

冷却水取水設備設計に関連した海生物の問題

大西 外明*・真鍋 恭平**・原 一 利**

1. はじめに

最近、大容量の火力発電所や原子力発電所の開発が急ピッチですすめられており、それに伴い、層選択取水や放流温水の海水中での拡散等の問題が、重要な研究対象の一つとなり、数々のすぐれた成果が上げられてきている。しかしながら、冷却水取水設備を実際に計画、設計する現場技術者の立場からいえば、千秋¹⁾も指摘しているように、種々の海生物による障害防除の問題も無視できない事項である。多種の海生物のうち、冷却水取水に最も大きな支障を与えるものとして、フジツボ、ムラサキガイ等の付着生物と、集団的に浮遊移動するクラゲ類があげられる。取水路設備に付着する付着性海生物に関連して実際上問題となるのは、海生物の付着厚さはどれくらいであるか、また、一定期間ごとの付着総量はどれくらいであるか、海生物が付着した水路の粗度係数は実際にはどのような値であるかといった諸点である。これらの諸点については、冷却水取水路の断面決定、沈砂池および沈砂池内堆積物排出設備の規模決定上、まず具体的な数値を想定する必要があるわけである。一般的には取水路の全長にわたり平均 10 cm 程度の付着シロを見込み、粗度係数には、0.025 程度の値を採用している例が多いようである。しかし、これらの値は、経験的に用いられている値であり、今後、水路の設計をより合理的に行なうためには、付着厚さは別としても粗度係数の大きさについては、実験室なり現場なりで数多く測定調査を行なう必要があろう。

以上は取水設備の寸法を設計するために必要な事項であるが、これら設計条件を設定するために行なう調査方法と海生物の付着をできるだけ少なくするための工夫もまた重要な検討事項である。調査方法に関連して最も注意なくてはならないことは、取水設備の稼動前後において取水海域内の流況が変化するので、調査結果から取水設備稼動後の海生物付着状況をどのように予測するかという点である。また、海生物の付着をできるだけ少なくするための工夫としては、塩素注入、各種塗料の塗装、超音波法、火花放電法等の人工的な処理方法について、従来調査研究がすすめられていて、このうちでもとくに

塩素注入法は、実際の発電所で広く応用されている。こうした人工的な海生物付着防止方法とは別に、冷却水取水路の壁面材料そのものを海生物付着物防止面から有利なものをえらぶことができるというのがぞましい。また、取水路内流速は海生物付着度と関係があるという説もあるが、現場の実際のデータ、あるいは実験資料を基にした具体的検討が欲しいところである。付着生物はその幼生がすべてプラクトンとして浮遊するものであり、それは種類によってほぼ一定の水深の所に層をなして密度が高くなるという性質を有しているといわれているが、この性質を選択取水の概念と組合せれば、特定の種類の付着生物の付着量にある程度制限することが可能となりうるかもしれない。事実中井・工藤²⁾は新清水共同火力発電所で調査を行なった結果、取水路への付着生物の餌料の供給量は、取水路入口にカーテンを設置する前後で、著しく減少したと報告している。

つぎに、発電所運転上大きな障害を与えるミズクラゲ（以下、単にクラゲと称することとする）は、太平洋、大西洋および地中海など世界の温帯水域に広く分布し、わが国近海にも多産する普通の鉢水母類の一種であるが、これに対しては、形態学的研究や飼育実験や生態的調査研究がなされているが、エンジニアリングの立場からすれば、その防除、処理対策のあり方が最も関心がもたれる点である。発電所のクラゲ除去対策に関連して佐藤³⁾は、クラゲの襲来と発電所事故状況および気象との関係を統計的な見地から調査した結果を報告しており、また大島・桑原⁴⁾らは、クラゲ排除対策に関する研究の一環として、ミズクラゲの比重について研究し、その比重は環境水の比重とほぼ同一であると述べている。また、小野⁵⁾らは、取水口前面に網を張ることによりミズクラゲを除去する案につき室内実験を行なっているが、実用の上でなお多くの問題点を残しているものと思われる。このようにクラゲ防除対策は解決を急がれる重要事項であるにもかかわらず、その工学的対策はもちろん、自然環境下における生態そのものについても不明な点が多々あるのである。またクラゲに関する研究は、従来、主として水産関係者の手によって進められてきたが、クラゲの平面分布や鉛直分布等は、クラゲ自体遊泳力をにほとんど有していなく、かつ、海水の比重とほぼ同一の比重を有することから判断して海水表面あるいは海水中的の浮遊

* 正会員 工修 日本原子力発電(株)技術本部土木建築課

** 正会員 日本原子力発電(株)敦賀建設所

物質とみなして、流体力学的な取扱いにより説明しようとする考え方もある*。たとえば、クラゲの平面分布を上空からみると、一群、一群が縞状になっていることが知られているが、このことは海面上に散布した木粉等が時間の経過とともに縞状となる現象と似ているように考えられ、水理学あるいは流体力学的な立場から、さらに検討したい点である。またクラゲは瀬んだ海域で発生し海流によって遊泳するといわれるが、冷却水取水に伴う浮遊物をふくんだ密度流の問題も将来の課題として興味もたれる。

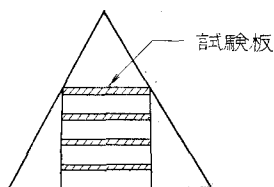
本論文では冷却水取水に関連した海生物問題解決の第 1 段階として、これら数々の問題点のうちから、付着生物については、付着試験時と水路稼動時では生物の付着状態が異なる場合があることを東海発電所の場合を例にとり概述し（この問題については一部発表済み⁹⁾）、ついで、水路建材と付着海生物との関係について敦賀市浦底湾内調査の結果を基に論じる。クラゲについては、一般に深層部にはクラゲの存在が少なく、深層取水を行えば有利との説があるが、この点についての著者らの所見を述べる。ついで、敦賀発電所で取水口設計に関連して行なった大型の実験水路で行なったクラゲ防除に関する 2, 3 の実験結果について述べる。

2. 東海発電所取水路の稼動前後における海生物付着状態

(1) 取水設備計画時における付着生物調査結果と水路の設計条件

東海発電所では直径 2.5 m の 2 条の海底埋設管で約 15 m³/sec の冷却水を取水しているが、この水路施設設計に先立って、取水鋼管敷設後付着するであろう海生物の種類と量を推定するため、東海村取水地点における付着生物の季節変化についての調査を行なった。調査方法としては、取水管設置予定地付近の海中に、コンクリート、および鉄の 2 種類の試験板 (35×35 cm) を図-1 のごときフレームに水平に取りつけて浸漬し、2 カ月ごとにとりあげて付着している生物の量と種類について調査を行なった。

図-1 東海発電所計画時の海生物付着状況試験板の取付状態



試験板の浸漬は昭和 34 年 6 月 12 日より開始され、昭和 35 年 4 月までに 8 月、10 月、12 月、2 月、4 月の 5 回にわたってとりあげ調査を行なった。その結果、サンカクフジツボ、アカフジツボ、マガキの 3 種類がかなり多量に付着するであろうことが指摘されたが、この種の

