

循環水型海洋深層冷熱利用方式の管内摩擦抵抗低減と 深層でのファウリングに関する実験的研究

Experimental research on drag reduction in pipe and fouling on heat exchanger for circulating water system using deep sea low temperature

学籍番号 47106648 横山 立樹
指導教員 尾崎 雅彦 教授

(平成 24 年 3 月 22 日修了予定)

Keywords: 海洋深層水, 汽力発電所, 冷却システム, 摩擦抵抗低減効果, 生物付着

Keywords: Deep sea water, Steam power plant, Cooling system, Drag reduction, Biofouling

1. 序論

1.1 背景

我が国の電力の約 9 割が火力（石油、LNG、石炭など）及び原子力の一次エネルギーを利用して発電されている[1]。これらの火力発電及び原子力発電は、一般に蒸気タービンを用いる汽力発電(steam power generation)であり、ボイラーなどで発生させた蒸気を復水器で冷やして水の状態に収縮させることによってタービンを回すエネルギーを得ている。この蒸気を冷やすための冷却媒体として我が国の大規模汽力発電所では海水が用いられることがほとんどであり、沿岸海域への生態系への影響等を勘案して、取水した海水よりも 7°C 程度高い温度の温排水が海に戻されている。Fig.1 に従来型の冷却水システムの概念図を示す。海水を冷却媒体として利用する従来型のシステムでは、温排水の問題の他にも取排水管への生物付着、季節性の海水温変動による発電効率の低下などがしばしば問題となる。

1.2 循環水型深層冷熱利用方式の構想

尾崎研究室では、以上のような発電所の諸問題を回避しうる発電所冷却水システムを提案している。システムの概念図を Fig.2 に示す。すなわち冷却用媒体を海洋深層の低温領域と復水器の間でクロウズドに循環させ、取排水をともなわずに深層の冷熱を蒸気冷却に利用する方式である[2]。このシステムでは、温排水がないことが最大の特徴であるが、それに加えて取排水管への生物付着やクラゲ侵入への対策が不要となる。一方で長距離海底配管による費用増大に合理性が認められるか、深層での熱交換性能が長期にわたって確保されるか、深層へ持ち込まれる熱の影響はないか、などが課題となる。

1.3 本研究の目的

本研究では新しい冷却水システムの実現可能性評価の一環として、冷却用媒体の循環に要するポンプ消費電力軽減のための界面活性剤による管内摩擦抵抗低減効果(Drag Reduction, 以下 DR 効果)の適用可能性を実験的に評価し、その結果を用いてエネルギー得失を算出する。また深層に設置する冷却器の伝熱を阻害する恐れのあるファウリング(Fouling)の温度影響について実験的に明らかにする。

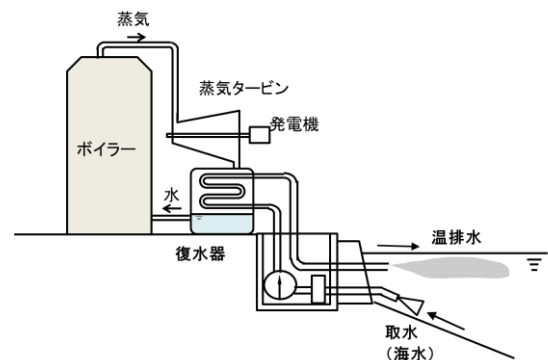


Fig.1 Existing type of thermal power plant cooling system

2. 界面活性剤による配管摩擦抵抗低減効果

2.1 界面活性剤水溶液

配管輸送する流体に添加剤を加えることで管摩擦抵抗が低減されることは、B.A.Toms[3]が燃料を輸送する際に高分子ポリマーを加えると流れの抵抗が小さくなることを偶然見出したことから知られるようになり、それ以来様々な添加剤の抵抗低減効果についての研究がなされてきた。特に界面活性剤は、最大 80%程度の DR 効果が得られることが知られており[4]、またポンプ等の機械的せん断に対する劣化の影響を受けにくく、長期間にわたり利用できることから、その幾つかはビル空調設備等に実用化されている。本研究では、陽イオン性界面活性剤 Ethoquad O/12 (Lion Akzo 社製)

