

# 復水器冷却水路系の発泡防止対策

Prevention of Foam Discharge from Cooling Water Channel Systems into the Sea

福 原 華 一\*  
Kaichi Fukuhara

A large number of bubbles formed in a cooling water channel system happen to flow into the sea, and thus to affect seascapes. Hence such a channel system with a large flow rate needs to be designed suitably not to discharge a noticeable amount of foam at the outlet. The author proposes a new maintenance-free and economic countermeasure against foam discharge, in which all the bubbles in the flowing water are collected at a designed highest part of a pressure tunnel to form a floating air mass and the air blows out through an airpipe.

Keywords: Cooling water channel system, Air bubble, Foam discharge prevention, Shore-sited power station.

## 1. はじめに

火力・原子力発電所では、出力10万Kw当たり、火力約3.5m<sup>3</sup>/s、原子力約6.0m<sup>3</sup>/sの海水を復水器の冷却に使用している。この水路系で生じた泡が消えないまま海域に流出し、景観を損ねる場合がある。発泡防止対策は、発電所運開後では困難であったり、多額の費用がかかるので、発泡しない合理的な水路系の設計が望まれている。

電力中央研究所では、電力各社の数多くの発泡防止対策に協力してきた。本報告ではこれらを通して得られた知見をもとに、冷却水路系の発泡状況と発泡防止対策例を概括するとともに、泡を海域に流出させず、かつ、メンテナンス不要な構造の水路の設計法<sup>(1)</sup>を提案する。

## 2. 冷却水路系発泡現象の概要

### 2. 1 冷却水路系概要<sup>(2)</sup>

図-1は水路系縦断面図の一例である。取水槽から放水槽まではポンプで圧送される。復水器は最も高所にあり、サイホン効果によって大きな負圧が働いている。この負圧が大きすぎるとキャビテーションや剥離によってサイホン効果を損ねるので、サイホン高  $H_s$  は式(1)を満足するように設計されている。

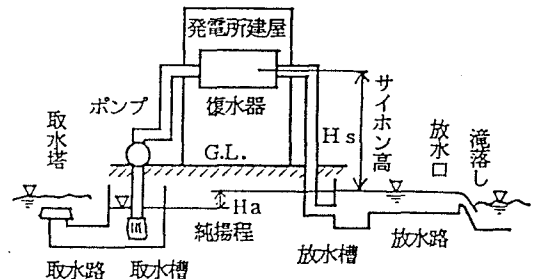


図-1 冷却水路系縦断面図

$$P \leq -H_s + \Delta h \quad (1)$$

ここに、 $P$ ：サイホン効果基準水頭  $\approx -8$  m  $H_s$ ：復水器中心から放水槽水位までの高さ  
 $\Delta h$ ：復水器から放水槽までの損失水頭

一方、取水槽、放水槽内の水位変動は、ポンプ機械系に悪影響があるといわれ、その変動はポンプ揚程の10%以内にすることが望ましいとされている。主としてこの二つの条件（サイホン効果基準水頭の確保と放水槽水面変動の抑制）を満たすために、弁操作や放水槽水位のせき上げをしている。その結果、放水路系の一部が滝落しとなり空気を連行しているところがある。

ポンプ揚程は純揚程  $H$  に取水槽から放水槽までの水路系の全損失水頭と余裕を加えた、10m～15mが多い。

ポンプおよび水路系は、最終的にはポンプの設備費、水路の建設費、全建設費の年間経費率、ポンプ動力費を含む水路系設備の維持費等々が最小となるような断面やレイアウトその他から設計される。しかし、この中に従来は、発泡対策はほとんど考慮されなかったため、今後はこれらもコストに十分反映した上、合理的な設計をす

\* 正会員 電力中央研究所 我孫子研究所 水理部構造水理研究室(270-11 我孫子市我孫子1646)