取水管で最も問題となるムラサイガイについては、試験板に付着がみられなかった。しかし、構造物設置に伴い、ムラサイガイが発生するであろうことは過去の火力発電所の例から予想された。事実、あとで述べるように水路稼動後には、多量のムラサイガイの付着が認められたが、このような差異が生じた原因の一つとして試験板を水平においたこと、および浮遊砂の多い海域においたことによるものと推定される。当時、これらの取水阻害生物の除去対策として、火力発電所などで実施されている塩素注入法も考慮されたが、ムラサイガイ、フジツボ、カキ等の成体は塩素に対する抵抗性が強いこと、および鋼管に塩素注入装置を設置するとしても、その維持保守がきわめて困難視されたこと等の事情を合せ考え、結局、塩素注入装置をつけずに、管径決定に際して平均 10 cm の貝付着シロを見込み、また、水理計算には 0.025 の粗度係数を用いることとした。

(2) 発電所完成後の取水管内面の海生物付着状況

以上の設計上の基本的な考え方に対して、埋設してから 4 年 11 カ月の昭和 42 年 5 月、発電所定期点検時に管内全長にわたり潜水調査を行ない、管内部の海生物付着状況を調べた結果によると、付着厚さは取水口入口付近で最大 20 cm 程度で下流部にいくほど減少している。また、鋼管頂部では付着の程度が少なく、また底部では薄い沈泥土が堆積しており海生物の付着はなかった。これらの付着厚さを管全長にわたり平均すると、南側管で 14 cm 厚、北側管で 11 cm 程度であり、設計値よりやや大きな付着量であった。付着海生物の種類については試験板による調査時にほとんどみられなかったムラサイガイが大部分であり、そのほか、フジツボ、カキ、ホヤ、イソギンチャク、巻貝等もみられた。昭和 42 年 10 月に、再度、管内の海生物付着状況調査を行なったが、海生物の種類、付着の傾向等は第 1 回目調査結果と全く同様であるが、平均の付着厚さは南北管とも約 7 cm であり、前回調査時より減少し、設計値を下まわっている。以上の 2 回の調査結果から判断して、設計時における貝付着シロの仮定は妥当なものであったといえよう。

3. 水路建設材料と付着海生物との関係—敦賀発電所取水地点浦底湾内での調査結果

敦賀発電所の取水路設計にあたり、付着海生物予防の立場からみて、水路構築資材として鉄管がよいか、あるいはコンクリートがよいかを判定することを目的として、試験板の浸漬試験を行なった。試験板としては、アルミ塗装板とコンクリート板の 2 種類を用いた。アルミ板は、その表面はウォッシュプライマーと防錆塗料を塗って、材質が鉄でないことによる影響をなくした。試験は財団法人資源科学研究所馬渡静夫博士に委託して、昭和 39 年 11 月より 41 年 5 月にいたる 1 年 6 カ月の間に、敦

* 東工大日野と大西との私的な席上での討論による。

表-1 試験結果表示記号

記 号	試験板浸漬月日	試験板引上月日	試験板浸漬月数
3-1	39 年 11 月 3 日	40 年 1 月 26 日	3
3-2	" 12 月 26 日	" 3 月 30 日	3
3-3	40 年 1 月 26 日	" 4 月 27 日	3
3-4	" 2 月 25 日	" 5 月 27 日	3
3-5	" 4 月 27 日	" 7 月 31 日	3
3-6	" 6 月 23 日	" 9 月 28 日	3
3-7	" 7 月 31 日	" 9 月 28 日	3
3-8	" 9 月 28 日	" 12 月 8 日	3
6-1	40 年 1 月 26 日	40 年 7 月 31 日	6
6-2	" 4 月 27 日	" 9 月 28 日 (10月30日)	5 ~ 6
6-3	" 7 月 22 日	41 年 1 月 31 日	6
6-4	" 12 月 8 日	" 4 月 28 日	5
12-1	39 年 11 月 3 日	40 年 9 月 28 日	11 ~ 12
12-2	40 年 1 月 26 日	41 年 1 月 31 日	12
12-3	" 4 月 27 日	" 4 月 28 日	12

賀市敦賀発電所用地前の浦底湾内で行なった。海生物の付着はその期間によって大いに様相を異にするので、その比較判定は3カ月、6カ月、1カ年の3郡に分けて行なうこととした。また、試験板の浸漬位置としては、海水の流れがさかんな位置におくことに留意しながら、浦底湾の湾口と湾奥のそれぞれ水深1mおよび10mの所をえらんだ。また試験板の寸法は15×30cmである。以下の記述で調査結果を表わすのに便利のように、表-1、

表-2 海生物表示記号

記 号	付着生物類	記 号	付着生物類
<i>P</i>	管 棲 多 毛 類	<i>M</i>	ムラサキイガイ類
<i>B</i>	苔 虫 類	<i>T</i>	ホ ヤ 類
<i>C</i>	管 棲 甲 殻 類	<i>W</i>	海 藻 類
<i>B_s</i>	フ ジ ツ ポ 類	<i>M_s</i>	そ の 他

