河川水熱利用設備の洗浄方式と流量制御方式の見直しによる効率改善

— 河川水利用熱供給システムの改修内容とその効果 —

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF THE WASHING METHOD AND THE FLOW CONTROL METHOD OF SYSTEM UTILIZING THE HEAT OF THE RIVER

— Study on improvement effects with a renewal of DHC system using river water heat —

山川 智 — * 1 齋藤功志郎 — * 2
下 正純 — * 3 河野匡志 — * 4
村上公哉 — * 5

Satoshi YAMAKAWA — * 1 Koshiro SAITO — * 2
Masazumi SHIMO — * 3 Masashi KAWANO — * 4
Kimiya MURAKAMI — * 5

キーワード：
河川水利用, 再生可能エネルギー熱, 地域熱供給, 効率改善

Keywords:
River water utilization, Renewable energy heat, District heating and cooling, Efficiency improvement

In 1989, district heating and cooling system using river water heat was introduced for the first time in Japan, at Hakozaki. And this system was improved with a renewal in 2012~2014. It was improved the washing method of the heat pump tube and the control method of river water intake. This paper presents a study on improvement effects with a renewal of DHC system using river water heat.

1. はじめに

エネルギー資源のほとんどを輸入に頼る日本は、省エネルギーに加え、エネルギー供給構造を転換すべく再生可能エネルギー(以下、再エネ)の普及拡大が求められている。なかでも「河川水の温度差エネルギー」は、2009年、EUの「再エネ指令」において、「ヒートポンプが利用するハイδροサーマル」として、再生可能エネルギー熱(以下、再エネ熱¹⁾²⁾)と認められた。日本においても同年、「エネルギー供給構造高度化法」により、「大気中の熱その他の自然界に存する熱」として再エネ源と定義された。しかし、2012年施行のFIT(電気事業者による再生可能エネルギー電気の買取に関する特別措置法)により、電気を創出する再エネ(太陽光・風力発電など)の普及は飛躍的に進んだが、再エネ熱(河川水の熱など)の普及は十分とはいえない状況である。河川水の熱をはじめとした再エネ熱の一層の普及のためには、再エネ熱の利用技術の確立が求められている。

箱崎地区熱供給センター第一プラント(以下、本施設)は、東京都中央区箱崎にあり、都心を流れる一級河川である隅田川に面して立地している。現在の熱供給エリアの全景を写真1に、熱供給エリアの全体概要を図1に示す。本施設は、日本初の河川水の温度差エネルギーを利用した熱供給施設として建設され、1989年に供給を開始した。竣工後20余年を経るなかで河川水利用ならではの課題や機器の劣化が顕在化したため、「河川水の利用技術の確立」および「更なる省エネルギー化」を目指し、2012~14年に設備改修を行った。

表1に設備改修の概要を示す。大きくは4つの観点から改修を実施し、河川水の最適利用では熱源機チューブの洗浄方式や河川水流量制御方式などの見直しを、熱源システム廻りでは運用データに基

写真1 箱崎地区の熱供給エリアの全景³⁾

図1 箱崎地区の熱供給エリアの全体概要³⁾

¹⁾ 東京電力エナジーパートナー(株)
(〒105-0022 東京都港区海岸 1-11-1)
²⁾ 東京都サービス(株)
³⁾ ㈱竹中工務店
⁴⁾ ㈱日建設計総合研究所 工博
⁵⁾ 芝浦工業大学建築学部建築学科 教授・工博

¹⁾ TEPCO Energy Partner, Incorporated
²⁾ Tokyo Toshi Service Company
³⁾ Takenaka Corporation
⁴⁾ Nikken Sekkei Research Institute, Dr. Eng.
⁵⁾ Prof., Faculty of Eng., Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.

