

Study on the system performance and exergy evaluation of a solar thermal utilization system of over 30 years using in a shelter gymnasium

SungKi SONG^{*1}Koichi ISAWA^{*2‡}

30年以上使用の体育館における太陽熱利用システムの運用と性能およびエクセルギー評価

宋 城基^{*1‡}伊澤 康一^{*2}

Abstract

In order to realize ZEB and ZWB in shelter gymnasiums, the performance, operational status, and problems of the solar thermal utilization system that has been used in a gymnasium for more than 30 years were investigated and studied. The annual solar thermal collection efficiency was about 47%, confirming that the performance of the solar thermal collection has not declined. In the exergy consumption process, it was found that the solar thermal utilization system with boiler consumes about 40% less exergy than the boiler alone.

Keywords: Gymnasium, Solar thermal utilization system, long-term using, System Performance, Exergy
 キーワード：体育館，太陽熱利用システム，長期使用，システム性能，エクセルギー

1. はじめに

地球環境問題について話し合った COP21 においてパリ協定が締結され、その対応のため日本は 2018 年 7 月に「脱炭素化」に向け第 5 次エネルギー基本計画を発表し、エネルギー効率化とともに再生可能・未活用エネルギー拡大を中心に 2030 年までの大幅削減を進め、2050 年は排出ゼロという見通しを決めた。建築物においては高気密高断熱をはじめ省エネルギーと創エネルギーによる ZEB/ZEH の実現を目指すようになった。また、2050 年から使用電力を 100%再生可能エネルギーで賄う RE100 の取り組みにおいても日本は参加することとなり、環境省では再生可能エネルギーの積極的な利用などを目的に「再生可能エネルギー情報提供システム (REPOS)」¹⁾を開発し、太陽熱と地中熱の導入ポテンシャル量が推計できるように公開している。ところが、2020 年度資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」²⁾によると、2019 年度(新型コロナパンデミック前)における一次エネルギー国内供給は前年度比 2.5%減少し、再生可能エネルギーは 8 年連続で増加が続いたものの、水力を除けば国内供給の 5.8%で過ぎず、そのほとんどが太陽光発電や風力であった。太陽熱を利用するシステムは

15~20%の太陽光発電システムに対し、40~60%³⁾と高い変換効率と CO₂ 排出量ゼロとして注目されているものの、他の再生可能エネルギーに比べて国内での普及率はいまだ低いのが現状である。

また、近年は 2011 年 3 月の東日本大震災、2018 年 7 月の西日本豪雨や 9 月の北海道胆振東部地震など、想定を超える自然災害が増加しており、災害による避難生活は長期化傾向にある。しかし、避難所環境は劣悪であり、それに起因する災害関連死も生じている。特に、平成 23 年度東日本大震災における学校の対応等に関する調査研究報告書⁴⁾によると、体育館の 7 割以上が避難所として利用され、避難所で問題となった設備はトイレに次いで暖房設備であると指摘されており、ライフライン途絶時と長期避難所暮らしの双方に対応するため、避難所には暖房設備が設置されることが求められている。従って、カーボンニュートラル、ZEB・ZEH および RE100 の実現において、避難所は優先されるべき建築物であり、太陽熱利用ができるエネルギー自立型避難所の推進が必要不可欠と考える。

先行研究⁵⁾では、大田区の避難所となっている全小中学校の平常時における給湯、空調、照明などの利用パターンを把握するとともに、災害時のみならず平常時において太

*1 Associate Professor, Department of Architectural Design, Hiroshima Institute of Technology
 ‡e-mail: s.song.wt@it-hiroshima.ac.jp

*2 Associate Professor, Fukuyama University

Received: December 17, 2022, Accepted: February 17, 2023

*1 広島工業大学建築デザイン学科 准教授
 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)
 ‡e-mail: s.song.wt@it-hiroshima.ac.jp

*2 福山大学工学部建築学科 准教授

(原稿受付: 2022 年 12 月 17 日, 受理日: 2023 年 2 月 17 日)

陽光発電と太陽熱集熱システムを優先する環境配慮型とシステム投資回収年が最短となるようにコージェネレーションシステム、太陽熱集熱器、太陽光発電の順に導入する経済重視型について検討した結果、環境配慮型は経済重視型に比べ、1次エネルギーやCO₂排出量は約10%多く削減できるが、国からの補助金などを考慮したイニシャルコストは約5年以上長くなることを示された。また、先行研究⁶⁾では、2009年度設置された「ソーラーエネルギー利用推進フォーラム」における太陽熱利用給湯システムの環境価値を活用する制度について検討するとともに、太陽熱利用量の簡易計測・算出の手法の違いによる誤差率の補正「環境価値換算係数」の提案と省エネ基準地域と年間日射地域を考慮した全国の代表20地点における太陽熱利用給湯システムの太陽熱利用量をシミュレーションから算出した上で、補助金額を提案されている。

