

第 6 回

旧工技院名古屋工業技術研究所の サンシャイン計画を含む太陽熱 energy R & D

Solar Thermal Energy R&D Including the Sunshine Project at the Former National Industrial Research Institute, Nagoya, predecessor of AIST Chubu Centre

種村 榮*

1. はじめに

旧工技院傘下の研究所である名古屋工業技術研究所 (NIRIN) (組織名称は当初名古屋工業技術試験所 (GIRIN), 現在は産業総合技術研究所中部センター (AIST, Chubu Centre), 本稿では, どうしても必要な時以外は NIRIN を使用) はサンシャイン計画 (SS 計画) スタート時から参画し, 太陽熱 energy に関する多くの R & D を実施してきた. SS 計画の民間委託研究を国研として支える主目的に関しては, 公式の評価委員会から『目的を果たした』と評価されている.

それと同時に NIRIN の研究 outputs は日本の JSES はじめ関連学協会, 及び関連産業界のみならず, 国際太陽 energy 学会 (ISES) を初めとする関連学術界, あるいは IEA (国際 energy 機関) の研究開発委員会 (R & D department) 傘下の太陽冷暖房給湯研究開発委員会 (R & D Committee for Solar Heating, Cooling and Domestic Heating Water System: SHCDhw system) 等を通して国際的に寄与し, 欧米, 及び中国等で活発に進められている現在の太陽熱 energy R & D の outcome になってきた.

本稿では本学会の本特集の趣旨に応えるべく, 1994 年 4 月から (旧) 工技院が産総研 (AIST) に組織換えする 2000 年 3 月に終了したサンシャイン計画を含む, 標題の研究活動 (一部は研究 theme の継続性から, SS 計画終了後 2022 年ぐらいまでの研究についても言及) とその背景を紹介し, 標題研究に NIRIN が果たしてきた, あるいは現在も果たしている役割を, 研究者の視点から簡潔に纏めてみたいと思う.

本稿は紙数の関係もあり, 多くの研究 theme の膨大な研究 outputs を私一人で逐一紹介すること,

及びそれに関する膨大な文献 list を全て提示することは不可能なので, in depth に語れないことを予めお断りしておきたい. また蓄熱技術は重要であるが, 専門外なので含めなかった.

尚, それに代わる資料として以下を, 冒頭で恐縮であるが御紹介させて頂く. 工技院及び産総研の強固な OB 組織『産工会』の運営する web 上に, 旧工技院傘下の研究者達が行って来た幅広い分野の R & D における『秘話』を掲載する site がある. 私ばかりで無く一緒に研究を進めた研究者達 3 名 (それぞれ入所の時期が異なるので, SS 計画関与の研究 theme は異なる. 田澤真人博士, 山田豊章博士, 吉村和記博士) による, 私とは異なった分野の R & D とその outputs 詳細と, outcome も語った『SS 計画での太陽熱利用 system の R & D (名工研)』(160 ページ以上) が, 間もなく (2025 年 8 月) 上梓される運びとなっている¹⁾ ので, そちらも是非御参照頂くことを御願いたい. また, 右下欄に紹介した現在の私の affiliation 中に記載した Google Scholar site を検索すれば, 経歴と論文・著書業績の殆ど (一部は欠落) は明らかになる. 本文や参考文献に記名した NIRIN 関係の各研究者についても, 同様な業績 site を御検索頂けば必要情報は得られる.

2. NIRIN の太陽炉研究と SS 計画参画経緯

私は, SS 計画の NIRIN での実施が決まった 1993 年当時は, 名古屋大学工学研究科結晶材料研究室 + 豊田理化学研究所に PD として籍を置いていた.

* (一財) ファインセラミックスセンター (JFCC) 顧問 + 客員研究員, 日本応用物理学会フェロー + 功労会員, 日本太陽エネルギー学会功労会員, 中国広西大学物理科学院国際招聘教授, 中国科学院国際シニア科学者, IEA SHCP 貢献賞受賞者, 2013 年秋期瑞宝中綬章拝受者, Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?hl=ja&user=155uulUAAAAA>, h-index: 45.)

NIRIN では SS 計画実施のために材料物性の研究要員が要るということで、故野口哲男博士の研究室に採用され、1974 年の SS 計画初年度から NIRIN での研究活動を開始した。従って、NIRIN (= GIRIN) の創設 (1953 年、もともと戦前からの国立陶磁器試験場が母体) 時の event には詳しくないが、SS 計画への参画と大きく関わるので以下に知っている fact を山田博士にもご協力頂いて、以下に披露しておく。

NIRIN の前身名古屋工業技術試験所 (名工試 = GIRIN) では、創設直後から高温太陽炉の設計・建設 (一号炉と二号炉) と、二号炉で得られた高温を用いての高融点セラミックス (特に、単元、二元、三元系のランタニドを主として) の研究をセラミックス基礎部所属の故野口哲男博士 (課長) (1986 - 1987 年: 日本太陽エネルギー学会会長) が主導して行ってきた。

野口博士からの伝聞では、『最初期の一号太陽は、故久田太郎初代所長 (後に科学技術庁初代事務次官) が積極的に進められ、戦後 13 年経過していたが、未だ日本全体が復興途上にある 1958 年に、表面を手で削り出し、かつ磨き上げた口径 3m の Al 製放物面鏡を直接太陽に対面させ (直達式太陽炉と呼ぶ)、その焦点の太陽像温度 1,500 [°C] 程度を得た』であった (久田氏の後を継いだ野口研究室にはサングラスを着用した久田所長が太陽炉の焦点を観察していた写真が残されていた)²⁾。GIRIN が 1978 年発行した「名古屋工業技術試験所 25 年史」³⁾、あるいは、産総研となった 2003 年発行の「名古屋工業技術研究所 50 年史」⁴⁾ に、もう少し詳しい技術 data が掲載されているかも知れない (私は手許にそれらが無いので、申し訳ないが、ここに文献のみ挙げさせていただきます)。

二号炉は一号炉に引き続いて 1959 年に建設され、3[m] 四角のヘリオスタット (銀裏面平面鏡) と、口径 1.5m の銀裏面放物面鏡 (旧日本海軍の探照灯

に用いられ、当時五島光学 (株) が所有のものを利用) を備えた光軸水平ヘリオスタット式であった。ヘリオスタットは太陽の位置を追尾し、それと対向するように設置された放物面鏡の鏡軸に平行な太陽光を入射させる。太陽像の大きさは約 6 [mm]、その最高放射密度は約 500 [cal/cm²/sec]、及び最高到達温度は 3,000 ± 2 [K] であった。この二号炉はヘリオスタット式のために、放物面鏡焦点とヘリオスタットとの間に自由空間が取れるので、測定装置や実験装置をそれぞれの最適な位置に設置できる。そのため、野口研究室では先述した高融点セラミックスの蒸発率、融点、相図、結晶成長、高温合成等々の貴重な超高温物性の研究成果を発表できた。その一例として、Table 1 に各種酸化物の融点における蒸発率の data、Fig 1 に二号炉の放物面鏡と焦点周りに設置された 262 [μm] の分光波長による赤外放射温度計装置の写真を、文献⁵⁾から示す。尚、1965 年迄の外国を含む太陽炉の形式、構造や使用状況 (その計測・実験装置を含め) の解説は野口博士の文献群⁶⁾を参照されたい。