表 1 熱供給システムの設備改修の概要

計画意図	熱供給開始時の採用技術	顕在化した課題	採用判断基準※1					改修時の採用技術・改善策
			①	②	③	④	⑤	
河川水の最適利用	バースクリーン	特になし		●		●		既設流用
	水中ポンプ〔定速ポンプ〕	流量制御への対応	●	●	●			インバータによる低負荷への対応
	干満に応じた放水口の切り替え	特になし		●		●		既設流用
	オートストレーナー〔エレメント回転型〕	混入物の除去性能（残渣量・動力低減）		●	●	●		経年数の長い半数のオートストレーナーを更新〔内面ブラッシング型〕
	熱源機チューブのブラシ洗浄	洗浄性能		●	●			ボール洗浄方式の採用
	熱源水入口温度による制御	熱源水の流量配分の偏りによる効率低下	●	●				制御用センサの追加〔圧力・流量〕 熱源水流量制御の見直し
	河川水の直接利用	特になし	●	●		●		供給当初の考えを踏襲
熱源高効率化	熱回収型ヒートポンプ〔河川水直接利用〕 バックアップ用に冷却塔を併設	経年劣化による熱製造効率の低下	●		●		●	機器単機容量の縮小 機器スペースの縮減
	チタン製チューブによる河川水直接利用	特になし	●	●				更新機器にもチタン製を採用
	熱源機チューブの管内面加工	熱交換効率の向上	●	●	●			管内溝加工による熱交換性能向上
	ターボ冷凍機〔河川水直接利用〕	容量適正化	●		●		●	経年数が短く未更新【容量を縮小して更新予定】
負荷平準化	縦型水蓄熱槽〔熱交換器を介して縁切り〕	温度ドロップの解消 弁切替の省力化	●			●		縦型蓄熱槽の補修 蓄熱槽出入口の熱交換器を撤去
搬送動力低減	冷水及び温水ポンプを設置し 供給系統をバイパス管で連携 〔定速ポンプの台数制御〕	供給負荷の減少に伴う 低流量域の動力削減、 容量適正化	●		●		●	供給系統ごとに圧力設定最適化 搬送設備容量の縮小 インバータによる低負荷への対応
その他	機械室給排気ファン常時稼働	スケジュール運転	●					運転時間の見直し

※1 採用判断指標：①～⑤はそれぞれ①運転データの蓄積、②河川水利用実績、③技術の進歩、④既設流用、⑤建築上の制約をさす

づく熱源設備と搬送設備の機器容量の縮小、蓄熱システムの熱交換器の接続系統の見直し、供給圧力の設定の見直しなどを行った。なお、本稿では、改修前は大規模改修開始前で東日本大震災の影響のない2010年度、改修後は2015年度時点である。

これらの設備改修により、一次エネルギー換算（昼間 9.97GJ/千 kWh、夜間 9.28GJ/千 kWh）の年間平均プラント効率は、改修前（2010年度）が0.96、改修後（2015年度）が1.24となり約30%向上した。また販売熱量あたりのCO₂排出量原単位は、0.054[kg-CO₂/MJ]から0.042[kg-CO₂/MJ]となり約22%低減した。これは東京都の「低炭素熱」の認定値 0.058[kg-CO₂/MJ]を大幅に下回る値である。今回の設備改修は、地域の熱需要家が省エネ法や温対法において定期報告する際に用いる各種原単位を大幅に低減し、地域全体の環境負荷低減に大きく貢献している。

本稿では、今回の設備改修の中から、わが国における今後の河川水の再エネ熱利用の一層の普及に貢献すべく、河川水利用熱供給シ

ステムにおいて顕在化した河川水利用特有の課題点および今回の改修での改善点とその効果について報告する。

2. 熱源システムにおける河川水利用の概要

本施設の河川水の取水設備の概要図を図2に示す。隅田川の水を堤防下に設置した3台の水中ポンプで取水し、建物地下2階の熱供給プラントの機械室に引き込んでいる。そしてオートストレーナーで混入物を除去し、熱源機器で利用して、再び隅田川へ放水する仕組みとなっている。また本施設は隅田川の河口に近く、満潮時には海水が遡上する汽水域のため、写真1に示す通り潮の干満に応じて、取水口に対して放水系統を上流側と下流側で切り替えて、放水された河川水を取水してしまうショートサーキットの防止を図っている。

