が悪いと減る。または,天気がよいと活性度も上がるが悪いと下がる傾向を示した。この通りに 反応しない種もあり,反応の仕方は種によって様々であった。



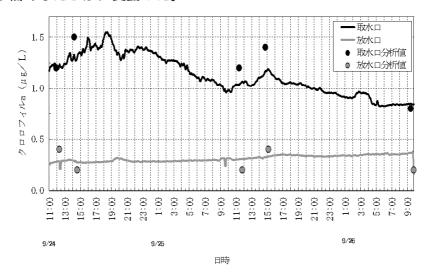


第6図 植物プランクトン出現量,活性度の日変化の例 南方海域の発電所,夏季

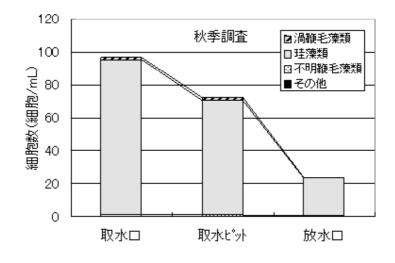
採取対照の海水は流れによって刻一刻変化しており,他にも,雨が降ると塩分が変わり, 陸水が海に流れ込むと栄養塩,水温なども変化する。プランクトンパッチの存在も知られ ている。プランクトンの活性や量を変動させる要因は多く,複雑である。「植物プランク トンの出現量,活性度の自然変動が大きい」ことは,水路通過による影響を評価する上で 採集に伴うハンドリングの他,自然界の変動を考慮すべき必要性を示している。

6.放水口でみられる細胞数の減耗

植物プランクトン量の変化を見るために、取水口、取水ピット、放水口にクロロフィル計を設置して1日~数日間の連続測定を行った。その結果、取水口に比べると、取水ピットや放水口でクロロフィルの減少が観察された。この傾向は、いずれの海域でも同様であった。第7図に、中部海域の発電所における取水口と放水口でのクロロフィル連続測定値の例を示した。図に示したように取水口では放水口に比べ値が高く変動が大きい。放水口では常に値が低くなだらかに変動した。



第7図 取水口と放水口で連続測定したクロロフィル a 量変動の例 中部海域, 秋季



第8図 取水口,取水ピットと放水口で連続測定した出現細胞数の比較例 中部海域の発電所,秋季

取水口に対してどの程度放水口で減耗したかを示すクロロフィル減耗率の平均は,中部 海域において39~77%の範囲で変動し,平均は61%であった。これは,北方海域の減耗率 の平均49%より10%ほど高かった。このように放水口での減耗率には,海域によって差が みられた。第8図に取水口,取水ピット,放水口で観察した細胞数を比較した例を示した。 この例に限らず,取水口,取水ピット,放水口の順で数の減少がみられた。また,植物プ ランクトンの種類は珪藻類が圧倒的に多いが,他のどの種類も減耗していた。

植物プランクトン減耗の原因は,放水口で採集した標本中に付着生物由来の糞が観察されたことや,付着量の推定結果から捕食量を求める調査結果などから,付着生物によって発電所水路内で捕食され減少することが示唆された。

)動物プランクトン

これまでの実態調査で得られた結果を解析した結論は、「冷却水路通過後の動物プランクトンの死亡率は、北方海域、中部海域及び南方海域において、発電所運転条件の違いに関わらず、わずか数%以内であった。」また、「放水口での動物プランクトンの数の減少、付着動物の糞の増加が観察された。これは、定性的に発電所内に生育する付着生物の捕食による減耗を示唆するものと考えられ、その捕食率は活性度の低下率に比べて小さくないことが推論された。」というものである。

1.動物プランクトンに対する影響の調査方法

動物プランクトンの生死は、検鏡時に完全に運動能力を失ったものを死亡とした。冷却 水路通過の影響を評価するため生残率を次のように定義した。

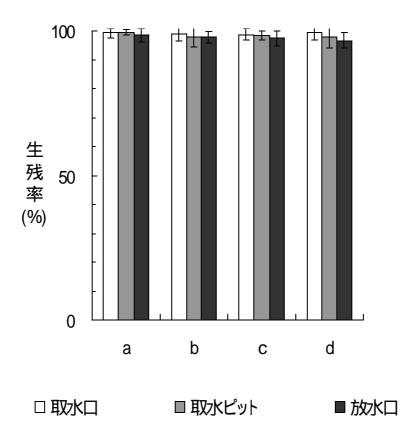
生残率(%)=生存個体数/採集した全個体数×100

植物プランクトンの場合細胞数を数えながら生死判定をするのは困難であるが,動物プランクトンの場合は,生死それぞれのグループに分けた後に固定して計数することができる。植物プランクトンの場合と異なり,量と質を同時に観察できることになる。調査の対象とした動物プランクトンはカイアシ類で,種まで同定することは時間を要することから,現地ではアカルチア属,オイソナ属,パラカラヌス属,その他のカイアシ類,それらのコペポダイト期,ノープリウス幼生の6グループに分けて評価した。

動物プランクトンの採集には,植物プランクトンと同様レシプロポンプを用い,海水を 濾過水槽に設置した100 µ mネット内に導入し、衝撃をできるだけ与えないように濾過した。 採集物は,発電所構内に設けた仮設実験室内で直ちに検鏡した。

2. 冷却水路通過後の生残率

発電所の取水口,取水ピット,放水口において動物プランクトンを採集し,冷却水路通 過前後の生残率を比較してきた。その結果,発電所の運転状況にかかわらず生残率の低下 はわずかであることが明らかになった。これらのことは,調査対象とした3海域,いずれの季節にも共通していた(第9図)。



第9図 発電所運転条件が異なる場合の動物プランクトン生残率の比較例 南方海域の発電所,全てのデータの平均,縦バーは標準偏差,a,bの条件下では 塩素は注入されていない。a,cは無発電,b,dは発電中である。

これまで調査を行った3発電所の全てのデータを集めて,発電所内での採集場所別運転条件別に生残率の平均値(第4表)を求めた。植物プランクトンの項で述べたように,この表の取水口における生残率は,水路を通過する前の標本の生残率を測っていることから,運転条件の違いには左右されない。いずれも生残率は高く,海域の差も小さい。動物プランクトンが死亡したまま海域に漂っていることは少ないと考えられることから,ここで観察された死亡の原因は植物プランクトンとは異なり,主にハンドリングによると考えられる。取水口での生残率を比較すると,南方海域>中部海域>北方海域であり発電所の敷地の大きさ,取水路の長さと反比例している。実験室に搬送する間の時間経過,人為操作(ハンドリング)に伴う死亡の可能性が強い。

放水口での生残率は,水路通過による影響を受けた結果を表している。わずかにdの条件下の生残率が他よりも低下している(第9図)が,それぞれの運転条件による変化も少なく季節の差もほとんどなかった。植物プランクトンの結果と同様,取水ピットにおける生残率は,取水ピットの位置が取水口と放水口の間にあることと対応して両者の中間の値を示していた。取水口から,取水ピットを経て,放水口に至り,生残率はわずかづつ下がるが,下がり方における3発電所の差は小さかった。

第4表 動物プランクトン生残率データの運転条件・場所別に求めた平均値

				生残	率 (%	<u> </u>			
運転条件	J	取水口 取水ピット		<u> </u>	放水口				
	北方	中部	南方	北方	中部	南方	北方	中部	南方
a:通水のみ	96	98	99	96	98	99	95	97	98
b:塩素注入なし発電	97	99	99	96	99	98	95	95	98
c:通水に塩素注入	98	99	99	98	98	98	94	97	97
d:通常発電	96	99	99	96	98	98	94	95	97

第4表から,要因別の影響度を計算した(第5表)。影響度は100%から生残率を差し引いた残りで,死亡率と同じ意味合いである。計算方法の詳細は省くがここに示した数字は,どの要因が作用するか相対的に求めたものである。機械的影響や化学的影響,昇温の影響は,数%の死亡であり小さかった。北方海域において昇温の影響度にマイナスが見られるが計算上の誤差と考えられる。

第5表 要因別に求めた動物プランクトンへの影響度(%)

要因	自然死亡及びハンドリング	機械的影響	化学的影響	昇温影響
北方海域	3	2~3	0 ~ 1	-1 ~ 1
中部海域	2	1 ~ 2	0 ~ 1	1~3
南方海域	1	1	1	1

機械的な刺激に対する耐性の知見は少ない。動物プランクトンであるアカフジツボのノープリウス期幼生とカイアシ類の2種類を用い,機械的な負荷を多連式スターラーの回転数を変化させることによって与える室内試験を行った結果,動物プランクトンは海水の回転・乱流に加えて多くの気泡が発生するような条件下の機械的な刺激に対しても耐性があ

ることが分かった。この結果から,動物プランクトンが被る機械的影響は小さいことが示唆された。

動物プランクトンの塩素耐性については,多くの知見がある。塩素による急性毒性について暴露時間と死亡に要する塩素濃度との間には両対数でほぼ直線関係があり,高濃度では短時間で死亡し,低濃度では長時間を要することが分かっている(Mattice and Zittel, 1976; EPRI, 1980, etc.)。致死に至る濃度は種や発育段階で様々であるが,おおよその限界は数mg/Lと推定される。

カイアシ類の成体と未成体及びフジツボ類のノープリウス幼生の塩素耐性について試験した結果,添加濃度3.0mg/Lでのカイアシ類未成体の平均生残率は15分接触後では37%,30分間,1時間,3時間の接触でそれぞれ9%,4%となった。フジツボ類幼生ではカイアシ類よりさらに耐性が高く,これら動物プランクトンの種の塩素耐性は植物プランクトンに比べ相当高いことが分かった。このことは植物プランクトンに比べ動物プランクトンでは,塩素注入の影響が小さいことを裏付けるものと考えられる。

(付録 4.動・植物プランクトン活性度,生残率の統計解析:p.46~47参照)

(付録 5.要因別影響度の解析手法:p.48~49参照)

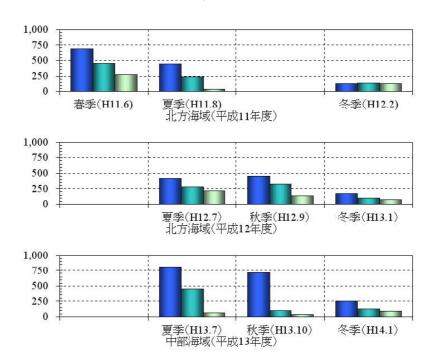
3.放水口でみられる個体数の減耗

水路内を通過する際に受けるであろう影響のうち,昇温の影響,化学的影響では,生物体が消滅するようなことは考えにくい。機械的影響の場合にも傷ついたり衝撃を受けても個体消滅するとは考えにくい。一方,循環水ポンプのプロペラの周りに発生する気泡の消滅の衝撃によって,細胞や組織が破壊されるという指摘があり,個体が採集ネットの網目を通過するほどの大きさまで小さく破壊されるかどうかについては確認されていない。

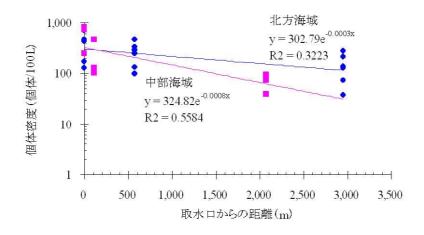
第10図に発電所の取水口,取水ピット,放水口で観察した動物プランクトンの出現密度の例を示した。取水口の出現密度が最も多く,取水ピット,放水口と減少する様子が分かる。発電所によって取水路の長さが異なるので,発電所の取水口を起点として,取水ピット,放水口に至る距離と,動物プランクトンの出現量との関係を第11図に示した。データは片対数で距離が伸びるほど減耗することを示している。