表-3 3 カ月浸漬におけるアルミ塗装板とコンクリート板の付着数の比較

期 間	板 質	3-1		3-2		3-3		3-4		3-5		3-6		3-7		3-8		合 計	
		<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>
湾 内 水 深 1 m	<i>P</i>	53	109	—	—	26	30	—	—	7	14	1200	1300					1286	1453
	<i>B</i>	1	—	2	1	1	2	12	3	73	26	49	9					138	41
	<i>C</i>	3000	3500	3200	1400	500	350	1000	2000	2400	2000	400	600					10500	9850
	<i>B_s</i>	—	—	1	—	2	4	—	—	2	152	79	42					84	198
	<i>M</i>	—	—	—	—	65	164	731	824	1095	558	7	—					1898	1546
	<i>T</i>	48	89	70	50	100	100	—	—	40	7	4	—					262	246
	<i>W</i>	—	—	120	—	300	500	800	700	—	—	—	—					1220	1200
	<i>M_s</i>	—	—	—	—	13	38	34	131	32	9	—	—					79	178
	小計	3102	3698	3392	451	1007	1188	2577	3658	3649	2766	1739	1951					15467	14692
湾 内 水 深 10 m	<i>P</i>	52	390	3	15	900	1100	—	—	9	10	1800	1200					2764	2715
	<i>B</i>	6	5	2	2	27	80	—	—	6	9	33	21					74	117
	<i>C</i>	350	450	750	400	400	700	5000	2000	1500	1000	200	200					8200	4750
	<i>B_s</i>	39	84	45	6	67	151	1	—	312	406	186	62					653	709
	<i>M</i>	—	—	—	—	16	20	110	94	779	279	—	—					905	393
	<i>T</i>	9	90	6	3	70	80	9	2	—	—	—	—					94	175
	<i>W</i>	—	—	—	—	—	—	500	—	—	—	—	—					500	1
	<i>M_s</i>	—	1	—	—	11	2	2	—	14	25	—	—					27	28
	小計	456	1020	806	426	1491	2133	5622	2096	2620	1729	2222	1483					13217	8887
湾 口 水 深 1 m	<i>P</i>	90	290	3	3	13	120	—	—	10	17	147	79	1200	1200	2	8	1465	1717
	<i>B</i>	11	2	15	9	9	66	2	2	96	89	9	13	24	35	19	11	165	227
	<i>C</i>	1500	750	550	1750	200	350	1000	1000	2000	1000	300	200	500	800	100	300	6150	6150
	<i>B_s</i>	14	93	4	0	9	62	—	—	27	97	42	20	1	6	9	6	96	284
	<i>M</i>	—	—	—	—	4	88	139	122	—	23	—	—	—	—	17	37	160	270
	<i>T</i>	4	6	48	15	90	40	1	—	40	12	—	—	100	92	6	11	289	176
	<i>W</i>	—	—	30	100	300	500	800	600	—	—	—	—	—	—	—	—	1130	1200
	<i>M_s</i>	—	6	—	—	2	99	37	43	—	—	—	—	—	—	18	14	57	162
	小計	1619	1147	650	1877	627	1325	1979	1767	2173	1238	498	312	1825	2133	171	387	9512	9186
湾 内 水 深 10 m	<i>P</i>	188	262	9	22	160	400	—	—	27	9	321	305	1400	1000	9	18	2115	2026
	<i>B</i>	13	2	3	2	24	26	1	—	25	12	28	11	52	50	22	15	172	118
	<i>C</i>	1500	200	300	300	1200	950	2000	1000	400	200	50	50	200	50	30	30	5700	2787
	<i>B_s</i>	566	635	125	104	701	667	5	3	1330	956	1990	847	57	63	79	26	4913	3301
	<i>M</i>	—	—	—	—	126	212	125	185	2	4	8	—	—	—	6	3	267	404
	<i>T</i>	—	4	—	—	—	—	—	—	60	30	6	—	2	25	4	2	72	61
	<i>W</i>	—	—	—	—	—	—	400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	—
	<i>M_s</i>	—	—	—	—	86	384	79	9	—	7	—	—	—	—	12	9	177	409
	小計	2268	1103	497	428	2297	2639	2610	1197	1848	1218	2403	1217	1711	1188	182	103	13816	9083
湾 内 計		3558	4718	4198	1877	2498	3421	8199	5754	6269	4495	3961	3434					28684	23579
湾 口 計		3887	2250	1147	2305	2924	3964	4589	2664	4021	2456	2901	1529	3536	3321	353	490	23328	18269
1 m 計		4721	4845	4042	3328	1634	2513	4556	5425	5822	4004	2237	2263	1825	2133	171	387	24979	23878
10m 計		2724	2123	1303	854	3788	4772	8232	3293	4468	2947	4625	2700	1711	1188	182	107	27033	17970
合 計		7445	6968	5345	4186	5422	7285	12788	8718	10290	6951	6862	4963	5536	3321	353	490	52012	41848

表-2 に示す記号を用いることとする。

(1) 調査結果

a) 3 カ月浸漬板の結果

3 カ月浸漬板上の付着個体数を生物群別に表示すると表-3 のとおりである。表中の記号 *a* はアルミニウム試験板、また記号 *c* はコンクリート試験板もあらわす。このアルミ板とコンクリート板での付着生物数の合計数の10% 以上の差がある場合を有意の差と見なして、アルミ板とコンクリート板の比較をわかりやすくまとめると表-4 のようになる。この表からわかるように、3 カ月浸漬の各組においてアルミ塗装板とコンクリート板のいずれかが常に多いという値は全く見るができない。しかし、最右欄すなわち、総合計の欄をみるとアルミ板の方が有意的に多いという結果がほぼ揃っており、とくに水深 10 m の位置においてかなりはっきり認められる。以上のことから3 カ月浸漬の場合、コンクリート面よりも金属の防錆塗装面の方に付着が多い傾向があるといえよう。また、これを生物群別に一覧すると、表-5 のようになる。表-5 から管棲甲殻類、フジツボ類、ムラサキイガイ類、海藻類はアルミ塗装板の方に有意的に多く発生する傾向を示していることがわかる。

b) 6 カ月浸漬板の結果

上記の3 カ月浸漬板の結果はほぼ付着生物群集の発生期にあたる。これに対して6 カ月浸漬板はその飽和期を示すものと考えられるが、その結果は必ずしも発生期の

表-6 5 カ月浸漬におけるアルミ塗装板とコンクリート板の付着数の比較

		6-1		6-2		6-3		計	
		<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>c</i>
湾内 1 m	<i>P</i>	5	28	185	218			190	246
	<i>B</i>	66	23	24	6			90	29
	<i>C</i>	2000	2400	50	50			2050	2450
	<i>B_s</i>	5	58	71	67			80	125
	<i>M</i>	153	251	12	2			165	253
	<i>T</i>	50	30	5	2			55	32
	<i>W</i>	—	—	—	—			—	—
	<i>M_s</i>	29	73	—	—			29	73
	小計	2312	2863	347	345			2659	3213
湾内 10 m	<i>P</i>	—	9	171	110			171	119
	<i>B</i>	8	17	62	31			70	48
	<i>C</i>	1200	1500	—	—			1200	1500
	<i>B_s</i>	245	81	347	257			592	338
	<i>M</i>	114	83	—	2			114	85
	<i>T</i>	3	2	5	5			8	7
	<i>W</i>	—	—	—	—			—	—
	<i>M_s</i>	12	44	—	—			12	44
	小計	1582	1736	585	405			2167	2141
湾口 1 m	<i>P</i>	4	14	100	120	4	49	108	183
	<i>B</i>	85	48	116	177	13	30	214	255
	<i>C</i>	2000	1200	—	—	700	100	2700	1300
	<i>B_s</i>	42	20	51	10	21	50	114	80
	<i>M</i>	762	722	2	—	376	25	1140	247
	<i>T</i>	80	35	1	—	—	—	81	35
	<i>W</i>	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>M_s</i>	112	124	—	—	340	35	452	159
	小計	3085	1663	270	307	1454	289	4809	2259
湾口 10 m	<i>P</i>	3	6	96	62	12	5	111	73
	<i>B</i>	23	14	179	152	47	8	249	174
	<i>C</i>	300	500	—	—	230	150	530	650
	<i>B_s</i>	956	207	985	931	302	4	2223	1142
	<i>M</i>	155	135	—	2	51	64	206	201
	<i>T</i>	50	50	—	—	—	—	50	50
	<i>W</i>	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>M_s</i>	9	46	—	—	6	14	15	50
	小計	1496	958	1260	1147	648	235	3384	2350
湾内計		3894	4599	932	750			4826	5344
湾口計		4581	2621	1530	1454	2102	524	8193	4609
1 m 計		5397	4526	617	654	1454	289	7468	5467
10 m 計		3078	2694	1845	1552	648	235	5571	4481
合計		8475	7220	2462	2104	2102	524	13039	9948