改修前の熱源システム系統図を図3.1に、同改修後を図3.2に、改修前後の設備仕様の一覧を表2に示す。熱源機器の構成は改修前後で同じであり、ヒートポンプ熱源機（熱回収型）2台とターボ冷

図2 河川水の取水設備の概要図

図 3.1 改修前の熱源システム系統図

図 3.2 改修後の熱源システム系統図

表 2 改修前後の設備仕様の一覧

機器名称	主な仕様			
	改修前	台数	改修後	台数
ヒートポンプ熱源機 〔熱回収型〕	【RHP-1, RHP-2】 冷却：能力 20.2[GJ/h], COP 4.47 加熱：能力 14.2[GJ/h], COP 3.65 熱回収：冷却能力 20.2[GJ/h], 加熱能力 14.2[GJ/h], COP 5.88	2	【RDBHP-1, RDBHP-2】 冷却：能力 14.0[GJ/h], COP 5.45 加熱：能力 8.9[GJ/h], COP 4.60 熱回収：冷却能力 14.0[GJ/h], 加熱能力 9.5[GJ/h], COP 7.08	2
ターボ冷凍機	【RTR-1】 冷却：能力 20.2[GJ/h], COP 4.95	1	【RTR-1】・・・未更新 14.0[GJ/h]の能力にて更新予定	1
蓄熱槽	冷水槽 950m³, 温水槽 560m³ 冷温水槽 1,700m³, 1,700m³	—	部分補修, 槽内清掃, 断熱防水	—

凍機 1 台である。ターボ冷凍機（RTR-1）は今後更新予定であり、本設備改修では、ヒートポンプ熱源機 2 台（RHP-1→RDBHP-1, RHP-2→RDBHP-2）を更新した。3 台ともに熱源機内のチューブに河川水を送水し直接熱交換するシステムである。河川水には海水が混ざり塩分濃度が高く、チューブの腐食を防止するため、チューブの材質にはチタンを使用している。また改修前後共に各機、圧縮機を 2 台搭載し、100%運転と 50%運転が可能となっている。蓄熱槽の改修は、部分補修や槽内清掃を行った程度である。

3. 河川水利用システムの課題と改善点

3.1 河川水の混入物除去と熱源機チューブ洗浄方式の改善

（1）改修前のシステム

河川水の利用にあたり、本施設は隅田川下流に位置しており、河川水に土や砂の他、スーパーのレジ袋などのゴミ類や貝類などの海洋生成物が混入するため、これらの除去が必要となる。また、本施設では、河川水を熱源機に引き込み、熱源機内のチューブで熱交換しているため、チューブ内面の汚れの付着は熱交換効率を低下させる要因となる。そのため、河川水の熱源水利用に際して新築当初から、次の 3 つの設備を設け、混入物除去と熱源機チューブの洗浄を行っていた。一つ目は、取水口に設置する 40mm ピッチのバースクリーンである。これにより河川水の粗い混入物を除去する。二つ目は、2mm メッシュのオートストレーナーである。これにより細かい

表 3 設備改修において比較した熱源機チューブの洗浄方式の特徴

洗浄方式	写真	特徴
自動ブラシ洗浄方式 (改修前)	ブラシ	<ul style="list-style-type: none"> ・実測結果からボール洗浄方式よりも洗浄効果が小さい ・ブラシの回収の際に弁・切替え作業等が発生し、四方弁の設置が必要 ・ブラシのホルダーコストが高い ・オプション対応する冷凍機メーカーが1社のみ ・ブラシ部は全長 20mm、直径 15.5mm
自動ボール洗浄方式 (改修後)	硬い 柔らかい スポンジボール	<ul style="list-style-type: none"> ・1台の制御ユニットで冷凍機複数台まで対応可能 ・スポンジボールの径や回収率の管理が必要 (ボールの直径・固さを変更して、回収率の変化を継続検証中) ・配管システム簡素化(既設ポンプが利用可能) ・販売メーカーは複数社あり