また,取水口から取水ピットまでの減耗のほうが,取水ピットから放水路に至る減耗よりもが多いことになるが,個々のデータにはバラツキがある。このデータのバラツキは各

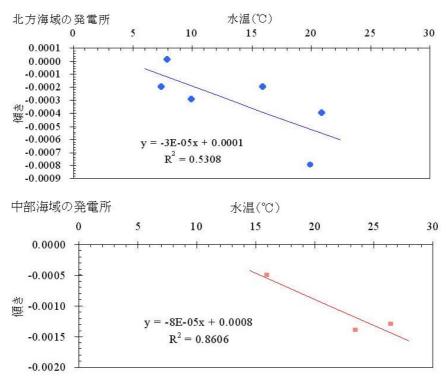
季節の変動であると考え,各季毎に直線の傾きを求めた。それぞれの傾きは,1例を除いて負あった。この傾きは減耗率と同じ意味合いを持つので,この傾きと環境水温との関係を求めた(第12図)。結果は,水温が高いときほど傾きは負の方に大きくなり,傾きが0になるときの切片は北方海域の発電所で約5 ,中部海域の発電所で約13 であった。このことは,動物プランクトンの冷却水路内における減耗には季節性があり,その減耗の仕方には海域差がみられることを示唆している。



第10図 発電所冷却水路通過に伴う動物プランクトン個体数の減耗 各季節毎に示す棒グラフの左から,取水口,取水ピット,放水口,縦 軸は個体数,単位:個体数/100L



第11図 取水口からの距離と動物プランクトンの出現量との関係 出現量は発電所別季節別の平均値,環境水温は標本採集時の取水口水温



第12図 環境水温と動物プランクトン減耗量の傾きとの関係 環境水温は,採集時の取水口水温

4.付着生物に捕食される可能性

発電所の取水路内に多くの付着生物が生息し、発電の傷害になっていることはよく知られている。塩素注入はこれらの付着を防止するために行われている。発電所で処理される貝類・藻類の量は100カ所の発電所の平均で年間370 t にも達する(火力原子力発電技術協会,1993)。それだけの付着生物が生息・成長するのであるから、発電所内に取り込まれた植物プランクトンや動物プランクトン、デトリタスなどを餌として捕食していることは容易に想像される。

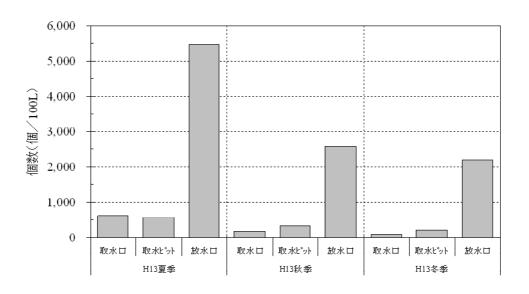
発電所で採集した動物プランクトンの標本には、その量は様々であるが海生生物の糞が混じっている。第13図に放水口で観察された糞を示した。写真の背景に写っている升目は1辺が0.5mmである。写真中央の糞の大きさと右上にある動物プランクトン(カイアシ類)の大きさとはほぼ同程度か、糞の方が大きいくらいである。左はフジツボ類触手の脱皮殻であり、フジツボはこの触手で餌を捕らえている。この南方海域の発電所でみられた触手、糞は、形態からアカフジツボのものと推定される。



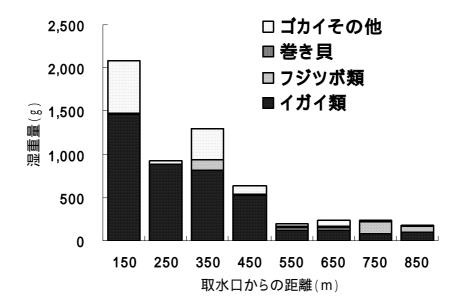
第13図 発電所放水口でみられたフジツボ類の糞の例 南方海域の発電所

糞を計数した結果(第14図)では,放水口で多く出現している。この例では取水口と取水ピットの個数が同程度であるが,取水口<取水ピット<放水口のように下流で漸次多くなる場合もあった。このとき中部海域の発電所放水口で増加していた糞の多くは,その形態からイガイ類のものと推定された。

第15図には発電所冷却水路系に付着している生物を坪刈りし、分析した結果を示した。 調査した発電所では、取水管で取水し塩素注入は行われていなかった。生物量は上流側で 多く下流に向かって漸次減少している。ここではイガイ類が優先し、上流では殻長が大き く付着密度も高く、下流に向かって殻長は小さくなり密度も低下した。Hoshiai(1964)は、



第14図 取水口,取水ピット,放水口における付着生物糞の個数の比較中部海域の発電所,平成13年度



第15図 取水路内に付着している生物量と取水口からの距離の関係 北方海域B発電所,平成15年6月

八戸火力発電所の取水路内を調査し同様の現象を観察しており,水路取水口から奥へ向かっての生物量の減少傾向は,海水に懸濁している動物の餌料成分が減少するためではないか(星合,2003)と考察している。

取水口と放水口の出現量の差から求めた「動物プランクトンの減耗量」と、「付着生物量から推定した捕食量」とを比較した。付着生物の量は、発電所の取水ピットから復水器の間の循環水管の坪刈り調査で求めた。この間では清掃や防汚塗料などの効果があり曲管部など一部分にフジツボのコロニーがみられた。コロニーの殻底径組成は10mm以下が約58%、20mm以上の大型が5%、残りが中型であった。取水口から取水ピットの間は、観察区間の上流側であり清掃は行っていない。この区間にコロニーと同程度の密度で、壁面の全面に隙間なく付いていると仮定した場合に、動物プランクトンの減耗量とほぼオーダーが合った。同じく清掃をしない放水路にも付いていると仮定して、これを加算してもオーダーが合った。コロニーが清掃部分の観察結果のように疎らに付いているとすると過少評価で、コロニーが10mm以下の小型のフジツボで占められていると仮定すると過大評価であった。

Karas,(1992)は,動物プランクトンに最も影響を与えているのは冷却系の内壁に付着している生物による捕食で,かなりのプランクトンが濾過摂餌されており,その影響は冷却系が長いほど大きいことを指摘している。本調査で得られた結果も,同様の事実を示していたものと思われた。しかし,動物プランクトンのみならず植物プランクトンについても減耗の仕方は海域によって異なっていた。付着試験基盤に付着した生物の分析からは,発電所の立地点,構造の違いのみならず,取,放水口の環境差でも生育する付着生物の種,量,成長に差がみられることを確認しており,これらの差が捕食量,すなわちプランクトンの減耗量の変動をより複雑にしているものと思われる。

) 魚卵 , 稚仔魚

今回の調査で得られた結果は、「冷却水路通過後の魚卵、稚仔魚の死亡率は、北方海域、中部海域、南方海域においても100%にはならず、3割程度の生存を確認した」、「取水口の出現個体数に比べ、放水口のそれは少ないことが示唆された」というものである。季節性が強く出現密度が低い魚卵、稚仔魚については、十分に満足できる標本が得られ難く、冷却水路通過後の死亡率を確定するのは困難であった。しかし、南方海域の調査で得られた放水口で採集した魚卵、稚仔魚の中に生存個体が存在し、北方海域、中部海域での調査で約3割の生存を確認することができた。また、放水口の出現個体数は取水口のそれに比べ少ない傾向がみられた。

1.魚卵,稚仔魚に対する影響の調査方法

稚仔魚の生死判定は動物プランクトンと同様,運動法によって判定が可能である。一方, 魚卵の生死判定については魚卵のふ化実験の経験がないと困難である。そこで,生死判定 については,稚仔魚の場合は完全に活動を停止している個体を,魚卵については胚及び卵 が変形し,透明感を失うか卵全体が白濁している個体を「死亡個体」とした。生残率は動 物プランクトンと同じく,次のように定義した。

魚卵 : 生残率(%) = (生存魚卵個数/全魚卵個数)×100

稚仔魚: 生残率(%) = (生存稚仔魚個体数/全稚仔魚個体数)×100

魚卵,稚仔魚は,生死それぞれのグループに分けた後に固定して計数することができる。 生存している卵を飼育してふ化させ,種の同定を試みたこともあったが,生死判定をしな がら種まで同定することは時間を要し困難であったことから,現地では形態的に分類でき るレベルで処理し,一部は固定して後日分析に供した。固定標本については色素が抜ける など生体よりも同定が困難になることも多い。固定標本のさらに一部はDNA分析に供し た。しかしながらこれらの処理を施した後でも種まで同定できた個体は多くはなかった。

魚卵,稚仔魚は個体密度が低く,採集にあたっては動・植物プランクトンに比べ大量の

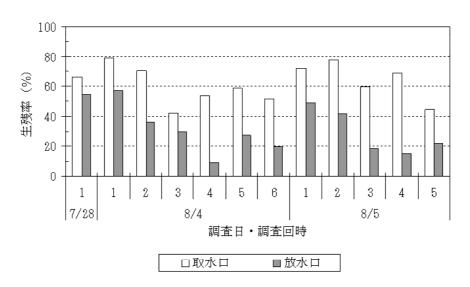
海水を濾過する必要がある。南方海域及び北方海域では、動・植物プランクトンで使用したレシプロポンプの台数、採集時間、回数を増やしたり、水路内で比較的流速が低い場所にMTDネットを投入したりした。出現しやすい季節を選び、時間帯を選んだ。生きたままの魚卵、稚仔魚を迅速に検鏡するため、要員を増やす等の工夫を行った。しかし、充分な量の標本採集はなかなか困難であった。中部海域においては、稚魚輸送用のポンプを導入した。その結果、比較的多くの魚卵、稚仔魚を得ることができた。

魚卵,稚仔魚の試料のため,取水口及び放水口に設置した稚魚輸送ポンプで採取した海水を,目合い0.328mmのネット(GG54)を張った2t水槽内で静かに濾過し濃縮した。得られた試料は実体顕微鏡下で魚卵,稚仔魚に選別し,生死判定を行って生残率を求めた。

(付録 3.発電所における標本採集方法の検討結果:p.44~45参照)

2. 冷却水路通過後の生残率低下

発電所の取・放水口において魚卵,稚仔魚を採集し,生残率を比較した。稚魚輸送ポンプを導入したことにより,採集数が最も多かった中部海域の例を示す(第16図)。魚卵の取水口での生残率は41.9~78.8%の範囲で変化し,平均64.6%,放水口の生残率は9.1~57.1%で,平均値28.6%であった。取水口の生残率と放水口の生残率について,両者の間には有意差(t検定;p<0.01)が認められ放水口で低かった。取水口の生残率を100%と仮定した時の放水口における生残率は,17.0~82.5%の範囲で平均44.2%であった。



第16図 取・放水口における魚卵生残率の比較 中部海域の発電所,夏季

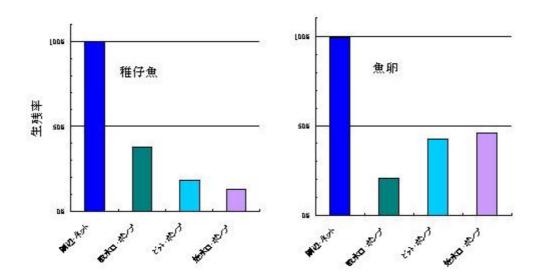
同じ中部海域の例で稚仔魚の生残率について調査した結果は下記の通りであった。魚卵に比べて稚仔魚の採集数は少なかったが,稚仔魚の取水口での生残率は12.8~58.8%の範囲で変化し,平均26.0%であり,放水口の生残率は0~100%,平均値16.4%であった。稚仔魚の取水口と放水口の生残率を比較すると,平均的には放水口で低かった。しかし,取水口と放水口とで生残率が逆転している場合もあり,統計的に有意な差はなかった。

これらの結果から,魚卵,稚仔魚が発電所の水路に取り込まれた場合,少なくとも約3割以上は生存していることが示唆された。これまでは,魚卵,稚仔魚は海域に分布する密度がプランクトンなどに比べて少なく,それだけ採集には努力を要し,魚卵,稚仔魚の生残率の評価を困難にさせてきた。そのためもあって,従来,魚卵,稚仔魚が発電所を通過して放水された時には,すべてが死亡して放出されるとして扱われることが多かった。本調査においては,魚卵,稚仔魚採集のため稚魚輸送ポンプを導入したことにより,採水量がこれまでのレシプロポンプに比べて大幅に向上し,魚卵,稚仔魚は1調査回あたり10~100個採集できた。対照区となる取水口での魚卵,稚仔魚の生残率は平均64.6%であった。