る必要がある。

2・2 発泡箇所と空気連行形態

当所が関わった電力各社の発泡地点の主な発泡箇所、空気連行形態を分類すると次のとおりである（表－1）。

① せき上げ滝落とし

放水槽、放水口あるいは放水路の途中で 1～2mせき上げられている所があり、この滝落としとして空気を連行する最も代表的な発泡形態である。

② 跳水

放水路が開水路の場合、放水口近傍や水路拡幅部、急勾配部で跳水を生じ空気を連行して発泡する。

③ 噴流による渦、水面擾乱

循環水管から放水槽へ、あるいは放水槽から海域へ水中放流される場合、被り水深が小さく放流流速が速いと渦や水面擾乱を招き空気を連行し発泡することがある。

④ 合流部の滝落とし

補機系冷却水や気化器系の放水路、その他雑排水が滝落としで合流する所で空気を連行し発泡する。

⑤ シャワー

LNGの気化器の海水シャワーで多量の空気が連行されて発泡している。また、スクリーンなどの洗浄の海水シャワーでも空気連行、発泡することがある。

⑥ サイホン部の水密不備

復水器周辺や放水路にサイホン部がある所では、管路の中は負圧なので、フランジの締め付けが不十分であったり管路のクラックがあると空気を連行、発泡するおそれがある。

表－1 発泡形態と発泡箇所

| 空気連行形態      |                                                                                     | 発泡箇所                          |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| ① せき上げ滝落とし  |  | 放水槽、放水口<br>放水路～放水口<br>の中間     |
| ② 跳水        |  | 放水口近傍<br>開水路拡幅部               |
| ③ 噴流による水面擾乱 |  | 放水槽                           |
| ④ 合流部滝落とし   |  | 補機系、雑排水<br>路、気化器系と<br>主水路の合流部 |
| ⑤ シャワー      |  | 気化器、スクリー<br>ン洗浄               |
| ⑥ サイホン      | フランジ、<br>クラック等から<br>管路に流入                                                           | 放水槽<br>放水口                    |

2・3 海水の泡の特徴

空気連行による発泡現象は、自然の海ではよく見られる現象で、生活廃水、工業廃水等の入る河川や、特殊な例、例えば中禅寺湖の発泡例等<sup>(3)</sup>は別として自然河川ではめったに見られない、海水固有の現象である。

(1) 海水の泡の研究<sup>(4)</sup>

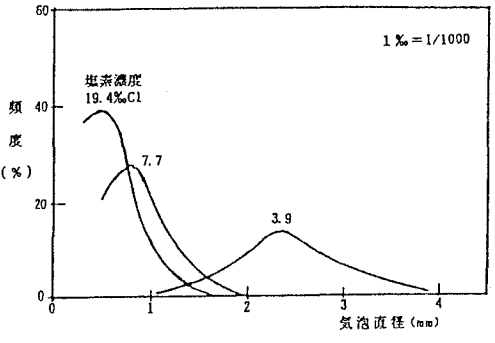
海水の泡については、元東京理科大学教授、阿部友三郎氏によって詳しい研究が発表されている。

阿部は海水を入れた容器を振盪させて泡を作り、泡の大きさ（直径）の頻度分布を調べた（図－2）。そして、塩分が濃いほど細かく一様な泡ができ、薄いほど粗く不揃いの泡ができると指摘している。さらに、実際の海で砕波してできた泡の粒径分布を測定したところ、直径0.075～0.5mmの範囲が多く、大部分は0.2mm以下で、毎秒1cm<sup>3</sup>につき30個位生成されていたという。

また、冬季、東北裏日本の海岸に発生し飛び散る安定泡沫（寿命の長い泡沫）を採取、分析し、多量の沿岸性プランクトンや海藻類を根源とする沢山の有機物を認めている。また、淡水、海水、海水の安定泡沫の表面張力、粘性を測定した（表－2）。そして、海水に安定泡沫ができるのは小さな沢山の泡が海水中に含まれている有機物を吸着、浮上分離、濃縮することにより、淡水や普通の海水に比べて、表面張力は小さく、粘性係数は大きくなるためと阿部は指摘している。

(2) 泡の浮上分離作用

小さな気泡が疎水性粒子（水に濡れにくい粒子）を吸着し浮上分離する性質は古くから工業廃水の浄化、鉱石



図－2 泡粒の大きさの分布（文献4）

表－2 泡沫液の物理的特性（文献4）

|              | 水     | 海 水    | 泡沫液   |
|--------------|-------|--------|-------|
| 表面張力 dyne/cm | 74    | 75     | 27～34 |
| 粘性係数 g/cm・s  | 0.013 | 0.0137 | 0.63  |