太陽熱利用とそのシステムの性能については、集熱器のみを対象とした数値計算モデルの研究⁷⁾、補助熱源として太陽熱を利用した自然冷媒のヒートポンプ温水器の数値計算モデルの研究⁸⁾がある。また、太陽熱を床暖房給湯およびデシカント空調システムの熱源として利用することを想定し、実測からパラメータを推定した数値計算モデルと実測の両方からシステム全体の性能(集熱効率、太陽熱依存率、システムCOP)を評価した研究⁹⁾がある。また、集熱器と蓄熱槽の一体型の3種類の自然循環型太陽熱温水器において実際の利用を想定し、最大2年間の性能試験から、集熱効率は38~44%と強制循環型に比べ小さくないことや二次配管は無断熱であるための熱損失が1割以上であることを報告した研究¹⁰⁾がある。

これらの先行研究では太陽熱利用システムにおいて実測や実験およびシミュレーションにより、集熱器や貯湯槽などこれらを含めたシステム全体における性能について検討されている。また、太陽熱利用システム導入によるLCCO₂やLCCの検討およびシステムの普及促進のため補助金の決め方について提案などが行われている。ところが、太陽熱利用システムのライフサイクルコスト(LCC)やLCCO₂の評価は寿命までその性能が維持できていることを前提としているものの、設計または施工後の寿命まで性能が発揮できているかについて、また、長年その性能維持ためにはどのような問題や改善が必要なのかについて調査報告や研究などは見当たらない。さらに、太陽熱利用システムの普及には、石油・石炭などの化石エネルギーのように密度が高いエネルギー源に対し、密度が低いすなわち質が低いエネルギー(低エクセルギー)源をいかに有効活用できるのかが左右されるため、エネルギーの量のみならず、質を含め評価が必要であろう。

そこで、本研究は想定外の災害が起こる可能性は高くなっている現在、避難所建築としての体育館のZEBやZWBを目指すことを目的としており、ここでは、避難所体育館に30年以上長年使用し続けた太陽熱利用システムの実測調査と聞き取り調査により、その性能と運用状況および問題

点について報告する。また、資源の「量」のみを扱うエネルギーでの評価に加えて、資源の「質」と「量」の双方を加味して評価できるエクセルギーを用い評価を行なう。

2. 建物とシステムの概要と実測概要

2.1 対象建物

Fig.1に対象建物を示す。対象となる建物は広島市佐伯区にある指定避難所となっている体育館であり、1986年5月に竣工された延床面積約6,430 m²、地上3階建てSRC造である。体育館の1階は延床面積約776 m²のプール、約518 m²のトレーニングルーム、約1,688 m²の実験室が、2階は床面積約1,940 m²(天井高約12.9m)のアリーナ、約137 m²のステージ、約68 m²のミーティングルーム、約1,217 m²のその他器具庫等が、3階は約808 m²のアリーナの観覧席と放送室等となっている。まず、1階のプールは長さ25mの水深1.2mと1.6mがそれぞれ2コースと6コースの計8コースとシャワー室、更衣室があり、プールと脱衣室にはコンベクターが設置されている。トレーニングルームは北東側の入り口付近に換気扇があるのみで、冷暖房装置はついていない。また、2階のアリーナは4試合のパレーボールが同時にできる、または3試合のバスケットボールが同時にできる設備が備えられており、東側のみ連続した全面窓となっている。さらに、3階は北側の壁面を除いて全ての側面に連続した窓が設置されており、アリーナ天井の中央の一部にも天窗が設置されている。また、平常時使用では、体育館の使用人数は室内プール約20人、トレーニングルーム約15人、アリーナ約30人が想定されている。

体育館の開館時間は土曜日 9:00~12:15、平日 9:00~20:00であり、日曜日、祝日、創立記念日、盆休み、年末年始を除く年間約287日使用される。特に、プールの使用時間は平日 16:00~19:00、夏期休業期間は平日 13:30~17:30、土曜日 13:30~16:30であり、年間約168日使用される。2019年度の使用日数は体育館が285日、プールが166日であった。



Fig.1 Building, Gymnasium and Pool

2.2 太陽熱利用システム

Fig.2 に体育館の太陽熱利用システムの概要図を、Fig.3 には主な装置を示す。このシステムの供給側（一次側）には太陽熱集熱器、貯湯を兼ねた蓄熱槽と集熱ポンプ、ボイラーと一次ポンプ、加熱用・給湯用・暖房用のそれぞれの熱交換器と構成されており、消費側（二次側）にはプールの加熱用・シャワーの給湯用・プールと更衣室の暖房用の二次ポンプとシャワー用貯湯槽と構成されている。集熱運転時には蓄熱槽の下部から集熱ポンプにより太陽熱集熱器に送られた水が温められたのちに蓄熱槽の上部に戻る。また、需要側への熱供給時には蓄熱槽に蓄えられた温水が1次ポンプによりボイラーに送られ、各用途の設定温度に達しない場合にはボイラーでさらに温められたのち、熱交換器で熱交換され、再び蓄熱槽に戻る。ここで、対象の太陽熱利用システムの集熱器は直径 100 mm、厚さ 2 mm、長さ 2,870 mmの選択吸収膜付真空ガラス管型が 1,680 本の 210 台があり、その有効集熱面積は 382 m²で、反射板が無く、水平に設置されている。蓄熱槽は幅 4m、奥行き 3m、高さ 2mで、その有効容量は 20 m³である。ボイラーはA 重油使用の出力 349kW が 2台、熱交換器は 198kW のプール加熱用、220kW の給湯用、233kW の暖房用がそれぞれ 1 台ずつある。各ポンプの定格流量は集熱ポンプが 3150/min、プール加熱用・給湯用・暖房用の 1 次ポンプがそれぞれ 3100/min、3400/min、3600/min である。