3. 出現分布層と生残率

魚卵,稚仔魚の出現は,産卵時期が特定の季節に限られるケースが多いことから,それらの出現も特定の季節に限られる傾向が多いことが知られている。また,種によっては分布層が限られることも知られている。また,種苗生産の現場では分離浮遊卵の受精卵のうち,水槽の下層に沈降している卵のふ化率が悪いことも知られており,これに関する詳細な研究もなされている(柏木,2001)。

南方海域における調査では魚卵,稚仔魚それぞれ数百個体の採集ができ,この時初めて放水路で採集した魚卵・稚仔の一部は生きていることが確認できた(第17図)。この結果から,周辺海域をネット曳きで採集した標本の死亡は,魚卵,稚仔魚ともにほとんどなかったのに対し,取水口,取水ピット,放水口でポンプ採集した標本の生残率は低かった。このとき使用したポンプはレシプロポンプであった。その後の調査で,このポンプで取水口で採集した魚卵の生残率は31~44%,稚仔魚では45~51%で低かったことと比較すると,図の取水口で採集した魚卵の生残率は若干低く,稚仔魚では同等であった。このことから,図に示した差は,主に採集方法の差によって生じたものと考えられた。



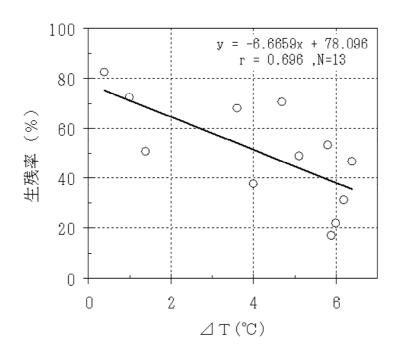
第17図 魚卵・稚仔魚採集ネット及びレシプロポンプで採集した魚卵,稚仔魚の生残率 南方海域の発電所,周辺;揚油桟橋付近,取水口;揚油桟橋上の取水口近傍地点,ピット; 取水ピット,放水口;放水口直前の放水路

しかし,このときの取水口の標本は,取水口の水深と合わせるために海底上1mから採水している。実際の取水口は海底から4.5m立ち上がっており,取水ピット,放水口で採集した標本とは異なる集団,特に魚卵では,はじめから弱っている卵を採集していた可能性も考えられた。もし海底直上の魚卵がすでに生残率が低いものであるならば,カーテンウォールや取水管を利用して深層から取水している発電所では,この集団を選択的に取水する可能性がある。

中部海域をモデルにシミュレーションした結果では,夏季の成層期の取水範囲は海底付近に限られていることが分かった。対流期では比較的全層から取水する。魚卵の生残率が海底では低いか,どの程度差があるかについて,中部海域において成層期である夏季に表層と下層の差を比較する調査を行った。上層18回,下層19回の採集を行い,1回の採水量は16~75㎡,出現量の平均は上層で289個/㎡,下層で166個/100㎡で上層が多く,生残率は上層74%,下層77%と変わりはなかった。このときの水深は約9m,下層は海底から2.5m,上層は海面下0.5mであった。上層と下層での生残率の差はなかった。この程度の水深の違いでは差はないのかも知れないが,このときの出現量では,取水口が開口している下層で少なかった。

4.冷却水路通過時に作用する要因

中部海域で得られた調査結果から,取・放水口間の水温差(T)と放水口での魚卵生残率の関係を第18図に示す。水温差(T)と取水口の生残率で割り戻した放水口での生残率の間には,やや強い負の相関(r = -0.696, N = 13)がみられた。この場合の T0 の放水口での魚卵生残率は回帰式から78%, T7 の場合は31%であることが計算される。計算された T7 の魚卵生残率31%は,発電所がフル稼働して T7 になったとしても,水路を通過する魚卵はすべてが死ぬことなく,3割程度は放水口から生きた状態で放出される意味合いを持つ,また, T0 の魚卵生残率の計算値78%は,取水口での生残率と比べると20%ほど低い,この生残率の差は,魚卵が昇温以外に冷却水路通過時に受けた機械的,化学的ショックなどによる影響であるとも考えられる。

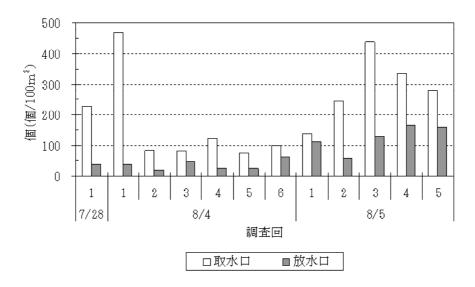


第18図 取・放水口間の水温差 (T)と放水口での魚卵生残率の関係 縦軸は,取水口の生残率を100%と仮定した放水口での生残率

以上のことから,魚卵の生残率については,発電所の通過時に受ける昇温との関係があることが推察された。しかし,このとき採集された魚卵は,調査を行った時期が夏季の高水温期ということ,採集方法の制約から放水口の水温に平均的に45分間暴露されていたことなど昇温の影響をより強く受けていた可能性がある。

5.放水口でみられる個体数の減耗

動・植物プランクトンでもみられたように,取・放水口に出現する魚卵,稚仔魚の出現量を比較すると放水口での量が少ないことが示唆された。取・放水口における出現魚卵個数の変化の例を第19図に示す。取水口が75~468個 / 100m³の範囲で平均216個 / 100m³,放水口が21~165個 / 100m³の範囲で平均74個 / 100m³であり,いずれの調査回でも取水口に比べ放水口で減少していた。稚仔魚の個体数は取水口が5~346個体 / 100m³の範囲で平均96個体 / 100m³、放水口が0~34個 / 100m³の範囲で平均9個 / 100m³であり,いずれの調査回でも取水口に比べ放水口で減少していた。



第19図 取水口及び放水口に出現した魚卵個数の比較 中部海域の発電所

魚卵,稚仔魚と同様に,動・植物プランクトンが水路通過中に減耗することは,中部海域の発電所だけでなく,これまで調査を行った他の2つの発電所においても観察されている。このプランクトンの減耗の一要因は,水路内に生息している付着生物の捕食によることが推論された。魚卵,稚仔魚の場合には,付着生物の他に魚類なども水路内に生息しており,それらによる捕食も考えられる。

)取り込み影響モデル

北方海域,南方海域,中部海域と長期にわたり調査してきた意味は,発電所への「取り込み影響」を一般化し,今後このような問題に取り組む際に役立てようという意図に答えることにあろう。モデルの目的は,事象の因果関係の整理,事象の予測などが考えられる。

「取り込み影響」には,本調査の主目的である「生物連行影響」の他,「スクリーン衝突影響」が含まれる(水産庁,1991)。本調査ではスクリーン衝突影響についても若干の調査を行い,「スクリーンに衝突した海生生物の一部は生存している」こと,「スクリーン衝突する海生生物と漁獲対象物との間には,関連性が薄い」ことなどを明らかにしてきたが,ここでは「生物連行」現象について整理したい。

生物連行問題は,取り込まれた微小生物が放出されるまでに受ける影響の予測(通過影響予測モデル)と,周辺のどの範囲からどの程度の確率で取り込まれるか(取り込み確率モデル)が重要となる。

(付録 6.スクリーンに衝突する生物の実態:p.50~53参照)

1.通過影響予測モデル

「冷却水路通過影響予測モデル」については、動・植物プランクトンが冷却水路通過中に受ける影響についてデータ解析し、機械的影響、化学的影響、昇温影響の要因別に影響度を計算した。この目的は、それぞれの影響がどの程度あるのか説明することにある。この結果、3海域ごとに求めた値はぼぼ同程度で、発電所の基本的な構造や運転方法が大きく異ならない限り、今後の新規立地発電所の評価にも適用できるものと考えられる。その計算結果は、すでに植物プランクトン、動物プランクトンの項で述べたので省略する。ここでは、これまでの調査で明らかになった「動・植物プランクトンが発電所冷却水路通過時に受ける影響」について整理した結果を述べる。

1)水路を通過する間にどんな影響があるか?

動・植物プランクトンがある発電所に取り込まれ,放水口から放流されるまでの間にどのような影響をどの程度受けるかを予測するために,これまでの結果から現象を整理する

と,放水口で観測されたプランクトンの生残率は,機械的影響,化学的影響,昇温影響のいずれをも受けた従属事象の結果として表すことができる。 s outを放水口での生存率, s mを機械的な生存率, s cを塩素注入による生存率, s t を昇温による生存率, とすると

$$s out = s m \times s c \times s t$$

となり,影響率をe = 死亡数/出現数とすると,

$$e out = (1 - e m) \times (1 - e c) \times (1 - e t) \cdots$$

2)冷却水路通過後にどれくらい減るか?

Noutを放水口から放流される動・植物プランクトンの数,Ninを取水口から取り込まれた動・植物プランクトンの数,Rb を水路内の付着生物に補食される数,Rm を機械的衝撃によって破壊される数,rb を水路内の付着生物に補食される率,rm を機械的衝撃によって破壊される率,rb を水路内の付着生物に補食される率,rm を機械的衝撃によって破壊される率,とすると調査の結果から rm はほとんど無視できるため,

3)冷却水路通過後に,どれくらい生きて出てくるか?

N / ivを放水口から生きたまま放流される動・植物プランクトンの数,とすると,

4)発電所の周辺のどの範囲で,どんな影響があるか?

Dを遅発的影響率, Vを新規加入率とし, 生存率について放水後のある場所 iの影響率 e iを求めると,

$$e i = e env. + D - V$$

温排水が周辺の海水と混合することによって生残率の高い群も加入(V)し,時間スケールから考えるとDはほぼ無視しうると考える。温排水の希釈倍率をCとすると,

$$V = e out \times (1 - 1/C)$$

放水口での昇温幅 $T_{\it o}($),周辺のある場所での昇温幅 $T_{\it i}($)とすると,有効桁から C $T_{\it o}/$ $T_{\it i}$ なので,周辺の影響係数 $e_{\it i}$,出現数 $N_{\it i}$,減耗係数 $r_{\it i}$,は,

とまとめられる。

(付録 7.プランクトン減耗要因のモデルによる検討:p.54~55参照)

(付録 8.温排水の希釈倍率計算:p.56~58参照)

(付録 9.プランクトン群が受けた影響の放出後の回復過程:p.59~60参照)

(付録 10.プランクトンの連行影響を説明するモデル:p.61~64参照)

2.取り込み確率モデル

「取り込み確率モデル」については,当初,周辺海域の分布形が分かっている生物が発電所にどう取り込まれるか,コンピュータシミュレーションによって「取り込み確率範囲を求める」ことから開始した。方法は角湯(1979)によった。

分布形が知られている北方海域のスケトウダラ卵の分布データをもとに,前面海域から 発電所に取り込まれる卵の量について水平的な取り込み確率範囲を求めた。その結果は, 発電所の冷却水路に取り込まれたスケトウダラ卵の量を実際に調査した結果と良く一致した(第6表)。表の中で,「取込実測」は,発電所取水口前面で実際採卵して,その卵数から日間の取込量を推定し全期間の取込量を求めている。「沿岸平均密度からの推定」手法は,発電所前面の近傍3地点のネット採集結果から求めた卵数の平均値と日当たり取水量から取込量を推定し,全期間の取込量を求めている。「取り込み確率モデルによる推定」手法では,調査期間全体の卵量から調査期間全体の平均卵量分布を求め,これにシミュレーションにより求めた取り込み確率分布と全期間の総日数を掛け合わせて取込量を推定したものである。

第6表 スケトウダラ卵の推定連行量の比較

推定手法	取込全卵量	倍 率	取込率%
取込実測(電力会社の調査による)	12.6億個	1	0.005
沿岸平均密度からの推定(深滝,1983)	74.4億個	5.9	0.03
取り込み確率モデルによる推定	26.8億個	2.1	0.01

スケトウダラ卵は水深200mの等深線沿いに産卵し、調査の対象とした海域では集中分布する。この海域の流動を計測した結果及びスケトウダラ卵分布調査結果の提供を受け、コンピュータ上で取り込み量を求めた。このモデルは魚卵、稚仔魚を含むプランクトンの分布量、分布形が与えられ、海域の恒流データ、発電所の取水流速のデータがあれば、取り込み量の予測が可能である。

