

液体集熱での太陽集熱の利用

Solar heat utilization in solar thermal collectors using liquid

太陽熱部会 原 人志*

1. 太陽熱利用機器の概要

太陽からの照射エネルギーを熱に変換し、その熱を利用する装置は、一般に「太陽熱利用機器」と呼ばれる。得られた熱の利用用途は温度によって分類され、特に 100℃ 以下の低温域では主として給湯用途に用いられる。本報告では、この種の太陽熱利用について詳述する。さらに、熱の輸送媒体として液体を用いる太陽熱利用機器に焦点を当て、特に家庭用システムについて解説する。家庭用太陽熱利用機器は、大きく太陽熱温水器とソーラーシステムの二種類に分類されるが、本報告ではソーラーシステムを中心に、その構造や性能を説明する。あわせて、国内における販売台数の推移とその要因、CO₂ 削減

効果に関する他の省エネ機器との比較、さらに戸建住宅の屋根利用における太陽光発電（PV）との棲み分け方法の提案についても論じる。

太陽熱利用機器（ソーラーシステム）の構成要素

家庭での太陽熱によって得られた温水は主に給湯に利用され、そのために必要な装置は、以下の 3 つの構成要素に分類される。

- 1) 集熱部（集熱器）：太陽エネルギーを吸収し、熱エネルギーに変換する部分。一般の家屋では屋根に設置されることが多い。
- 2) 蓄熱部（蓄熱タンク）：集熱器で変換された熱エネルギーを蓄える部分。タンク内の水は、集熱器から熱輸送によって昇温される。
- 3) 補助熱源：太陽光による蓄熱が不十分な場合に補助的に熱を供給する装置。タンク内の湯温が設定した出湯温度に満たない際、不足分を瞬間的に加熱して給湯する。

上記の構成要素に加え、熱媒体を輸送するための配管（断熱材で保温されている）や、熱媒体を循環させるための循環ポンプも必要となる。熱媒体には、冬季の凍結を防ぐ目的で不凍液が用いられる。

太陽熱利用機器（ソーラーシステム）の全体構成

ソーラーシステムの概略を図 1(a) に、実際の設置例を図 1(b) に示す。集熱器で日射により加熱された熱媒体は、循環ポンプの駆動によって循環し、蓄熱タンク内下部に配置された熱交換器を介して、タンク内の水に熱を移動させる。これにより、加熱時には加温された水が自然対流により上昇・攪拌することで、タンク内全体の温度がほぼ均一に上昇する。

実際の集熱運転では、集熱器およびタンク内の複数箇所に設置されたサーミスターで温度を検知し、効率的に太陽熱を蓄える制御が行われている。これ

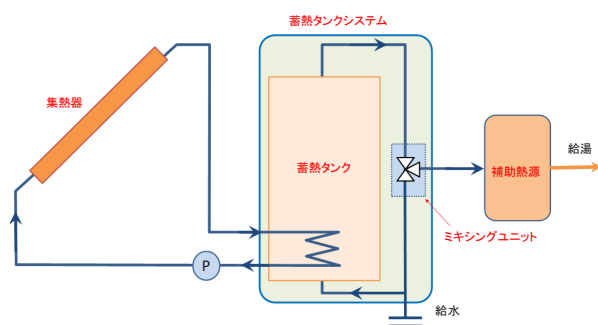


図 1(a) ソーラーシステムの概略図



図 1(b) ソーラーシステムの写真

*一般社団法人ソーラーシステム振興協会

らの制御基板や循環ポンプは、いわゆる「タンクシステム」と呼ばれる筐体内部に収められており、さらに給湯温度を調整するためのミキシングユニットも内蔵されている。

ミキシングユニットは、湯と水を混合して指定温度の湯を供給する重要な役割を担う。例えば、タンク温度が要求給湯温度より高い場合には、水と混合して設定温度にし、給湯器で加熱を行わないでお湯を供給する。一方、タンク温度が要求温度に満たない場合には、蓄熱湯をそのまま補助熱源へ送り、温度の不足分を瞬間的に加熱して設定温度で給湯する。このような運転制御は、太陽熱の有効利用において極めて重要である。

