

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360364

研究課題名（和文）

海の深層冷熱を利用する取排水のない発電所の冷却水システムに関する研究

研究課題名（英文）

Study on Thermal Power Plant Cooling System with No Heated Water Discharge

研究代表者

尾崎 雅彦（OZAKI MASAHIKO）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30529706

研究成果の概要（和文）：本研究では、冷却水を海の深層の低温領域と発電所の復水器の間でクロードで循環させ、取排水をとまわずに深層の冷熱をタービン発電の蒸気冷却に用いるシステムを提案し、その成立性に関する研究を実施した。10 万 kW 級の汽力発電所に適用した場合のケーススタディの結果、冷却水への抵抗低減剤の添加や、適切な要目計画によって電力の利得が 2.5%程度まで得られることが示され、また、海底配管敷設方法や深層熱交換器の概略イメージの明確化、深層への入熱を利用した湧昇による海域肥沃化の可能性評価を行うことができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, a novel type of cooling water system for thermal power plant is proposed, that is, the cooling water would be contained in a closed circuit pipe system and circulated between cold regions of the deep water and the condenser for turbine steam cooling. As a result of the case study on the new system applying to 100 MW class thermal power plant, the gain of power would be available up to 2.5% if the drag reduction is achieved with adding surfactant to circulated cooling water, and when the system is designed properly. And the outlines of new pipe laying method and sub-sea heat exchanger are described. Moreover, the possibility of fertilizing the sea with use of upwelling due to the input of heat via sub-sea heat exchanger is investigated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋資源・エネルギー

1. 研究開始当初の背景

(1) CO₂ 排出量削減のため、エネルギー供給側の対策としては発電所の効率向上や CO₂ 排出量の少ないエネルギー源へのシフトが急務となっている。現在汽力発電所（火力発電所・原子力発電所）では発電用タービンを回した後の蒸気を復水器で冷やすために大量

の海水が取水され、取水温度よりも 7℃程度上昇した温排水が海に戻されているが、温排水の拡散状況や沿岸域生態系への影響の予測評価・実態把握が、新型高効率発電所や原子力発電所の建設あるいは既存発電所の能力増強（リパワリング）における重要課題である。

(2) 海洋深層水の低温安定性に注目し、その無尽蔵とも言える冷熱エネルギーを有効利用する構想は古くからある。しかし表層海水温度と深層水温度の差は高々20℃前後なので大量の深層水を取水して利用する必要があり、温度差発電のような単独システムでは取水設備建設のための初期投資が経済性を圧迫するので未だ実用にはいたっていない。

2. 研究の目的

本研究では汽力発電所の冷却水システムへの適用を念頭に、新たに、冷却用媒体を海の深層の低温領域と復水器の間でクローズドで循環させ、取排水をとまわずに深層の冷熱を蒸気冷却に利用する方式を提案しその成立性に関する研究を実施する。

このシステムでは、温排水が無いことを最大の特徴とし、深層の冷熱を利用した発電効率向上も企図しているが、加えて、取排水路や復水器の生物付着対策あるいはクラゲ侵入対策が不要になるメリットもある。一方で長距離海底配管による費用増大の抑制、深層での熱交換技術、深層へ持ち込まれる熱の拡散予測と対策などが課題になると考えられる。そこで、これらの効果評価・課題解決策検討を実施しシステムのプロトモデルを構築する。

3. 研究の方法

<システム構想>

本研究で提案する海洋深層冷熱利用方式の発電所冷却水システムの概念図を図1に示す。冷却媒体を海の深層の低温領域と復水器の間で循環させ、取排水を行わずに深層の冷熱を蒸気冷却に利用する。冷却媒体は循環利用されるので原理的に選択肢は広いが、媒体の価格や機器の保守、万一の漏洩時の影響の少なさ等の観点から淡水を想定する。なお、媒体を循環させる時のポンプ消費電力の軽減のために、媒体の淡水に界面活性剤等を添加して摩擦抵抗低減効果(トムズ効果)を取り入れることも視野に入れている。