また、こうした太陽炉の研究とは別に、当時の GIRIN の機械部所属 group が中心となって、極めて簡単な構造の集熱 panel (風防ガラスの無い黒色塗料を施した galvanized metal panel を用いた) を実験棟の屋上に設置して、そこからの温水を地下の貯湯槽に溜めて、部屋の暖房に利用する、太陽熱暖房の先駆的研究を行っている。私が入所したときには、勿論 system は既に解体され、集熱 panel の残骸が雨ざらしになっているのと、コンクリートの貯湯槽が棄てられていたのを目撃できた。今回の執筆に当たって、この先駆的研究の技術資料を探すことは残念ながら出来なかった。さらに、この太陽熱暖房設備建設にあたって、この研究の日本での pionier で、

Table 1 各種の金属酸化物の融点とそこにおける蒸発率

	重 量 減		融 点 °C
	[g/cm ² min]	[mol/cm ² min]	
ZrO ₂	5.3 × 10 ⁻⁴	4.3 × 10 ⁻⁶	2734
SrO	1.7 × 10 ⁻²	1.6 × 10 ⁻⁶	2626
Al ₂ O ₃	1.8 × 10 ⁻⁴	1.8 × 10 ⁻⁶	2054
Y ₂ O ₃	4.2 × 10 ⁻⁴	1.9 × 10 ⁻⁶	2446
MgO	9.0 × 10 ⁻³	2.2 × 10 ⁻⁴	(2800)
SrZrO ₃	3.4 × 10 ⁻³	1.5 × 10 ⁻⁵	2674
MgO/ZrO	2.3 × 10 ⁻³	1.4 × 10 ⁻⁵	2137

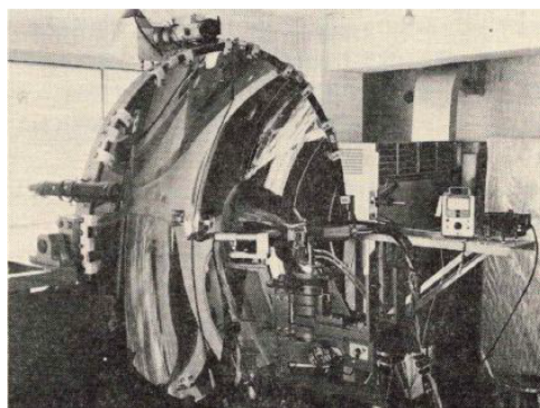


Fig. 1 NIRIN (GIRIN) 二号ヘリオスタット式太陽炉の室内側に設置された、集光のための焦点距離 90cm の放物面型裏面鏡と計測機器。

かつ泰斗であられた JSES 元会長の木村健一早稲田大学名誉教授のご指導を賜ったのかは確認が取れていない。私が、微かに覚えていることは、対象実験棟の主であった野口博士が『湿度が高くて、大変だった（快適性は必ずしも良くない）』と語ったことのみである。

上述したように、NIRIN は太陽熱エネルギー利用研究においては、既に 1960 年代から十分な知見・実績を持つ国立研究所であった。かかる経緯から、SS 計画の該当部分を担当することになった。

3. NIRIN における太陽熱利用 system の研究

3-1 研究 mile stone チャート

文献^{7-i, ii)}に記録されているように、SS 計画の『太陽 energy 技術の R & D』での main の中項目は、『太陽冷暖房給湯システムの R & D（以後 SCHDhw と略）』と『太陽 energy 発電 system の R & D』であった。後者は、さらに「太陽熱発電 system の R & D」, 「太陽光発電 (PV) system の R & D」及び太陽熱電子発電や宇宙発電などを対象とする「その他の発電 system の R & D」の 3 つの sub theme に分けられた。『SCHDhw』が主要 R & D に取り上げられた理由は、これらの熱需要が大きいからである。

また、将来を見据えて『太陽炉等の実用化を促進するために必要な基礎技術と太陽 energy の新しい利用方式の基礎的研究』を目標として、半ば付け足しのように『太陽 energy 新利用システムの R & D（以下 NSE と略）』も当初プロジェクトに中項目として取り上げられた。

主流の中項目の内「太陽 energy 発電 system の R & D」は当時の工技院電子総合技術研究所が、一方 SCHDhw は NIRIN が国研として責任を果たすこととなった。しかし、SS 計画発足直後に両所での

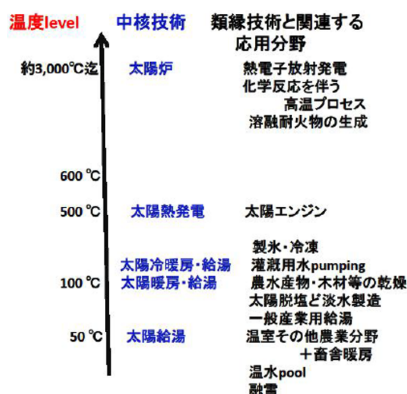


Fig. 2 太陽熱利用技術の分類とその適用温度 level. 中核技術はグレーで示した。

細部の研究内容の重複を避ける目的で、名工研に電総研から関係者に来ていただいて、半日程度の調整会議を持った。その結果、NIRIN の研究対象は Fig. 2 の温度 scale でいえば、常温から 250 °C 程度(太陽冷暖房給湯 system に利用する真空管式平板集熱器の集熱板到達温度程度)、及び太陽炉利用研究の超高温 level とすることで落ち着いた(議事録は消失しており、会議に参加した私の記憶による)。

SS 計画最初期では、中項目 SCHDhw R & D の中で民間の委託研究で行われた「ソーラーハウス R & D/4 プロジェクト(新築個人住宅, 既存個人住宅, 集合住宅, 大型ビル)」, 及び「集熱器材料 R & D /3 プロジェクト(金属系材料, 合成樹脂系材料, ガラス系材料)」(前出文献^{7-i, ii)}参照)を back up するために、NIRIN では「材料の研究: 集熱材料及び蓄熱材料の研究」と「評価 system の研究: 集熱器試験評価法の研究」の 2 サブテーマ、及び研究所の太陽熱利用研究の“一丁目一番地”である NSE の中のサブテーマ『太陽炉の高温利用研究』を実施した。また、国際的にも SCHDhw 技術は欧米太平洋州各国政府にとっても関心の高い代替 energy 技術で、早速『国際共同研究』が start し、関連分野に NIRIN も参加した。

NIRIN が実施した太陽熱利用 system に関わる時系列 (time line) 研究 mile stone チャートを Fig. 3 に示す。繰り返すと、中項目の略号 SHCDhw は『太陽冷暖房給湯システム R & D』, 及び NSE は『太陽 energy 新利用システムの R & D』を意味する。また、それぞれのサブテーマ arrow の下中に主な研究 theme を挙げた。それらの具体的内容は直ぐ後に与える。尚、図中のサブテーマ『国際共同研究』については別項に詳述する。

当初の研究内容は以下であった：

集熱材料とその特性評価分析：

①光選択吸収性 (SSA) 発現の物理原理探究と高性能化

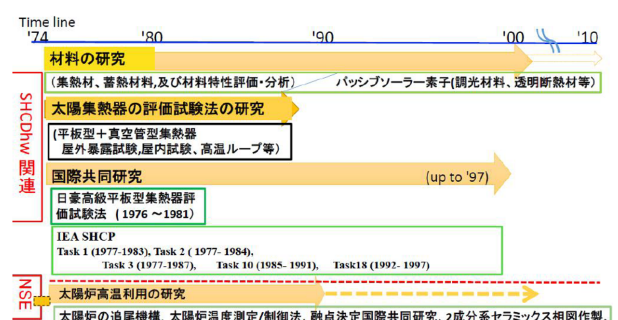


Fig. 3 NIRIN の太陽熱利用研究の mile stone chart.