曇天や降雨時にはタンク内の蓄熱温度が十分に上昇しないことがあるが、日射量はゼロではなく、集熱後の温度は給水温度より高くなる場合が多い。補助熱源が瞬間加熱できることで、そのわずかな温度差も有効に利用できるため、太陽熱利用機器との組み合わせには瞬間式給湯器が最も適している。なお、ヒートポンプ式給湯器は瞬間加熱能力に乏しく、この用途には不向きである。

2. 集熱器の種類と性能

集熱器の種類

家庭用に使われる集熱器は、主に「平板型」と「真空ガラス管型」の2種類に分類される(図2)。

一般的に、平板型は図に示すように、集熱板が熱媒体の流路を形成するよう2枚のプレス加工した鉄板を貼り合わせた簡素な構造を持つ。コストが安価であることから、国内で最も広く利用されている。

一方、真空ガラス管型は、熱媒体流路配管とガラ

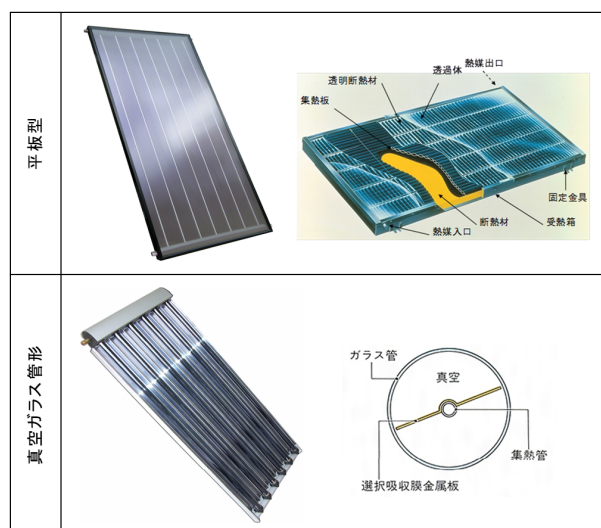


図2 集熱器

ス管の間を真空にすることで、配管からの放熱を防ぐ構造を有する。より高温が必要な場合に用いられ、給湯以外では、例えば吸収式冷凍機の熱源として利用される。

集熱器の性能

集熱器の性能は、日射エネルギーに対する熱への変換効率で評価される(図3)。縦軸は集熱効率(受光した太陽光エネルギーのうち、熱エネルギーに変換された割合)を、横軸は集熱効率変数(集熱器と周囲との温度差を日射エネルギーで除した値)を表している。

集熱効率および集熱効率変数の定義式を以下に示す。

$$\text{集熱効率} = Q / (A \cdot I)$$

$$\text{集熱効率変数} = \Delta \theta / I \quad (m^2 \cdot K/W)$$

ここで、

Q : 集熱媒体による集熱量 (W)

A : 集熱器の面積 (m^2)

I : 単位面積当たりの日射エネルギー (W/m^2)

$\Delta \theta$: 集熱器熱媒体の入口出口の平均温度と周囲温度との差 (K)

集熱効率変数の増加は、その定義式から周囲への熱損失の増加を意味する。このため、一般的にどの集熱器でも、集熱効率変数が大きくなるにつれて集熱効率が低下する傾向を示す。日射量と周囲温度の関係から、集熱効率変数の小さい領域は夏季に相当し、大きい領域は冬季、中間の領域は春秋などの中間期に対応すると考えられる。

横軸全域にわたって高い効率を維持できる集熱器は「優れた集熱器」といえるが、集熱器の種類によって効率曲線の傾きや効率値が異なる。具体的には、②の真空管型は熱損失が少ないため効率曲線の傾きが小さく、変数大きい領域では①の平板型(黒色