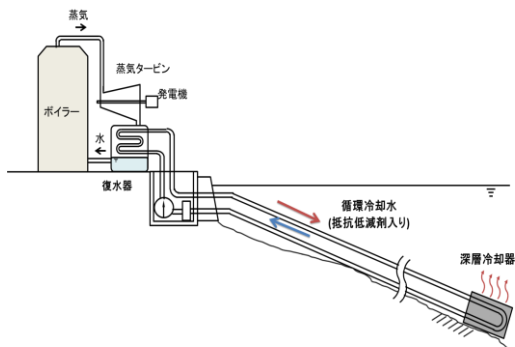


図1 新方式冷却水システムの概念図

(1) 新冷却水システム適用による発電プラントへの効用評価

低温の冷却水を用いると発電出力が高くなるが、大深度の低温の海洋深層水に到達するためには海底配管が長くなり管摩擦損失が増大するので、冷却媒体循環のためのポンプ消費動力が効果の一部を相殺する。管摩擦損失を低減するには管径を大きくするか流量を減らす方策が考えられるが、管の大径化は建設コスト増大につながり、冷却媒体の流量低減は発電効率上昇を抑制する。

そこで、10万kW級の汽力発電所を対象とし、海洋深層水に到達するための海底地形モデルを想定して、従来型冷却方式に替えて新方式を用いた場合のシステム設計を行って発電効率に対するパラメータ影響を調べる。表1に、基準となる従来型の発電所の主要目を示す。また、タービン出口蒸気温度(ここでは冷却媒体出口温度-温排水温度に相当-より5℃高いと設定)を変化させた時の発電出力・効率の変化の算定結果を図2に示す。

表1 従来型冷却方式を用いた発電所モデル

項目	数量	備考
発電端出力	100,000kW	
発電端熱効率	35.5%	下記条件から算定
復水器冷却水		海水
入口温度	22℃	年間平均
出口温度	29℃	入口温度+7℃
比熱	4.0kJ/kg-K	
流量	21,917m ³ /h	復水器の熱負荷と上記温度差から算定
タービン入口蒸気条件		
圧力	150barA	飽和蒸気温度 342.1℃
温度	550℃	
比エンタルピ	3,448kJ/kg	
タービン出口蒸気条件		
圧力	0.0532barA	
温度	34℃	冷却水出口温度+5℃
比エンタルピ	2.212kJ/kg	タービン内部効率考慮
タービン内部効率	85%	
発電機効率	95%	
蒸発器投入熱量	281,600kW	発電端熱効率から算定

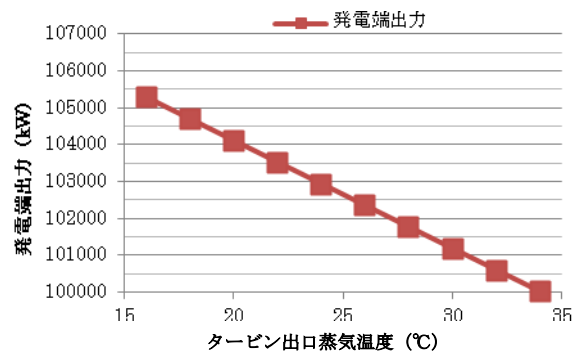


図2 タービン出口蒸気温度と発電出力・効率

さらに、現在海洋深層水を汲み上げ利用している高知県室戸岬東海岸付近の地形および年間平均海水温の鉛直分布を参考に、表2に示すような地形と水温のモデルを仮定する。

表2 海底地形および水温鉛直分布のモデル

水深[m]	水平距離[m]	管長[m]	水温[°C]
10	-	-	21.1
200	2,600	2,870	13.3
300	2,800	3,120	10.1
400	3,100	3,470	7.8
600	3,400	3,870	5.3
800	4,500	5,100	4.0

新形式冷却水システムを導入した場合の電力得失を次の手順で算定する。

- ①深層冷却器を設置する水深、海底配管の直径、循環冷却水の管内流速を入力する。
- ②循環冷却水の流量を①から算定する。
- ③冷却水の復水器入口温度を表2に示した深層海水温度+5°Cとみなす。
- ④復水器出入口温度差を⑦/①/冷却水比熱で求める（④から⑦は繰返し収束演算）。
- ⑤冷却水の復水器出口温度は③+④である。
- ⑥タービン出口蒸気温度を⑤+5°Cとする。
- ⑦復水器負荷および発電端出力を、タービン入口蒸気温度（表1）、タービン出口蒸気温度⑥、流量②より、熱計算にて算定する。
- ⑧管摩擦損失およびポンプ消費動力を算定する。
- ⑨電力得失を⑦⑧より求める。

(2) 海底配管と循環式冷却水に関する研究

①界面活性剤による管摩擦抵抗低減効果

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が知られるようになって以来、様々な添加剤の抵抗低減効果について研究が行われてきている。特に界面活性剤は、最大80%程度の抵抗低減効果が得られる可能性があり、またポンプなど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って利用できることから、最近ではビルの空調設備などへの実用化が始まっている。本研究では、陽イオン性界面活性剤 Ethoquad 012 と非イオン性界面活性剤 AROMOX DM10D-W（いずれも Lion Akzo 社製）を用い、水温や重量濃度を変えた時の抵抗低減効果について実験で測定する。