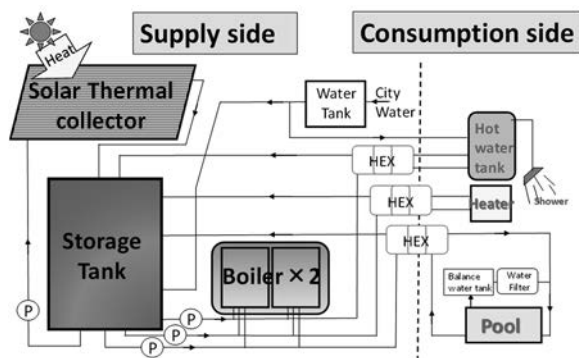


Fig.2 Solar thermal utilization system.



Fig.3 Thermal storage tanks, boilers, heat exchangers.

2.3 実測概要

体育館の太陽熱利用システムの性能を調査するため、2018年10月1日からFig.4に示すようにシステムの温度、流量を計測開始し、システムの重油の消費量や運用については聞き取り調査を行った。温度計測は集熱出入口、プール加熱用・給湯用・暖房のそれぞれの行き返りとボイラー通過後の計 11 箇所において熱電対を用い配管の表面温度を

1 分間隔で計測記録した。流量は集熱ポンプ、給湯・プール加熱、暖房のそれぞれの一次ポンプの計 4 箇所において 1 分毎の運転出力を計測し、この出力と定格流量から算出した。また、日射量と外気温度は近くの建物屋上で計測している気象データを、ボイラーの重油消費量は定期的に記録しているデータを聞き取り調査で収集した。ここで、定点自動気象観測システムの日射計 (class2) の測定範囲と波長範囲は 0~1400W/m²と 310~2800nm、使用温度範囲と温度依存性は-40~80°Cと±5%/°C (-10~+40°C) である。



Fig.4 Measurement of Temperature and Pump operation.

3. システムの運用状況と性能

3.1 システムの運用状況

太陽熱集熱システムは 5 年に 1 回のメンテナンスが行われているが、長年使用されていることもあり、真空ガラス管の不具合品があった時には取り換えせず、撤去し、現在はその約 8 割の 1,297 本のみで集熱している。また、2012 年の行われたメンテナンスでは、給水側の継手部分のパッキン 2 か所、継手 1 か所の交換があったが、その他に重大な故障はなく、現在まで大規模なシステム改修は行われていない。ところが、集熱ポンプは設置時と同様に平日 7 時~15 時に稼働となっているものの、集熱運転の制御関連資料が残っていないため、詳細な運転条件などは不明である。また、ボイラーは設置以降 2007 年 6 月ごろに一度改修があったのみで、年 2 回の法定点検を除けば他の故障もなく 1 日ごとに交互稼働が行われている。ボイラーの運転時間は 8:30~20:00 で、休日は日曜日のみであり、担当者が必要と判断した場合は手動で運転するが、外気温度が低い時には手動で 2 台同時運転を行うことがある。ところが、ボイラーは設計図書に各用途別の設定温度が給湯・暖房 60°C、プール加熱 40°Cの記載されているものの、集熱運転と同様にボイラー加熱などの詳細な運転条件などは不明である。

Fig.5 に 2011 年~2020 年まで 10 年間の各年における冬季・中間期・夏季のボイラーの重油消費量を示す。ここで、冬季は 12 月~3 月を、夏季は 6 月~9 月を、残りの 4 か月を中間期とする。また、重油消費量は月末の給油量を記録したデータであり、2014 年度はデータが残っていない。まず、太陽熱利用システムの年間重油消費量は 23,000~33,0000/年、その平均は約 25,8000/年であり、新型コロナ流行 2020 年度を除けば平均は約 26,8000/年であった。