の選鉱等に応用されてきた。気泡を発生させる一般的方法の一つに加圧浮上法<sup>(5)</sup>がある。これは、液体を加圧すると液中に溶解する気体の量が増え、常圧に戻されると溶解していた気体が気泡化する性質を応用したもので、その粒径は70~90ミクロンと微細な気泡ができるのが特徴である。加圧によって水に溶解する空気量（容積比）は圧力に比例し、常温では圧力増  $1\text{kgf/cm}^2$  につき約 2% 増加する。加圧浮上法では、 $2\sim 5\text{kgf/cm}^2$  加圧<sup>(5)</sup>し常圧に戻すので、そこで発生する空気量は大体 4~10% と考えられる。淡水の滝落として生じる気泡は 5 mm 程度であるのに対し、海水<sup>(4)</sup>は  $0.2\sim 0.5\text{mm}$  の気泡が発生する。概念的にいえば、海水の泡は淡水の泡に比べて、直径は約 1/10 になり、同一空気量でも海水中では淡水中と比べて気泡の数は 100 倍、表面積は 10 倍に増える。また、後述のように浮上速度は 1/10 になる。このため海水の泡は疎水性粒子を吸着する能力は著しく大きい。

### (3) 安定泡沫発生に関する因子

安定泡沫発生に関する因子には、①有機物等界面活性源濃度 ②空気量 ③空気の連行形態等が考えられ、生産される安定泡沫量はこれらの組合せから決まると考えられる。

ナップが貫入している水クッション中の空気量はいくつかの実験結果<sup>(6, 7, 8)</sup>によれば（図-3）、貫入流速  $2.6\sim 7.3\text{ m/s}$  の条件で 15% 程度である。放水路の滝落とし落差は  $1\sim 2\text{m}$  が多く、貫入流速は  $4\sim 6\text{m/s}$  程度なので空気量も 15% 程度と推定される。この空気量は加圧浮上法で液体に溶解させる空気量よりはるかに多い量である。

実際に景観等を害する因子には、安定泡沫の絶対量とともに、海域の流れや波、密度分布等に支配される泡沫の集中密度も考えられ、これ等を定量的に評価する手法はまだ確立されていない。さらに、これらの許容量は地点によっても異なるから一般的には論じられない。

### 3. 発泡防止対策例

発泡防止対策の基本は、最も代表的な発泡原因であるせき上げ滝落とし水路系に作らないことである。止むを得ずせき上げる場合は、空気連行を防止する設計、物理的、化学的消泡対策等がある。これら考えられる案も含めて対策例を一括して図-4に示した。

#### (1) せき上げのない設計

①開水路放流、②管路放流いずれも一般的な放流形式である。ただし、放水路が開水路の場合、循環水管から放水槽への放流流速が速く出口の被り水深が小さいと水面擾乱で空気を連行し、発泡する場合がある。