本研究で製作した温度制御型回流実験装置の概要を図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の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。実験に用い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50mmまたは100mm、測定区間の長さは2.8mである。

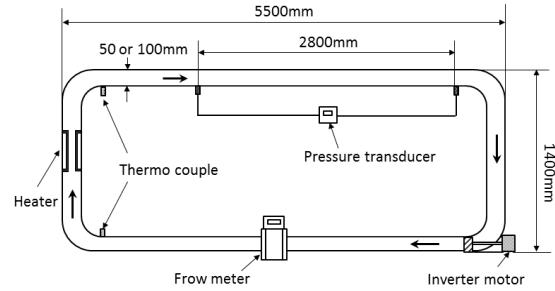


図3 温度制御型回流実験装置

②海底配管の全長一括敷設方式

従来の深層水取水配管敷設方法は、ある程度の長さの管を洋上で順次結合しながら沖合に向けて展張していくものが代表的である。この敷設方法では作業に時間がかかるので、多大な費用を要するほか、海象が穏やかな日が続く時期にしかできないという問題がある。そこで、管を陸上から浮上曳航しながら引き出し、全長を一括して沈降させて敷設する方式の実用可能性の検討を行う。

検討には管を多質点-バネ系でモデル化し、海面上に水平に浮上している状態を初期条件として沖合からあるいは陸上側から順次管の水中重量を増加させ自然沈降させた時の挙動を時刻歴でシミュレーションする計算プログラムを開発してケーススタディを行う。プログラム開発にあたっての重要な点の一つは、管が海底に置かれた時の摩擦力（特に静止摩擦力）のモデル化である。これによって、海底が傾斜している場合や海底に凹凸変化がある場合に、沈降のさせ方が管の局所的な強度に及ぼす影響などを調べる。

(3) 深層での熱交換に関する研究

①深層に置かれる熱交換器の計画

復水器で温められた媒体が海底配管を通じて深層に置かれる熱交換器に輸送され、周囲の低温の深層水によって所要の温度にまで冷やされ、再び復水器に向けて輸送されていくシステムの中で、深層の熱交換器の成立性は重要な課題の一つである。本研究では、プレート式熱交換器を採用するものとし、流量や主要目を変えた時の必要伝熱面積やエネルギー損失を算定するプログラムを作成して検討に資す。（プログラム作成においては、熱交換器メーカーの設計手法を参考にさせていただいたので、具体的な記述を割愛する。）

②伝熱面へのファウリング影響

海水を利用する熱交換器などでは、海水の加熱や凝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になる。この現象は一般にファウリングと呼ばれ、伝熱面の性能低下をもたらすなど種々のトラブルの原因になりうる。深層水は表層水に比べて清浄であり、光が到達しないので生物の付着・成長もほとんど無いと考えられるが、深層水内での伝熱面におけるファウリングに関しての知見は多くないので実験的に観察を行う。

図4に、本研究で用いた実験装置の概要を示す。加熱した水が流れるチタン製パイプを暗室内で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するものである。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定期的に入れ替えながら使用する。実験装置において、チタンパイプ内に送り込まれる水の入口温度は約70℃になるように制御され、パイプに沿ってその温度が低下するので、伝熱面の温度と付着物の関係を考察する。実験は2011年11月4日から30日間にわたって連続的に行い、実験終了後に付着物の乾燥重量測定および分析を行う。

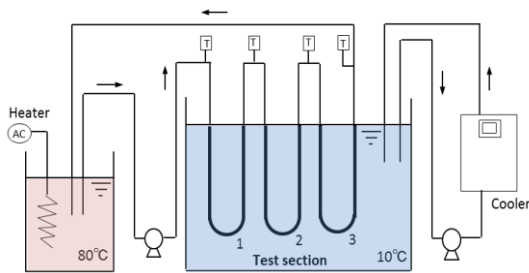


図4 深層水内伝熱面の付着物観察実験装置

(4) 深層への熱入力にともなう変化予測と対策検討

一般に海洋深層水は、表層水に比べて窒素やリン等の栄養塩を豊富に含んでいる。栄養塩は植物プランクトンの増殖を促すため、発電所の排熱によって温められた海洋深層水が浮力で湧昇して有光層に栄養塩を供給し、海域肥沃化の効果が顕れる可能性がある。そこで、成層と流れのある場における熱入力による湧昇現象について、回流成層水槽を用いた水理実験および静水圧と非静水圧領域を結合した数値モデルを用いたシミュレーションによる検討を行う。