各年における月重油消費量は、1,000 (2020年度のみ1,460 l/月) ~6,000 l/月であった。また、各期間の月間重油消費量と4か月平均重油消費量は、冬季では14,500~21,000と約17,700 (2020年度除くと約18,100) で、中間期では6,000~12,000と約6,700 (2020年度除くと約7,200) で、夏季では1,000~6,000と1,440 (2020年度除くと約1,700) であった。このことから、年間の重油消費は体育館の使用制限がある2020年度を除けば、8年間平均25,800 l/年であり、毎月の最大消費量は変わらないことが分かる。また、期間の重油消費は夏季、中間期、冬季の順に多く、冬季は中間期の約2.5倍以上で、年間消費量の内53~75% (2020年度83%) を占めていることが分かる。さらに、夏季は2012、2015、2017、2018の4年間を除けば、重油消費がほとんどないことから太陽熱利用システムでほとんど賄われていることが分かる。

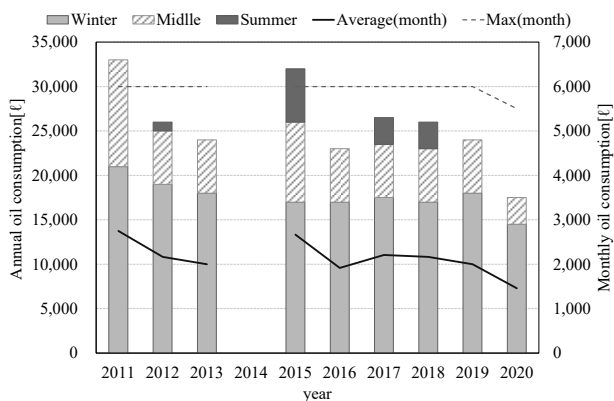


Fig. 5 Oil consumption of Annual and Monthly

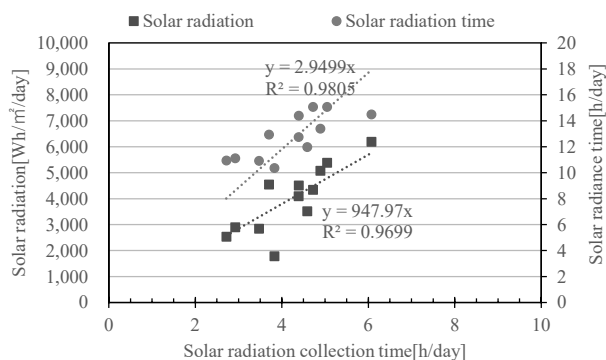


Fig. 6 Number of hours of heat collection and solar radiation

Fig. 6 に体育館の通常運用ができた実測開始の2018年10月1日~2019年9月30日の1年間における各月の日積算平均日射量と日平均日射時間(日射がある時間)に対する太陽熱利用システムの日平均集熱運転時間の関係を示す。日平均集熱運転時間2.7~6.1 h/dayに対する日積算平均日射量は1,785~6,190 [W/m²·day]であり、両方による1次元直線近似式の相関を示す決定係数は約0.98であった。また、日平均日射時間は2.7~6.1 h/dayであり、集熱運転時間に対する1次元直線近似式の決定係数は

約0.97であった。このことから、集熱運転は日積算平均日射量と日射時間に比例するとともに、計画時の1日9時間運転は行っておらず、日射時間の1/3程度しか運転していないことが分かる。

3.2 実測調査によるシステム性能

2020年から新型コロナが流行しているため、体育館の通常運用ができた実測開始の2018年10月1日~2019年9月30日までの1年間における結果を示す。

1) 太陽熱集熱効率と集熱温度

Fig. 7 に各月の日積算平均日射量と日平均外気温および集熱効率を示す。日積算平均日射量は12月の1,785 [W/m²·day] ~5月の6,190 [W/m²·day] で変動しており、年間の日積算平均日射量は3,980 [W/m²·day]であった。日平均外気温は1月の5.8℃~8月の27.6℃で変動しており、年間の平均外気温は16.2℃であった。このような日射量と外気温の気象条件において、集熱運転による各月の集熱効率は9月の28%~2月の60%となり、年間集熱効率は約47%であった。また、夏季(42%)、中間期(47%)、冬季(57%)の順に集熱効率は高い結果であった。このことから、日射量が少なく外気温が低い月や季節の方が集熱効率は高くなる傾向にあることが分かる。特に、冬季の集熱効率が低いのは、夏季に比べ稼働時間が短いことや集熱し蓄熱槽に貯めた温水の熱の多くを負荷で使用できているためと考えられる。