- ② SSA 特性精密分光測定法
- 蓄熱材料とその特性評価分析：
 - ③ 低中温顕熱・潜熱蓄熱材料の熱物性と高性能 system 化
 - ④ 潜熱蓄熱 system の評価法
- 太陽集熱器の評価試験法：
 - ⑤ SS 計画で開発された平板型集熱器の集熱特性評価と rating
 - ⑥ SS 計画で開発された真空管型集熱器の集熱特性評価
 - ⑦ 集熱特性屋外暴露試験法とその測定精度向上
 - ⑧ 集熱特性屋内太陽シミュレータ試験法
 - ⑨ 集熱器熱損失係数の屋内屋外夜間測定法
- 太陽炉高温利用：
 - ⑩ 光軸垂直型ヘリオスタット・放物面鏡三号炉*の概念設計と建設
 - ⑪ 同上三号炉のヘリオスタット追尾機構の開発
 - ⑫ 同上太陽炉の温度計測 system の構築とその制御
 - ⑬ 2 成分高融点 La 族酸化物の相図決定
 - ⑭ 高融点酸化物の融点決定に関する IUPAC 国際共同研究
 - ⑮ 日仏太陽炉利用における共同研究

* 三号炉の energy 束密度，集光率，到達温度，放物面鏡仕様等の諸元は二号炉と同じ程度。

3-2 研究テーマの変遷

上記民間委託研究の進捗と目的達成がほぼ図られた 1981 年頃に(極一部は 1983 年頃まで継続したが)，我々の backup すべき次の民間委託の研究開発は，「産業用ソーラシステム R & D / 2 プロジェクト(カスケーディング・プロセスヒート方式，フィックスド・プロセスヒート方式)」及び，「長期蓄熱の R & D / 3 プロジェクト(土中蓄熱方式，化学反応方式，温度差方式)」に移った。それに応じて，NIRIN の sub theme「材料の研究」と「評価 system の研究」の名称はそのまま，主たる研究内容は，中温度用光選択吸収膜の高性能化と耐久性向上，デシカント蓄熱 system，及び材料の劣化メカニズムと加速劣化試験法，等にそれぞれ変わった。この時，研究体制の大きな変化として，1980 年の SS 計画推進機関として NEDO の設立により，大部分の研究予算が工技院の一般会計予算から NEDO の特別会計予算に行政上移行した。

次の変更は，1978 年から始まった省エネエネルギ

技術開発“ムーンライト計画”を 1990 年に統合して“ニュー SS 計画”と名称が変わったことである。しかし本稿ではそれも含めて“SS 計画”で一貫する。

それに合わせて，Fig. 3 に示す様に NIRIN の研究は省エネの側面も有するサブテーマ「材料の研究：パッシブソーラ素子」に一本化された。これに関しては，back up すべき民間の R & D テーマも含めて，別項で詳述する。

尚，『太陽炉の高温利用研究』は 1989 年の終了後もセラミックス研究の中で，NIRIN の志段味サイエンスパークへの移転に伴い，太陽炉の移転が困難と判断された 2000 年迄山田博士が継続した(前出文献¹⁾)。前節 3-1 に記載された『太陽炉高温利用』テーマの『⑪同上三号炉のヘリオスタット追尾機構の開発』の成果は，香川県仁尾町に設置された，Tower 式太陽熱発電 system に使われたヘリスタット鏡の追尾機構の委託先 maker によって実際に適用された(前出文献¹⁾)。

4. 国際共同研究

「SHCDhw に関わる国際共同研究」は 2 本の小項目からなる。一つは，先にも触れた IEA の研究開発委員会所管の『太陽冷暖房プログラム (SHCP)』⁸⁻ⁱ⁾傘下のいくつかの Tasks⁸⁻ⁱⁱ⁾，他の一つは『日豪高給平板型集熱器試験法』への参加であった。

前述したが，NIRIN にとって大事な研究所 level での『日仏太陽炉研究共同研究』は，太陽炉研究の中で行われた。

4-1 IEA SHCP^{8-i, ii)}

太陽熱エネルギーの利用を促進し，持続可能なエネルギーソリューションを提供することを目的に，太陽冷暖房技術の R & D を通じて，エネルギー効率の向上と環境負荷の軽減を目指す国際活動の platform として発足した。その意義は，①技術開発の加速：国際的な協力を通じて，技術開発のペースを加速させる②標準化の推進：太陽熱技術の標準化を促進し，各国の R & D プログラムを強化する③コスト削減：国際的な協力により，時間とコストを節約④持続可能なエネルギー：太陽熱エネルギーの利用促進を通じて，持続可能なエネルギー供給の実現にある。これにより，IEA SHCP は，グローバルなエネルギー転換を支援し，持続可能な未来に向けた重要な役割を果たす platform になる。

NIRIN は Table 2 に Task 番号，Task 名称，及び研究内容 / 成果概要を示した 5 つの Tasks に参加した。各 Task の総括責任者 (operating agent：

Table 2 NIRIN が参加した IEA SHCP Tasks の名称と研究内容／成果概要.

Task (番号と名称)	研究内容概要(上段)と成果概要(下段)
Task 1 Performance of Solar Heating & Cooling Systems	SHCシステムの性能評価に焦点を当て、シミュレーションモデルの評価と改善を図る ① シミュレーションモデルの精度向上、②性能予測のためのコンピュータモデルの改善
Task 2 (OA)	情報交換に特化したプロジェクト、IEA SHCの共同研究活動を補完する役割を果たした。
Coordination of Solar Heating and Cooling R&D	① SHCに関する研究開発の調整と情報共有
Task 3	ソーラーコレクターおよびシステム全体の性能評価方法の開発
Performance Testing of Solar Collectors	① 屋外暴露試験法の共通化、② 太陽シミュレーターによる屋内暴露試験法の開発
Task 10 (OA)	ソーラマテリアル(集熱材、透過材、断熱材、蓄熱材など)の諸特性評価法と加速劣化試験法の開発
Solar Materials R&D	① それらの評価法を開発。
Task 18	省エネルギーと快適性を両立させるために、建物外皮に用いる先進的なガラス材料の適切な使用を支援するための科学的、工学的、建築的基盤の開発。
Advanced Glazing Materials for Solar Applications	① エネルギー効率の高いガラス材料の開発、② れらの材料が建物のエネルギー消費に与える影響の評価

OA) の出身国、及び開始と終了年はそれぞれ、Task 1: Denmark, (1977 - 1983), Task 2: Japan, (1977 - 1984), Task 3: Germany, (1977 - 1987), Task 10: Japan (1985 - 1991), 及び Task 18: UK, (1992 - 1998) であった。尚、Task 2 と Task 10 の OA は、それぞれ故野口博士及び私が務めた。

