

自由水面を持たぬ水路内における密度流に関する実験報告 (火力発電所復水器冷却水路内密度流に関する実験)

東京電力K.K.技術研究所 野口俊郎
同 二重作主税

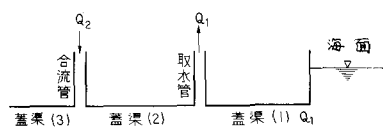
§ 1. 概 要

液化天然ガス(LNG)を燃料とする火力発電所が計画され(建設中)、復水器冷却用水取水のための圧力水路内からLNG気化用水を取水し、再びこれを還流する場合の密度流的諸問題の検討を行なった。即ちLNG気化用水取水のために復水器冷却用圧力水路途中に分岐を設け、揚水取水し、LNG気化に使用後、再び下流水路内に放水還流すれば揚水取水した水は約6℃冷却されて還流されるので、密度流ないし攪拌現象により上流に逆流する現象を生じ、極端な場合には冷水の循環を生じて次第に温度が低下し、支障を生ずることも考えられるので、冷水循環の現象の解明と逆流を発生する場合の限界の究明を行なうこととなり、フルード数相似の $1/20$ 模型による実験を行なったので、その結果を報告する。

なお研究実施にあたっては東大生研井口教授と東京工大椎貝助教授の指導協力を頂いた。

§ 2. 模型実験相似則

復水器冷却用水路からLNG気化用水を取水する状況を模式化して示せば右図のとおりとなり、このような水路における諸現象については次の現象の複合と考えられる。



- ① エネルギー損失(摩擦による損失)による影響
- ② 密度差による影響
- ③ 合流管からの射出水による影響

これらを満足する相似則については下記のとおりである。

- ① エネルギー損失(摩擦による損失)による影響

エネルギー損失が問題となる現象では一般にレイノルズ数が大きな影響を持ち、

今 $S = \frac{1}{20}$ の模型を仮定して原型、模型の両者に対するレイノルズ数を計算すれば、

$$\text{原型} \quad (Re)_P = \frac{V_P \cdot R_P}{\nu_P} = 1.95 \times 10^5$$

$$\text{模型} \quad (Re)_m = \frac{V_m \cdot R_m}{\nu_m} = 1.91 \times 10^4$$

一方摩擦損失水頭 dh は $Re \sim \lambda$ のグラフより

$$\text{原型} \quad \lambda = 0.025 \quad (dh)_P = 0.566$$

$$\text{模型} \quad \lambda = 0.63 \quad (dh)_m = 0.0336 \quad (20 \times dh_m = 0.672)$$

以上の結果より、当現象におよぼす摩擦損失の影響は小である。

- ② 密度差による影響

二層の境界面の安定、クサビの発達現象は重力の影響に関するフルード数、内部摩擦の影響

響に關係するレイノルズ数、の兩者に關連していると考えられる。この場合、レイノルズ数は境界面における拡散又は境界面の攪拌という問題に対して影響をもつが本実験では、第1点として、クサビの先端の位置が問題であり拡散の状況は第二次的であること、第2点として、原型では完全な乱流であり模型では層流に近い状態であるからクサビは模型においてやゝ発達しやすいものと考えられること。

以上2点により判断してこゝで問題とする密度流現象を推察するためには、フルードの相似則に基づいた模型によつて実験可能であり、かつ安全側であると考えた。

従つてこの場合、密度差を考慮したフルード数 F'_r は

$$F'_r = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot h}}$$

であるから、原型と模型とで $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_p = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_m$

なる關係式を満足させておけば一般的なフルード数 $F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$ を一致させることによりフルードの相似則は満足される。

③ 合流管からの射出水による影響

合流管からの射出水による影響はエネルギーの拡散現象と考えることが出来る。

この場合、合流管部については射出水のレイノルズ数、流速、合流管と蓋渠の管径比等を考慮する必要があるものと思われる。

しかし、合流管部における射出水のレイノルズ数は、 $(Re)_m = 1.22 \times 10^5$ 、 $(Re)_p = 1.26 \times 10^6$ であり、レイノルズ数が流れの乱れに及ぼす影響は無視し得る程度である。

以上の理由により、フルード相似則に従えば現象がほゞ代表され、縮尺 $\frac{1}{20}$ の模型で十分原型の現象を推察し得ると思えられるので、これにより模型実験を行なつた。