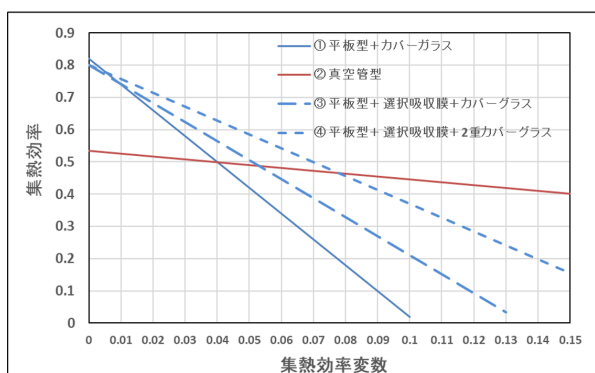


図3 集熱器効率線図¹⁾

塗装+カバーガラス付き)よりも高い効率を示す。一方で、変数が小さい領域では平板型の方が効率が高い。

以上より、季節ごとの利用温度やコストパフォーマンスなどを総合的に考慮して、適切な集熱器を選択する必要がある。

①の平板型集熱器の効率曲線の傾きを小さくし、すなわち熱損失を抑制する方法として、現在は主に2つの手法が採用されている。1つはカバーガラスを二重にする方法、もう1つは集熱面に選択吸収膜を施す方法である。

前者の二重カバーガラスは、海外の集熱器には採用例が見られるものの、重量が増加するため、日本国内の家庭用集熱器ではほとんど採用されていない。後者の選択吸収膜は、重量増加などの副作用がないことから、多くの機器で広く利用されている。熱損失の形態から判断すると、真空管方式は主に対流熱伝達による熱損失を抑制し、選択吸収膜は輻射による熱損失を抑制する効果を持つ。

図には、③平板型+選択吸収膜+カバーガラス、④平板型+選択吸収膜+二重カバーガラスの性能も示しており、それぞれの効果・傾向が理解できる。
選択吸収膜

集熱性能を向上させるためには、太陽光エネルギーを効率よく吸収し、加熱された熱媒体からの放熱を最小限に抑えることが重要である。その手法の一つとして、選択吸収膜が開発され、機器に広く利用されている(図3、③)。

この膜は、図4に示すように、太陽光の波長域(E線)では光を効率的に吸収し、一方で熱媒体温度100℃および40℃における放射(C線:100℃の黒体放射、D線:40℃の黒体放射)を抑制する特性を持つ。破線は理想的な反射・吸収特性の曲線を示し

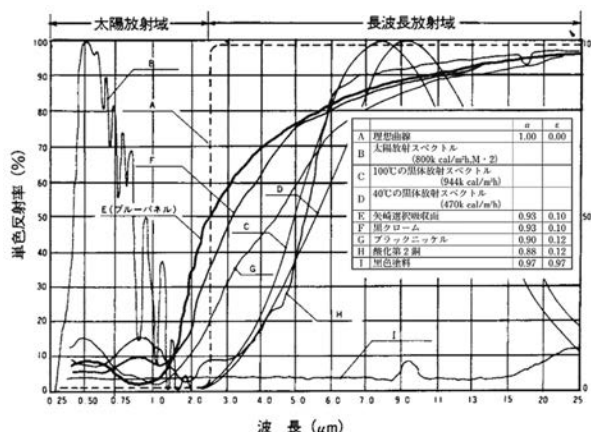


図4 選択吸収膜の波長特性²⁾

ており、このカーブに可能な限り近づけることが、膜製造メーカーの技術開発目標となっている。

効率における日射の影響

日射量に対する平板型集熱器の集熱効率を図5に示す。雨天時の日射量は約1 kWh/m²(≒3.6 MJ/m²)程度であるが、曇り程度の条件下でも効率は晴天時とほとんど変わらない値を維持している。日射量が減少しても効率の低下が小さいことは、太陽熱利用機器の重要な利点の一つである。

3. 太陽熱利用機器の性能に影響する要因

太陽熱利用機器の性能に影響を与える要因としては、集熱器の効率と面積(集熱量)、各構成要素の熱損失、お湯の利用時間スケジュール(給湯のタイミング)などが挙げられる。以下に、それぞれについて説明する。

集熱器の面積と効率(集熱量)

集熱量は、給湯で使用可能な全熱量を規定する値であり、太陽熱利用機器の性能を決定する最も重要なパラメータの一つである。集熱量は集熱器の面積と効率によって決まるため、これらの二つのパラメータが特に重要となる。前節「2. 集熱器の種類と性能」で述べたように、集熱効率を高めることは集熱面積の削減につながるため、効率は特に重要な指標にある。