Table 2 に与えた研究成果は、NIRIN の研究進捗発展のみならず、我が国全体の太陽熱利用 R & D にも多くの feed back をもたらした。私自身が参加した Task 1 (1 ~ 2 回代理), Task 3, 及び Task 10, さらに吉村博士(私が参加出来なかった Task 10 の終了前には OA も代わって務めた)が参加した Task 18 の個別の成果の詳細を纏めて記述するには、多大の頁数を割かねばならないので、ここでは NIRIN の我々も寄与したいくつかの IEA SHCP が発刊した report と、NIRIN が主に関与した theme に関する成果文献^{(9)~(25)}の一部を挙げるに留める。尚、Task 18 に関して、“IEA SHCP Task 18 Report” が SHCP homepage 上に citation されていないので略した。

4-2 日豪高級平板型集熱器試験法

SS 計画で真空管式太陽集熱器を開発した三洋電機(株)と共に参加した。日本側が豪州に提案・供給できたのは、当時新築個人住宅用の SHCPDhw を装備したソーラーハウスプロジェクト(前出文献⁷⁻ⁱ⁾のために、同社が開発した真空管の中に fin-on-tube 式の平板型集熱板を封着した真空管型平板集熱器²⁶⁾、^{27-i, ii)}であった。そして豪州側が提案・供給したのは、Sydney 大学物理学科を主体とする solar energy team (1974 年 から Dr. B.Window, Dr. G. Harding, 及び, Dr. D.Mackenzie) により、先ず金属(Cu)基板上に光学屈折率勾配を付けた金属炭化物サーメットの光選択吸収膜(SAC と略、太陽

集熱用)を持った真空管 system の R & D^{28-i - iii)}が行われ、次に当時多くの商業ユニットに見られる特徴を持つ ETSC のデザインをテストし、最終的に真空二重管(魔法瓶の機能を有する)内に円筒の集熱 fin-tube を固定する(熱媒流路となる U 字管を fin 内側に溶接固定させる) type が選ばれた^{29-i - iv)}。

これらの試供された ETSC の集熱特性を双方で試験し、信頼性の高い ETSC の集熱特性評価法を議論した。豪州は安定した気象条件が容易に得られる location に恵まれており、集熱器の暴露試験には申し分の無い site で、そこで得られる data と NIRIN の高温熱ループ屋外暴露式集熱器試験装置で得た data とを比較することによって、ETSC そのものの伝熱工学上の諸問題と集熱特性評価法の深部まで議論できた^{27 i), 30)}。

この成果は IEA Task3 の成果(前出文献^{12~16)}、及び NIRIN の“集熱器試験評価法の研究 outputs”(前出文献¹⁷⁾)と共に、日本の太陽集熱器の集熱特性試験の JIS 制定(JIS A 4112, 制定 1984 年, 最新改定 2020 年³¹⁾) (対象集熱器は、集熱媒体を強制循環する平板形、真空ガラス管形などの非追尾式の太陽集熱器及び太陽光発電機能付き集熱器)に大いに寄与できた。

5. パッシブソーラー素子の研究開発

我々が考えたパッシブソーラー素子は Fig. 4 に listup した、太陽冷暖房給湯 system をより効率的に使用するために、建築物躯体(外皮と内皮両者を含め)からの熱損失を低減し、あるいは昼光利用を積極的に図るための遮熱・遮光機能を有する材料を指す。そこに例示した材料を、単に「先端省エネ材料(=太陽冷暖房 system 用の“お助け材料”)」と呼ぶことは、その有する機能が複合化していて十分に説明仕切れない。そこで、そうした複合機能を有する新材料の総称を吉村博士の提案を受け、我々は「パッシブソーラー素子」(= smart 材料=賢材)と名付けることにした^{32-i - vi)}。その名称は JSES で先ず認知され、最終的には広く社会で市民権を得るようになった。我々は窓材料のみならず、Fig.4 に例示した他の建築物部位(外皮、内皮等)に適用できる、複合機能材料もその対象に含まれると考えた。特に、光の透過性や遮熱性を制御する“調光機能”窓材は“smart 窓”と広く呼ばれている。調光機能材料には、Fig. 4 に示される色変化を伴う窓材料(クロモジェニック材料(Chromo.)), 及び色変化を伴わない窓材料(非クロモジェニック材料(= N-Chromo.))が

ある。読者の理解をたすけるために、Chromo の参考文献^{33-i, ii)}、及び N-Chromo の参考文献^{34-i, ii)}を例としてそれぞれ示す。

窓への適用材料が多いのは、Fig. 5³⁵⁾に示す様に建築物外皮の中で開口部（窓）は冬期の室内から外気への熱損失、及び夏期の室外から室内への熱流入の一番大きい部位で、室内温熱環境負荷の低減のための対策（遮熱機能）が是非必要となることに大半の理由は帰す。後の半分は、開口部からの太陽光を室内照明に利用する際に、窓開口部からの遮光も室内の快適光温熱環境確保に必須となることに依る。

尚、Fig. 5 は 1990 年代の古い建築部位別熱損失 data であるが、文献³⁶⁾によれば、住宅の高断熱化が奨励されてきても、2022 年の住宅消費 energy の 57% は冷暖房給湯に使用されており、1990 年代とほとんど消費形態は変わらない。さすれば、住宅の温熱環境に及ぼす主要な建築部位の断熱・遮熱の様相も Fig. 5 とそれ程大きな変化が無いと安全に推定

出来る。

このような住宅・ビルの光温熱環境を考慮し、結局 NIRIN では energy 効果と快適性効果の両立を図るに欠かせないと考えられた、未開発の窓材料（エレクトロクロミック（EC）調光材、サーモクロミック（TC）調光材、低放射率材料、シリカエアロゲル透明断熱材）、及び外壁材（選択放射素子）等、主に可視～近赤外～中赤外領域の分光学的特性（放射特性）に特徴を有する光学機能材料を研究 theme 材料とした。

これ以前に、同様の光学特性を持つ光選択吸収膜を、集熱材料研究対象の一つに選んでいたことと、先述した IEA SHCP Task 10 の専門家達との交流から、NIRIN 研究者にとってこの材料選択は自然な流れであった。これらの材料を Fig4 中に□で囲った。研究内容はそれぞれの材料について共通で、

- ①素子として必要な物性発現の mechanism の解明
- ②物性の高度化
- ③作製法の確立とその単純化
- ④必要な物性測定法の開発とその高精度化
- ⑤材料劣化の mechanism の解明と高耐久性化

とした。

一方、NIRIN の sub theme が back up する民間の委託研究は、上記の目的を持った先進窓の R & D と、それを普及させるに必要な耐久性の向上及び、それと同時に経済性を高めるための生産技術の最適化を目的とする「調光ガラスの研究開発」（1990～1997）が選択された。パッシブソーラ素子の一つである「調光ガラス」とは、外部の光の強さに応じてガラスの透過率を調整することにより、室内の温熱環境（照度・温度）を快適化しながら、エネルギー効率の向上を目指す遮熱効果に優れた窓ガラス材料である。とりわけ調光ガラスの中でも、遮熱を材料への電荷注入で制御できるエレクトロ・クロミック調光（EC と略）ガラスが取り上げられた。