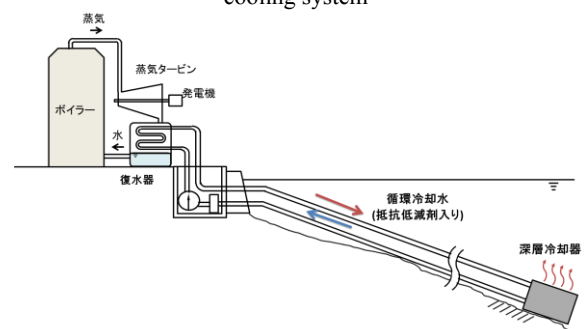


Fig.2 Concept of proposed thermal power plant cooling system with no heated water discharge

及び非イオン性界面活性剤 AROMOX DM10D-W (同社製) を使用した。なお実用上の観点から、溶媒はイオン除去水や蒸留水ではなく、水道水とし、重量濃度を Ethoquad O/12 については 500ppm、AROMOX については 500ppm, 1000ppm, 5000ppm とした。

2.2 実験装置及び方法

円管内流れにおける管摩擦による圧力損失の測定には、本研究で新たに製作した温度制御型回流実験装置を用いた。実験装置の概要図を Fig.3 に示す。管内流体をモータの駆動力で回転するインペラによって流動させ、流体の温度と流速を所定値で制御しながら測定部での圧力損失を計測できるように設計されている。実験に使用した管は流体力学的に滑らかなステンレス製円管で、内径は $d=50\text{mm}, 100\text{mm}$ の 2 種類である。測定区間の長さは $L=2800\text{mm}$ である。

2.3 実験結果

Ethoquad O/12 500ppm 水溶液及び AROMOX 500ppm 水溶液の抵抗低減率 DR をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。上段は DR を管断面平均流速で整理したもの、下段は DR をレイノルズ数 Re で整理したものである。 Re 及び管摩擦係数 λ はそれぞれ次式により定義される。

$$Re = \frac{U_m d}{\nu} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\Delta P}{\rho U_m^2 / 2 L} d \quad (2)$$

ここで U_m 及び ν は管断面平均流速及び動粘性係数である。このとき DR は同じ流速における水道水の場合の管摩擦係数 λ_s と界面活性剤水溶液の管摩擦係数 λ によって次式より定義される。

$$DR = \frac{\lambda_s - \lambda}{\lambda_s} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Ethoquad O/12 500ppm 水溶液の場合 DR は流速の増加に伴い大きくなり、最大となった後、減少することが分かる。温度影響については高温であるほど DR 効果が持続する流速域は広がるが、最大 DR はほとんど変わらない。また Re で整理するよりも流速で整理した場合の方が管径が異なるデータの傾向が一致することがわかる。一方 AROMOX 500ppm 水溶液の場合 DR は流速の増加に伴い減少していき高流速域ではほとんど消失する結果となった。これを管径 $d=5\text{mm}$ で実験を行った玉野ら[5]の実験結果と比べてみると、 Re で整理した場合、傾向がほぼ一致することがわかる。

3. エネルギー得失計算

3.1 計算モデル及びフロー

汽力発電では、冷却用媒体の温度が下がるほど発電効率が上がり、発電出力を増大できるが、より低い温度の深層域に到達するためには長距離の海底配管が必要であり、その分冷却用媒体を輸送するためのポンプ消費電力が増大することになる。すなわちエネルギーの得失は発電出力増とポンプ消費電力のバランスによって決定される。これらを定量的に検討するために、本研究では発電

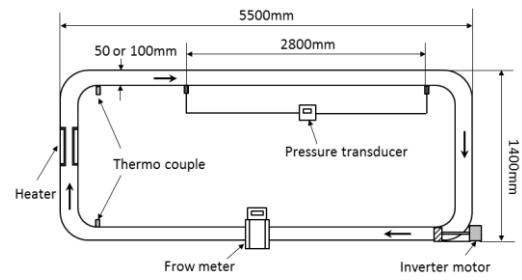


Fig.3 Experimental apparatus for pipe flow

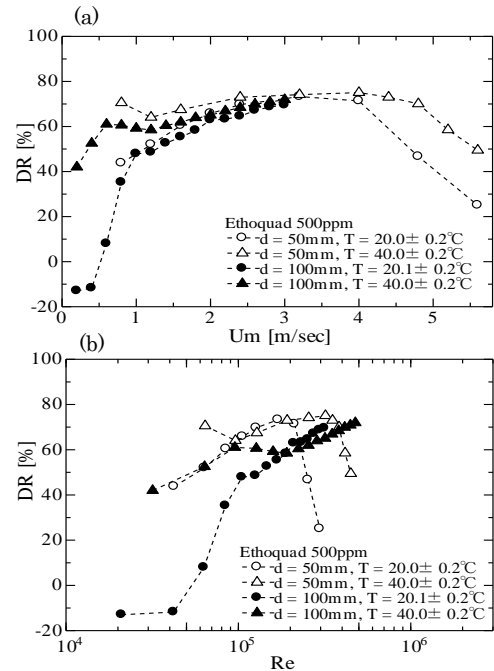


Fig.4 Effect of solution temperature and pipe diameter for Ethoquad 500ppm: (a)DR vs U_m , (b)DR vs Re