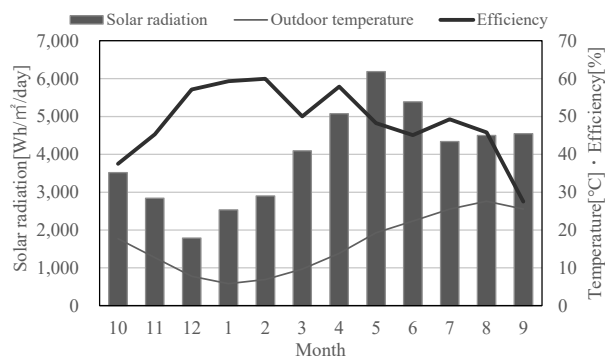


Fig. 7 Solar radiation and outdoor temperature, efficiency

Fig. 8 に各月の集熱稼働時における集熱入り口の温度を示す。集熱の入口出口温度は、10月~3月はそれぞれ12.5~30℃と16.5~48.5℃の変動、月平均はそれぞれ17.5~21.4℃と30.7~37.2℃であった。また、4月は13.8~33.6℃と18.6~76.1℃の変動、月平均は24.9℃と48.4℃であった。さらに、5月~9月は19.3~40.3℃と28~84.2℃の変動、月平均は29.8~34.5℃と48.4~55℃であった。このことから、集熱運転の立上がり時間などを除けば、冬季の集熱出口温度は約30℃以上、最大温度は約48℃で、夏季の集熱出口温度は約48℃以上、最大温度は80℃を超えることがわかる。冬季の集熱温度が低いのは日射量が少ないことや外気温が低いためと考えられる。

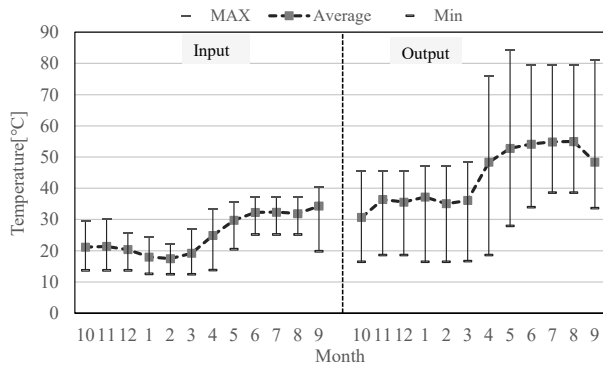


Fig.8 Input and Output temperature

2) 供給熱量と太陽熱利用率

Fig.9 に月積算供給熱量と太陽熱利用率を示す。ここで、太陽熱利用率とは、太陽熱集熱システムによる集熱のうち、実際供給熱量として使われた熱量の割合である。月積算供給熱量は9月の0.6MWh～12月の約71.6MWhで変動しており、年間の月平均供給熱量は約34.8MWhであった。太陽熱利用率は9月の2.8%～10月から3月までの100%で変動しており、年間の太陽熱利用率は約80%であった。また、期間別の供給熱量は夏季0.5～3.2MWh/月(平均1.7MWh/月)、中間期27.7～63.1MWh/月(平均45.1MWh/月)、冬季49.1～71.6MWh/月(平均57.5MWh/月)の順に、太陽熱利用率は夏季2.8～4.1%(平均3.5%)、中間期18～100%(平均約76.4%)、冬季100%の順に大きい結果であった。このことから、供給熱量は5月を除けば、中間期と冬季共は35MWh/月(年間の月平均)以上であったが、夏季は年間供給熱量の約1.6%程度しかないことがわかる。また、太陽熱利用率は冬季と中間期に比べ、夏季は3.5%しかないことがわかる。さらに、供給熱量が多い月ほど太陽熱利用率が高いことが推測できる。ここで、中間期5月の太陽熱利用率が低いのは、集熱効率も高く他の月に比べ日射量も多いため、集熱量が多くなり、集熱に対して供給熱量が少なかったためである。また、夏季6月～9月のボイラー供給熱量が発生しているが、図5の2019年の夏季において重油消費量がない理由は、夏季4か月間合計の重油消費量が少なかったことで、5月末に供給された重油をこの4か