何故 EC が対象になったかについては以下によ

1) 窓材料	
(a) 調光素子	
(1) クロモジェニック材料	
●エレクトロクロミックデバイス*	
●サーモクロミック薄膜	
●フォトクロミック*	
(2) 非クロモジェニック材料	
●サーモトロピックデバイス	
[水和ゲルデバイス**、ポリマー混合デバイス*等]	
●分散型液晶タイプデバイス**	
●分子分極配向型デバイス	
(b) 低放射率透明素子	
●熱線反射ガラス：[金属(Fe, Co, Cr, Ti)酸化物膜**、金属(Au, Cr)+SiO ₂ 膜**、金属Si膜*]	
●硬質低放射率膜：[Durable D/M/D Tandem*, (M:金属=Ag etc, D:誘電体)]	
●軟質低放射率膜：[ITO上のMgF ₂ 膜**、ITO上のフッソドープITO**、(ITO=In SnOx)]	
●紫外及び近赤外(赤外)線カットの狭い選択透過幅を有する低放射率膜：[窒化物膜、遷移金属酸化物膜**、D/M/D**]	
(c) 透明断熱素子	
●プラスチックハニカムタイプ**	
●ガラスキャビラリタイプ**	
●シリカエアロゲル：[モノリシック*、粒子**]	
(d) Super Windows(高断熱複層ガラス)：[ガラスにlow-e coating**使用、ガラス間隙をa) gas filling** (Kr, SF ₆ , CO ₂ , C ₂ F ₆ , SO ₂ 等)、b) evacuated**, c) particulate silica-aerogel**とする]	
(e) 蛍光型波長変換集光素子**	
(f) 角度選択反射・透過素子：[ホログラム*、金属斜め蒸着膜]	
2) 外壁(屋根)材料	
(a) 選択放射素子：大気の窓(8,000～13,000nm)を通して大気上層部や大気圏外の冷熱源への放射(放射冷却促進)	
(b) 透明断熱素子(商業化等については窓材料参照)**	
(c) 熱電ベルチエ効果冷却素子	
3) 内壁(天井)、床材料	
(a) 潜熱型壁蓄熱材**：カプリン酸、水和塩などのカプセル化埋め込み	
(b) 熱電ベルチエ効果冷却素子	
(c) 遠赤外放射体(温熱環境において温度の均一化に効果有り)	
4) 自然昼光利用のための導光材	
(鏡**、ガラスファイバー**、透明プリズムライトガイド**、ホログラム)	
無印：研究室での基礎研究段階、*：開発段階、**：商業化段階	

Fig. 4 適用建築物部位別の passive solar 素子の例。表枠下黒□内の注釈は 1990 年代の状況であり要注意。

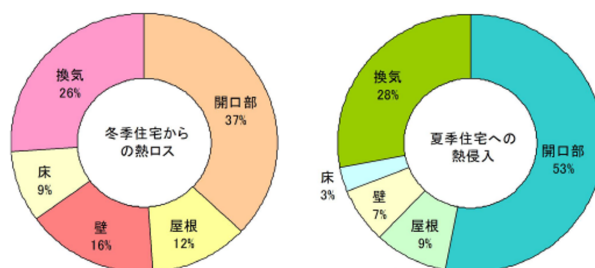


Fig. 5 1990 年代の住宅各部位の室内から外気への熱損失（冬期）及び外気から室内への熱流入（夏期）の割合

る：上記プロジェクトの中で、最初2年間に我々の提案により『調光材等の研究開発：冷暖房等代替エネルギー量シミュレーション』が宿谷昌則教授（現東京都市大学名誉教授）のご協力の下に行われ³⁷⁾、Fig6に与えたようなsimulation結果が得られた。そして、今後のbuildingでの光温熱環境の省エネと快適性の両立重視を見込む中で、特に、冷房負荷のenergy低減効果が顕著なECが委託先の意向玩味と世界的関心の高まりを反映して選ばれた。尚、少々残念なことは、このプロジェクトで開発されたECガラスを実際のビル事務室に装着して、予見のenergy効果の実証研究がSS計画の中で行われなかったことである（委託先では実証試験を当然行っている筈であるが）。

Fig. 6の縦軸は年間当たり平米当たりの負荷で単位は $[MJ/m^2 \text{ Yr}]$ 。用いたsimulation model主要parameterや条件の詳細は前出の文献^{37) i, ii)}にあるが、主要なparametersと条件は以下の通り：

- ①事務所の一室の仕様は（間口8m, 奥行8m, 階高3.5m, 天井高さ2.6m）
- ②南面開口部（幅6m×高さ1.7m）を窓とした
- ③東京の標準気象データ（外気温、及び水平面天空日射量等）を利用
- ④室内の熱環境は、夏期温湿度26℃, 50% RH, 及び冬季温湿度22℃, 50% RHで制御
- ⑤部屋の使用時間帯は9時～18時
- ⑥室内の照度基準は、机上面（75cm高さ）の設計照度を500 [Lx]
- ⑦この照度を得るために必要な照明器具配置は光束法で決める
- ⑧照明の調光は蛍光灯の安定器への入力電力を連続的に変化させる連続調光等

対象の9種類の窓は以下の通り：

- 1 番：EC 窓,
- 2 番：熱線反射ガラス窓,
- 3 番：熱線吸収ガラス窓
- 4 番：透明板ガラスとブラインドを組み合わせた標準窓,
- 5 番：透明複層窓
- 6 番：EC 窓とブラインドの組み合わせ,
- 7 番：EC と低放射率（Low-e）透明ガラスとの複層窓
- 8 番：7 番とブラインドの組み合わせ
- 9 番：Low-e 透明ガラス（Low-e 薄膜は外側のガラスの建物内部側面に被覆）と透明板ガラスの複層窓

尚、EC 窓の仕様は：2,000-3,000 [nm] 厚の EC デバイスをガラスでサンドイッチにした合わせガラスで、その光学特性は漂白時及び着色時の太陽光透過率は EC 材料の太陽光吸収により、夫々 6.9 % 及び 54.6 %。また、その着色コントロールは室内側で照度 20 [KLx] から着色を始め 80 [KLx] に達する時に最大着色となるように連続制御する。

尚、9 番の値は前出文献³⁸⁾に従って、窓ガラス 9 番の各種 parameter（直達日射熱取得率 0.51, 遮蔽係数 0.59, 熱貫流率 2.7 $[W/m^2K]$, 及び直達日射透過率 0.69）を用い NIRIN で算出した参考値。極最近の文献³⁹⁾によれば、窓 9 番の暖房負荷及び冷房負荷は窓 5 番のそれらの、夫々 67% 及び 75% との結果もあり、これらの値を選択すれば 9 番の窓の棒グラフは、示された参考値からもう少し省エネ側に低減することになるかも知れない。

Fig6 の EC 窓（特に 7 番、及び 8 番）の省エネ効果について、読者の皆さんが『？』と早合点しないために、もう少し詳細に暖房、冷房及び照明のエネルギー負荷を個別に見て、EC ガラス窓を応援しておく：