また、湧昇域におけるプランクトン等の動態をシミュレーションするための生態系モデルを構築し、熱入力によって引き起こされた湧昇がどのような肥沃化効果をもたらすのかを検討する。

4. 研究成果

(1) 新冷却水システム適用による発電プラントへの効用評価

例として、深層冷却器設置水深を600mとし、管の内径を1,292mm(呼び径1.4m)とした場合の計算結果を図5に示す。なお界面活性剤添加による抵抗低減効果は後述する実験結果を参照して60%得られると仮定した。管内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う、逆に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。利得が最大になる流速が存在することがわかる。このケースでは管内流速が3.4m/secで最大の出力増(約1,510kW、従来型の1.5%増)が得られた。

深層冷却器設置水深や管の内径を変え、上と同様にして出力増が最大になる流速で結果をまとめたところ、出力増大の観点からは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得策であることがわかった。現実的と考えられる範囲では、最大の出力増が2.5%程度まで得られると見込まれた。

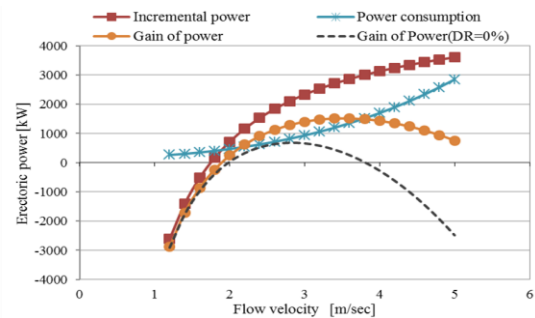


図5 管内流速を変えた場合の電力得失計算結果

(2) 海底配管と循環式冷却水に関する研究

① 界面活性剤による管摩擦抵抗低減効果

Ethoquad 0/12 500ppm 水溶液を使った場合の実験結果(抵抗低減率)を図6に例示する。図からわかるように、抵抗低減効果は流速の増加にともない大きくなり、極大値をとったあと、減少することがわかる。温度影響については、高温であるほど効果が出現する流速域が広がるが、最大効果値はほとんど変わらない。

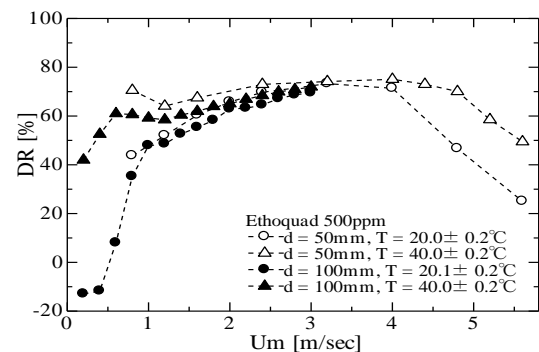


図6 Ethoquad 0/12 500ppm 水溶液の抵抗低減効果

なお、図6の横軸は管内流速としたが、横軸にレイノルズ数をとって整理したよりも、管径が異なるデータの傾向が一致する結果になった。このことは、実験よりも大径の管に適用する場合にも同程度の速度領域で効果が得られる可能性を示唆していると言える。一方、AROMOX水溶液を使った場合、横軸をレイノルズ数にしてデータを整理する方がよく、レイノルズ数が20,000程度以下で抵抗低減効果が得られる結果となった。大径の管にはあまり向かないと言える。

②海底配管の全長一括敷設方式

開発したシミュレーション計算プログラムを用いて、一斉注水、沖側からの注水、陸側からの注水の3通りの注水方式と、一定傾斜の海底、凹凸のある海底を対象にパラメータを変更して計算を行った。

初期の水面浮上状態から、注水した部分から順に短時間で終端速度に至って落下していくため、沖側や陸側から一定速度での注水を行うと、注水速度に応じた一定の傾斜を持って落下する。そして、海底が一定傾斜の場合、傾斜に対して管が平行に近いほど管に発生する内力が小さい結果が見られた。海底地形に合わせて注水速度を制御することができれば、設置時の管に生じる内力を低減できる可能性がある。