混入物を除去する。三つ目は、熱源機のチューブ洗浄である。改修前は自動ブラシ洗浄方式(以下、ブラシ式)を採用していた。

ブラシ式は、熱源機の起動時に水流により熱源機チューブ内の上流側から下流側にブラシを移動させて洗浄し、熱源機停止時に熱源水配管の四方弁を切り替え、チューブ内の水流を逆流させて、起動時に下流側に移動していたブラシを上流側に戻す仕組みである。つまり、熱源機の起動時と停止時にそれぞれ1回洗浄する。この方式の特徴を表3に示す。ブラシ式では、ブラシを回収する際に熱源機を停止させ四方弁を切替える必要がある。また、熱源機のオプション仕様であり、対応する冷凍機メーカーが1社のみと限られる。

(2) 改修前のシステムの課題

改修前は、オートストレーナーと熱源機のチューブ洗浄で課題が発生していた。まずオートストレーナーでは、内径約16mmの熱源機チューブに対し、2mmメッシュのエレメントを採用していたが、運用時に熱源機チューブの一部が閉塞する事象が発生していた。また、オートストレーナーはメッシュの目詰まりを防ぐため、カゴ状のメッシュのエレメントの内側にブラシを設け、エレメントを回転させて、メッシュに付着した混入物を掻き落とす構造となっていた。しかし、エレメントの摺動部隙間からビニールなどの薄い混入物や細かい混入物の一部が流出していた。

次にブラシ式では、熱源機チューブの1本1本の上流側と下流側の端部にブラシが留まるホルダーを設ける必要があるため、熱源機製造コストの増大を招いていた。

(3) システムの見直しとその効果

改修後の混入物除去と熱源機のチューブ洗浄までの概要を図4に、改修内容を表4に示す。熱源機チューブが閉塞する事象が発生したチューブ内を調査した結果、貝類の死骸が原因であることが分かった。これらは、オートストレーナーの2mmメッシュを卵や幼生の状態で通過し、熱源水配管内面に付着して十数mm程度に成長したものが、やがて死に絶えて熱源機に漂着したものと推定された。そのため、熱源機の手前に6mmメッシュのY型ストレーナーを追加し、貝類による熱源機チューブ閉塞の防止を図った。さらにオートストレーナーの摺動部隙間から流出が生じないようエレメントが回転せずに、内面のブラシが回転する方式のオートストレーナーを採用した。その結果、ビニール等の混入物の流入は生じなくなった。

熱源機チューブの洗浄方式は、熱交換効率への影響や製造コスト

図 4 改修後の混入物除去と熱源機のチューブ洗浄までの概要

表 4 混入物除去と熱源機のチューブ洗浄に関わる改修内容

対象設備	主な改修内容
①バースクリーン	従来のまま
②オートストレーナー	エレメント回転型から内面ブラッシング型へ変更し、摺動部隙間からの混入を防止
③Y型ストレーナー	熱源機手前に回転スクレーパー付Y型ストレーナーを新たに設置
④熱源機チューブ洗浄	自動ボール洗浄方式へ変更
⑤熱源機チューブ材質	熱交換効率を向上するため、新たにチタン製チューブの管内面に溝加工を施す対策を講じて熱源機を更新

表 5 熱源機チューブ洗浄方式別の熱源機の単体 COP

運転モード		圧縮機 1 台 50%運転		圧縮機 2 台 100%運転	
実施時期		2008 年	2009 年	2008 年	2009 年
RHP-1	洗浄方式	ブラシ	ボール	ブラシ	ボール
	単体 COP	4.61	4.88	4.42	4.46
		+5.9%		+0.9%	
RHP-2	洗浄方式	ブラシ		ブラシ	
	単体 COP	4.70	4.68	4.19	4.16
		-0.43%		-0.72%	

への影響が大きいため、もう一つの主要な洗浄方式である自動ボール洗浄方式（以下、ボール式）について改修前に仮設で設置し、既設のブラシ式との性能比較を行った。その特徴を表3に示す。