#### (2) せき上げを設ける設計

③弁調整放流は、流量変化等に応じて弁

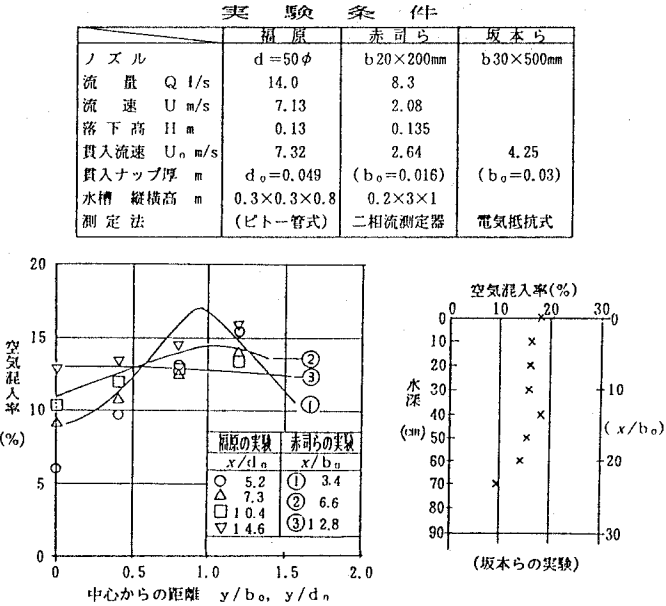


図-3 水クッション中の空気混入率の測定例（文献6~8）

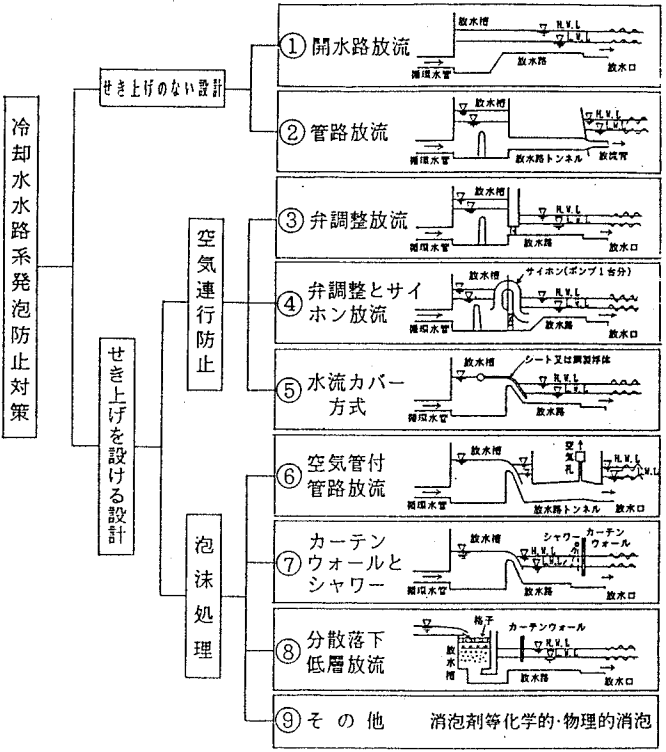


図-4 冷却水路系の発泡防止対策例

開度を調整するもので、最近、採用されるようになった。

④弁調整とサイホン放流は、小流量のポンプ2台の水路系を対象にしたものである。しかし、サイホン始動、停止時の発泡は避けられない等、まだ検討が十分でない。

⑤水流カバー方式は日本原子力発電等で検討されたものであるが、カバーの振動が激しく適当な材料がないなどまだ実用化には至っていない。

⑥空気管付管路放流は4章で述べるもので、現在建設中のLNG気化器放水路に採用された。

⑦カーテンウォールとシャワーは泡沫処理の方法として最も多く採用されている。

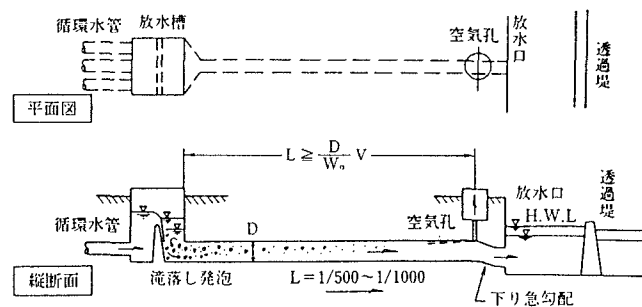
⑧分散落下底層放流は、中国電力が現地実験を重ね、柳井火力LNG気化器放水路の設計に採用した<sup>(9)</sup>

⑨消泡剤は効果的だが大量には使用できない。

#### 4 メンテナンス不要な発泡防止対策 ——空気管付管路放流水路の提案——

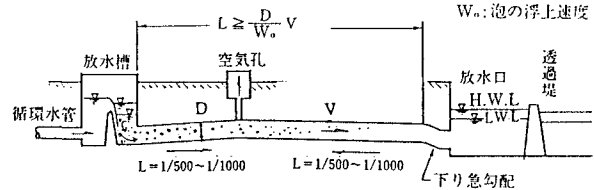
##### 4.1 提案方式の概略

放水槽でのせき上げ滝落としが避けられない場合の発泡防止対策として、図-5に示す空気管付管路放流水路を提案した。これは、圧力水路に取り込まれた空気の挙動についての従来の知見や実機水路での観測結果等をもとに、滝落として連行された空気を圧力水路内で浮上させ、泡として海域に流出させることなく、空気孔より大気へ排気するものである。したがって、運転中に消泡のためのメンテナンスが不要で、水路の長さが確保できる地点では最も実用的な設計と考えられる。