次に,モデルを他の魚種,他の海域に適用できるよう一般化するため,中部海域の発電所を対象に鉛直的な取り込み範囲を求める流動モデルを開発した。流動シミュレーションの結果によれば,成層期には対流期に比べ底層に近い層の海水を取水していることが分かった。このことは,鉛直的な分布でごく表層に分布するなどの特徴を示す生物に関してモデルの適用範囲を拡大するために行った。

(11. 冷却水取水に伴う魚卵稚仔取り込み量の予測手順:p.65~70参照)

付 録

1	. 調査対象発電所の概要	39
2	. 植物プランクトンの生死判定方法	42
3	. 発電所における標本採集方法の検討結果	44
4	. 動・植物プランクトン活性度,生残率の統計解析	46
5	. 要因別影響度の解析手法	48
6	. スクリーンに衝突する生物の実態	50
7	. プランクトン減耗要因のモデルによる検討	54
8	. 温排水の希釈倍率計算	56
9	. プランクトン群が受けた影響の放出後の回復過程	59
10	. プランクトンの連行影響を説明するモデル	61
11	. 冷却水取水に伴う魚卵稚仔取り込み量の予測手順	65

- 38 -	
--------	--

1.調査対象発電所の概要

1)南方海域の発電所

本調査の調査対象として選定した3発電所の位置,取放水系の位置を第1図に示す。南 方海域で調査対象とした発電所は,石油原油燃焼のボイラー2基によって出力は,1号機3 7.5万kW及び2号機50.0万kWの最大出力計87.5万kWの発電を需要に合わせDSS及びWSS運転で 行っていた。

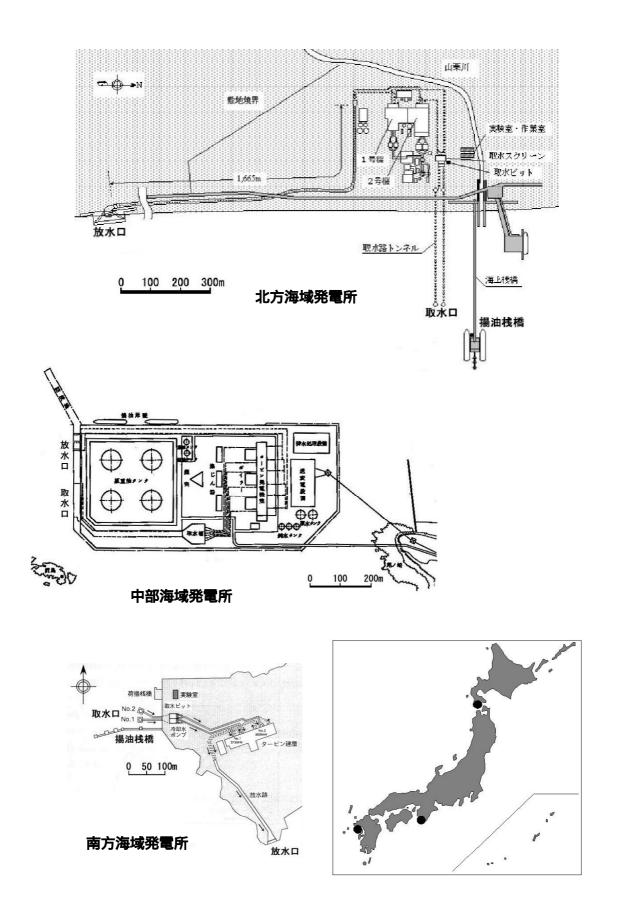
冷却用海水は,海面(L.W.L.)下5.5mに取水口を持つ取水管方式で1号機14.4m³/秒及び2号機20.4m³/秒を利用しており,冷却水ポンプの羽はいずれも固定式であった。冷却水路は約70mの取水管,取水ピット,網目約10mmのスクリーン,ポンプを経て復水器に導入され,約7 の海水温上昇の後,約500mの開渠を経て海域に放流される。その間の距離はおおよそ1号機で770m,2号機で950mであり,取水口から放水口までの通過時間は設計流速からの計算では約16分であるが,放水路が傾斜しているため潮汐によって放水流速は多少変化する。

2号機の取水ピットに模擬(塩蔵)卵を放流した実測では,潮位150cmでの放水口への到達時間は最速で8~9分,平均で10~11分であった。取水管路及び放水路の採集地点までの距離を除いた計算値は12分であったので,ほぼ計算通りということになる。海生生物の付着を防止するための塩素処理は,取水管先端で海水電解液を注入し,濃度で0.2~0.3mg/L,放水口で検出限界以下となるよう連続注入されていた。

2)北方海域の発電所

北方海域で調査対象とした発電所は,重油またはオリマルジョン燃焼のボイラー2基によって出力は,1号機35.0万kW及び2号機35.0万kWの最大出力計70.0万kWの発電を行っていた。この発電所は道南地域に電力を供給する基幹の発電所であり,稼働率は高かった。

冷却用海水は,海面(W.L)下8.0mに取水口を持つ取水管方式で1号機15.5m³/秒及び2号機15.5m³/秒を利用しており,冷却水ポンプの羽はいずれも可変式であった。1号機の冷却水は約515mの取水管,取水ピット,網目約10mmのスクリーン,ポンプを経て復水器に導入され,約7 の海水温上昇の後,約1,665mの開渠を経て海域に放流される。その間の距離は循環水管を含めて1号機で約2,900mであり,2号機も同程度の距離であると推定される。



第1図 発電所の位置,取放水系の位置

取水口から放水口までの通過時間は設計流速からの計算では約27分である。

模擬卵を取水ピットに放流した実測では,2号機の最速通過時間は21分,クロロフィル計による連続観察記録のタイムラグを見ると約19分であった。この間の計算値は約22分であるのでほぼ計算通りということになる。海生生物の付着を防止するための塩素処理は,取水管先端から海水電解液を注入し,濃度で0.2mg/L,放水口で検出限界(0.02mg/L)以下となるよう連続注入されていた。冬季水温が5 以下では海水電解装置を停止していた。

3)中部海域の発電所

中部海域で調査対象とした発電所は,石油原油燃焼のボイラー3基によって出力は,1 号機60.0万kW,2号機60.0万kW,及び3号機60.0万kWの最大出力計180.0万kWの発電を需要 に合わせ弾力的に運転している。最近の稼働率は年間10%以下と低く,運転は主に夏季に集 中していた。

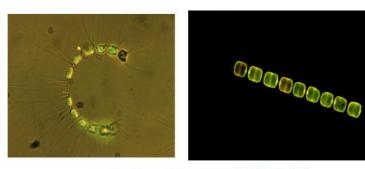
冷却用海水は,外洋に面し平均海面下約6.5mに取水孔を持つ有孔堤方式で1・2及び3号機それぞれ26.5m³/秒の取水能力がある。冷却水ポンプの羽はいずれも可変式であるため電気出力にあわせて変化する。冷却水路は約338mの暗渠,3基共用の取水ピット,網目約10mmのスクリーン,ポンプを経て復水器に導入され,約7 の海水温上昇の後,約865mの開渠を経て海域に放流される。その間の距離は1~3号機で約1,900~2,000mであり,取水口から放水口までの通過時間は設計流速からの計算では約17分であるが,可変の取水量に合わせて流速は変化する。

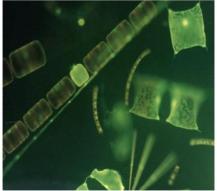
取水ピットへの模擬卵の放流による実測では,2号機の最速通過時間は17分であり,取水口~取水ピットの間の計算値は3分であるのでこれを加えると20分となり実測の方が通過に時間がかかっている。海生生物の付着を防止するための塩素処理は,運転時にのみ行われ,放水口で検出されないよう連続注入されていた。

2.植物プランクトンの生死判定方法

従来行われてきた植物プランクトンの生存率(活性)の測定方法には,培養による細胞の増殖能,明暗びん法による光合成能,クロロフィル(Ch-a)量の測定等がある。しかし,これらの方法は生死判定のために比較的長時間を要すること等の欠点がある。より簡便な測定方法には,色素による染色方法,細胞内の酵素活性から判定する方法等があげられる。我々が採用したのは,細胞染色による細胞数測定法である。この方法は試料に染色液を加え生細胞あるいは死細胞だけを染色し,直接顕微鏡下で計数を行う方法のひとつであり手軽に利用できる。植物プランクトンの種類によってどの染色液が有効か不明の点が多く,また,染色むらが生じ計数に誤差をもたらす可能性があるが,個々の細胞の生死が評価できるという長所がある。

FDA(fluorescein diacetete; フルオレセイン ジアセテート, 蛍光染色剤)は細胞内に取り込まれると, 細胞内のエステラーゼにより分解され, 紫外線により蛍光を発するフルオレセインに変わる。この細胞内に生じたフルオレセインを蛍光顕微鏡で観察して計数する方法がある(第2図)。生細胞は蛍光を発するが死細胞では発光しない(菅原,1987)。FDA法は, 積極的に「生」を評価する場合に有効である(Saga et.al.,1987)。





第2図 FDA染色された植物プランクトンの例

1) FDA法とエバンスブルー法との比較試験の結果

FDAとエバンスブルー,それぞれの染色法で活性度を比較した。結果は,Chaetoceros socialisで,FDAで88%の活性度であったものがエバンスブルーでは47%と評価され,Eucampia zodiacusでは,それぞれ,98%と0%と評価された。種による反応の差もあるが,それぞれの染色法から求めた活性度は同じ採集物からの測定ではありながら,エバンスブルー染色法で活性度が低く算出された。この時,Odontella sinensisでは細胞内の色素収縮が多くみられたが,色素収縮のみられた細胞はエバンスブルー法によれば「死」と判断されたのに対し,FDA法では「生」と判断される。この種で,色素収縮が軽微な群を培養すると分裂するものがみられたが,収縮が進んだ群は分裂しなかった。

2) FDA法と1℃法との比較試験の結果

珪藻類3種(Chaetoceros compressum, C. muelleri, Skeletonema costatum)を用いて, FDA染色法と14C法による活性度の比較試験を行った。FDA法と14C法による活性度の間には,有意な相関関係がみられた(単相関係数r=0.77 ro.os)。14C法で求めた活性度には, 対照区に対して100%を上回るものが数例みられた。C. compressum について, 14C法で繰り返し3回求めたDPM値(毎分当たりのカウント数)の変動係数は,5~7%で測定値にばらつきがなく,C. muelleriでは14~45%とばらついた。C. compressum についてFDA染色法で3回求めた活性度の変動係数は,測定値のばらつきは小さく2~8%であった(山田ら,1999)。

3) F D A染色法

検鏡の前に、FDAをアセトンで溶解し0.5%溶液を作り、フリーザーに貯蔵する。検鏡直前に、FDA貯蔵液をろ過海水で0.01%になるように希釈し、水冷する。0.01%FDA溶液は室温で放置すると、分解が進み蛍光を発する能力が落ちるため、半日に一度は作り直すようにした。標本は適度に濃縮しスライドグラス上に所定量の標本をとり、これに同量の0.01%FDA溶液を加えカバーグラスをかけ数分間常温で放置後、蛍光顕微鏡下で観察を行った。黄緑蛍光を発する細胞とそうでない細胞とに分けそれぞれを計数した。この時、細胞表面に粘液をもつ珪藻類では粘液が発光することがあり判定は困難であった。また、標本に動物プランクトンが混じっている場合には、たとえ死亡したものであっても個体全体が発光するため、検鏡の障害になる場合は、事前に濾過し除くなどの処理を行った。

3.発電所における標本採集方法の検討結果

プランクトンにできるだけ物理的ショックを与えないという目的であれば,採集にバケッや採水器を使用するのがよいが,発電所における調査では流速3m/secにもなる条件下での採水で危険が伴うため,本調査ではプロペラ式ポンプに比べ機械的影響の少ない方法としてレシプロ式ポンプ(ピストンと弁を持つ汲み上げ型のポンプ)による採水を行ってきた。