比較方法は、プラントに設置されていた同型同容量のRHP2台において、RHP-1のみ2009年にボール式を仮設で接続し、RHP-2は既設のブラシ式をそのまま用いて比較を行った。評価期間は、最も汚れの影響が大きい夏期であり、2008年は8月1日～10月31日、2009年は6月1日～9月30日に実施した。ブラシ式は、熱源機の起動時、運転時、停止時にそれぞれ1回洗浄し、一日計3回洗浄を実施した。ボール式では、ボールの投入時間2分+回収時間4分を一日計3回、運転中に実施した。そして、効果の比較には熱源機器の単体COPと、チューブの熱交換性能の判断指標であるLTD値（Leaving Temperature Difference）を用いた。

$$LTD = (\text{冷媒凝縮温度}) - (\text{冷却水出口温度}) \cdots \cdots (1)$$

評価期間における熱源機の単体COPの比較を表5に示す。ボール式を使用した熱源機RHP-1については、ブラシ式を用いていた2008年と比べ、ボール式を用いた2009年では、圧縮機1台運転時の場合で単体COPが4.61から4.88となり約5.9%の上昇傾向が見られた。圧縮機2台運転時の場合で単体COPが4.42から4.46となり約0.9%の上昇傾向が見られた。一方、ブラシ式のみを用いた熱源機RHP-2については、圧縮機1台運転時の場合で約0.4%、圧縮機2台運転時で0.7%の低下傾向が見られた。

次に、洗浄方式の違いによるLTD値の推移を図5.1、図5.2に示す。評価期間は、2010年6月1日～9月30日である。ブラシ式では、圧縮機1台運転時と2台運転ともにLTD値はやや上昇する傾向が見られたが、ボール式では、LTD値の上昇傾向は見られなかった。

以上の2つの指標の比較から、本改修ではボール式を採用した。この方式を採用することによって、バックアップ用の冷却塔に切替える際に支障となっていたブラシの撤去作業を省力化することも可能となった。また各チューブにブラシフォルダーが必要なブラシ式に比べ、ボール式は熱源水管に集約してボールフォルダーを設置する機構のため、機器製造コストを抑制することができた。

3.2 河川水流量制御の見直しによるバイパス量の低減

（1）改修前の制御方法

河川水を熱源水として利用するのにあたり、周辺環境へ影響を与えないように、河川法に基づき「水利使用規則」に従って運用している。表6に示すように、この規則では本施設で利用する河川水の取水・排水の流量と温度差を定めており、流量は時間最大量（ m^3/s ）と日最大量（ $\text{m}^3/\text{日}$ ）、温度差は冷水製造の場合と温水製造の場合をそれぞれ定めている。このうち、取水・排水の時間最大量は、ピーク時に3台すべての熱源機を定格運転するために要する水量に基づいて定めた値となっている。

この規定を順守するために、図6に示すように、各熱源機における河川水の出入口温度差が水利使用規則に定めた値（冷水製造時：5℃、温水製造時：3℃）以下となるように入側電動弁を制御していた。そして、河川への排水時に取水と排水の温度差が規定温度差を超える場合は、河川水主管の末端に設けた往還バイパス弁を開放する制御を行っていた。

（2）改修前の制御方法の課題

各熱源機の出入口温度差による入側電動弁で河川水流量を制御

図 5.1 LTD 値の推移（自動ブラシ洗浄方式）

図 5.2 LTD 値の推移（自動ボール洗浄方式）

表 6 水利利用規則（改修後）

最大量	時間最大量 [m³/sec]		日最大量 [m³/日]	
期間	取水	排水	取水	排水
4/1～10/31	1.00		56,826	
11/1～3/31	0.60		22,293	
取水と排水の温度差	冷水製造の場合：5 [°C] 以下 温水製造の場合：3 [°C] 以下