表-4 アルミ塗装板とコンクリート板の海生物付着傾向の比較 (3 カ月浸漬の場合)

試験記号	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	合計
材 質	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>
湾内 1 m	—	○×	—	×○	○×	—			—
湾内 10 m	×○	○×	×○	○×	○×	○×			○×
湾内 計	×○	○×	×○	○×	○×	—			○×
湾口 1 m	○×	×○	×○	—	○×	○×	—	×○	—
湾口 10 m	○×	—	—	○×	○×	○×	○×	○×	○×
湾口 計	○×	×○	—	○×	○×	○×	—	×○	○×
1 m 計	—	—	×○	—	○×	—	—	×○	—
10 m 計	○×	○×	×○	×	○×	○×	○×	○×	○×
合計	—	○×	×○	○×	○×	○×	—	×○	○×

(○:多 ×:少 —:差僅少)

表-5 生物群別にみた海生物付着状況の比較 (3 カ月浸漬の場合)

	湾内計		湾口計		1 m 計		10 m 計		合計	
	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>
<i>P</i>	4050	4068	3580	3737	2751	3070	4879	4735	7630	7805
<i>B</i>	218	158	337	345	303	267	247	235	549	502
<i>C</i>	18700	14600	11850	8930	16650	16000	13900	7530	30550	23530
<i>B_s</i>	737	987	5197	3585	180	482	5566	4010	5934	4492
<i>M</i>	2894	1937	537	674	2149	1816	1172	797	3431	2613
<i>T</i>	356	421	248	237	551	422	166	236	604	658
<i>W</i>	1720	1200	1600	1200	2350	2400	900	—	3320	2400
<i>M_s</i>	106	206	234	571	136	340	204	437	340	777
計	28684	23579	23328	18269	24979	24798	27034	17970	52012	41847

表-7 アルミ塗装板とコンクリート板の海生物付着傾向の比較 (6 カ月浸漬の場合)

試験記号	6-1	6-2	6-3	合計
材 質	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>	<i>a c</i>
湾内 1 m	— +	— —		— +
湾内 10 m	— +	○ ×		— —
湾内 計	— +	○ ×		— +
湾口 1 m	○ ×	— +	○ ×	○ ×
湾口 10 m	○ ×	+ —	○ ×	○ ×
湾口 計	○ ×	— —	○ ×	○ ×
1 m 計	+ —	— —	○ ×	○ ×
10 m 計	+ —	+ —	○ ×	○ ×
合計	+ —	+ —	○ ×	○ ×

傾向をそのまま持続するとは限らないのである。いま、6カ月浸漬板を一括表示すると表—6を得る。これを3カ月板の場合に準じて有意の多少を比較してみると表—7のようになる。これを3カ月板の場合に比較してみると著しい相違点に気づく。それは3カ月板ではアルミ塗装板とコンクリート板のいずれが付着数が多いかという比較を行なうと、その配置は不規則であって、湾口、湾内のいずれにおいても、とくに水深1mにおいてはいずれとも傾向が決しがたかった。これに対して6カ月板では表—7にみられるように、アルミ塗装板の方が付着数が多い傾向が認められる。また、6カ月板における生物群別の付着状況は表—8のとおりである。この表より明らかなように、アルミ塗装板に多くの個体が発生するのは、フジツボ類、ムラサキガイ類であって、付着障害の最も著しい両類が3カ月板の結果と一致していることは注目を要する。

c) 1カ年浸漬板の結果

1カ年浸漬板は回収数が不足であるため、資料として十分解析するための困難であったが、得られた限りのものについて一括表示すると表—9のようになる。表—9からはとくにアルミ塗装板において付着数が多いという値が見られず、両板の付着数はきわめて接近していることがみられる。

以上、3カ月、6カ月、1年の浸漬板においてアルミ塗装板とコンクリート板とを比較してみると、付着群集の形成期に相当する浸漬板3カ月程度では相当のバラツ

キがありながらも大体アルミ塗装板の付着が多く出る傾向がみられる。ついで、付着群集の完成期に相当する6カ月頃には、その傾向がほぼ安定してアルミ塗装板の付着数がほとんど常に多くなる。しかし、群集の崩壊期ないし交代期である1カ年後になると、再び傾向がばらついてくると同時に両者の付着数は接近してくる。このような点からみると、冷却用水路をコンクリート造とするのも、鉄管にさび止め処理を施して用いるのも長期的にみれば顕著な差がないものといえよう。

4. 水深による海生物付着度の差

付着生物はその幼生がすべてプランクトンとして浮遊するものであり、それは、ある種類にあってはほぼ一定の水深のところに層をなして密度が高くなるという性質を有する。したがって、3.で述べた水深1mと10mに浸漬した試験板上に出現する付着生物の種類組成も当然いくぶんかの差を示すはずであり、また着生後の成長も異なってくるはずである。このことは、冷却水路の取水口を水深何メートルのところに設けたほうがよいかの判定の材料となるとともに、その水深より取水する場合での付着生物相の変遷を予測する材料ともなるであろう。この意味において、3.で述べた調査結果を水深別に整理したのが、表—10、表—11である。これらの表中の付着個体数の数値はすべてアルミ塗装板とコンクリート板との合計値である。

a) 3カ月浸漬の場合の地点別水深差の比較

表—10によってみると、湾内、湾口ともに水深10mの方が多く付着するのは管棲多毛類、フジツボ類であるのに対して、水深1mの所では、管棲甲殻類、群体ホヤ類、海藻類であることがよくわかる。コケムシ類については、いずれも大差はなく、ムラサキガイ類は湾内では1mの所に多いが、湾口では差はなく、その他のものでは湾内と湾口とで逆になっている。そして全付着数をくらべると湾内では1mの方が多く、湾口では10mの方が多く、管棲甲殻類と海藻類を除いてみると、1mよりも10mの方がわずかに多くなっている。この二つの群は、いずれも時期的に不安定な出現をし、かつ、個体の大きさが小さいという点で恒常的に比較することはやや不適当なものであることを考慮に入れると、実用的には水深10mの方にやや付着が多いということの方が真相に近いものといえることができる。

b) 6カ月および1年浸漬板における水深差

表—11をみると、6カ月のものでは湾内、湾口ともに同一傾向を示し、1mに多く現われるものは、管棲多毛類、管棲甲殻類、ムラサキガイ類、群体ホヤ類であり、10mのところにも多いものはフジツボ類である。コケムシ類は必ずしも一方に多いとはきまらない。12カ月浸漬板における水深差については浸漬材料が不十分な

表—8 生物群別にみた海生物付着状況の比較
(6カ月浸漬の場合)

群別	湾内計		湾口計		1m計		10m計		合計	
	a	c	a	c	a	c	a	c	a	c
P	361	365	219	256	298	429	282	192	580	621
B	160	77	463	429	304	284	319	222	623	506
C	3250	3950	3230	1950	4750	3750	1730	2150	6480	5900
B _s	672	463	2337	1222	194	205	2815	1480	3009	1685
M	279	338	1346	448	1305	500	320	286	1625	786
T	63	39	131	85	136	67	58	57	194	124
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M _s	41	117	467	209	481	232	27	94	508	326
計	4826	5349	8193	4609	7468	5467	5571	4481	13039	9948