当初は、ネットによる採集も試みた。プランクトンネットの口径に対し、濾し網の前に直径が大きいリングを取り付けネット内部の流速を落とすと網地への接触刺激が緩和される。しかし、そのようなネットを試作し発電所の放水路に設置したところ、流水抵抗が大きいので水中に保持するのが困難であったり、コッドエンド部に空気が混入し激しく振動するなど活性を調べる器具としては適さなかった。プランクトン活性を調べる時は、取扱時に空気の混入を少なくする必要がある。珪藻類のChaetoceros pseudcurvisetumを対象に、砂速1mで約90秒の曳網と砂速2m以上で約40秒曳網し採集した標本の運搬方法の試験で、容器内の空気の混入度合いで比較した結果、生存率は、容器内に「空気なし」が88%(1m/sec)、74%(2m/sec以上)の生存率であったものが、「空気あり」ではそれぞれ53%、45%に下がった。この条件差は、曳網速度の違いよりも大きな影響があった。

標本の採集は、予備調査時に発電所水路内の流速断面を測定し可能な限り流速、流向が安定している場所に採水管の口を垂下して、プランクトンの活性度に悪影響を与える水路内に滞留している海水の混入を避けた。レシプロポンプでくみ上げた海水は、予め現場海水とネットを張った濾過水槽に導入し、衝撃をできるだけ与えないようにした。標本の運搬には衝撃を減らし水温を維持するため、保温容器内に現場の海水を張り採集瓶を浮かして搬送した。

魚卵,稚仔魚の場合は,さらに複雑であった。出現する季節が限られ密度が低いことから,充分な数の標本が得られる季節を選ぶため,環境影響評価書などの情報に加え現地調査の度に出現密度の調査を行った。その結果,南方,北方,中部いずれの海域の発電所でも夏季に比較的多くの魚卵,稚仔魚の出現が認められたため,この時期に集中的な調査を行った。

動・植物プランクトンに比べ出現量が少ない魚卵,稚仔魚の採集には,次のような方法で対応した。南方海域の発電所では,動・植物プランクトンと同じレシプロポンプを使い,

採水量及び採集回数を多くした。1回の採水量を約100~1,000 L にするとともに出現しやすい早朝を狙って12~16回の採集を2日間行った。生きたままの魚卵,稚仔魚を迅速に検鏡するため分析要員を増やした(海生研,1999)。北方海域の発電所では,魚卵,稚仔魚の出現量が少ないことが予想されたため,濾水量をさらに増やすためネット採集を試みた。北方海域の発電所の放水口は扇形に拡がっており,流れの抵抗が少ない場所にネットが設置できた。しかし,流れの抵抗の少ない場所では単位時間当たりの濾水量も少なく,もともと出現が少ないこともあって充分な量の標本採集ができなかった。中部海域の発電所においては,プランクトンネットほどの濾水能はないがレシプロポンプよりは大量の採水能がある稚魚輸送ポンプを導入した(第1表)。その結果,約3,700 t の濾水量で約7,000個の魚卵を採集した。

第1表 魚卵,稚仔魚採集方法の特性比較

採集方法	レシプロポンプ	稚魚輸送ポンプ	MTDネット
濾 過 能 力	19L/分	630 L /分	15 t /分*
稚仔への傷害	ある	少ない	時間・速度による
コスト	低い	高い	用船すると高い
採集時間 / 回	2.5~25分	90分	10分
濾過量 / 回	50 L ~ 0.5 t	57 t	150 t

*; 1m/sec, 10分間曳網で計算



第3図 標本採集に用いたレシプロポンプ(左)と稚魚輸送ポンプ(右)

4.動・植物プランクトン活性度,生残率の統計解析

発電プラントの稼働による昇温があり、塩素注入を行っている通常運転状態のケース、すなわち機械的影響、塩素注入影響、昇温の影響が考えられる場合について、植物プランクトンの活性度データの基本統計量を求めた(第2表)。また、活性度のデータを逆正弦変換した後に、採集場所間で対応のあるデータから平均値の差を t 値として求め、検定し(第3表)、この結果に基づいて各採集場所毎の生残率の大きさを比較した(第4表)。

第2表 植物プランクトン活性度の基本統計量

	標本数	平均	最大	最 小	標準偏差	標準誤差	歪度
d.取水口	56	86.48	100.0	49.3	9.507	1.282	-1.28
d.取水ピット	55	73.78	100.0	21.7	18.777	2.555	-1.08
d.放水口	55	60.73	100.0	4.0	23.597	3.211	-0.46

(注:d.取水口,d.取水ピット,d.取水口は,各々の場所における通常運転時の活性度を表す。)

第3表 植物プランクトン活性度の平均値を t 検定した結果

	取水口	取水ピット	放水口	
取水口		* *	* *	- :有意差なし
取水ピット			* *	* :5%で有意差あり
放水口				* * : 1%で有意差あり

第4表 植物プランクトン活性度の大きさの比較

取水口	>	取水ピット	>	放水口
取水口		>		放水口

これら一連の計算の結果から,取水口で採集された標本と,取水ピット,放水路でのそれらとの間には,植物プランクトンの活性度に統計的に有意な差が認められた。また,活性度は,取水口で最も高く,次いで取水ピット,放水路の順であり,「冷却水路通過の影響がある」とした場合の順と矛盾はなかった。また,同じ計算により動物プランクトンにつ

いて見ると,取水口で採集された標本と,取水ピット,放水路でのそれらとの間には,植物プランクトンと同様,生残率に統計的に有意な差が認められ,生残率の大きさも,取水口で最も高く,次いで取水ピット,放水路の順であった(第5,6,7表)。

第5表 動物プランクトン活性度の基本統計量

	個 数	平均	最大	最 小	標準偏差	標準誤差	歪度
d.取水口	53	99.22	100.0	87.9	2.299	2.321	-4.60
d.取水ピット	49	97.82	100.0	78.1	3.646	0.526	-3.85
d. 放水路	48	96.65	100.0	89.2	2.681	0.391	-0.94

(注:d.取水口,d.取水ピット,d.取水口は,各々の場所における通常運転時の活性度を表す。)

第6表 動物プランクトン活性度の平均値を t 検定した結果

_		桟橋	取水ピット	放水口	
	桟橋		* *	* *	- :有意差なし
	取水ピット			* *	* :5%で有意差あり
	放水口				* * :1%で有意差あり

第7表 動物プランクトン生残率の大きさの比較

桟橋	>	取水ピット	>	放水口	
桟橋		>		放水口	

データの分布が正規分布でないときにはこれを適当に変換して正規分布に近い分布に直 しておくことが望ましい(淡中,1900他)ことから,生残率のt-検定では,逆正弦変換し ない方法も試したが結果に差は認められなかった。

5.要因別影響度の解析手法

平均的な活性度について機械的影響,化学的影響,昇温影響の3要因に分解するに当たり,設けた前提は以下の通りである。 データは,生存個体数と死亡個体数のデータであるので,データ単位は種,または,属別発育段階別に求めた生残率とする。 対照区については,取水口で採集されたもののデータとするが,必ず対応がとれているわけではないので取水口の同時採集のセットを優先するが,密度調査や接触試験に供した標本のデータも参考にする。

発電所の運転条件と標本の採集場所による要因の掛かり方が,微妙に違うことを考慮し, 整理すると第8表になる。

運転条件	取水口(B)	取水ピット(P)	放水路(O)
a: 通水のみ	h	h <u>M</u>	hM
b: 発電・塩素注入なし	h	h <u>M</u>	hM T
c: 通水・塩素注入あり	h	h <u>M C</u>	hM C
d: 発電・塩素注入あり	h	h <u>M C</u>	hM T C

第8表 発電所の運転条件別に作用する要因のまとめ

したがって,それぞれの組み合わせからそれぞれの要因がどの程度作用しているかについては,以下の計算で求めることができる。

- ・ hの求め方 取水口のa~dを込みにして平均値を求める。
- ・ <u>M</u>の求め方 aの系列とbの系列のデータを込みにして平均値で平均値を除す。

$$\underline{M} = h\underline{M}/h$$

= P(a+b)/B(b+d)

Mの求め方aの系列から M = hM / h= Oa / Ba

^{*} 取水ピットの後ろにポンプがあり,生残率では \underline{M} > M の可能性がある。

^{**} C より \underline{C} は , 時間的に短期である。残留塩素濃度は減衰過程にあり , 注入初期濃度の閾値で効いたとしても死亡するのに時間を要する場合は , 生残率では C > C となると考えられる。

放水口の系列から $M = hMT \times hMC / hMTC / h$ = $Ob \times Oc / Od / h$

ただし, hは代入する。

*C*の求め方

ピットの系列から $\underline{C} = h\underline{MC}/h\underline{M}$

= P(c+d)/P(a+b)

ピットの系列で,h及び で求めた \underline{M} を代入する c \ge dを込みにして, \underline{C} = $\underbrace{hMC}/\underline{M}$ /h

= P(c+d)/M/h

Cの求め方

放水口系列で C = hMC/hM

= 0c/0a

= Od/Ob

放水口系列で,h及び で求めたMを代入する。

b.系列で, C = hM C / M / h

= Ob/M/h

Tの求め方

放水口系列で T = hMT/hM

= Ob/Oa

同じく T = hMTC/hMC

= Od/Oc

放水口系列で,h及び で求めたMを代入する

b.系列で, T = hMT/M/h

= Ob/M/h

放水口系列で,h及び で求めたM,Cを代入する

d.系列で, T = hMTC/M/C/h

= Od/M/C/h

植物プランクトン及び動物プランクトンへの影響度の計算は、次の式で求めた。

植物プランクトンへの影響度

= (1 - (放水路活性度の平均)/(取水口活性度の平均))×100 (%)

動物プランクトンへの影響度

= (1 - (放水路生残率の平均) / (取水口生残率の平均)) ×100 (%)

6.スクリーンに衝突する生物の実態

発電所に取り込まれるのは,微小生物ばかりではない。小型の魚介類なども取り込まれ, 大型の生物が迷入することもある。一般に発電所の冷却水路に取り込まれた後,除塵スクリーンに掛かって処理されるものを「スクリーン衝突生物」とし,スクリーンの網目(目合い約10mm)を通り抜けて復水器を経由して放出されるものを「連行生物」と称している。

調査は、南方海域の2発電所、北方海域の発電所、中部海域の発電所で、四季に各季1回以上行った。スクリーンに衝突した魚介類試料は、塵芥槽への吐出口に袋状のモジ網(目合い4×5mm)を取り付けることにより、原則として2昼夜(48時間)に8時間間隔で6回採集した。採集した生物は直ちに種別に生死判別を行い、実験室内に搬送し、全長及び重量の計測に供した。調査は魚類、甲殻類、頭足類の3グループを対象とした。

1)出現種,個体数

調査期間中にスクリ - ンに衝突した生物は,南方海域のA発電所では魚類34種,甲殻類26種及び頭足類3種の合計63種,B発電所では魚類24種,甲殻類15種及び頭足類6種の合計45種,中部海域の発電所では魚類81種,甲殻類34種及び頭足類8種の合計123種,北方海域の発電所では魚類34種,甲殻類20種及び頭足類5種の合計59種であった。出現種類数は,いずれの分類群でも中部海域で多かった。

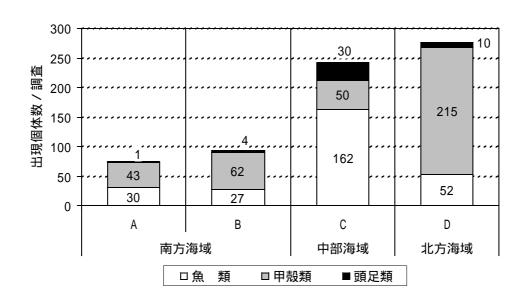
スクリーンに衝突した魚介類の調査海域別出現種の比較結果を第9表に示す。共通出現種は,南方海域と中部海域の間で多く,南方海域と北方海域の間で少なかった。特に南方