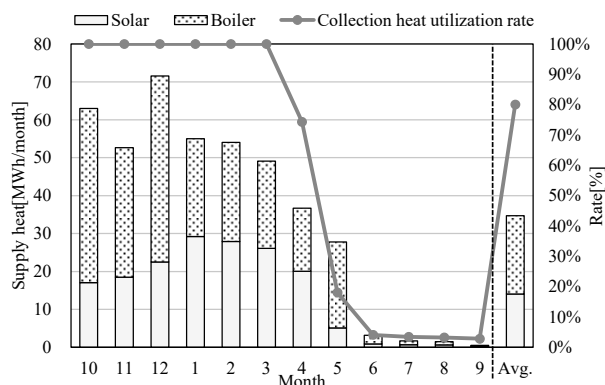


Fig.9 Supply heat and Collection heat utilization rate

月間で消費し、9月まで重油が供給されなかったためと推測できる。

3) 利用熱量と太陽熱依存率

Fig.10 に給湯・プール加熱・暖房の月積算利用熱量と太陽熱依存率を示す。ここで、太陽熱依存率とは、利用熱量の内、太陽熱集熱システムの集熱が利用された熱量の割合である。給湯は9月の0.2MWh～3月の13.9MWhで変動しており、年間の月平均利用量が約6.2MWhであった。暖房は6月の0.0018MWh～2月の16MWhで変動しており、年間の月平均利用量が約4.3MWhであった。プール加熱は9月の0.3MWh～1月の47MWhで変動しており、年間の月平均利用量が約24.3MWhであった。期間別の利用熱量は、暖房は夏季がほとんど無く12%以下、給湯とプール加熱は全ての期間でそれぞれ9～41%と53～91%を占めていた。このことから、年間の利用熱量は暖房約12%と給湯約18%、プール加熱約70%の順に多く、ほとんどがプール加熱用として使われることがわかる。また、期間ごとの用途別の利用熱量の割合はあまり変わらないことがわかる。太陽熱依存率は5月の18%～9月の約60%で変動しており、年間の太陽熱依存率は約41%であった。期間別は中間期34%、冬季37%、夏季46%の順に大きい結果であった。このことから、太陽熱依存率は、利用熱量が多い中間期と冬季はほぼ同じで、利用熱量が少ない夏季が他の期間より高いことがわかる。ここで、夏季は他の期間に比べ負荷がかなり少ないにもかかわらず、太陽熱依存率が100%にならない原因は、負荷発生が午前であり、蓄熱槽から供給される水温が設定温度に比べて低い時間帯があることや、設計図書の設定温度より高い温度で制御されている時間帯もあることにより、ボイラー運転が行われたためである。

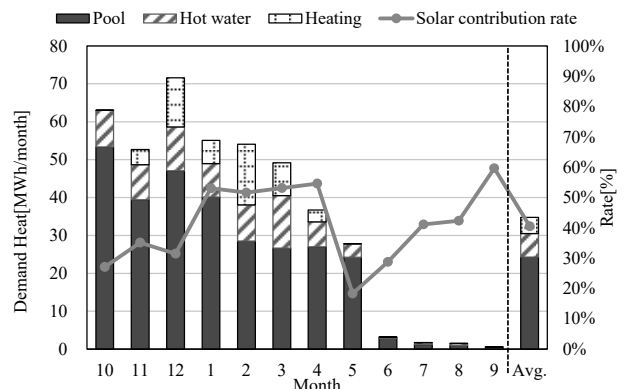


Fig.10 Consumption heat and Solar contribution rate

4) 考察

一般的な太陽熱利用システムの集熱効率¹¹⁾は、用途別に給湯システム30～60%、暖房システム30～50%、暖冷房システム20～40%とされており、30年以上使用されている太陽熱利用システムの集熱性能は低下していない。また、資料は無いが設計当時とほぼ同じ程度の集熱性能が発揮できていると推測できる。

また、建築用の給湯・暖房・除湿冷房の使用温度は 40～60℃、吸着・吸収式冷凍機の使用温度は 60～95℃とされているため、体育館の太陽熱集熱システムは、冬季の給湯・暖房の熱源としてやや足りないものの、夏季の給湯・除湿冷房用の熱源としては十分であることがわかる。従って、冬季においては集熱運転の時間と制御などを改良することにより単独運転による対応可能性も十分考えられるし、夏季においては 60℃以上の温度も得られることから冷凍機の熱源としても使えることが推測できる。

4. エクセルギー評価

資源の「質」と「量」の双方を加味した評価のため、エクセルギー概念を用い、冬季 12 月～3 月までの 4 か月における太陽熱利用システムへの投入エクセルギーを求めた。また、太陽熱集熱は行わず、ボイラーのみですべて熱供給する場合のエクセルギーを求め、比較検討した。

4.1 計算方法¹²⁾

太陽熱集熱とボイラーの両方で熱供給する場合 (CASE1)、ボイラーへの入力エクセルギー、ボイラーからの出力エクセルギーは、それぞれ式 1) と式 2) で計算できる。また、太陽熱集熱なしボイラーのみで熱供給する場合 (CASE2)、ボイラーでの入力・出力エクセルギーは式 1) と式 2) において、ボイラー出口温度を熱交換器入口温度に、ボイラー入口温度を熱交換器出口温度に置き換えることで計算できる (Table.1 の式 3) と式 4)。ここで、エクセルギー計算に必要な重油 (A) の有効比とボイラー熱効率をそれぞれ 0.93 と 0.8 とした。なお、[ボイラーの熱効率]=[得られる温水の熱エネルギー]/[投入される天然ガスの化学エネルギー] であり、[A 重油の有効比]=[化学エクセルギー]/[化学エネルギー]である。なお、太陽熱によって供給される温エクセルギーは式 2) のボイラーの入口・出口温度を蓄熱槽の入口・出口温度に置き換えることで計算できる。