図 6 改修前の河川水利用制御の概要

図 7 冷水製造時の熱源負荷率と熱源機出入口温度差（改修前）

したところ、熱源機毎に河川水の流量配分に偏りが生じた。水利使用規則により取水の時間最大量は3台の熱源機の定格流量の合計値に基づいて定められていたため、一方の熱源機に河川水が偏ると他方の熱源機で河川水が不足し、図7に示すように、熱源機の河川水出入口温度差が拡大した。これに伴って冷媒凝縮温度も上昇し、熱源機の効率低下や温度異常による機器の保護停止が生じていた。そして、水利使用規則の冷水製造時温度差 5℃を超過する場合は、排水温度を下げるために、河川主管のバイパス弁を開放する制御がかなりの頻度で働いていた。

(3) 制御方法の見直しとその効果

本改修では、図8に示すように熱源機毎に河川水配管に流量計を新設し、流量要素による入口弁制御を追加した。また取水ポンプの流量制御には圧力計を新設し、推定末端差圧制御から実末端差圧制御へ変更した。これにより、各熱源機への河川水の流量配分が適正化された。そして、河川水のバイパス量が低減し、本施設の河川水取水量に対する熱源機の河川水流量は、改修前の62%から、改修後には97%に増大した(図9参照)。各熱源機の河川水の出入口温度差は、図10に示すように水利使用規則の5℃以内に制御することが可能となった。この結果、冷媒凝縮温度の上昇を抑制し、効率低下や機器の保護停止を抑止している。

4. まとめ

1989年に日本で初めて河川水の再エネ熱を利用した本施設において、2012～14年に取水設備および熱源システムの設備改修を行い、一次エネルギー換算の年間平均プラント効率は0.96から1.24に約30%向上した。本稿では、今回の設備改修の中から、わが国における今後の河川水の再エネ熱利用の一層の普及に貢献すべく、河川水利用熱源システム特有の課題に関わる以下の知見を報告した。

- 1) 2mm メッシュのオートストレーナーにより混入物除去を行っていたが、熱源機チューブの一部に閉塞が生じ、原因を調査したところ、メッシュを通過した貝類の卵類が熱源水配管内で成長し、死に絶えて漂着したものと想定されたため、熱源機手前にY型ストレーナーを追加し、閉塞防止を講じた。
 - 2) 河川水の混入物を除去するオートストレーナーについて、エレメントの摺動部隙間から混入物の一部が流出したため、エレメントが回転せずに、内面のブラシが回転する方式のオートストレーナーを採用し、同流出の防止を講じた。
 - 3) 河川水との熱交換効率を左右する熱源機チューブの洗浄方式について、改修前にボール式を仮設置し、既設のブラシ式と比較した結果、LTD 値と熱源機単体 COP とともにボール式が優位となったため、改修時に採用した。
 - 4) 流量要素による河川水の流量制御を熱源機毎に追加することで、流量配分が適正化され、流量の偏りにより生じていた冷媒凝縮温度の上昇を抑制し、効率低下や機器の保護停止を抑止した。
- 今後、普及・拡大が求められている再エネ熱利用に対して、河川水の再エネ熱を利用する本施設の設備改修から得られた知見や技術が広く活用され、持続可能な社会の実現にいくらかでも貢献できれば幸甚である。

図9 冷水製造時の熱源負荷率と熱源機出入口温度差（改修後）

図10 改修前後の熱源機への河川水流量の比較※2

※2 改修前の2010年度は、熱源機への熱源水流入量は計測されていなかったため、熱源機凝縮温度の計測データから冷却水循環量を逆算して、熱源機への流入量を推計（2015年度は実測値）し、各々の年度の河川取水量を100%として比率を算出した。

謝辞

今回の設備改修は、熱源プラントの運転管理者および計画・設計・施工に関わった多くの方々の長年に亘る尽力により成し得たものである。この場を借り深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 山川智ほか5名：ヒートポンプによって供給される再生可能エネルギー量に関する研究（第1報）再生可能エネルギー量の算定方法の検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.201～204, 2016.9
- 2) 渡邊幸芳ほか5名：ヒートポンプによって供給される再生可能エネルギー量に関する研究（第2報）我が国における大気熱からの再生可能エネルギー量の推計，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.205～208, 2016.9
- 3) 東京都サービス㈱ 箱崎熱供給センターパンフレット

[2017年6月7日原稿受理 2017年8月29日採用決定]