熱損失

熱利用機器全般に共通することであるが、熱損失を最小限に抑えることが、機器の性能を維持する上で重要となる。太陽熱利用機器の場合も同様で、まず集熱器、集熱配管、蓄熱タンク、給湯配管の各構成要素において熱損失が発生する。

図6には、あるソーラーシステムを給湯M1スタンダードモードで実験した際の、各構成要素におけ

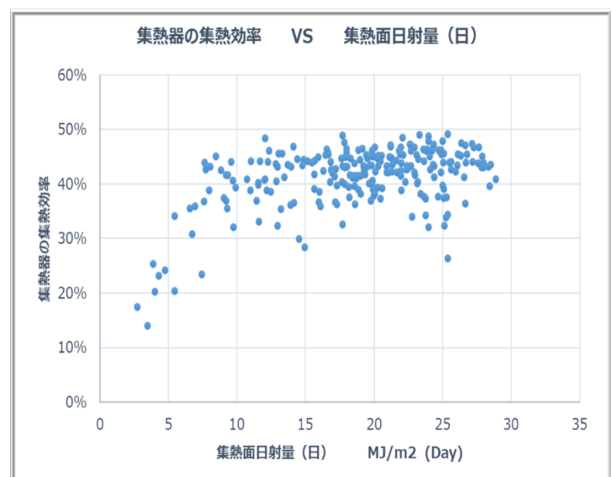


図5 日射量と集熱器の効率の関係

る1日あたりの授受した熱量を示す。

このグラフをもとに各構成要素の受熱量に対する熱損失を試算した結果を表1に示す。

最も大きな熱損失は集熱器で発生しており、これは最初にエネルギーが流入する部分の温度が最も高くなるため、周囲への熱損失が最大となることに起因する。

また、国内の平板型集熱器の多くはカバーガラスを有しており、そのガラスの入射角特性によって吸収エネルギーが影響を受ける。

カバーガラスに入射する日射光を透過率（ τ ）、反射率（ ρ ）、吸収率（ α ）に分離すると、次式が成り立つ。

$$\tau(\theta) = 1 - \alpha(\theta) - \rho(\theta)$$

一般的な各割合を図7に示す。入射角度が $\theta = 60^\circ$ を超えると、反射率は急激に上昇する傾向がある。この場合、単位面積当たりの照射エネルギーも $\theta = 0^\circ$ の場合と比べて 1/2 以下に減少するため、戸建て住宅では特に朝夕の時間帯における集熱量がこの影響を受けやすい。

お湯の利用時間スケジュール（給湯のタイミング）

お湯を使用する時間帯も、太陽熱利用機器の性能に影響を与える要因の一つである。特に、集熱の時間帯と多く給湯が行われる時間帯（ピーク時）の間隔が大きくなるほど、蓄熱タンクにおける熱損失が増加する。

実際に、住宅の省エネ性能評価に用いられる

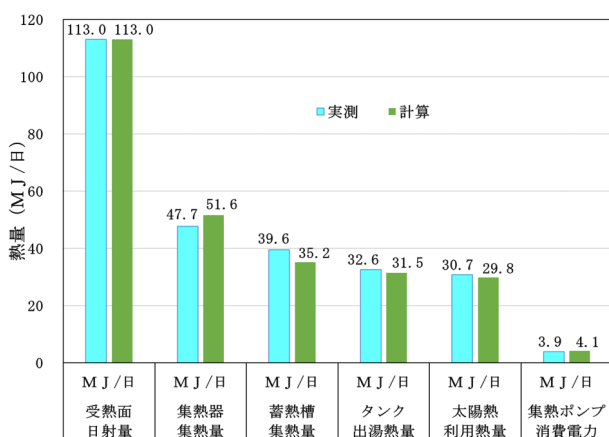


図6 年間での各要素での熱量³⁾

表1 各要素における熱損失

(MJ/日)	受熱面日射量	集熱器集熱量	蓄熱槽集熱量	タンク出湯熱量	太陽熱利用量
各熱量	113	47.7	39.6	32.6	30.7
熱損失		65.3	8.1	7	1.9
熱損失率		57.8%	17.0%	17.7%	5.8%