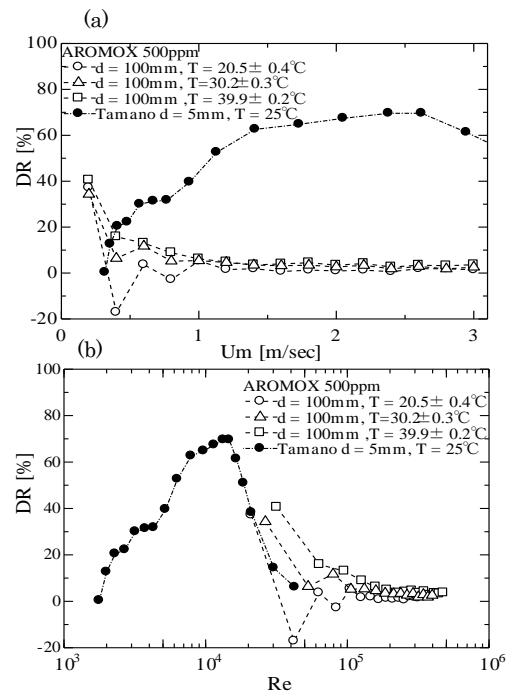


Fig.5 Effect of solution temperature and pipe diameter for AROMOX 500ppm: (a)DR vs U_m , (b)DR vs Re

端出力 10 万 kW 級の汽力発電所を対象に、従来型冷却方式に替えて循環水型海洋深層冷熱利用方式を用いた場合のエネルギー得失を計算によって求める。基準となる従来型の発電所の主要目を Table 1 に示す。またエネルギー得失は海底配管長と到達水深の水温の関係に依存するが、ここでは高知県室戸岬東海岸付近の地形[6]及び年間平均水温の鉛直分布を参考にした。DR 効果については実験結果から 60%得られるものと仮定した。

以上の条件から Fig.5 に示すフローを用いて電力得失を算定した。

3.2 計算結果

深層冷却器設置水深を 600m とし、管の内径を 1,846mm (呼び径 2.0m) ,および 1,292mm (呼び径 1.4m) とした場合の計算結果を Fig.6, Fig.7 に示す。流速が低いほどポンプ消費動力は下がるが、発電端出力増大効果が少なくなってしまい、流速が高いと発電端出力増は大きくなるがポンプ消費動力が大きくなってしまふ。結果からも利得が最大となる流速があることが分かる。呼び径 2.0m のケースでは管内流速 2.6m/s (冷却水約 20,000m³/h) で最大の出力増 (約 2,540kW, 従来型の 2.5%増) が得られ、呼び径 1.4m のケースでは管内流速 3.4m/s (冷却水約 16,000m³/h) で最大の出力増 (約 1,510kW, 従来型の 1.5%増) が得られた。なお DR = 0% の場合の最大利得は、DR = 60% の場合と比較して呼び径 1.4m では約 50%、呼び径 2.0m で約 20%減少する結果となった。管径が小さいほど DR 効果の効用は大きくなるといえる。

深層冷却器設置水深と管の内径を変え、上と同様にして出力増が最大になる流速での結果をまとめたものを Fig.8 に示す。できるだけ大径の管を用いて大水深のより低温域へアクセスすることが出力増大の観点からは得策であることがわかる。

4. 伝熱面へのファウリング影響

4.1 ファウリング現象

海水利用プロセスにおける蒸発装置や熱交換器では、海水の加熱や濃縮によって伝熱面に生物、スケール、微粒子等の付着物がつくことがしばしば問題となる。この現象は一般にファウリング(Fouling)現象と呼ばれており、ファウリングは伝熱面の性能低下をもたらすばかりでなく種々のトラブルを引き起こす原因ともなり得るため、その対策が重要な課題となっている[7]。本研究で検討する新しい蒸気冷却システムにおいても深層冷却器の伝熱面へのファウリング現象の予測と対策は、設置後のメンテナンスが難しいことからシステムの実用化を検討する上で非常に重要であると判断し、実験的に深層水内での伝熱面におけるファウリングの観察を行った。