(1) 空気孔下流設置の場合

ここに  $L$  : 水路長  
 $D$  : 水路高  
 $V$  : 流速=1.5m/s  
 $W_0$  : 泡の浮上速度



(2) 空気孔上流設置の場合

図-5 空気孔付管路放流水路

##### 4.2 圧力水路に連行される空気の挙動

###### (1) 気泡の浮上速度、浮上距離

水路に連行された空気が浮上するに必要な距離は式(3)で与えられる。

$$L_F \geq \frac{D}{W_0} V \quad (3)$$

ここに、 $L_F$  : 気泡が浮上しきる距離

$V$  : 水路流速

$W_0$  : 気泡の浮上速度

$D$  : 水路の高さ

水力施設の設計では、水路流速を0.5~0.6m/sとし、滝落として生じる気泡の大きさは5mm程度が多いことから、浮上速度は0.12m/s以下を採用している<sup>(10)</sup>。海水の滝落として生じる気泡の大きさは2・3で述べたように非常に小さく浮上速度も遅い。図-6は筆者等が実機水路で観測した水路流速と浮上速度の関係である(流速2m/sのデータは推定値)。流速が速くなると気泡は流れに巻き込まれ浮上しにくくなるので、設計流速は1.5m/sを目安とする。水路の高さを低くすれば水路の長さが短縮できる。

###### (2) 天井に溜まる空気塊の挙動

天井に浮上した気泡は、流下流速が遅くなるので後から浮上してくる気泡と合体し扁平な空気塊に発達しながら流下する。しかし、図-7のように天井が流下方向に下り勾配の場合は、空気塊浮力の水路方向分力は遡上力となるので、空気塊が発達しこの遡上力が空気塊に作用する抗力より大きくなれば、空気塊は水路を遡上する。

空気塊の遡上力、抗力は式(4)(5)で示される。

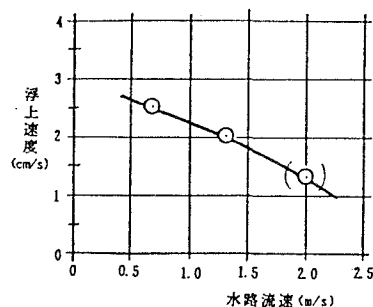


図-6 水路を流下する泡の浮上速度

$$F_{Ax} = F_{Ay} \cdot i = \Delta A \cdot L_A \cdot w \cdot i \quad \cdots \cdots (4)$$

$$F_{wx} = C_D \cdot \Delta A \cdot \frac{V^2}{2g} w \quad \cdots \cdots (5)$$

ここに

$F_{Ax}$  : 空気塊遡上力       $F_A$  : 空気塊浮力  
 $i$  : 天井勾配       $L_A$  : 空気塊の長さ  
 $w$  : 水の単位体積重量       $V$  : 水路流速  
 $C_D$  : 空気塊の抗力係数 (固形と仮定)  
 $\Delta A$  : 空気塊断面積

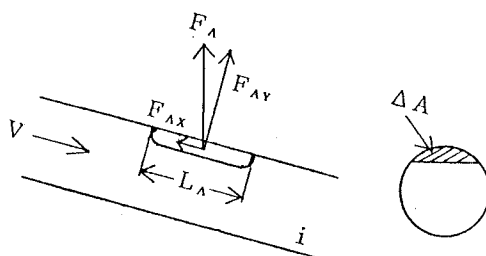


図-7 空気塊の遡上力

空気塊を固形と仮定、壁面との摩擦を無視して遡上力と抗力がバランスする条件を求めれば、

$$F_{Ax} = F_{wx}$$

$$\Delta A \cdot L_A \cdot w \cdot i = C_D \cdot \Delta A \cdot \frac{V^2}{2g} w$$

$$\therefore L_A = C_D \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \cdots \cdots (6)$$