① 標準窓の暖房負荷 ($61.4 MJ/m^2 Yr$) に比較し、5 番、7 番、8 番、及び 9 番の窓で負荷の低減効果が見られる。EC 窓のみでは暖房負荷低減効果は顕著でないが、これは用いた EC 窓が室内外側ともガラス面で、住環境の温度領域でのその半球熱放射率が、0.86-0.9 と高く、熱線反射効果が極めて小さいことに起因する（これが、この後で紹介する NIRIN 吉村博士等の『調光ヒートミラー』の研究の動機に繋がる）。もし EC 窓単独で暖房負荷の低減を実現するためには、EC 材料自身を近赤外～赤外領域で反射型にする等の窓に熱線反射機能を持たせるか、あるいはそうした機能を持つ他の材料との複合化

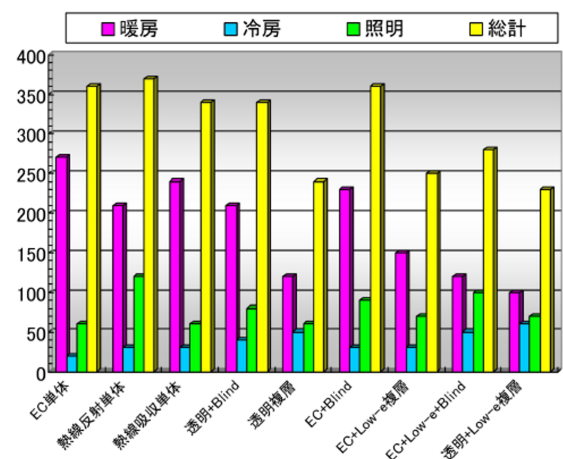


Fig. 6 9種類の窓を持つビルの事務室一室のシミュレーションによる冷暖房・照明負荷の差異。

(複層化)等の工夫が必要となる。

② 標準窓の冷房負荷 ($116 \text{ MJ/m}^2 \text{ Yr}$) に比較しエネルギー効果の有効性は1番, 3番, 2番, 6番, 7番, 及び5番の順位となる。いずれも日射熱取得係数が標準窓のそれ (ブラインドを完全に下ろした場合 0.50 程度, 上げた場合 0.86 程度) に比べて小さいからである。

③ 標準窓の照明電力 ($92.1 \text{ MJ/m}^2 \text{ Yr}$) と比較し, エネルギー効果は, 5番, 1番, 3番, 7番, 及び9番の順となる。

④ 総括すると, EC を含めたスマート窓が高い省エネルギー性能を発揮するためには, 夏はできるだけ日射を遮り, 逆に冬はできるだけ日射を透過することが求められるということだ。

このように①～③を参照すれば, 1990 年代の技術で得られた EC 窓及びそれを組み合わせた窓はどちらかと言えば冷房負荷低減機能を発揮する。全負荷でみれば, 窓7番は冷暖房及び照明総てにエネルギー効果を有し, 気候を選ばず, 日本のどこで用いてもその省エネルギー効果の potential は高い。

この窓を, 大平洋気候帯にある太平洋岸, 近畿, 四国, 中国及び九州の一部の 1,746 万戸の住宅・ビルの半分の 873 万件の $4.9 \text{ [m}^2\text{]}$ の南窓に用いれば, 年間 41.8 億リットル (ドラム缶約 366 万本) の石油を節約できることになる。特筆すべきは, こうした窓の使用により, 夏期の1日の冷房負荷を最大 60% 程度まで減じ, その結果電力消費を最大 40% にそれぞれ低減でき, しばしば現在問題となっている夏場のピーク電力カットに大変有効となる。更に, ビルの全点灯の場合の照明電力消費に比べ, EC 窓は太陽自然採光を一部可能とすることによりそれを 29%, EC ガラスと低放射率ガラスから成る複層窓の利用では 36% 低減可能となり, 制御点灯と併用すれば 60-70% の消費電力低減が見込まれる。さらに, 商業ビルで取り入れられている高速換気空調システムのサイズを小さくできる等の効果も期待できる。

さて NIRIN においては, 2000 年の SS 計画終了と, それと同時に進められた産総研中部センター (AIST Chubu Centre) への移行という大きな event があったが, 調光ガラス窓を積極的に省 energy 建築物外皮に広く採用する状況を我が国に作る目的で, NEDO 委託研究として吉村博士 (現, 東海大学機構・岐阜大学特任教授) - 田澤博士 (産総研名誉リサーチャー, 前産総研中部センター長) を中心とする『環境応答型ヒートミラーの研究開発』に繋がった (前出文献¹⁾ 参照)。

既に Fig. 6 の説明①で述べられた従来の EC 調光ガラスの欠点を克服するため, 彼等は吸収ではなく反射で制御 (反射型の調光材料 = 調光 mirror), つまり濃い青色ではなく鏡状態に変えることができればもっと遮熱効果を高めることができると考え, そのような材料探索を先ず始めた。2002 年に Mg-Ni 合金を用い, ガスクロミック (空気中の水素を利用) 方式の調光 mirror を世界で初めて成功させた⁴⁰⁾。引き続き, 彼等はそれを実用化する研究に着手した⁴¹⁾。その後, 彼等は耐久性を確保するために, Ni に代わって Y を用いる事を発見した⁴²⁾。本『調光ヒートミラーの R & D』に関しては, 直接当事者から語って貰うべきであるので, 本稿ではこれ以上立ち入らない。

敢えて付け加えることは, スマート窓材料の一つの有力候補である, 周囲の外気温度で automate に調光する熱調光材料 (サーモクロミック = TC 材料) 窓に関しての Fig. 6 と類似した energy 効果が, Fig. 6 に関して御紹介した宿谷先生の監修の下に, 浅田秀男博士 (現, 愛知淑徳大学教授, 当時東京理科大准教授) の協力を得て simulation され⁴³⁾, TC 窓の適用範囲, 及び必要とされる光学・熱物性値等の範囲等が明らかになったことである。これは世界で初めて材料科学者との密接な協力による, TC 窓に対する本格的な simulation で, 貴重な data となる (前出文献¹⁾ 参照)。

6. 自宅をパッシブソーラー素子の窓を取り付けたソーラーハウス化して energy 効果を試す

建物外皮・内皮を高断熱化して, 1990 年代最終期に商業化された, パッシブソーラー窓 (真空複層ガラス窓, 熱線反射 low-e ガラス, 熱線吸収ガラス) を実装した個人住宅の一室の省エネ効果を以下に実証しておく (特に真空断熱ガラス窓)。

種類	商標名	日射熱取得率	熱損失係数 U 値 [W/m ² K]
単相 (3mm)	---	0.88	6.32
透明複層 (3mm (gl) + 12mm (air gap) + 3mm 8gl)	---	0.79	3.00
真空複層 (3mm (gl) + 0.2mm (evac. gap) + 3mm (gl))	Spacia (N 社)	0.79	2.67
Low-e 複層 (3mm (gl) + 12mm (air gap) + 3mm (low-e))	Sunny-Cool (S 社)	0.44	1.65
熱線反射 (h. refl) 複層 (3mm (gl) + 6mm (air gap) + 6mm (h. refl))	Sunny-Rex IC (S 社)	0.25	3.09