Web プログラム⁴⁾を用いて、集熱器を屋根の西側と東側に設置した場合の太陽熱利用量を比較したところ、西側に設置した場合の方が若干（約3%）多い結果となった。主に集熱・蓄熱する時刻と主にお湯を利用する時刻との時間間隔が小さい方（西側）が、蓄熱タンクからの放熱が抑制され、太陽エネルギーを有効に利用できることになる。

4. 太陽熱利用機器の耐久年数

当協会これまで集計してきた2003年から2023年までの太陽熱利用機器の出荷データ⁶⁾と5年ごとに総務省住宅土地建物調査⁷⁾が公表する市場設置台数のデータ（2023年が最新）をもとに、ワイブル分布により太陽熱利用機器の耐久年数を試算した。ワイブル分布の定義式を下記に示す。

確率密度関数：

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\}$$

残存確率関数：

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\}$$

ここで、 m ：形状パラメータ、 η ：尺度パラメータとする。

形状パラメータ $m (= 3.87)$ は、JGKA 調査報告書（2014年）⁸⁾に示される給湯器の平均値を使用し、尺度パラメータ η を統計データから最小二乗法により算出した。結果、 $\eta = 26.39$ となった。

以上のパラメータ値を用いて残存率を計算すると、図8に示すようになり、平均残存率が50.6%の場合、平均耐久年数は23.8年となる。

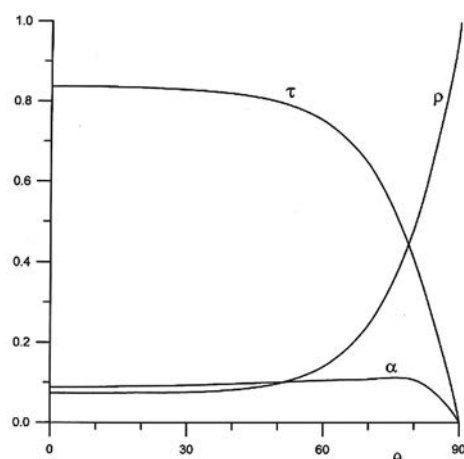


図7 カバーガラスの入射角度による透過率、反射率、吸収率⁵⁾

5. 太陽熱利用機器開発の動向

PVT とは、太陽光発電パネルの裏側に熱を吸収する装置を備え、発電と集熱の両方を同時に行うことができる機器である。国内では、2016 年ごろから数社により研究開発が行われた経緯があるが、市場での販売は実現していなかった。しかし、2024 年に某メーカーにより国内で製造・販売が開始された（図 9）。

当該メーカーの PVT にはアモルファスシリコン太陽電池が使用されており、電池の温度により変換効率が変化する。集熱により電池温度を下げることで、発電効率の向上が期待できる。ただし、PV 表面をガラスで覆うなどの設計は、発電性能と集熱性能の両方に影響するため、設置現場のニーズに応じて電気と熱の利用を総合的に検討する必要がある。

IEA の報告書「SOLAR HEAT WORLD WIDE Edition 2025」¹⁰⁾によると、2017 年以降、欧州における集熱器の設置面積は増加を続け、2024 年時点で 1,000,000 m² に達している（空気集熱式も含む）。