となる。 $V=1.5\text{m/s}$ 、 $C_D=0.15$  (翼と球の中間と仮定)  
 $i=1/500 \sim 1/1000$  とすると、 $L_A=9 \sim 18\text{m}$  となる。これが遡上空気塊の大きさの目安である。空気塊の遡上は厚さ (または断面積) に関係しないが、実際には厚さが小さいと空気塊が水面の乱れで切断され、その場合は遡上力が低下し下流に流下するので、遡上に必要な最小厚さが存在すると考えられる。

### (3) 空気孔からの吹き出し状況

圧力水路の空気孔からの吹き出しは、空気と水の二相流となり、空気量、管径、空気孔高等により異なるフローパターンを示す。表-3は滝落としがあり、若干圧力がかかった水平な放水路の下流に設けられた単純な空気孔 (500φ) からの空气の吹き出し状況を観察した結果である。小流量時は間欠的に飛沫を伴って吐き出し、中間流量時は息をつくものの、連続的に飛沫を伴い吐き出した。最大流量時 ( $Q=58\text{m}^3/\text{s}$ 、 $V=1.9\text{m/s}$ ) は飛沫を伴わず空気のみ定常的に吐き出した。

圧力トンネルの呑口や出口から空気がでる場合、被り水深が小さいと、トンネル内の空気塊が大気に連通する時、瞬間的に空気が抜けるので、エアーハンマー現象が生じることがある (図-8)。空気孔断面が大きいと同様にエアーハンマー現象が生じることがあるので注意する必要がある。

## 4. 3 空気管付管路放流水路の設計

設計条件 流量  $Q=60\text{m}^3/\text{s}$   
 空気連行量  $Q_A=9\text{m}^3/\text{s}$  (約15%)

### (1) 水路諸元

水路流速  $V=1.5\text{m/s}$  空気の浮上速度  $W_0=0.18\text{m/s}$   
 [トンネル案] 管径  $D=7.14\text{m}$  浮上距離  $L \approx 600\text{m}$   
 [カルバート案] 幅  $B=8\text{m}$  高さ  $D=5\text{m}$   
 浮上距離  $L \approx 420\text{m}$

### (2) 空気孔の設計 (図-9)

空気孔は、①空気溜め ②空気管 ③減勢室 (第一、第二) ④空気孔 で構成される。

#### ① 空気溜め

天井に浮上した空気をスムーズに空気管に導くために空気溜めを設ける。

表-3 空気の吹き出し状況

| $Q\text{m}^3/\text{s}$ | $V\text{m/s}$ | 吹き出し状況          |
|------------------------|---------------|-----------------|
| 1.9                    | 0.6           | 飛沫を伴い間欠的        |
| 3.8                    | 1.3           | 飛沫を伴い連続的        |
| 5.8                    | 1.9           | 空気のみ定常的 約2.0m/s |

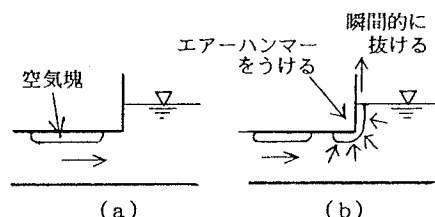
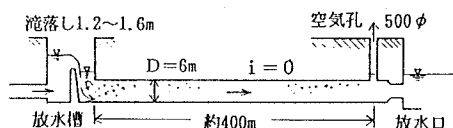


図-8 圧力トンネル出口のエアーハンマー

## ② 空気管

空気管は設計風速 ( $Q_A/A$ ) 30m/sとして管径を決める。

空気管の上端と下端の範囲内に圧力水頭水位を設定する。

$$Q_A = 9 \text{ m}^3/\text{s} \quad A = 0.3 \text{ m}^2 \quad d = 0.62 \text{ m} \phi \text{ (管径)}$$