表—9 生物群別にみた海生物付着状況の比較
(1カ年浸漬の場合)

	湾内計		湾口計		1m計		10m計		合計	
	a	c	a	c	a	c	a	c	a	c
P	562	331	254	427	423	534	393	224	816	758
B	99	73	113	62	108	58	104	77	212	270
C	—	—	100	50	100	50	—	—	100	50
B _s	188	70	320	523	115	62	393	531	508	593
M	157	320	371	512	480	633	48	199	528	832
T	16	4	14	10	28	12	2	2	30	14
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M _s	3	37	78	298	77	192	4	143	220	335
計	1025	835	1250	1882	1331	1541	944	1176	2414	2852

表一10 3 カ月浸漬板による地点別水深比較 (個体数)

		3-1		3-2		3-3		3-4		3-5		3-6		3-7		3-8		計		平 均	
		1 m	10m	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
湾	P	162	442	—	18	56	2 000	—	—	21	19	2 500	3 000					2 739	5 479	457	913
	B	1	11	3	4	3	107	15	—	99	15	58	54					179	191	30	32
	C	6 500	800	4 600	1 150	850	1 100	3 000	7 000	4 400	2 500	1 000	406					20 350	2 950	3 392	2 158
	B _s	—	123	1	51	6	218	—	1	154	718	121	251					282	1 368	47	228
	M	—	—	—	—	229	36	1 555	204	1 653	1 058	7	—					3 444	1 298	574	216
	T	137	99	120	9	200	150	—	11	47	—	4	—					508	269	85	45
	W	—	—	120	—	800	—	1 500	500	—	—	—	—					2 420	500	403	83
	M _s	—	1	—	—	51	13	165	2	41	39	—	—					257	55	43	9
計		6 800	1 476	4 843	1 232	2 195	3 624	6 235	7 718	6 415	4 349	3 690	3 705					30 179	22 110	5 030	3 685
湾	P	380	451	6	31	133	560	—	—	27	36	226	630	2 400	2 400	10	27	3 182	4 135	398	517
	B	13	15	24	5	75	50	4	1	187	41	22	39	59	102	30	37	414	290	52	36
	C	2 250	1 700	2 300	600	550	2 150	2 000	3 000	3 000	600	500	100	1 300	250	400	80	12 300	8 480	1 538	1 060
	B _s	107	1 201	4	289	71	1 368	—	8	124	2 286	62	2 837	7	120	15	105	390	8 214	49	1 027
	M	—	—	—	—	92	338	261	310	23	6	—	8	—	—	54	9	430	671	54	84
	T	10	4	63	—	130	—	1	—	52	90	—	6	192	27	17	6	465	133	58	17
	W	—	—	130	—	800	—	1 400	400	—	—	—	—	—	—	—	—	2 330	400	291	50
	M _s	6	—	—	—	101	470	80	88	—	7	—	—	—	—	32	21	219	586	27	73
計		2 766	3 371	2 727	925	1 952	4 936	3 746	3 807	3 413	3 066	810	3 620	3 958	2 899	558	285	19 730	22 909	2 466	2 864

表一11 6 カ月, 12 カ月浸漬板による地点別水深比較 (個体数)

		6-1		6-2		6-3		計		平 均		12-1		12-2	
		1 m	10m	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
湾	P	33	9	403	281			436	290	218	145	523	114		
	B	89	25	30	93			129	118	65	59	63	56		
	C	4 400	2 700	100	—			4 500	2 700	2 250	1 350	—	—		
	B _s	67	326	138	604			205	930	103	465	114	61		
	M	404	197	14	2			418	199	209	100	439	17		
	T	80	5	2	—			82	5	41	3	16	—		
	W	—	—	—	—			—	—	—	—	—	—		
	M _s	102	56	5	10			107	66	5	33	35	4		
計		5 175	3 318	692	990			5 867	4 308	2 934	2 154	1 190	252		
湾	P	18	9	220	158	53	19	291	186	97	62	321	247	535	
	B	133	37	293	331	43	55	469	423	156	141	57	72	149	
	C	3 200	800	—	—	800	380	4 000	1 180	1 333	393	—	—	300	
	B _s	62	163	61	1 916	71	306	194	3 385	65	1 128	111	780	13	
	M	984	290	2	2	401	115	1 384	407	462	136	12	207	135	
	T	115	100	1	—	4	—	120	100	40	33	19	2	25	
	W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	M _s	236	55	—	—	—	—	236	55	79	18	410	142	56	
計		4 748	2 454	577	2 407	1 372	875	6 697	5 736	2 232	1 912	930	1 450	1 213	

ため結論を出すことは困難であるが、一般的傾向としては、管棲多毛類と群体ホヤが 1 m の所に多く出ている。また、フジツボとムラサキガイは湾内と湾口とでは逆になっている。

以上の検討より、1 m と 10 m との水深の差による付着状況の変化は、期間により必ずしも一定とはいいがたいが障害に最も影響をもつものの一つと考えられるフジツボ類は、ほとんど常に 10 m 線に多く付着するようである。

5. 海中でのクラゲの鉛直分布

(1) 冷却水の深層取水とクラゲ防除対策

わが国各地における発電所では、クラゲの集団が冷却

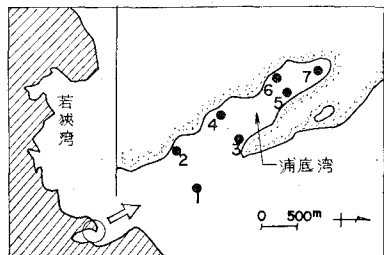
水取水口へ侵入して、取水口スクリーンの閉塞や破損、さらに発電出力の制限等、発電所の運転に多くの障害をおよぼしており、その障害を排除する方策をたてる必要にせまられている。海水中のクラゲの鉛直分布を支配する要素として、クラゲの食餌となるプランクトン類の分布、光量、水温、塩分濃度等のクラゲ自身の生物としての嗜好、クラゲの比重や遊泳力等の生物的特性とともに、波浪、海水の流れ等の力学的要素が考えられる。クラゲの比重については、大島ら⁷⁾の研究調査によれば、海水の比重とほぼ同じであり、また、クラゲを比重がわずかに異なる海水中に投入すると数時間で環境水の比重に近づく傾向があることから、大島はクラゲの鉛直方向分布を制約する要素として環境水の比重が大きな意義が