4.2 実験装置および方法

加熱した水が流れるチタン製パイプを光を遮断した暗室内で 10℃に保たれた海洋深層水に浸し、伝熱面への付着物成長を観察した。海洋深層水には伊豆大島の取水施設から取り寄せたものを使用した。実験装置の概要図を Fig.9 に示す。入口温度が制御された循環水が送液ポンプによって一定の流量でチタンパイプ内に送り込まれており、深層水を通過すると冷却されてその温度は下

Table 1 assumed model of the thermal plant

Param.	Value
Output of power generation	100000kW
Generating efficiency	35.3%
Heat input to boiler	283632kWt
T/P of entryside turbine steam	550℃/15barA
T/P of exitside turbine steam	34℃/0.0532barA
Pump head of condenser	5m

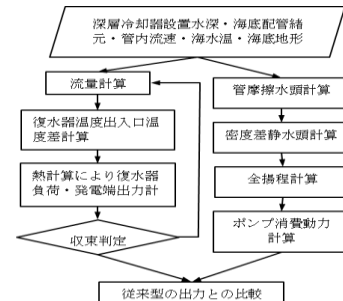


Fig.5 Flow chart of calculation of gain of power

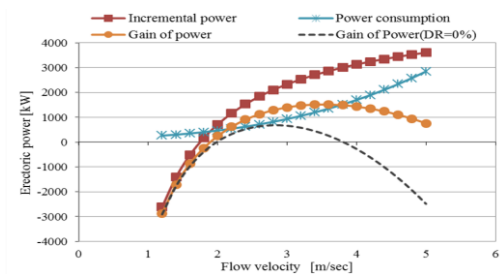


Fig.6 Gain of power in the case study (water depth of 600m & pipe dia. of 1.4m)

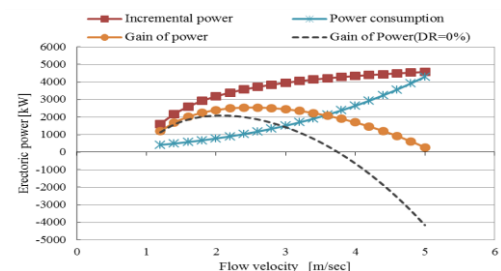


Fig.7 Gain of power in the case study (water depth of 600m & pipe dia. of 2.0m)

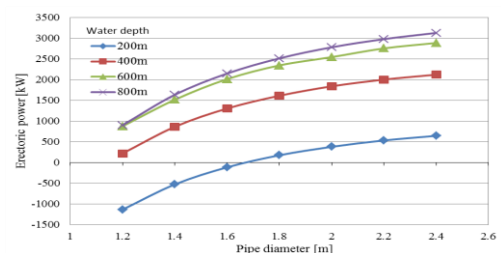


Fig.8 Optimized gain of power for each conditions in water depth & pipe dia.

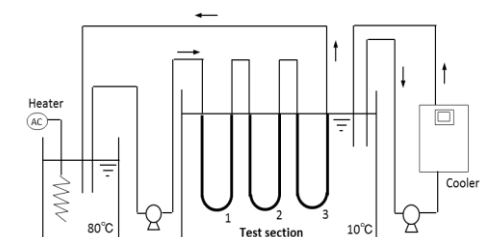


Fig.9 Experimental apparatus for observation of fouling to heat surface

がっていく。循環水の温度を流量により調節して Table2 に示すようなチタンパイプ表面の温度を設定し、実験を開始した。

実験は 2011 年 11 月 4 日からの 30 日間で行い、付着物の観察は 1 日に一度デジタルカメラで撮影を行い、データログで温度データを収集した。なお実験終了後には付着物の乾燥重量測定及び分析を日本微生物クリニック株式会社に依頼した。

4.3 実験結果

実験終了後の付着物の乾燥重量測定結果を Table3 に示す。Section1 の付着物が最も多く他のセクションと比較すると 10 倍~20 倍の重量となった。このことから高い温度域のセクションに選択的に付着していったことが分かった。