第9表 スクリーンに衝突した魚介類の海域別出現種比較 南方海域の結果は,2発電所調査結果を合算した。

項	目	目		南方海域中部海域北			北方海域 共 通				
		合	計	Α	В	C	AB	AC	ВC	ABC	
合	計	2	29	90	122	59	23	11	15	7	
魚	類	1	36	45	81	34	14	6	7	3	
甲	殻類		78	36	33	20	5	2	6	2	
頭	足類		15	9	8	5	4	3	2	2	

海域と中部海域の魚類では14種と多かった。全海域における共通出現種は魚類のカタクチイワシ,カワハギ,アミメハギ,甲殻類のヨツハモガニ,イシガニ,頭足類のミミイカ,マダコであった。

スクリーンに衝突した魚介類の1調査(2昼夜)当たりの出現個体数を第4図に示す。魚介類の出現個体数は、南方海域、中部海域、北方海域それぞれに異なり、発電所でも異なる。個体数合計では北方海域で多く、次いで中部海域で、南方海域では少なかった。また分類群別には魚類、頭足類が中部海域で、甲殻類が北方海域で最も多く採集された。

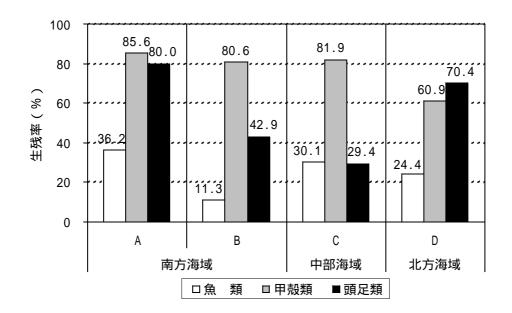


第4図 スクリーンに衝突した魚介類の海域別出現個体数 出現個体数は,2昼夜/1調査当たり。

魚介類のスクリーンへの1日当たりの衝突量は,海域別では758~5,980g/日で北方 海域が最も多く,分類群別では魚類が468~3,768g/日,甲殻類が44~358g/日,頭 足類が86~1,855g/日で,魚類が多かった。

2) 生残率

スクリーンに衝突した魚介類の生残率は,海域別では中部海域で低かった。分類群別の 生残率は,全海域で魚類が低く甲殻類が高かった。これに対して,頭足類では,海域別で 29.4~80.0%と差が大きく,中部海域で最も低いが,同じ南方海域でもA発電所の80.0% に対しB発電所の42.9%と差がみられた(第5図)。海域別の生残率が中部海域で低いのは、分類群別で生残率が低い魚類の組成比率が高いためである。魚類の体サイズ別生残率を海域ごとに計算した結果、100mm未満が5.5~24.1%、全長100mm以上が25.0~60.0%であり、大型個体の生残率が高かった。



第5図 スクリーンに衝突した魚介類の海域別分類群別生残率 四季に2昼夜以上の採集を行った結果をまとめた。

3)周辺海域出現種との関係

発電所周辺海域に出現する種と,スクリーンに衝突した種について比較するため,刺網,地びき網を試験的に操業して得られた漁獲物との比較を行った。その結果,魚類でスクリーンに衝突したのは81種,刺網で21種,地びき網で105種であった。スクリーンに衝突した魚類のうち,刺網,地びき網で出現したのはそれぞれ12種,21種で,両漁業種類を合わせると30種であった。

発電所取水口周辺の環境からスクリーンに衝突する魚類は、岩礁域近傍で操業される刺網漁獲物に類似すると期待されたが、共通種は12種と少なかった。スクリーンに衝突した魚類は約80%が全長100mm未満であり、刺網で漁獲された魚類の全長の最小値が117mmであることから、目合いにより漁獲サイズが選択された結果、類似性が低かったと考えられる。これに対して、地びき網はシラスを対象として操業していることから、サイズによる選択は無視できるが、それでも共通して出現した種は少なかった。

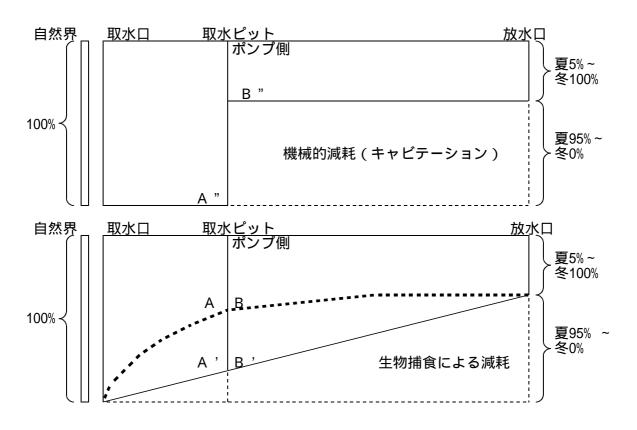
スクリーンに衝突した魚種を , 岩礁域近傍に生息するもの , 沿岸を回遊するもの , その他に大別すると , についてはその一部が刺網漁獲物として , については地びき網漁獲物として出現した。 については , 流れ藻と共に取水口に進入する場合 , 時化等の海象条件により進入する場合等が考えられた。

以上から,スクリーンに衝突した魚種は,発電所周辺に出現する魚種と比較すると,地 びき網の漁獲物中では沿岸を回遊する魚種,刺網の漁獲物中では岩礁域に生息する魚種の 一部であり,沿岸で行われる漁法で漁獲されるものとは共通する種は少なく,流れ藻と共 に移動するような小型種,小型個体も多く含まれていた。

7. プランクトン減耗要因のモデルによる検討

冷却水路通過前後の活性,生残率の変化を調査した結果は,何%死亡するかという結果である。減耗する量を調査した結果は,何%消えたかという結果で,「消える」と言うことは結果的には「死亡」である。この関係をモデルで整理するために,減耗の要因が機械的要因によるものか生物による捕食によるものかを検討した。

第6図は,動物プランクトンを例にとって冷却水路通過時の減耗量を概念で示したものである。図の左側に取水口があり取り込まれる前のプランクトン量を100%とする。プランクトンは実際の発電所を模擬して図の右の放水口から放出される。上段の図は,通過する間に「機械的影響で減耗するモデル」である。機械的減耗は,プランクトンがプランクトンネットの網地をすり抜けるような大きさまで粉々に破壊されることによってのみ起きうる。相当な力が掛からないと体の一部が残ると考えられるので,このような現象を引き起こすのは,ポンプの羽が回転する際に起きるキャビテーションの力であるという指摘がある。



第6図 機械的影響による減耗モデル(上段)と生物補食による減耗モデル(下段)

ここで、キャビテーションが減耗の原因であればポンプ通過後、上段の図のようにA "の量がポンプ通過後にB "まで減耗するはずである。すなわち、取水ピットまでは減耗がなく、ポンプ通過時に減耗する。下段の図は「生物捕食によって減耗するモデル」である。取水口から漸次減耗する形になる。

プランクトンを採集して出現量を比較した調査の結果をみると,3海域いずれにおいても動・植物プランクトンの違いにかかわらず下段の図のようにポンプの手前である「取水ピットで減耗」し始めていた。魚卵,稚仔魚の結果も似たような結果がみられた。またそのとき,取水口で出現したプランクトン量の減耗カーブは, 取放水経路に捕食者が均等に付着している場合は実線, 上流側で高密度,大型個体が付着している場合は,太破線のようになると考えられるが,取水ピットまでの減耗が大きく のA-Bを通るケースが多かった。

8. 温排水の希釈倍率計算

プランクトン活性度や減耗量の回復が,温排水の希釈混合によってなされていることが 示唆されるため,放流される温排水の希釈倍率の計算過程を以下に示す。ここでは放水後 のプランクトンを採集調査した北方海域の発電所を想定している。

温排水の熱量は,

温排水の熱量 (H_0) = 放水量 (V_0) × $t(T_0)$ ×海水の比熱 (C_0) ×海水の密度 (0)

で求められる。ここで,北方海域の発電所における温排水の熱量[J/s]は,放水量31[m³/s], t7[],水温27.68(20.68+7) ,塩分32.75で海水比熱は,4010.6[J/(kg・K)],密度は1.0208×10³[kg/m³]であるから,

 $H_0 = 31 [m^3/s] \times 7 [K] \times 4,010.6 [J/(kg \cdot K)] \times 1.0208 \times 10^3 [kg/m^3] = 8.884 \times 10^8 [J/s]$

となる。

温排水は,放水後周辺水と希釈されその体積を増加させながら,また海表面から大気へと熱を放出しながら広がっていく。希釈後の水温をTt[K],体積をVt[m³/s],海表面から大気への放熱量をG[J]とすると,熱量保存から,

となる。ここで,Gについて考える。温排水は層厚D(=1m)で広がっていくと仮定すると, 単位時間当たりのその表面積Aは,

 $A = V_0 / D = 31 [m^3] / 1 [m] = 31 [m^2]$

となる。また,放水された温排水が水温Ttに到達するまでの時間スケールMtを推算すると, 1 で15.7h, 2 で9.4h, 3 で5.9hとなる。これは,温排水の拡散予測面積1 上昇域 2.0km², 2 上昇域0.6km², 3 上昇域0.2km²(北方海域の発電所の環境レポートより)から, 相当半径各々1.13km, 0.62km, 0.36kmを算出して,相当半径[cm] = 0.312×(時間スケール[sec]) 1.17の関係式に代入し求めた。

このことから , 放熱係数を $F(54.5[J/m^2 \cdot s \cdot]$ 暫定指針より算定) とすると , 温排水が放水直後の7 から3 , 3 から2 , 2 から1 に到達するまでに大気へ放熱する熱量 G_3 , G_{3-2} , G_{2-1} は ,

 $G_3 = F \times A \times T_{7-3} \times M_3 = 54.5[J/m^2 \cdot s \cdot] \times 31[m^2] \times 5[] \times 5.85[h]$ $= 1.779 \times 10^8[J]$ $G_{3-2} = F \times A \times T_{3-2} \times (M_2 - M_3) = 54.5[J/m^2 \cdot s \cdot] \times 31[m^2] \times 2.5[] \times (9.35-5.85)[h]$ $= 5.328 \times 10^7[J]$ $G_{2-1} = F \times A \times T_{2-1} \times (M_1 - M_2) = 54.5[J/m^2 \cdot s \cdot] \times 31[m^2] \times 1.5[] \times (15.65-9.35)[h]$ $= 5.741 \times 10^7[J]$ $(T_{7-3}, T_{3-2}, T_{2-1}$ は各々の温度に到達するまでの平均水温とした)

となる。

従って,希釈後の水温Ttにおける体積Vtは,

$$Vt = (V_0 \times T_0 \times C_0 \times {}_{0} - Gt) / (Tt \times Ct \times t) = (H_0 - Gt) / (Tt \times Ct \times t)$$

となり, その希釈率 tは,

$$t = Vt / V_0 = (H_0 - Gt) / (Tt \times Ct \times t \times V_0) \cdots 2)$$
 式

となる。

よって, Tt = 3 [K]のとき,水温23.68(20.68+3) ,塩分32.75で海水比熱は,4,007.9[J/(kg・K)],密度は1.0220×10³[kg/m³]で,

$$_{3}$$
 = (8.884×10 8 [J] - 1.779×10 8 [J])
/ (3 [K]×4,007.9[J/(kg·K)]×1.0220×10 3 [kg/m 3]×31[m 3])
= 1.87

と計算され,同様に,Tt=2 [K]のとき,水温22.68(20.68+2) ,塩分32.75で海水比熱は,4,007.2[J/(kg・K)],密度は1.0223×10³[kg/m³]で,

$$_{2}$$
 = (8.884×10 8 [J] - (1.779×10 8 + 5.328×10 7 [J])
/ (2 [K]×4,007.2[J/(kg·K)]×1.0223×10 3 [kg/m 3]×31[m 3])
= 2.59