§ 3. 試 験 内 容

(1) 試験項目および概要

(イ) L N G 気化用水取水計画条件下の冷水循環の有無の確認

復水器冷却用水取水計画、ならびに L N G 気化用水取水計画におけるもつとも条件の悪い場合を想定し、冷水循環の有無を模型実験により実験的に確かめる。

発電所復水器冷却取水量 $(Q_p)_{min} = 6 \text{ ㍑/s}$ 水温 12°C

L N G 気化取水 $(Q_v)_{max} = 3 \text{ ㍑/s}$ " 6°C

(ロ) L N G 気化取水量を変化して冷水循環現象限界条件の確認

合流管を圧力水路に取付ける角度により拡散の方向は著しく影響されるので次の4種について試験を行なつた。

取付角度 90° 60° 45° 30°

(ハ) 取水と環流水の温度差による影響の検討

(2) 試験装置概要

水路模型は図-1～2に示すごとくである。

水路 縮尺 $1/20$

材質 硬質透明塩化ビニール

流量測定 90° 三角セキ 1台 (ポイントゲージ)

60° 三角セキ 1台 (")

流量分岐箱 (もぐりセキ付) 1台

ポンプ 渦巻型 最大流量 250 l/min

揚程 7 m

(3) 試験条件

フルード数相似則にもとづく模型流量と原型流量との関係は

$$Q_m = \left(\frac{1}{20} \right)^{\frac{5}{2}} \cdot Q_p \text{ で与えられる。}$$

密度差

海水の密度は各場所に応じて異なるが、塩分含有量を仮定し密度を推定すれば、

$$\rho_1 = 6^\circ\text{Cの海水の密度} = 1.03602 \text{ g/cc}$$

$$\rho_2 = 12^\circ\text{Cの} \quad \quad \quad = 1.03577 \quad \quad \quad "$$

実験においては ρ_1' の温度が $4.5^\circ\text{C} \sim 5.3^\circ\text{C}$

となるため、補正温度として $T = 6.4^\circ\text{C}$

$\sim 7.3^\circ\text{C}$ を採用した。

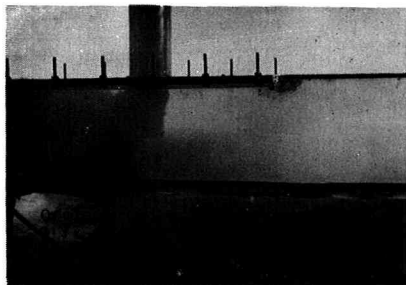


写真 1

§ 4. 試験結果

① 設計取水条件下の冷水循環の検討

写真1に示すごとく冷水循環はおこらない。

② 冷水循環現象の限界条件の検討

写真2に示すごとく、 $3.0 / 3.5$ の場合に模型では循環を起し、 $3.0 / 3.75 = 0.8$ の場合は取水管と合流管の中間点まで逆流するので $3.0 / 3.75 = 0.8$ を以つて限界値とした。次項に述べるごとく、この限界値は、発電所取水 Q_1 と L N G 取水 Q_2 の比 α に依つて決まるものと思われるので、 $4.0 / 5.0$ 及び $2.0 / 2.5$ の実験も行ない、ほぼ同様な現象を呈する事を確認した。

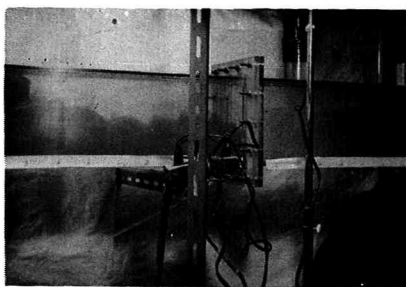


写真 2

③ 合流管取付角度の影響

流量比 $\alpha = 3.0 / 3.75 = 0.8$ の場合、下流側に向けるほど進入長さ L は小さくなり安定する。(写真3)

なお、この項目については、射出水のエネ

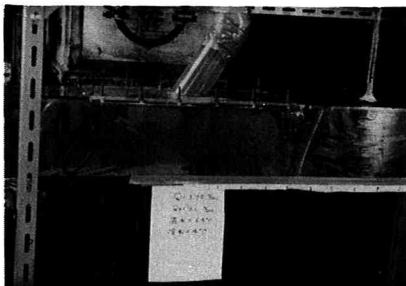
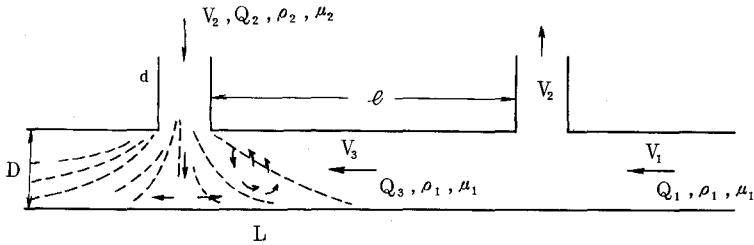


写真 3

§ 5. ま と め

以上の実験結果により、温度差即ち密度差が大なる場合はクサビが見られるが、当面の密度差(12℃の海水の ρ と6℃の海水の ρ')および取水条件($\alpha = 0.5$)の範囲内では、密度流でのいわゆる強混合型、即ち全体的な混合が見られた。