Fig. 7 ST solar house に使用された通常板ガラス窓, 及び高断熱ガラス窓とその仕様 (日射熱取得率, 及び U 値)。

私の家は1998年に省・新エネ住宅（“STソーラーハウス”：強制循環・熱交換式太陽給湯system（開口面積 2m^2 の光選択吸収膜平板集熱器3枚+300L貯湯槽）+総電池容量3.10kWの系統連携式PVsystem（最大出力電圧209.6V、最大出力電流14.73A、セル効率17%のSi単結晶太陽電池module24枚（ 23.1m^2 ）と系統連携のための最大電力変換効率94%のinverter、設置の屋根の仕様：切り妻屋根の長手方向が東西から 8° 西向きにずれ、屋根勾配 28° ）+各種高断熱窓（Fig.7参照：部屋の方角、用途、及び開口面積等に応じて）+他の建物外皮・内皮の高断熱化（外壁、床、内壁、天井、及び屋根の熱貫流率 U 値は、それぞれ、0.281, 0.854（0.680：床暖房設置の場合）、0.121, 0.299、及び0.209 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]))に建替・新築した。Fig.7中には用いられたガラスの種類と厚さを（）の中に与えた。複層窓の場合は、左端が外気側、右端が室内側を指す。ガラス間隔を中央に与えた。用いられた記号は以下を意味する：gl：並板ガラス、low-e：低放射率薄膜、h.refl：熱線反射膜、及びevac：真空、を夫々意味する。この中で、空調機を日常的に利用するLivingには真空断熱窓を装備した。従って以下のenergy効果の検証は、計測されたこの部屋について行う。

尚、住宅とソーラー機器等の詳しい仕様、初期の冷暖房給湯energy management実績、及び運転初期の経済性考察は文献⁴⁴⁾にある。建物外皮・内皮の U 値はヨーロッパ等の寒冷地の省エネ住宅での建物外皮の U 値平均 $0.20\text{--}0.13$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]と比較すれば⁴⁵⁾、特に小さい値では無いが、名古屋のような非寒冷地では住宅外皮・内皮の断熱として十分な値である。真空複層窓は床面積（ 16.5m^2 ） $\times$ 天井高（ 2.5m ）の、最も使用頻度の高い床暖房仕様の床を持つ1階Livingで、開口面積（ 4.68m^2 ）の南側と開口面積（ 1.14m^2 ）の東側2箇所である。

この部屋の年間空調使用電力は全使用電力の約17%（直近のdataとして、2023年7月～2024年8月、床暖房は運転せず。同一条件で年変動は $\pm 1\%$ 前後）であった。文献⁴⁶⁾にある世界標準（家庭・事業所・商業施設・産業の冷暖房や給湯等の熱energy転換はそのsectorの電力消費の約40-50%）、及び文献^{47), 48)}、及び前出文献³⁶⁾の国内標準（2022年ベースで家庭sectorの64%（冷暖房給湯+厨房利用））から見れば、我が家の“真空断熱窓”を実装した部屋の冷暖房空調電力使用量の割合は、大きいものではない事が判る。“省エネ効果は充分有る”と評価できると思う。

また、この窓を設備したことによるcomfortとしては、通常の窓でしばしば問題となる冬のガラス窓の結露は全く発生しなかったことである。さらに、設置場所は道路に面しており車の通行も朝晩あるが、その騒音も低下した。尚、評価の対象外であるが、年間の照明使用電力割合は全消費電力量の10%（年変動は同じく $\pm 1\%$ ）である。

使用された真空複層窓の経時的な真空劣化の原因は以下の4つと考えられる：①ガラス内側に吸着されたガスの離脱、②封着seal材からのガス離脱、③真空pillarからのガス離脱、及び④ガラスを通しての空気中の希少元素He（大気中に5 [ppm]）の流入。

①についてはガラス表面温度が高くなれば離脱ガスは増えるが、低下すれば離脱ガスは再び吸着されるので、大きな要因とは考えられない。④に関しては、一般的なガラスのHe透過率は $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度であるので、当初 0.133 [Pa]の真空度は単純計算から⁴⁹⁾は、30年経過でca 1300 [Pa]（大気圧の $1/80$ 程度）で、真空はほぼ喪失することになる（対策技術を全く採らない場合の理論上限）。メーカーは10年保障を謳っており、そのために20-30年の耐久性を想定した設計がなされていることを信用しているが、簡易的な測定で、先ず U 値をそろそろcheckする必要があるかも知れない。

尚、メーカーは $\text{SnO}_2:\text{F}$ 膜を低放射率膜としてガラス上に形成したtypeの真空複層窓を高性能typeとして出荷しているが、その膜からの吸着ガスの紫外線による離脱による真空劣化については、皆合博士（現NSG（株））と共同で詳しく分析し、劣化のmechanismを発表した⁵⁰⁾。

ついでに述べておくと、我が家の構成員が夫婦二人になって以来の、年平均の太陽光発電量、発電効率、売電割合、自己消費量、及び購入電力量は、それぞれ 3.46 [MWh], 9.80 [%], 63.7 [%], 36.3 [%], 及び 3.83 [MWh]である（2015年4月から2025年3月迄の年度別値の平均）。一方、給湯調理用ガスの年平均消費量は 146.3 [m^3]である。

装備された太陽光発電systemの経年劣化を、非専門の私が単純に年平均の発電効率でmonitorする限り、設置以来28年経過した今も、顕著な低下は無いと思うが、以下の専門家の意見を参照すると、効率算出で分母に使用する傾斜面の半球入射日射量を、気象庁発表の名古屋での水平面半球日射量から、正確に推定する方法などの精査が必要かと思う。

実は本systemは、2010年に加藤和彦博士（現産

総研福島再生可能エネルギー研究所太陽光システム研究チーム主任研究員）等による“PVResQ” team に、『PV system の failure の研究』の対象物件として念入りの検査をして貰っている。その時、『約 14 年が経過した太陽電池モジュールとしては総じて良好な状態であるといえるが、標準日射強度に換算した短絡電流が少なくなっているのが気にかかるところである。太陽電池モジュールの劣化が疑われるところであるが、残念ながら現状では現地でこれを正確に判断する方法がない。太陽光発電システムの普及が今後ますます進展していけば、おのずと長期運用されるものも増えていくだろうが、それらの劣化状況を判断するための手法の開発が求められるだろう』との報告⁵¹⁾を受領している。

上述してきたように、幸いにして我が家は同じ家族構成の他家庭と比較して、省エネ達成度は高いと思う。但し、PV 発電 system は、設置以来現在まで 27 年間に inverter は 2 台不具合発生により交換（2005 年、及び 2020 年）した。また、太陽給湯 system は、集熱 panel の循環熱媒漏出により、全 panel と集熱器への熱媒供給管交換を 2020 年に行った。また 2024 年末から 2025 年初めに、給水管系から貯湯槽への機械弁劣化による給水漏洩（このために水道料金がほぼ 2 倍弱まで増えた）、及び給湯配管系の三方弁劣化による給湯不備が続けて発生し、交換した。後者は既に国内全ての maker では製造中止となっており、三方弁に変わり自動弁（設定した貯湯槽外周の温度により、ソーラー側とガス給湯側に自動的に替わる）に取り替えた。これによって、先に述べたガス消費量がどのように影響を受けるかは、今後の data 解析を待たねばならない。