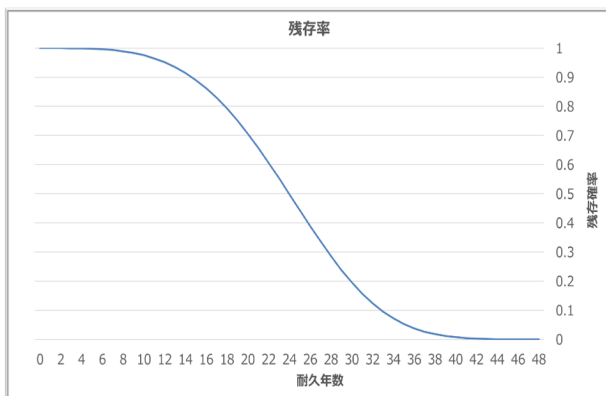


図 8 太陽熱利用機器の耐久残存確率

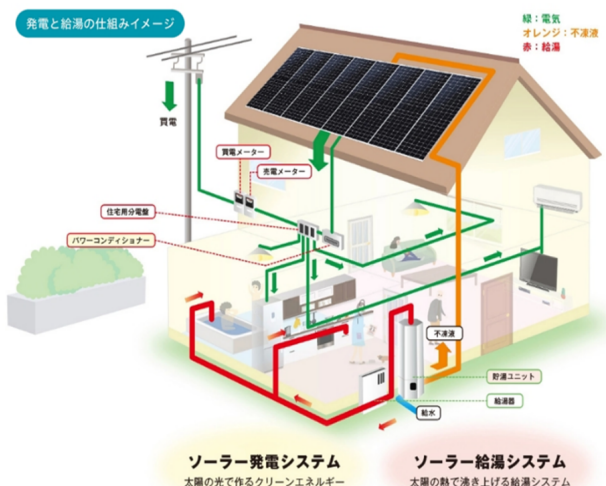


図 9 PVT
(太陽光+太陽熱ハイブリッドモジュール)⁹⁾

日本では、バスタブへの湯の投入を頻繁に行い、利用する湯温も比較的高い。一方、欧州、例えばドイツでは、バスタブに湯を張るのは月に 1, 2 回であり、給湯温度も比較的低い。このことから、日本における給湯熱量は欧州よりもかなり多いことが予想される。お湯の使用量や入浴文化の違いが、PVT がこれまで日本で普及しなかった理由の一つである可能性がある。

6. 他の省エネ機器との性能比較

建築物省エネ法により、2025 年 4 月から新築戸建住宅では一次エネルギー消費量を基準値以下に抑えることが義務化された。この義務に適合させるためには、建築前に建築研究所のホームページで公開されている通称「Web プログラム」⁴⁾を用いて、住宅の一次エネルギー消費量を計算することが必須である。

そこで、この Web プログラムを用いて、太陽熱利用機器の CO₂ 排出量を算定した。比較のため、他の省エネ機器（高効率給湯器として認められている）であるハイブリッド（HB）給湯器、エネファーム、エコキュートについても、同条件で計算を行った。（図 10）

計算における前提条件として、エコジョーズと太陽熱利用機器の組み合わせとし、通常の給湯器のモード効率を 80%、エコジョーズのモード効率を 93% とした。また、計算条件は 4 人家族、地域は東京（6 地域）、日射条件は A4 区分とした。

結果、以下のことが確認された。（図 10）

- 1) HB 給湯器、エネファーム、エコキュートと比較して、エコジョーズに 6 m² および 8 m² のソーラーシステムを組み合わせした場合、CO₂ 削減効果が高い。
- 2) エネファームと、エコジョーズ+ 4 m² のソーラーシステム、および 4 m² の太陽熱温水器の CO₂ 削減効果は同等である。

以上の結果により、CO₂ 削減効果に関して、経済

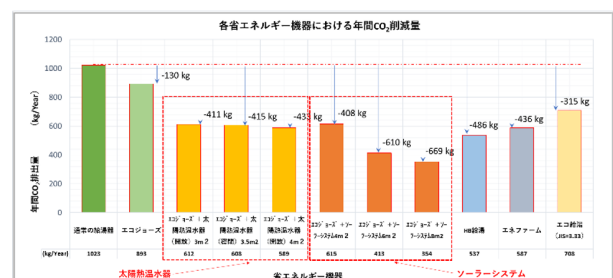


図 10 太陽熱利用と他の省エネ性機器の CO₂ 排出量

産業省が認定する高効率給湯器と比較しても、太陽熱利用機器はそれに劣らない性能を有することがわかる。

7. 日本における太陽熱利用の現状と将来

販売台数の推移とその要因

国内の太陽熱利用機器の販売台数の推移を図 11 に示す。1980 年の第 2 次オイルショックを契機に販売台数は急増したが、その後は様々な要因により減少傾向を示してきた。各時期における減少要因は以下の通りと推定される。

【経済性の要因】

1980～2000 年には原油やガス価格が安定し、燃料費削減の効果が減少したことから、太陽熱利用機器の経済的魅力が低下した。

【商品開発の要因】

1980 年代以降、給湯器の自動化（自動お湯だし機能など）が進展した一方で、太陽熱利用機器の最新給湯器への対応が遅れた。

【競合の要因】

2001 年以降、エコキュートの販売が開始された。さらに 2012 年以降は太陽光発電（PV）による FIT 制度の導入によりオール電化住宅が普及し、PV による屋根利用が主流となった。