あるとしている。また、桑原⁹⁾らは東京湾内の現地調査の結果に基づき、ミズクラゲの鉛直方向分布は、海水中の塩素量、ひいては海水の比重分布と深い関係を有していると述べている。海水の密度成層形成は、温度や塩素量が水深面に変化することにより生じるものであるから、対象となる海域におけるクラゲが表層近くの特定的な水層部を好むものであれば、クラゲの比重が海水のそれとほとんど等しく、さらにクラゲ自身の遊泳力はほとんど無視しう程度のものであることから、冷却水を深層より取水することにより、取水路内へのクラゲの流入を阻止することが可能であろうという考えもでてくるわけである。しかし、非常に深い水深の水を深層取水するならば、深層取水によるクラゲ除去も十分可能ではあるが、多くの発電所の取水点における水深は 10~15 m 程度であり、このような水深の所で、はたしてクラゲの少ない下層水が存在するか否かという問題は、深層取水口設計の実際的な問題として、さらに検討をくわえる必要があると考えられる。著者らは、敦賀原子力発電所取水口の設計に際して、昭和 40 年 11 月から 42 年 10 月の間にわたり、取水地点である浦底湾内におけるクラゲの生態調査を行なったが、以下、その結果を用いて、クラゲの鉛直方向分布の問題につき若干の検討をくわえることとする。

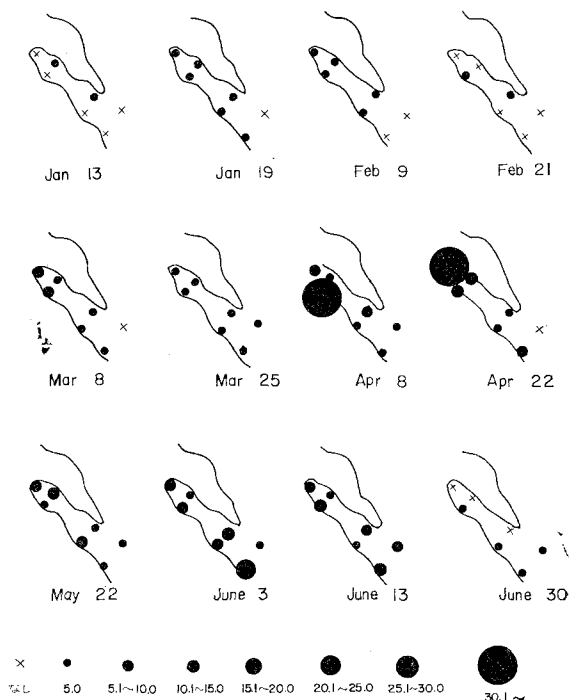
(2) 浦底湾内におけるクラゲの分布

浦底湾は福井県敦賀市の敦賀湾の内湾で、南側に位置する湾口は敦賀市に面し、北側湾奥に敦賀原子力発電所の冷却水取水口があり、年間を通じてきわめて静穏な海面を有している。昭和 41 年 11 月から 42 年 10 月までの間、この湾内のクラゲの出現期、分布密度、成長の状態、クラゲの鉛直方向分布を図一2 に示す 7 定点において、毎月 2 回、計 25 回にわたり測定調査を行なった。クラゲの鉛直方向分布調査にさいしては、深度別の採集とともに、水中テレビによる観察をも併用した。これらの調査結果から湾内のクラゲの季節変化を示すと 図一3 のとおりである。また、海水の温度分布とクラゲの鉛直方向分布の関係を示すと 図一4 のとおりである。図一3 にみられるように、3 月と 6~10 月に多量のクラゲが存在している。またクラゲの水面分布は斑状に群がるが、そのクラゲ群内でクラゲ採取した結果によると、安田⁹⁾

図一2 浦底湾内のミズクラゲ分布観測点の配置



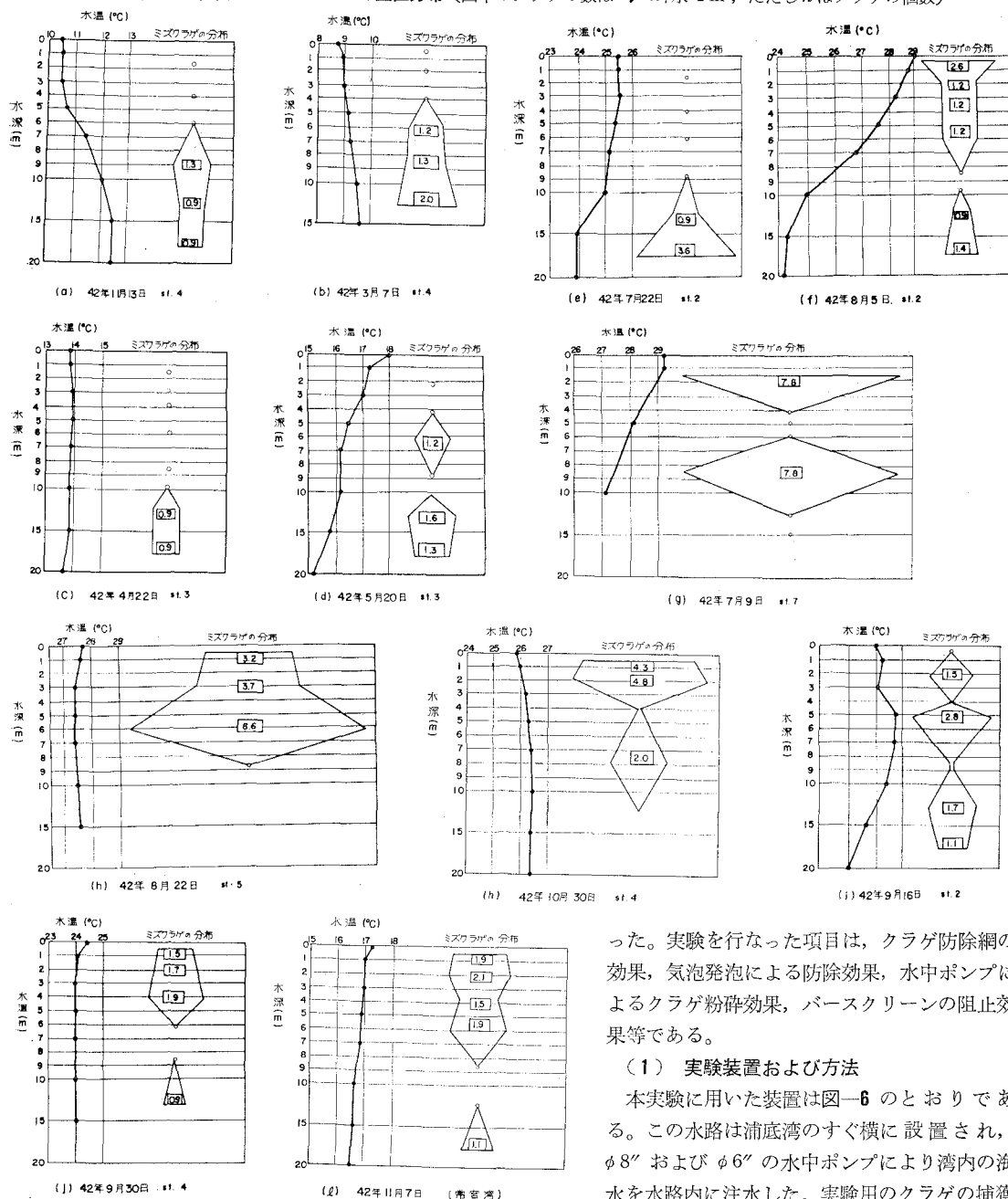
図一3 昭和 42 年のミズクラゲ発生の季節変化の状態
(単位: 個/水 1 m³)