(3) 深層での熱交換に関する研究

①深層に置かれる熱交換器の計画

熱交換器で生じるエネルギー損失を極力小さくしようとする熱交換器を大型化しなければならない。電力の得失に大きな影響を及ぼさない程度のエネルギー損失におさまるように概略の計画を行ったところ、2m×8m×18.6mのユニットが10基という規模になった。海底に設置するには決してコンパクトではないが、技術的に不可能ではないとの感触を得ることができた。

②伝熱面へのファウリング影響

実験の結果、スケールの析出は見られず、伝熱面がおおよそ40℃以上の範囲を中心に、微生物が形成するバイオフィームがうすく付着した。

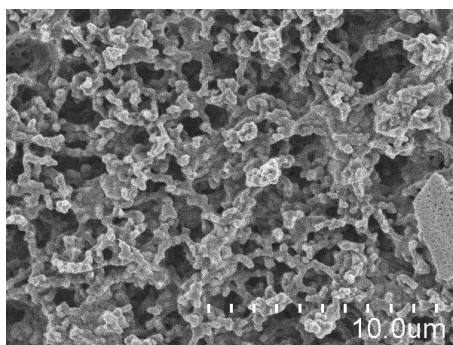


図7 付着物の走査電子顕微鏡写真

微生物の同定を行ったところ、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になった。ただし今回提案のシステムで使用する温度領域では付着はほとんど起こらないか、もしくは成長速度が非常に遅いと考えられる。

(4) 深層への熱入力にともなう変化予測と対策検討

成層と流れのある場における熱入力による湧昇現象について、水理実験およびシミュレーションによる検討を行った。その結果、湧昇高さは、熱入力(Q)が大きく、成層の温度勾配(GT)が小さく、流れ(U)が小さいほど大きくなり、 $U \cdot GT/Q$ とリチャードソン数に依存することを明らかにした。

また、熱入力によって引き起こされる湧昇がどのような肥沃化効果をもたらすのかを生態系モデルをつかってシミュレーションで検討したところ、プランクトンの空間分布は湧昇による水温変化の影響を強く受けることや、鉛直移動する大型動物プランクトンが大きく増殖する可能性があることが示された。

(5) まとめ

以上示したように、本研究では、海洋深層冷熱利用方式のクローズドサイクル型冷却水システムを提案し、予想される効果や課題について検討を行った。10万kW級の汽力発電所に適用した場合のケーススタディの結果、適切に要目計画を行うことによって電力の利得が得られることが示され、また、海底配管敷設方法や深層熱交換器の概略イメージの明確化、深層への入熱を利用した湧昇による海域肥沃化の可能性評価を行うことができた。

東日本大震災の後、電力供給不足解消が急務の我が国では、石炭火力の新設の必要性に対応して環境アセスメント期間の短縮化など規制緩和の動きがある。過度に厳しい規制を緩和することは重要であるものの、必要なことを省略する情勢は望ましいものではないであろう。環境負荷を軽減する技術を積極的に導入する方向性も重要であり、本研究で提案した技術構想はそれに貢献できると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 佐藤慎一、多部田茂、尾崎雅彦、取排水の無い発電所冷却水システムに関する基礎

研究第二報;湧昇による肥沃化効果検討のためのモデル構築、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第 13 号、2011、pp. 267-269

- ② 尾崎雅彦、大内一之、實原定幸、岡村盡、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論文集、査読無、第 12 号、2011、pp. 359-362

[学会発表] (計 4 件)

- ① 尾崎雅彦、海の深層冷熱を利用する取水・排水の無い火力発電所冷却水システムに関する研究、第 4 回深層水シンポジウム、2013 年 3 月 16 日、東京都大島町北の山公民館
- ② 多部田茂、海洋深層への熱入力による海域肥沃化に関する基礎的検討、第 16 回海洋深層水利用学会全国大会、2012 年 11 月 8、9 日、東京都大島町開発総合センター
- ③ 多部田茂、海洋深層への熱入力による湧昇に関する基礎的検討、平成 24 年度海洋理工学会秋季大会、2012 年 10 月 18、19 日、京都大学百周年時計台記念館
- ④ 尾崎雅彦、取水・排水の無い火力発電所冷却水システムに関する研究、第 3 回深層水シンポジウム、2012 年 3 月 10 日、東京都大島町立第一中学校

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 雅彦 (OZAKI MASAHIKO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号：30529706

(2) 研究分担者

佐藤 徹 (SATO TORU)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号：30282677

多部田 茂 (TBETA SHIGERU)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：40262406

大内 一之 (OUCHI KAZUYUKI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・客員共同研究員
研究者番号：40533972

(3) 連携研究者

なし