1997 年には、ある企業の訪問販売に関する違反行為が報じられ、太陽熱利用機器のイメージ低下を招いた。ただし、この影響は一時的であり、継続的なものではなかった。

以上の結果、現在の家庭用太陽熱利用機器の販売台数はピーク時の約 2～3% に留まっている。2020 年に政府が 2050 年カーボンニュートラルを掲げて以降、2023 年には対前年比で若干の増加が見られたものの、2024 年度は前年を下回り、太陽熱温水

器の販売台数は、停滞した状況にある。

日本の給湯事情（ガス給湯器の将来予測）

太陽熱利用機器と最も相性の良い瞬間式ガス給湯器の将来市場について、以下に予測する。

【集合住宅について】

現在、日本全体のガス給湯器の半数以上は集合住宅に設置されており、これらの CO₂ 削減は将来的な重要課題の一つである。削減手段としてまず考えられるのはオール電化であるが、既存マンションでは構造上の制約（場所と重量）からエコキュートの設置が困難であり、オール電化の導入は難しい。次に、水素給湯器による置き換えが考えられるが、水素は都市ガスに比べ発熱量が約 1/3 であり、現行インフラを利用する場合には流量を約 3 倍、ポンプの元圧を 9 倍にする必要がある。また、水素はリークしやすく、かつ、メタンに比較して可燃範囲が広い、火災伝播速度が速い、などの安全上の問題から、現状のインフラでの供給は困難であると予想される。さらに、メタネーションで生成したメタンを利用するアプローチも研究が進んでいるが、現段階ではコスト面で極めて厳しい。

以上のことから、2050 年までに現行マンションの多くは瞬間式ガス給湯器を有する可能性が高く、集合住宅における都市ガスの使用は継続される可能性が高い。

【戸建住宅について】

都市部、特に東京都内では、狭小地に建設された住宅が多数を占め、敷地や構造の制約からタンク式給湯器（エコキュートなど）の設置が困難な場合が少なくない。このような住宅では、今後も小型・壁掛けの瞬間式ガス給湯器の利用が継続されると見込まれる。さらに、近年の新築住宅着工数の減少を踏まえると、広い敷地を必要とするエコキュート設置が可能な戸建住宅への建て替え件数は限られており、2050 年時点でも相当数のガス給湯器が残存すると予測される。

『エネルギー・経済統計要覧 2025』¹¹⁾ によれば、2023 年における家庭部門の年間エネルギー消費量は 1,853 PJ であり、その内訳は暖房用 25.2%、給湯用 26.8%、厨房用 9.5% である。家庭用給湯器のうちガスおよび石油を燃料とする機器が約 80% を占めることから、家庭部門全体の約 21%、すなわち 397 PJ が化石燃料による給湯に起因する消費となる。これは、家庭部門において給湯を通じて大量の CO₂ が継続的に排出されていることを示している。

以上を総合的に判断すると、集合住宅への対応に

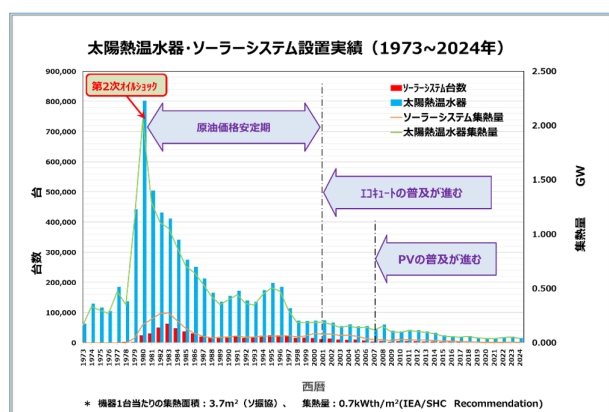


図 11 国内における太陽熱温水器・ソーラーシステムの実績

はさらなる工夫が必要であるが、瞬間式給湯器のCO₂排出抑制の有効な手段として、それに最も相性の良い太陽熱の利用が非常に有効になる。

屋根利用における PV との棲み分け

“屋根でお湯が作れる”という事実は、最近の若い世代にはほとんど知られていない。現在、屋根に設置されるパネルは一般的に太陽光発電（PV）が主流となっている。ただし、PV と太陽熱機器にはそれぞれ最適条件が存在する。変換効率の高い太陽熱機器は屋根面積が限られた住宅に適しており、一方、屋根が広い住宅には PV パネルの設置が有益である。このような適切な選択の重要性は、住宅利用者にとっても、CO₂削減の観点からも大きな利益をもたらす。