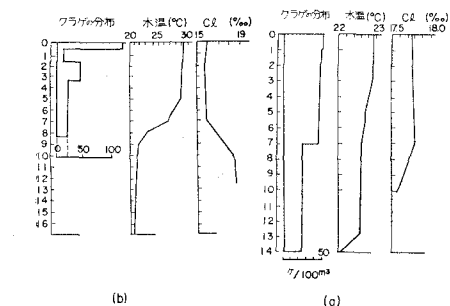
も報告しているように、海水 1 m³ 中に 71 個体も存在する。この値は桑原¹⁰⁾が東京湾内で観測した 0.05 個体~25 個体/m³ に比較して、かなり大きな値であり、同発電所冷却水の取水計画にあたり、クラゲ防除対策は重要な検討事項と目された。つぎに、クラゲの鉛直方向分布については、図一4 よりわかるように、春期には下層 (10 m 以深) に多く、秋期には上、中層 (以深 10 m 以浅) に多いが、15~20 m 程度のこの湾内水深のところで取水設備を設計する際には、クラゲが存在しえないほどの深層部はなく、全水深にわたり、存在していると考えべきであろう。東京湾における桑原らの調査では、同湾内でのクラゲの鉛直方向分布と水温分布、塩素量分布は、図一5 のとおりであり、桑原らはその分布状態はかなり動的なものであると述べている。

6. クラゲ防除に関する実験

日本原子力発電会社が建設中の敦賀原子力発電所 (出力 322 MW) では、最大 21 m³/sec の海水を冷却水として浦底湾より取水する設計である。同湾一帯は、安田も述べているように、クラゲの養生育成に好適な環境にあり、毎年大量のクラゲが発生し、5. でも記述したごとく、クラゲの成体は周年にわたり生存しており、それに対する対策が設計上重要な検討事項と目され、現地に長さ 7 m、幅 1.6 m の大型模型水路を製作し、実際のクラゲを用いて、種々のクラゲ防除方法につき実験を行な

図—4 浦底湾内海水温とミズクラゲの垂直分布 (図中のクラゲの数は $\frac{1}{\sqrt{n}}/\text{水 } 1\text{ m}^3$, ただし n はクラゲの個数)

図—5 東京湾内におけるミズクラゲの垂直分布, 比重, 塩素量の関係 (桑原らの調査による)



った。実験を行なった項目は、クラゲ防除網の効果、気泡発泡による防除効果、水中ポンプによるクラゲ粉碎効果、バースクリーンの阻止効果等である。

(1) 実験装置および方法

本実験に用いた装置は図—6 のとおりである。この水路は浦底湾のすぐ横に設置され、 $\phi 8''$ および $\phi 6''$ の水中ポンプにより湾内の海水を水路内に注水した。実験用のクラゲの捕獲

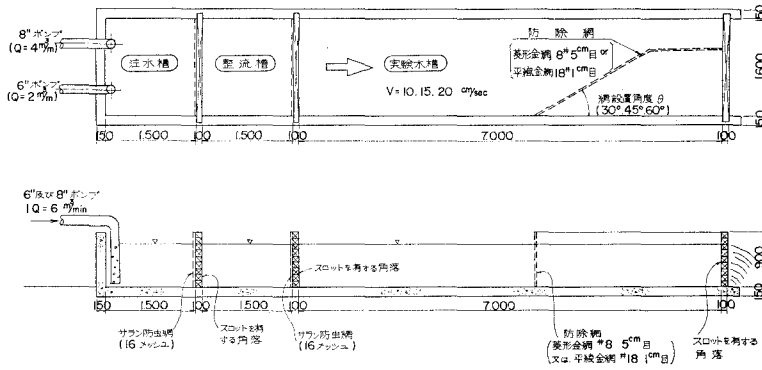
は、湾内でポリバケツにより一匹ずついいに行なった。なお、1 回の実験に供したクラゲの数は実験の項目により 10 ~ 60 匹/回に加減した。

(2) 実験結果

a) クラゲ防除網の効果

この実験は、取水口に来襲するクラゲを取水口側部に設ける別水路に誘導する場合を想定して、図—6 に示す設備で、網の目、網の設置角度、流速等を変化させて、防除網の効果を検討しようとしたものである。実験条件

図-6 防除網の効果判定実験設備 (scale 1/50)

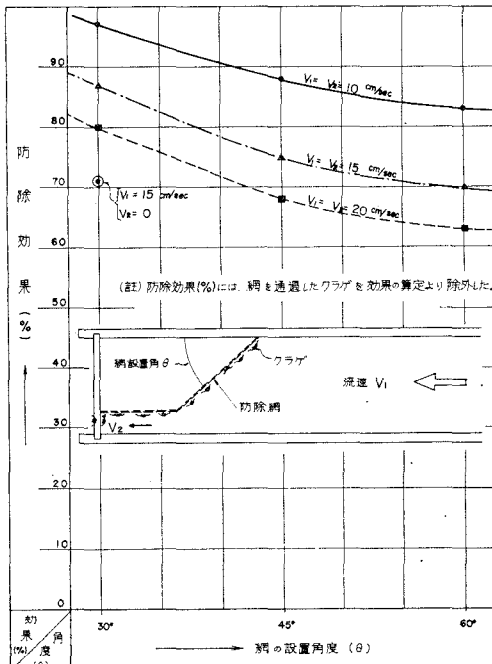


の組合せは表-12のとおりであり、また、1回の実験に用いたクラゲの個数は60匹である。観測結果から、流速をパラメーターとして網の設置角度と防除効果との関係をもとめてみると、図-7のとおりである。また、防除網の網目寸法と網目を通過するクラゲの直径との関係は図-8のとおりである。なお、図-8の結果は、網目5cm、網角度30°~60°、流速10~20cm/secの場合に相当するものである。図-7より、流速および網の設置角度が小さいほど、防除効果が高いことがわかる。また、図-8により、網目の3.5倍程度までのクラゲは網を通過す