Table.1 Input and Output Exergy Calculation

CASE1: Solar+Boiler	$\alpha \left\{ \frac{c\rho_w V_w (T_{b,out} - T_{b,in})}{\eta_b} \right\}$	1)
	$\left\{ c\rho_w V_w (T_{b,out} - T_o) - c\rho_w V_w T_o \ln \frac{T_{b,out}}{T_o} \right\} - \left\{ c\rho_w V_w (T_{b,in} - T_o) - c\rho_w V_w T_o \ln \frac{T_{b,in}}{T_o} \right\}$	2)
CASE2: Only Boiler	$\alpha \left\{ \frac{c\rho_w V_w (T_{L,out} - T_{L,out})}{\eta_b} \right\}$	3)
	$\left\{ c\rho_w V_w (T_{L,in} - T_o) - c\rho_w V_w T_o \ln \frac{T_{L,in}}{T_o} \right\} - \left\{ c\rho_w V_w (T_{L,out} - T_o) - c\rho_w V_w T_o \ln \frac{T_{L,out}}{T_o} \right\}$	4)

c:水の定圧比熱 [J/kg・K], ρ_w:水の密度 [kg/m³], V_w:流量 [m³/s], T_o:外気の絶対温度 [K], T_{b,in}・T_{b,out}:ボイラー入口と出口の絶対温度 [K], T_{L,in}・T_{L,out}:熱交換機入口と出口の絶対温度 [K], η_b:ボイラーの熱効率[-], α:重油の有効比[-]

4.2 結果と考察

Fig.11 に冬季 12 月から 3 月の投入エクセルギーを示す。太陽熱利用システムにおける投入エクセルギーは 2.8～4.8MWh/月、平均 3.7MWh/月であった。また、太陽熱利用システムから投入されたエクセルギーのうち、重油によって生産した温エクセルギーと太陽熱によって生産した温エクセルギーはそれぞれ約 54%と約 46%であった。このことから、太陽熱利用システムは冬季 4 か月において需要側の温エクセルギー負荷のうち、約 4 割の温エクセルギーを太陽熱から得ていることがわかる。ここで、Fig.9 の供給熱量では 12 月が、エクセルギー評価では 2 月が最も多いのは、12 月に比べて外気温が低い 2 月では、外気に対する温水のエクセルギーが相対的に高くなるためである。

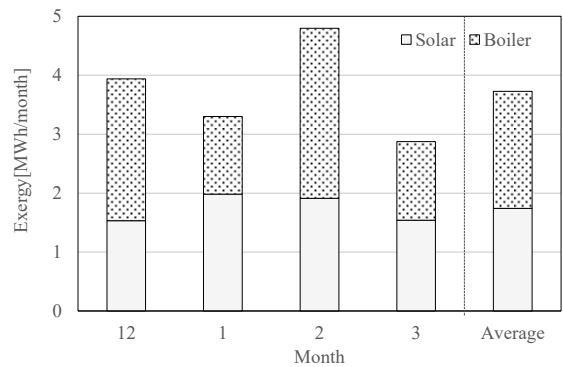


Fig.11 Supply Exergy in winter

Fig.12 にボイラーシステムにおける重油資源投入から温エクセルギー生産まで (Supply side:供給側) と、生産された温エクセルギーが「給湯・プール加熱・暖房」で消費されるまで (Consumption side:消費側) のエクセルギー消費プロセスを示す。集熱とボイラーを利用している太陽熱利用システムの場合 (CASE1) とボイラーのみの場合 (CASE2) について比較した。CASE1 の太陽熱利用システムの場合、必要な温エクセルギーを供給するためには約 111MWh の重油のエクセルギーがボイラーに投入され、ボイラーで約 103.3MWh が消費された後、7.7MWh の温エクセルギーが生産されることになる。また、CASE2 のボイラーのみの場合、必要な温エクセルギーを供給するためには約 195MWh の重油のエクセルギーがボイラーに投入され、ボイラーで約 183MWh が消費された後に、約 12MWh の温エネルギーが生産されることになる。このことから、CASE1 と CASE2 はともに、消費側で必要な温エクセルギーを得るためには約 9 割以上のエクセルギー消費されるため、有効に使われるエクセルギーが約 1 割程度であることがわかる。しかし、CASE1 は CASE2 に比べ、エクセルギーの投入から生産・消費までのプロセスのいずれにおいても約 4 割少ない。このことから、太陽熱利用システムを導入することにより、すべてのエクセルギー消費プロセスにおいてボイラーのみと比べて 6 割程度のエクセルギーで賄えることがわかる。従って、太陽熱利用システムは低質エネルギー源