そこで、「設置可能な屋根面積（＝パネル面積）」を主要パラメータとして、Web プログラム³⁾を用いて、太陽光と太陽熱のいずれがより効果的かを試算・整理した。評価指標は以下の2点とした。

- 1) 年間のCO₂削減量 (kg-CO₂/年)
- 2) コストパフォーマンス（光熱費削減による初期投資回収年数）

結果を表2に示す。

表2の結果から、以下の2点が確認できる。

- 1) CO₂削減において、屋根面積が8 m²以下の場合には太陽熱利用機器の方が有効である。
- 2) CO₂削減と経済性の両立において、屋根面積が6 m²以下の場合には太陽熱利用機器がより有効である。

以上より、日本全国の戸建住宅において、屋根面積に応じた「適材適所の屋根利用（太陽光または太陽熱）」を推進することが、家庭部門の給湯由来CO₂排出を効率的かつ経済的に削減する方策となる。

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、家庭用瞬間式給湯器から排出されるCO₂をゼロにすることは困難であったとしても、各家庭の現実的制約を考慮しつつ、可能な限りCO₂排出を低減する実行可能な施策を順序立てて合理的に進めることが、今後の有効なアプローチであると考えられる。そのために、有効かつ適切な太陽熱利用が推進することを期待する。

参考文献

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「業務用太陽熱利用システムの設計ガイドライン」, 2009.12, p.21

表2 集熱パネル面積による仕分け

【エコジョーズとの組み合わせ】

集熱面積（パネル）におけるCO₂排出量

面積範囲	~3	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	
南向き		3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8~	

■ : CO₂の削減に関して、太陽熱利用機器が優位な範囲

■ : 初期投資年数がPVに比較して太陽熱利用機器の方が優位な範囲（都市ガス）

■ : 初期投資年数がPVに比較して太陽熱利用機器が同等な範囲（都市ガス）

- 2) 矢崎エネジーシステム株式会社, 「設計用資料 太陽熱利用システム 太陽集熱器」, 2024.1, p.9
- 3) 原人志, 佐藤誠, 前真之: 太陽熱給湯システムにおける省エネルギー性能評価方法に関する研究（その1）, 日本建築学会環境系論文集, 第89巻, 第824号, p.646, 図12
- 4) 住宅に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム: <https://house.lowenergy.jp/>
- 5) J. Gorden., SOLAR RNERGY the state of the art, ISES, 2001, p.38.
- 6) 一般社団法人ソーラーシステム振興協会 HP, 設置実績: <https://ssda.or.jp/result/>
- 7) 総務省統計局 HP, 令和5年住宅・土地統計調査調査の結果: <https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2023/tyousake.html>
- 8) 「報告書: ガス・石油機器の残存率等についてのアンケート（案）」, 一般社団法人日本ガス石油機器工業会, 平成26年11月
- 9) 株式会社長府製作所 HP: PVT（太陽光+太陽熱ハイブリッドモジュール）<https://www.chofu.co.jp/products/solar/pvt.php>
- 10) Solar Heating & Cooling Programme Intrenatinal Energy Agency, (IEA SHC), SOLAR HEAT WORLD WIDE Edition 2025
- 11) 日本エネルギー建材研究所計量分析ユニット編: EDMC/ エネルギー・経済統計要覧（2025年版）, 理工学図書株式会社, 2025

著者略歴



原人志（ハラ ヒトシ）

（所属）一般社団法人ソーラーシステム振興協会

Japan Solar Heat Association

（役職）専務理事

（学位）博士（工学）.

（略歴）2020年4月技術部長, 2021年6月より専務理事に就任.

（専門分野）燃焼工学