表-12 防除網の効果に関する実験条件

網の角度	網の目 (cm)	流速 (cm/sec)
30°	1	5
45°	1	5
60°	1	5

図-7 防除網の効果判定

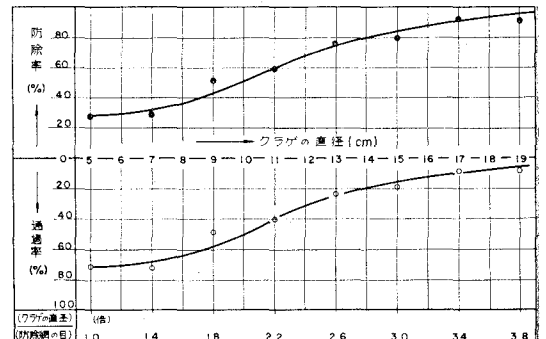


る被害防止対策の一つとして考えられる。そこで、発泡によりクラゲがどの程度水面近くに浮上させることができるかを知るために実験を行なった。この実験では、流水方向に対して30度の角度に2条の給気管を水路底部に布設してエアーカーテンを作った。実験条件の組合せおよび実験結果は表-13に示すとおりである。また実験結果を図示すると図-9のとおりである。この実験では、相当数(43~73%)のクラゲが上部に浮上することが認められたが、このことより、エアーカーテンはクラゲを水面近くに導くのに有力な手段であることを定性的に知ることができる。なお、クラゲの浮上する割合は、空気量の大きいほど、給気管の列が多いほど、また水路内流速が小さいほど、高くなる。以上のように、エアーカーテンによりクラゲを水面近くまで浮上させることができるが、それを除去する方法が適切でない

c) 水中ポンプによるクラゲ粉砕効果

取水口前面でクラゲを捕獲するにしても、スクリーンにより除去するにしても、生きたクラゲはなんらかの処理をしたうえで処分しなくてはならない。ここでは、ク

図-8 防除網の網目とクラゲの直径との関係



(註) ・実験に用いたクラゲの個体数 約400匹

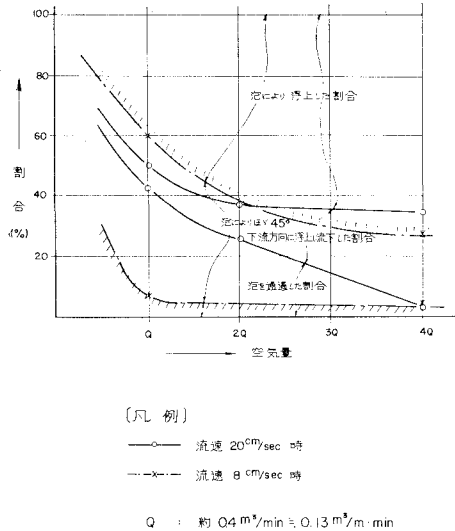
・実験用防除網 (菱形金網 8.5mm)

・流速 10~20 cm/sec

表一13 発泡による流下阻止効果に関する実験条件と結果

水槽内流速 (cm/sec)	20			30		
水深 (cm)	54			62		
水温 (°C)	25.5			25.8		
給気管の径と配列	φ 1 1/2"×2 列			φ 1 1/2"×2 列		
給気管頂に設けた空気孔	φ 3 mm ctc 10 cm			φ 3 mm ctc 10 cm		
空気量	小 (Q)	中 (2Q)	大 (3Q)	小 (Q)	大 (2Q)	
気泡により浮上したクラゲの割合 (%)	50	63	65	40	—	73
気泡によりほぼ 45° 下流方向に浮上流下した割合 (%)	8	11	32	53	—	23
気泡を通過し、浮上せず流下した割合 (%)	42	26	3	7	—	4

図一9 発泡による流下阻止程度の判定実験結果

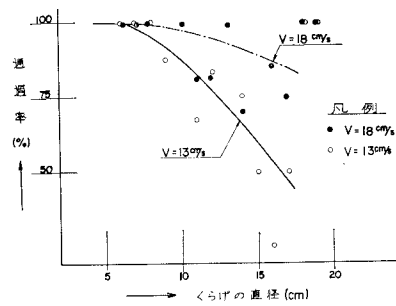


ラゲ処理の一方法として、水中ポンプ運転により粉砕する方法に注目し、その粉砕度および処理後の状況を実験により観察した結果につき概述する。実験は約 0.9 m³ のクラゲを実験水槽内に放流し、φ 4" 水中ポンプ 1 台を運転して行なった。その結果によると、ポンプを通過したクラゲは粉砕され、ポンプ吐口に設けた 0.5 mm 目の網を通過するものが大半であり、粉砕後の最大寸法はほぼ 2 mm 以下であった。また、粉砕されたクラゲは粘性度の高い液体状となり、多少の臭気を伴い多量の泡が発生する。この実験の結果から、水中ポンプによるクラゲ処理方法は有効なものであると判断されるが、実用化にあたっては、ポンプの最適形式、容量ならびに処理後の放出場所の選定については、各発電所地点の特種事情を考慮して慎重な検討を行なう必要があるものと考えられる。

d) バース スクリーンのクラゲ流入阻止効果

クラゲの処理設備として、取水口（スクリーン室）にレーキ付バースクリーンを設置する設計が多くの発電所で採用されているが、その実際の効果については明確にされていないのが現状である。そこで今後の設計の参考

図一10 バースクリーンの防止効果（クラゲの直径と通過率との関係）



に資するため、実験水槽内にバースクリーンを設置し、クラゲの直径とスクリーン流速とクラゲ通過量の関係を調べてみた。実験に用いたバースクリーンの仕様はつぎのとおりである。

- バーの寸法 16×22 mm
- バー純間隔 40 mm
- バー材料 木製（粗面）

この実験では、レーキの効果は省略した。実験結果は図一10 のとおりである。この図によってみると、データにバラツキはあるが、バースクリーンの間隔に比較してかなり大きな寸法をもったクラゲのスクリーンを通過していくことがわかる。そして、その通過量は、スクリーン流速が大きいくほど、大きくなる。実際の発電所ではスクリーン流速は 20~30 cm/sec あるいはそれ以上にとる場合が多いが、そのような流速のもとでは、レーキが回転しても、クラゲが多量の場合、相当量のクラゲがバースクリーンを通過してくるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 千秋信一：“冷却水深層取水工の設計に関する 2, 3 の問題”，第 14 回海岸工学講演会講演集 (1967)。
- 2) 中井甚二郎・工藤盛徳：“火力発電所の用水路について一生物学的にみた問題・新清水共同発電所におけるカーテンウォール設置の影響概要一”，沿岸海洋研究ノート，第 7 巻第 1 号，1969 年 3 月，日本海洋学会，沿岸海洋研究部会
- 3) 佐藤修一：“クラゲ排除対策に関する調査研究（その 1，クラゲの来襲と事故状況 および気象の関係）”，東京電力技報，1967 年 2 月。
- 4) 大島泰雄・笠原正五郎・二村義八郎・桑原 進：“クラゲ排除対策に関する調査研究（その 2，ミズクラゲの比重に関する研究）”，東京電力技報，1967 年 7 月。
- 5) 小野 章・佐藤修一・二重作主税：“クラゲ防止網に関する水理実験”，東京電力技報，昭和 40 年 8 月。
- 6) 辻本 進・竹村立史・大西外明・渡辺嘉男：“長大な海底取水鋼管における保守上の問題点”，土木学会誌 Vol. 53, Oct. 1968.
- 7) 既出の 4) と同じ。
- 8) 桑原 進・佐藤修一・野口信彦：“ミズクラゲの生態学的研究 1”，日本水産学会誌，第 34 巻第 2 号，1969。
- 9) 安田 徹：“福井県浦底湾におけるミズクラゲの生態—1，成体の出現状況”，日本水産学会誌，第 35 巻第 1 号 1969。
- 10) 既出の 8) と同じ。