の太陽熱を多く活用することにより、地球環境負荷低減に極めて効果的であることが示唆される。

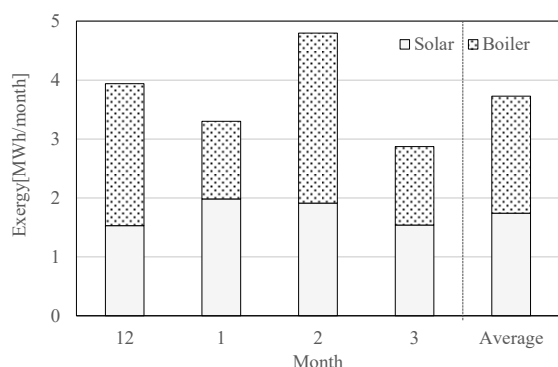


Fig.12 Exergy consumption process in winter

5. まとめ

避難所体育館に30年以上使用し続けている太陽熱利用システムの性能と運用状況および問題点について実測と聞き取り調査を行い、以下の知見を得た。

- 1) 太陽熱集熱システムは5年に1回のメンテナンスが行われ、配管の継手やパッキン交換はしているが、真空ガラス管は取り換えせず、撤去し、現在は設置時の約8割で集熱していた。その他に重大な故障はなく、現在までボイラーの1回交換があったものの大規模なシステム改修は行われていない。ところが、集熱やボイラーの制御関連資料が残っていないため、詳細な運転条件などは不明で、運転時間以外の制御変更はしていなかった。
- 2) 集熱運転時間は日積算と日射時間に比例しているものの、計画時の1日9時間運転は行われておらず、日射時間の1/3程度しか運転できていなかった。
- 3) 年間集熱効率は約47%で、夏季、中間期、冬季の順に高かった。一般的な太陽熱利用システムの集熱効率と比較しても30年以上使用されている太陽熱利用システムの集熱性能は衰えていないことが確認できた。
- 4) 太陽熱利用システムの集熱温度は、冬季の給湯・暖房の使用温度としてはやや低いものの、夏季の給湯・除湿冷房用としては十分であり、特に夏季は60℃以上の集熱温度も得られることから冷凍機の熱源としても使えることが推測できた。
- 5) 太陽熱利用率は夏季3.5%、中間期76.4%、冬季100%で年間80%であった。年間利用熱量はと暖房約12%、給湯約18%、プール加熱約70%の順に多く、年間の太陽熱依存率は約41%であり、中間期34%、冬季37%、夏季46%の順に高かった。30年以上使用されている太陽熱利用システムは未だに太陽熱利用率が高く、太陽熱依存率は半分程度であることがわかった。
- 6) 太陽熱利用システムを導入することにより、すべてのエクセルギー消費プロセスにおいてボイラーのみと比べて6割程度のエクセルギーで賄えることから、太陽熱

利用システムは低質エネルギー源の太陽熱を多く活用することにより、地球環境負荷低減に極めて効果的であることが示唆された。

- 7) 避難所として使用される際に、プール加熱用熱量は給湯や暖房に流用可能と思われるため、今後どれほど対応できるか、最適な太陽熱利用システムについて検討が必要であり、太陽熱が利用できる冷房システムの導入についても検討が必要である。

参考文献

- 1) 環境省：再生可能エネルギー情報提供システム (REPOS) (<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/>) (参照日：2022-10-13)
- 2) 「令和2年度(2020年度)エネルギー需給実績」：経済産業省、資源エネルギー庁 (https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html) (参照：2022. 10. 13)
- 3) 一般社団法人ソーラーシステム振興協会：「太陽エネルギーの利用方法」(<http://www.ssda.or.jp/energy/use/>) (参照：2022. 10. 13)
- 4) 文部科学省：平成23年(2011年)度東日本大震災における学校等の対応等に関する調査研究報告書、平成24年(2012年)。
- 5) Takuya Nawata, Miki Muraki: Study on how to secure the functions of evacuation centers in school facilities and how to construct energy systems considering environmental and economic conditions in normal times, Reports of the City Planning Institute of Japan, No.17(2), 243-246 (2018)
- 6) Takashi Akimoto, Reiji Suda: Investigation and Proposal on establishment of environmental value of solar thermal utilization in order to promote expansion, J. Environ. Eng., AIJ, **82**(731), 77-86(2017)
- 7) Mika Yoshinaga, Masaya Okumiya: An effective use of system simulation for designing solar system – Development of a transient flat plate collector model for TRNSYS, J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ, 532, 37-43(2000)
- 8) R. Yokoyama, T. Shimizu, K. Takemura, K. ITO : Performance analysis of a hot water supply system with a CO2 heat pump by Numerical simulation (1st Report, Modeling and Analysis of heat pump), Transactions of the JSM (in Japanese) B, **71**(707), 153-160(2005)
- 9) F. Yamaguchi, R. Yoshie, Y. Momoi, A. Satake, H. Yoshino, A. Mochida: Performance evaluation and validation of numerical simulation FOR A Floor Heating system that utilizes solar heat energy (Research of a floor heating and desiccant cooling system that utilizes solar heat energy Part1), J. Environ. Eng., AIJ, **77**(674), 283-292(2012)
- 10) Mika Yoshinaga, Kosaku Shirode, Yasuo Kuwasawa: Evaluations of thermosyphon solar thermal water heaters (Long term field test of three open circuit solar water heaters part1), J. Environ. Eng., AIJ, **88**(771), 341-350(2020)
- 11) 業務用太陽熱利用システムの導入検討ガイドライン「第2章 業務用太陽熱利用システムの基本事項」：資源エネルギー庁 (https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/attaka_eco/reference/pdf/sekkei/sekkei_2.pdf) (参照：2022. 11. 20)
- 12) Masanori Shukuya, Abdelaziz Hammache: Introduction to the Concept of Exergy – for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems, VTT Building and Transport, VTT Research Notes 2158, April 25, 2002