Tt = 1 [K]のとき,水温21.68 (20.68+1) ,塩分32.75で海水比熱は,4,006.5 [J/(kg・K)],密度は1.0226×10³[kg/m³]で,

$$1 = (8.884 \times 10^{8} [J] - (1.779 \times 10^{8} + 5.328 \times 10^{7} + 5.741 \times 10^{7} [J])$$

$$/ (1 [K] \times 4,006.5 [J/(kg \cdot K)] \times 1.0226 \times 10^{3} [kg/m^{3}] \times 31 [m^{3}])$$

$$= 4.72$$

となる。このように,大気への放熱を考慮した場合には以下に示す考慮しない場合に比べて小さな値となる。

一方,仮に1)式中の海表面から大気への放熱量Gは省略できるものと仮定した場合には, 希釈後の水温Ttにおける体積Vtは,

$$Vt = (V_0 \times T_0 \times C_0 \times {}_0) / (Tt \times Ct \times t) = H_0 / (Tt \times Ct \times t)$$

となり, その希釈率 tは,

$$t = Vt / V_0 = H_0 / (Tt \times Ct \times t \times V_0)$$
 · · · · · 3) 式

となる。よって, Tt = 3 [K]のとき,水温23.68(20.68+3) ,塩分32.75で海水比熱は,4,007.9[J/(kg・K)],密度は1.0220×10³[kg/m³]で,

$$_{3} = 8.884 \times 10^{8} [J/s] / (3 [K] \times 4,007.9 [J/(kg \cdot K)] \times 1.0220 \times 10^{3} [kg/m^{3}] \times 31 [m^{3}/s])$$
= 2.33

と計算され,同様に,Tt=2 [K]のとき,水温22.68(20.68+2) ,塩分32.75で海水比熱は,4,007.2[J/(kg・K)],密度は1.0223×10³[kg/m³]で,

 $_2 = 3.50$

Tt=1 [K]のとき,水温21.68(20.68+1) ,塩分32.75で海水比熱は,4,006.5 [J/(kg・K)],密度は1.0226×10³[kg/m³]で,

 $_{1} = 7.00$

と計算される。

9. プランクトン群が受けた影響の放出後の回復過程

動・植物プランクトンが発電所の取水路内で受ける影響は、その大小にかかわらず放水口から放出された後、どのように変化するのであろうか。これを室内実験的に求める方法があり、過去に行われた実験では、動物プランクトンであるカイアシ類の復水器通過後の生残日数、産卵数、次世代の孵化率は、取水口で採集された対照群に比べて特に影響があるとは認められなかった(海生研、1988)。本調査では、放水口から放出された動・植物プランクトンを、 tが3 、2 、1 の温排水内部で採集し、植物プランクトンの活性度、細胞密度、動物プランクトンの生残率、個体数密度を北方海域で調査した。結果を第10表に示す。

第10表 発電所冷却水路系及び周辺海域で採集した動・植物プランクトンの比較 北方海域における調査結果の例,表中下段斜体の数値は,温排水希釈倍率からの計算値

	桟橋	ピット	放水口	Т3	T2	T1
植物活性度(%)	95	71	65	81	92	91
				<i>82</i>	<i>87</i>	93
動物生残率(%)	99	98	97	98	99	98
				98	99	99
クロロフィルa量(μg/L)	1.3	0.5	0.3	1.2	0.9	1.1
				0.8	0.9	1.1
動物密度 (個体 / L)	5.9	5.9	2.5	3.1	4.0	4.0
				4.1	4.6	5.2
温排水希釈倍率(倍)	1.0	1.0	1.0	1.9	2.6	4.7

この表で、プランクトンの活性度や減耗量の回復過程に着目すると、放水口から T 2 域にかけて植物プランクトンの平均活性度が大幅に回復し、しかもその回復過程は冷却 水路通過時に受ける影響度合いにかかわらず似通っており、放出後の活性度は徐々に取水口(=周辺海域)での活性度に近づく傾向がみられた。

一方,海洋物理学的には,温排水は,放水口近傍では流速が大きくいわば噴射流の性格をおびており,水平,鉛直の両方向から激しく周囲の海水が引き込まれて混合し,いわゆ

る連行加入が生じる(有賀ほか,1975)。北方海域の発電所での温排水の希釈倍率を計算した結果は,大気への放熱を考慮した場合, T3 域で1.9,2 域で2.6,1 域で4.7 倍と計算され,大気への放熱を無視した場合はさらに大きな値となった。今仮に活性度が60%に減じた場合を想定しこの希釈率から計算すると, T3 域で79%,2 域で85%,1 域で91%となり,この調査で得られた,例えば植物プランクトンの平均活性度のデータとよく一致した。これらのことから,放水口前面海域,特に T2 域までの範囲では周囲から活性度の高いプランクトンが連行加入されていた可能性が高く,放出後のプランクトンにみる見かけ上の活性度の回復は,温排水の物理的な希釈に依存することが強く示唆された。

10. プランクトンの連行影響を説明するモデル

動・植物プランクトンが発電所内を通過する際に,機械的影響,化学的影響,昇温の影響を受け,一部は死亡する。とともに,発電所内に生息する付着生物に捕食され減耗する。 これらの関係を「死亡」の観点及び「量的な減少」の観点から整理し,モデルで説明する。

1)水路を通過する間にどんな影響があるか?

動・植物プランクトンがある発電所の冷却水路系に取水口から取り込まれ,放水口から 放流されるまでの間にどのような影響をどの程度受けるかを予測するために,これまでの 結果から現象を整理すると,放水口で得られた生残率(植物プランクトンでは「活性度」) のデータは以下のように整理できる。「放水口での生残率 s out」=生存数/出現数,但し, 出現数=死亡数+生存数 とした。ここで s out は,対照区となる取水口での生残率(= 自然界での生残率×ハンドリングの影響)で除し,これらの影響を取り除いた値である。

すると,放水口で観測されたプランクトンの生残率は,機械的影響,化学的影響,昇温の影響のいずれをも受けた従属事象の結果として表すことができる。ここで, $s\ m$ は,機械的な生存率, $s\ c$ は,塩素注入による生存率, $s\ t$ は,昇温による生存率である。

 $s out = s m \times s c \times s t$

次に ,「放水口での影響率 e out 」 = 死亡数/出現数 とし , e out = 1 - s out と 置くと , 複合的な影響については , 次のように計算できる。ここで , e m は , 機械的な影響率 , e c は , 昇温による影響率とする。

2)冷却水路通過後にどれくらい減るか?

動・植物プランクトンがある発電所に取り込まれ,放水口から放流されるまでの間に

どの程度減耗するかを予測する。ここで,Noutは,放水口から放流される動・植物プランクトンの数,Ninは,取水口から取り込まれた動・植物プランクトンの数,Rbは,水路内の付着生物に補食される数,Rmは,機械的衝撃によって破壊される数,rbは,水路内の付着生物に補食される率,rmは,機械的衝撃によって破壊される率とした。

放流される数 (Nout) は,取り込まれた数 (Nin) から捕食による数 ($Rb = Nin \times rb$) と,機械的に破壊される数 ($Rm = Nin \times rm$) を減じたものと考える。機械的衝撃によって破壊される率 (rm) は,調査の結果からほぼ無視しうるパラメーターであると考えると,式 のように表現できる。

水路内の付着生物に補食される率 (rb)は,水路長が長いと大きく,環境水温が高いと大きい。水路長,水温の関数としても表現できるが,発電所の立地場所によって付着生物の種類,構造によって捕食量が異なるため,全国一律に予測することは困難である。

3)冷却水路通過後に,どれくらい生きて出てくるか?

動・植物プランクトンがある発電所に取り込まれ,放水口から放流される時に,どの程度のプランクトンが生きて出てくるかを予測する。生きて出てきた場合は,再生産に寄与する可能性があり,また,生き餌を選択的に補食する生物に餌として寄与できる。ここで,N/ivを放水口から生きたまま放流される動・植物プランクトンの数とする。

$$N/iv = Nout \times sout$$

$$= Nin \times (1 - rb) \times sm \times sc \times st \cdots$$

生きて出てくる数 (N/iv) は,放流された数 (Nout) のうち取水路系を通過する間に影響を受けなかったもの,と表現される (式)。また,取水口で取り込まれるプランクトン数 (Nin) が生物に補食され生き残った (1 - rb) ものが放流されるが,それらは,

機械的,化学的(塩素注入),昇温の影響を同時に受け,一部は死亡した残り(s $m \times$ s $c \times$ st)とも表現できる(式)。

4)発電所の周辺のどの範囲で,どんな影響があるか?

発電所の冷却水路に取り込まれた動・植物プランクトンが放水口から放流された後に, どの程度の範囲でどの程度の影響が残るかを予測する。生存率と減耗率で2式に分けて計 算される。初めに生存率について放水後のある場所 / における影響率 e / を求めると次 式になる。ここで, D は, 遅発的影響率, V は, 新規加入率とする。

$$e i = e out + D - V$$

式 は,温排水とともに放流されたプランクトンは,その後,一部は遅発的な影響(D)で死亡する(または,分裂や孵化などによって回復する,その場合符号は負となる。)が,温排水が周辺の海水と混合することによって生残率の高い(自然海水中では,ほぼ100%の生残率である)群が加入(V)する,と整理できる。

調査の結果,時間スケールから考えるとDはほぼ無視しうると考える。すると,

$$e i = e out - V$$

ここで,温排水の希釈倍率をCとすると,

$$V = e out \times (1 - 1/C)$$

また,有効桁から考えると C TO/Ti なので次式のように表現できる。ここで,ei は,温排水内のある場所での影響係数 , TO は,放水口での昇温幅 (), Ti は,温排水内のある場所での昇温幅 () とする。

$$e i \quad e out - e out \times (1 - Ti / T0) \cdots$$

= $e out \times Ti / T0 \cdots$

これらを減耗量で考えると、

$$N i = (Nout + Nin(C - 1))/C$$

= $Nout/C + Nin(1 - 1/C)$

C TO/Ti hb,

$$N i \qquad N out \times T i / T O + N in (1 - T i / T O) \cdots$$

式より, $Nout = Nin \times (1 - rb)$ なので,

$$N i \qquad N i n \times (1 - r b) \times T i / T \theta + N i n \times (1 - T i / T \theta)$$

$$= N i n (1 - r b \times T \theta / T i) \qquad \cdots \cdots$$

すると,温排水内の減耗係数 r /は,次式で求められる。

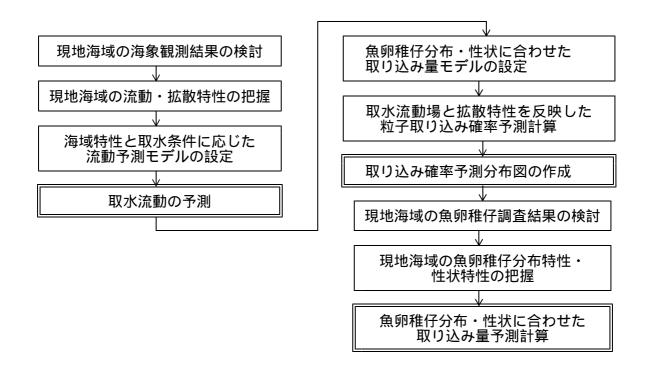
11. 冷却水取水に伴う魚卵稚仔取り込み量の予測手順

「温排水環境影響調査暫定指針」(資源エネルギー庁公益事業部発電課,1987)を参考にすると,予測手順は以下のように示すことができる。

1)予測の進め方

冷却水取水に伴う魚卵稚仔取り込みは,自然界の要素が複雑に関与する現象であるから, 冷却水の取水に伴う魚卵稚仔の取り込みを行うと言う実際的な問題には,理論的・実証的な研究成果に基づいた数理シミュレーション解析手法を一般的に用いる。

これらの手法を適用して魚卵稚仔の取り込み予測を実施する場合は,現場海域における海象・生物分布観測結果に基づき海域の流動・拡散の特性および対象とする魚卵稚仔の分布特性を十分把握して,取水流動および魚卵稚仔の拡散現象・取り込みを正しく表現することができる予測モデルを選択することが重要である。取水流動に伴う魚卵稚仔の取り込み予測の進め方は第7図に示す通りである。



第7図 冷却水取水に伴う魚卵稚仔取り込み予測の進め方

2)取り込み予測手法

(1)取り込み予測手法の概要(シミュレーション手法による)