従つて、この範囲内では、二次元噴流の拡散という現象に帰着できるものと推察される。



一般にこの現象の要因を

$$\varphi(L, d, D, V_2, V_3, g, \frac{\Delta\rho}{\rho}, \mu_2, \mu_1) = 0 \quad \text{とすれば、}$$

$$\text{又、} \varphi\left(\frac{L}{D}, \frac{d}{D}, \frac{V_2}{V_3}, \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot D}, \frac{V_3 D}{\mu_1}, \frac{V_2 d}{\mu_2}\right) = 0$$

$$\therefore \frac{L}{D} = g\left(\frac{d}{D}, \frac{V_2}{V_3}, \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot D}, \frac{V_3 D}{\mu_1}, \frac{V_2 d}{\mu_2}\right)$$

これらの中、レイノルズの項を無視すれば、

$$\frac{L}{D} = g\left(\frac{d}{D}, \frac{V_2}{V_3}, \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot D}\right)$$

次に密度差が比較的小さい場合であるから、内部フルード数(F_r')の影響を無視すれば、

$$\frac{L}{D} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{V_2}{V_3}\right)$$

ここに $V_2 = Q_2/A_2$ $V_3 = Q_3/A_3$ であるから

$$L = D \cdot f\left(\frac{d}{D}, \frac{Q_2}{Q_3} \cdot \frac{A_3}{A_2}\right)$$

d, D, A_3, A_2 を一定にした場合、 L は $\frac{Q_2}{Q_3}$ によつて定まる。即ち、 $Q_2 = \alpha Q_1$ とすれば、密度差が比較的小の場合、強混合の範囲 L は単純に α によつて決定される。

従つて、 Q_1, Q_2 の絶対量には無関係なエネルギー拡散の問題と考えて差支えないと考えられる。

次に原型と模型の α について比較すると、レイノルズ数は

(蓋 渠 部)

$$(Re)_p = 1.9 \times 10^5$$

$$(Re)_m = 1.9 \times 10^3$$

(合 流 管 部)

$$(Re)_p = 1.26 \times 10^6$$

$$(Re)_m = 1.22 \times 10^5$$

であり、従つて蓋渠部では原型は乱流、模型は層流に近い状態となるが、合流部から流入するエネルギーの拡散 (Dissipation) という点から考えると、合流管部のレイノルズ数が合流現象に及ぼす度合はほぼ同値と考えてよく、また蓋渠部においては原型での α の値は多少大き目になると考えられるから、模型での α' をとつても安全側である。

次にクサビあるいは拡散部分の長さ L に及ぼす流量比 α に密度差 $\frac{d\rho}{\rho}$ による影響の遷移状態を考えれば、 $Q_2/Q_1 = \alpha$ を一定に保つた状態で $\frac{d\rho}{\rho}$ を漸次大きくした場合、

最初、図-4 (a) に示すとき拡散状態のものが、ある限界の $\frac{d\rho}{\rho}$ のもとでは図-4 (b) に示すクサビの発達が見られ、いわゆる密度流へと移行するのが認められた。以上の結果より、 $\left(\frac{d\rho}{\rho}\right)_{cr} = 5 \times 10^{-4}$ の値以上では、この現象は密度流の取扱いをして良いものであり、この値以下では合流管からの射出水 (jet flow) の拡散現象と断定しても差支えないと思われる。

また密度流では時間とともに進行を継続して、安定状態までには時間の要素が加味されるが、拡散状態では均合が早く、条件を変えぬ限り静止状態を継続する。

次に LNG 取水口と放水口との間隔 ℓ について考えれば、クサビの長さ L は、 ℓ が L に比して大きい限り直接的な影響は及ぼさない。

即ち、 L が ℓ に接近してくると吸い込みの影響が L に影響を及ぼしてくることになり、 L が射出水および密度差によつて決まる L の値より大なることが考えられるが、一応幾何学的相似性により決定して良いものと考えられる。原型の ℓ を 60 m とすれば

$$\left(\frac{\ell}{D}\right)_p = \frac{6000}{300} = 20$$

$$\left(\frac{\ell}{D}\right)_m = \frac{100}{15} = 6.67$$

従つて原型では模型より安全側にあるから、模型において $L < \ell$ である限り原型では当然 $L < \ell$ と結論される。

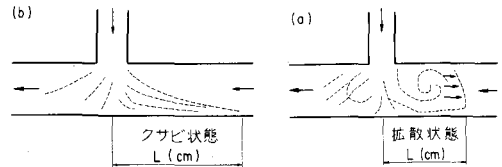


図 4