付着物の分析では 8 菌株の細菌(7 種)および真菌(1 種)が検出された。そのうち優勢だったのは *Alteromonas macleodii* 及び *Thalassospira profundimaris* であり、いずれも海洋性細菌であるとともに、これらの種は初めて発見されたのが深海底の堆積物中であったことから海の深層に生存する種であると考えられる。また *A. macleodii* については、高知県室戸岬にて取水された海洋深層水においても矢田ら[8]によってその存在が確認されていることから海洋深層に広く分布している可能性がある。付着物表面の走査電子顕微鏡写真を Fig.10 に示す。細菌と思われる構造が多数みられ、細菌が分泌する粘着性の多糖類によってそれぞれが結合している様子が確認できる。この画像から付着物を形成していたのは細菌が支配的であり、真菌やスケールの影響は少ないことが確認された。

5. 結論

本研究では発電所の循環水型海洋深層冷熱利用方式の冷却水システムの実現可能性評価の一環として、界面活性剤の抵抗低減効果の適用可能性を実験的に明らかにするとともに、システムのエネルギ―得失評価を行った。また深層冷却器における伝熱面へのファウリングの温度影響を実験的に調べた。実験結果およびシステム設計の結果から以下の知見が得られた。

- (1) Ethoquad O/12 水溶液では、流速 1~4m/s の範囲において温度影響は少なく、DR50~75%が得られ、管径を変えた場合でも DR 効果を流速で整理できることが実験的に確かめられた。このことから新しい冷却水システムの大口径配管への適用が可能であるものと考えられる。
- (2) 実験の結果から本システムでも DR 効果を 60%得られると仮定し、エネルギ―得失の計算を行った結果、今回検討したモデルの範囲ではポンプ消費動力の増大を考慮した上での発電出力として従来型に比べて 2.5%程度の利得が得られると算定された。また海底配管の径をより大きくし、より低温の深層域へ到達することが電力得失の観点からは得策であることが分かった。
- (3) ファウリングの実験ではスケールの析出はみられず、微生物が形成するバイオフィームが付着した結果となった。微生物の同定を行った結果、海洋深層に生息すると考えられる細菌類が検出され、それらが伝熱面に付着し、その成長に応じて熱交換性能が低下する可能性があることが明らかとなった。しかし今回の実験で付着が起きたのは 40~70℃程度の高温度域であり、本システムで使用する温度域では付着はほとんど起こらないか、もしくは成長速度は非常に遅いと考えられる。

参考文献

- [1] <http://www.fepc.or.jp/index.html>
- [2] 尾崎雅彦, 大内一之, 岡村盡 *et al.*, 取排水の無い発電所冷却水システムに関する基礎研究 第一報; 全体構想および発電効率への影響, 日本船舶海洋工学会講演会(2011)
- [3] Toms.B.A, Proc. First Int. Congr. on Rheology, North Holland, Amsterdam, 2(1949)135
- [4] J. L. Zakin, B. Lu, and H.-W. Bewersdorff, Surfactant drag reduction, Rev. Chem. Eng. 14(1998)253
- [5] S. Tamano, M. Itoh, K. Kato *et al.*, Turbulent drag reduction in nonionic surfactant solutions, Physics of Fluids, 22(2010)055102
- [6] 海上保安庁: 海底地形図「室戸岬」, 昭和 57 年 3 月 30 日
- [7] S. J. Pugh, Fouling During the Use of Seawater as Coolant -- the Development of a User Guide, Heat Transfer Eng., 26, (2005)35-43.
- [8] 矢田修一, 大場雅行, 榎本恵一, 「室戸海洋深層水」中の細菌種の分析, 海洋深層水研究, 4(2003) 47-56

Table2 Initial setting of surface temperature of titanium pipe

Section No.	Temperature[°C]
Section1 entry	71.0
Section2 entry	41.5
Section3 entry	26.2
Section3 exit	19.0

Table3 Measurement result of fouling dry weight

Section No.	Dry weight [g]
Section1	0.05813
Section2	0.00443
Section3	0.00223

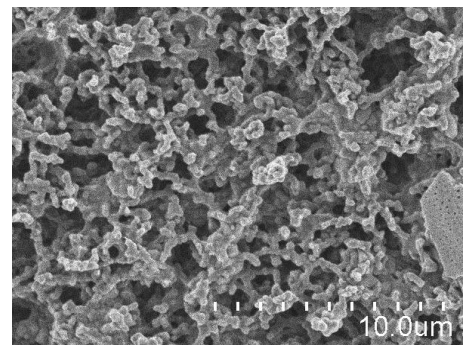


Fig.10 Scanning electron micrograph of surface of fouling