数理モデルによるシミュレーション手法は、温排水拡散予測で用いる手法と同様なものである。当該海域における物質の拡散特性を表現できる予測モデルを設定し、予測モデルに応じて基礎方程式を一定の条件下で変形・展開し、適切な境界条件を設定して数値解析を実施し、魚卵稚仔取り込み予測に用いる取水流動分布を予測する。

取り込み予測では、周期性が卓越する海域においても周期性が卓越しない海域においても海域の流れを平均的な流れとしてシミュレートしておき、拡散による海域の乱れは配置した粒子に所定の拡散係数を持つ乱れを与えて計算することとする。 取り込み予測に使用する流動場の予測に当たっては、予測モデルの設定と計算結果に対する物理的な評価が極めて重要である。

(2)取り込み予測に用いる流動予測手法の適用方法

冷却水の取り込みに伴う取水流動を予測する場合には,冷却水の取水方式や海域の流動 特性を考慮して,適切な予測手法を適用しなければならない。

冷却水の取り込み方式は,表層取水方式と深層取水方式に大別することができる。冷却水の取り込み流動予測には一般にシミュレーション解析手法を用いるが,海域の状況に応じて適用するモデルの次元を検討するものとする。通常は平面2次元モデルを用いる。以下に,シミュレーションを解析手法を用いた冷却水取り込み予測手法の適用方法について述べる。

取水流動の予測は原則として数理シミュレーション手法を用いて行う。この解析 手法には,海域の流動特性により,定常解析手法と非定常解析手法の2通りの方法が ある。

(考え方)

冷却水として取り込まれる範囲の海域では海水の流れや乱れなどの運動が起きており, その移動過程は複雑である。従って,取水取り込みの予測では,海域の流れや乱れなどの 素過程を多く取り込めるモデルによるシミュレーション解析手法の適用が適切である。 数理モデルによるシミュレーション解析は,第8図に示す手順によって実施する。すなわち,現地海域で実施された流動連続観測より得られた記録の自己相関係数,エネルギースペクトラム等の統計解析結果より,海域の流れの周期性を判断する。流れの周期性が卓越した内湾などにおいては,潮汐流を考慮した非定常解析手法の適用が考えられ,流れの周期性がほとんど認められない海域においては,異方性の拡散場または恒流を考慮した定常解析手法の適用が考えられる。

解析に使用するデータの整理,入力条件の評価の手法は,温排水予測時に実施する手法と同一の手法を用いる。取水流動の予測では,取水口の形状および配置を考慮して,取水流速が再現できるようにモデルを設定する。

(3)粒子による卵稚仔取り込み確率計算手法の適用方法

取水流動と伴に取水口に取り込まれる卵稚仔の確率をシミュレーション予測によって求める場合には,卵稚仔の性質を考慮した粒子の配列を基に予測しなければならない。

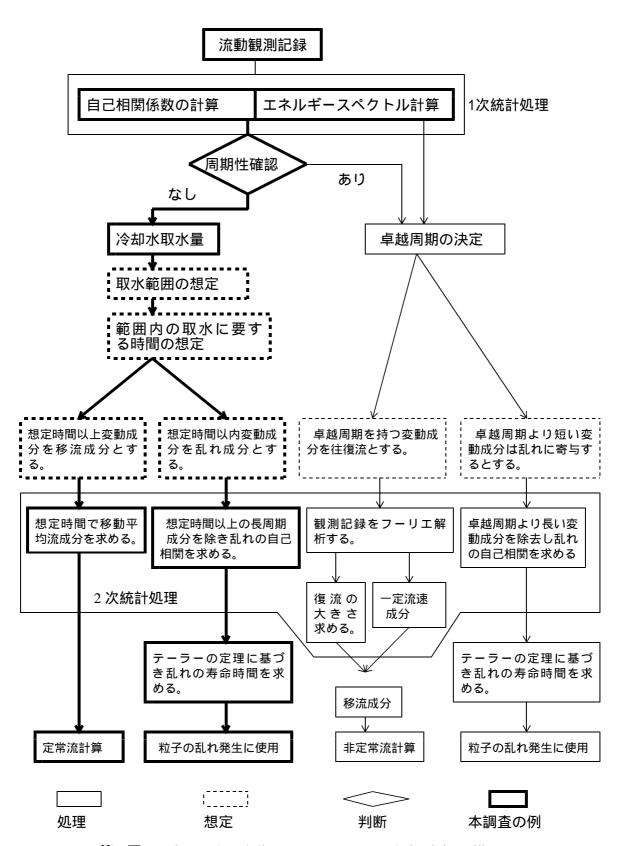
確率計算の方法は海域に配列した粒子の取り込み量とその位置によって求める。

取り込み確率の予測は原則として数理シミュレーション手法を用いて行う。この解析手法は、移流および取水流動と海域において所定の乱れ成分を持つ粒子の運動によりモデル化する。

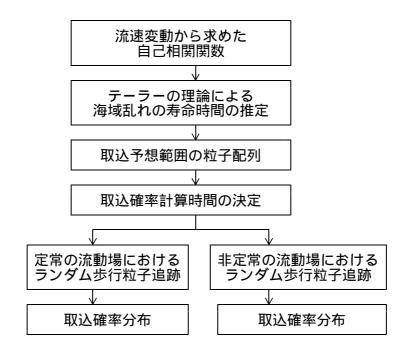
(考え方)

卵稚仔は海水の移流と乱れによる拡散によって移動し,冷却水取り込み範囲においてその一部が確率的に冷却水に取り込まれるため,移動および取込過程は複雑である。そのため,取込確率の予測では,海域流動と卵稚仔に見立てた粒子の運動をモデル化したシミュレーション解析手法の適用が適切である。

数理モデルによるシミュレーション解析は,第9図に示す手順によって実施する。すなわち,取り込み予測に用いる流動予測で得られた(第8図参照)海域流動を流動場とし,データ解析から得られた拡散係数を基に,流動場と流動場における卵稚仔運動の乱れを設定してモデルを作成する。



第8図 取水取り込み流動のシミュレーション解析手法の手順



第9図 粒子による卵稚仔取り込み確率予測手法の手順

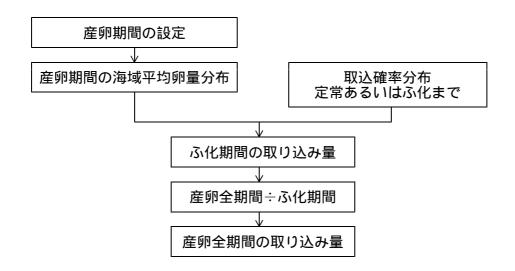
(4)卵稚仔取り込み量予測手法の適用方法

ランダム歩行の粒子追跡により得られた取り込み確率分布と,事前調査で得られた海域の卵稚仔分布から該当期間内における取り込み量を予測する。取り込み確率分布は時間経過とともに拡大し定常となるが,卵分布は確率分布が定常になるまでの期間の平均分布を用いるか,卵がふ化して忌避行動をとれるまでの期間とする。

卵稚仔取り込み量は,取込確率分布と海域の実測卵分布および魚種別に設定した期間により推定する。

(考え方)

卵稚仔取り込み量は、単純に取込確率分布と海域の実測卵分布の乗数で求まるが、どの期間の確率分布と平均卵分布を使用するかが重要な点である。この点から、対象とする海域の流動の他、ふ化時間や産卵全期間の適切な設定が必要である。取り込み量の計算は、第10図の手続きに従って実施する。



第10図 卵稚仔取り込み量予測計算の手順

検討委員名簿

委員長 塚原 博 平成8~15年度 九州大学名誉教授

委員 平野禮次郎 平成8~15年度 東京大学名誉教授

委員 和田 明 平成8~15年度 日本大学教授

委員 富士 昭 平成8~15年度 北海道大学名誉教授

委員 羽生 功 平成8~14年度 東京大学名誉教授

委員 沖山 宗雄 平成15年度 東京大学名誉教授

委員 渡部 終五 平成8~15年度 東京大学大学院教授

委 員 柏木 正章 平成13~15年度 三重大学教授

委員 堤 豊 平成9~10年度 元全国漁業協同組合連合会漁政部長

委員 宮原 邦之 平成11~13年度 全国漁業協同組合連合会常務理事

委員 前林 篤 平成14~15年度 全国漁業協同組合連合会漁政部次長

委員 井関 豊 平成8~9年度 元電気事業連合会立地環境部長

委員 土屋 良文 平成10~13年度 元電気事業連合会立地環境部長

委員 原田 正人 平成14年度 前電気事業連合会立地環境部長

委員 西村 文宏 平成15年度 電気事業連合会立地環境部長

委員 北原 宏一 平成8~13年度 東京電力(株)環境部環境技術Gマネージャー

委員 赤堀 文則 平成14年度 前東京電力(株)環境部環境調査G課長

委 員 河西 司 平成15年度 東京電力(株)環境部環境調査G課長

委員 清野 通康 平成8~12年度 元電力中央研究所我孫子研究所研究コーディネーター

平成16年3月末現在

猫 文

- 有賀祐勝・川崎健・渡辺 競:温排水と環境問題,恒星社厚生閣,東京,225pp.1975.
- EPRI: Review of open literature on effects of chlorine on aquatic organisms.

 Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Prepared by Ork Ridge
 National Labo., [EPRI EA-1491], 322pp., 1980.
- 深滝弘:スケトウダラ資源に及ぼす発電所取放水影響の予測,海生研研究報告,No.83101, 54pp., 1983.
- GESAMP (IMO / FAO / Unesco / MO / WHO / IAEA / UN / UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution): Thermal discharges in the marine environment. *Rep. Stud. GESAMP.*, No.24, 44pp., 1984.
- Hoshiai T.: Distribution of sessile animals in the intake-duct of the cooling sea water of the Hachinnohe thermal power station. Bull. Mar. Biol. Sta. Asamushi, 12(1), 43-50, 1964.
- 星合孝男:私がいまだに付着生物学会会員である理由,付着生物学会誌,学会創立30周年 記念号,31-34,2003.
- 角湯正剛,和田明:冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の確率的検討,電力中央研究所研究報告,No.378027,62pp.,1979.
- 海洋生物環境研究所:海外温排水研究情報 , No.3 , 海洋環境における温排水, 107pp . , 1985.
- 海洋生物環境研究所:動物プランクトンの復水器通過影響について,海生研リーフレット, 1,20pp.,1988.
- 海洋生物環境研究所:温排水生物影響調査報告書(4分冊の2)微小生物温度・連行耐性 試験,351pp.,1997.
- Karas, P.: Zooplankton entrainment at Swedish Nuclea Power Plants. *Mari. poll. Bull.*, 24(1), 27-32, 1992.
- 火力原子力発電技術協会:火力発電所における海生生物対策実態調査報告書,火力原子力発電技術協会,142pp.,1993.
- 柏木正章・近藤茂則・吉岡基:卵比重の差を利用した海産魚類の新しい卵質評価法,養殖,

- (2001.7), 120-123, 2001.
- Marcy B.C.Jr.: Survival of young fish in the discharge canal of a nuclear power plant., *J. Fish. Res. Board Can.*, 28, 1057-1060, 1971.
- Mattice, J. S. and Zittel, H. E.: Site-specific evaluation of power plant chlorination, *J. Water Pollut . Control Fed.*, 48:2284-2308, 1976.
- Saga, N., Machiguchi, Y. and Sanbonsug, Y.: Apprication of staining dyes for determining viability of cultured algal cells, *Bull.Hokkaido.Fish.res. Lab.*, No.51, 39-44, 1987.
- 資源エネルギー庁公益事業部発電課:温排水環境影響調査暫定指針(海生生物・漁業影響調査関係),83pp.,1987.
- 菅原泰剛:凍結融解された植物細胞の生存率測定法,「凍結保存-動物・植物・微生物-」(酒井明編),朝倉書店,東京,176-179.,1987.
- 水産庁研究部:発電所の大量取水が漁業資源に及ぼす影響について,10pp.,1991.
- 淡中忠郎:統計学の理論と応用,養賢堂,東京,p.78.,1967.
- 山田裕・磯野良介・澤口友宏・華山伸一・M. H. Davis・原猛也・青山善一: FDA (fluorescein diacetate)を用いた植物プランクトンの活性測定法,1999年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集,1999.