## ④ 減勢室

減勢室は中央を仕切り通気孔で連通させる。第一減勢室は主に水塊を、第二減勢室は飛沫を空気と分離し、水や飛沫が直接外気に吹き出すことを防止する。

通気孔は設計風速20m/sを目安とし断面を設計する。

減勢室の容積は、第一、第二とも設計空気量の5倍を目安とする。

$$\text{通気孔} \quad A = 0.45 \text{ m}^2 \quad d = 0.75 \text{ m} \phi$$

$$\text{第一、第二減勢室 容積} 4.5 \text{ m}^3 \approx 4.5 \text{ m} \phi \times 3 \text{ m}$$

## ⑤ 空気孔

空気孔は騒音の発生源とならぬよう四方に分散させ、風速15m/sを目安として設計する。空気孔の前面に笠をつける。

### (3) その他の留意事項

水路は空気の浮上距離を確保した後、下り急勾配区間で0.5m程度下げるか前垂れを設けた後、放水口に接続する。

放水口は波浪時でも天端が出ないように設計する。

経験的には下記の放流条件を満足すれば放水口出口等の水面擾乱による空気連行は少ない。

$$V \leq 1.5 \text{ m/s} \quad h \geq 1 \text{ m} \quad \text{または} \quad h/D \geq 0.5$$

ここに、 $V$ ：放流流速  $h$ ：放水口被り水深  $D$ ：放水口高さ

## 5 おわりに

発泡防止対策の基本は、開水路でせき上げ滝落としをさせないことである。このため、場合によっては復水器の高さを下げる必要があるが、せき上げ滝落としをした場合は、後で発泡防止対策に多額の費用がかかることを考えれば十分に検討されるべきである。

止むを得ずせき上げる場合の対策として空気管付管路放流水路を提案した。本水路は水路断面、長さとも従来よりは大きくする必要はあるが、運開後のメンテナンスが不要なので水路の長さが確保できる地点では有効な方式と考えられる。本方式は現在建設中のLNG気化器放水路の設計に採用された。提案した設計法の細部については実証を通じ、必要に応じて修正していきたい。

## 謝 辞

海水の泡については元東京理科大学教授、阿部友三郎氏にご教示頂いた。また、電力各社の研究所、発電所の関係者の方々には多々教えて頂いた。皆様に改めて御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) 復水器冷却水路系の発泡防止対策 福原 電力中央研究所研究報告 U90021 H2.7
- (2) 火力・原子力発電所土木構造物の設計 電力土木技術協会
- (3) 中禅寺湖のアワの発生機構(1) 世取山、小山、池田、小林 水質汚濁研究 10巻1号 1987
- (4) あわの科学 阿部友三郎 地人選書 地人書館
- (5) 土木工学ハンドブック(下巻)工業廃水および放射性廃液処理 土木学会編 S43
- (6) 自由落水脈の拡散に及ぼす混入空気の影響 赤司、斉藤、石川 第29回水理講演会論文集 1985
- (7) 自由落下水の突入する水路における空気混入 坂本、村上 第26回土木学会年次講演会 1971
- (8) 自由落水脈が水クッション中に連行する空気量 筆者実験資料
- (9) 柳井火力発電所LNG気化器放水の発泡防止対策について 森平、谷本、田中 電力土木 No230 1991.1
- (10) 水力発電所水路構造物の水理設計 千秋 技術者のための最近の水工学 土木学会東北支部 S36

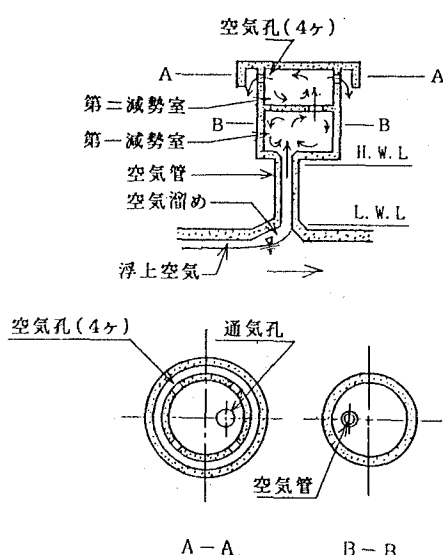


図-9 空気孔の構造