全くの余談になるが、一般人の妻の評価は太陽給湯 system が上記の不具合が発生していても、すこぶる高い。理由は季節を問わず温水が供給され、冬場の悪天候時でも前日が晴天であれば、system の貯湯槽内に残された温水を使用出来るなどの経済性の魅力（ガス代の節約効果が顕著）のようだ。一方、PV system が不人気なのは、先に述べた 2005 年の inverter 不良時（たまたま私が暫く不在であった期間と重なった）『警報音が突然鳴り響いて、多くの通行人からも指摘を何度も受け、取り扱いが判らないので私が戻るまで放置せざるを得なかった』が、トラウマになっていることから言えよう。また、数年前に“買取制度”が抜本的に変わり、我が家のように自己消費電力が平均約 40% 未満で、残り平均約 60% を電力会社に売電している場合には、設

置当初の手厚い“買取制度”で受けていた恩恵がなくなったことも、もう一つの原因となっている（前受金が減少したために、購入電力料金の支払いが以前ほど安価でなくなった）。尚、昨年までは、特に冬場の夕方時に電力会社から節電要請がよくきていて、協力出来る場合はそのようにした。本年からはむしろ PV が稼働する晴天時の昼前から昼過ぎに『電気を使ってくれ』との要請がよく来るようになった。我が家のように自己消費が 40 [%] そこそこの場合の PV による過剰電力購入削減対策と思うが、もしそうなら、揚水発電所の設備容量を上げるなり、新設するなどして、“余剰な電気を溜めておく”対策を何故取らないのか不思議に思う。何か釈然としない。

我が家の active solar 設置と passive 素子窓導入の経済性に関しては、初期費用と修理・maintenance にかかる費用を合算して単純に算出してみると、巷間喧伝されているほど芳しくない。妻からは苦情が寄せられている。しかし、私は太陽熱利用技術の研究者として、気候変動に対する国際的な取り組みの一環としての地球温暖化を 1.5℃ 以下に抑える“地球温暖化防止”を実現するために、現在の技術で最低限のことを実践しておきたと考えている。よって、経済性に関しては激しく、かつ厳しく論ずる積もりは無い。新しい技術を社会的に acceptable にして広く mass として普及するには、地球温暖化対策を主導する行政が、普及に本当に繋がる政策と制度設計を、事前に長期的観点から pre 評価した後に、提案すべきと考えている。その観点からすると、担当の経産省+環境省の官僚諸氏の責任は重い。これに関しては、これらのアクティブソーラーの一般 user の方々の評価と意見を是非伺いたい。

7. 論文の citation から見た太陽熱利用研究の最前線

SS 計画で我々が必死になって行って来た太陽熱利用研究の outputs が、現在の先進的太陽熱利用研究の最前線で outcome の役割を果たしていると認められている、太陽集熱技術の一例を紹介してみたい。

NIRIN 退職後も、名工大、(一財)ファインセラミックスセンター、中国科学院広州能源研究所、及び中国の 2 つの大学で研究 affiliation を確保し、『太陽熱利用・エネルギーハーベスティング材料の研究』を現在まで一貫して行ってきたが、これまで発表してきた論文群の中から、他者の論文によく引用される

研究項目に着目し、本学会にとっても古くから主要の分野を占めている“集熱技術”から以下の topics を選ぶ。尚、下記の節全体はかなりの簡易版なので、前出文献¹⁾を是非参考にして頂きたい。

7-1 直接太陽熱駆動蒸発器 (direct solar steam generator : DSSG)

7-1-1 DSSG とは

世界規模での人口増加と経済発展から“真水資源”の確保は世界的課題と認識される。その際、海水淡水化 (desalination)、水浄化 (purification)、あるいは水分を含んだ物体からの水回収 (reuse) の三つの基本技術において『効率的な水蒸気/湯気の発生法の確立』が必須で、それを太陽熱利用で達成しようとする試みは既に 1970 年代から (SS 計画ばかりでなく世界規模で) 行われてきた⁵²⁾。その水浄化の方式は、膜蒸留、逆浸透、多段フラッシュ蒸留などで、太陽集熱器、蒸発器、配管及び system 制御系等を適正に組み合わせるなどした複雑な system 構成 (可動部分も多く、かつ高圧操作が必要) を余儀なくされ、それが適用対象や応用範囲の狭小化、かつ高価化を招いてきた。

そこで、二つの良く知られた自然現象である“蒸発・沸騰” (“蒸発”: 沸点以下の温度で水から、低温水蒸気 (vapor) を発生させる、“沸騰”: 沸点以上の温度で湯気 (steam) を発生させる) を、太陽 energy を入力 energy 源として積極的に用い、簡単な装置構成とすることによって実現する技術 (DSSG = direct solar steam generation) が^{53)~55)} 2010 年代から注目されるようになって、現在も発展途上にある。

DSSG system は、太陽光を吸収して加熱された光集熱体 (photo-thermal material : PTM, 太陽集熱器の集熱 panel と同じような役割を担う) 表面に、処理を必要とする“作動流体, reservoir 水, 或いは, bulk 水 = 体積水”から導いた (real あるいは virtual

いずれでも、“直接か、あるいは、何等かの仕組みを有する water path: 水路”を使って導く) (例えば、もし、PTM に pore があればそれが水路となり、その径が充分小さければ毛細管現象で背面から表面に揚水される等) 水分子を、加熱された PTM 蒸発面 (PTM の気相界面に殆どの場合になっている) に接触させ、蒸気を発生させ、その蒸気を取り出し利用する装置である。

PTM からの蒸気発生の基本的原理・装置構成 (バルク水源から PTM を通して大気界面への蒸発水路を含め) を理解するために、当初の simple な 2 種類 (前出文献^{53)~55)} を Fig. 8 に示した。

Fig.8A の“体積型”では、PTM に微粒子 (nanoscale particle : NP) の局所表面プラズモン共鳴吸収 (L-SPRA) を利用するもので、水溶液中に分散・懸濁させた多量の NPs が、太陽光を水中で吸収して充分加熱され、その周辺に既に存在する体積水の水分子 (分子径 : ca 0.27[nm]) が、急速に沸騰し蒸気 nano bubble (泡) となり、水・空気界面から気中に“湯気”として放出される。こうした蒸気発生 mechanism からは“プラズモン太陽光駆動蒸気生成 (PSSG) システム”と仮称される (丁寧な呼称)。一方、蒸気発生とその水路の観点からは、Fig. 8 の下図に概要を示すように、懸濁した NPs に接触した周りの体積水を構成する水分子に、加熱された NPs から熱を素早く伝え加熱することから、“Volumetric system, 体積型 (ナノ流体 type)”と呼ばれる。本稿では、DSSG にとって主要な蒸発器 (蒸発器水路) (後出) と直結する用語“Volumetric system (体積型)”で通す。

一方、Fig.8 B) の“直接接触型”は Fig.8 A) の“体積型”から、できる限り simple な構成で蒸気収率を格段に向上させる目的で innovation されたもので、その essence は、体積水 (処理水 reservoir, 作動流体) 表面に“筏”の様に浮かせた PTM-Component (例えば、炭素ベースの材料、金属ナノ粒子担持材、狭帯域ギャップ半導体、及びポリマー等) の、下面の体積水から、冒頭の DSSG system の定義の箇所で既に説明した様に、何等かの smart な仕組みで、加熱 PTM-C 表面にその背面から揚水された水分子を接触させ、“蒸発霧”を発生 (放出) させる方式で、PTM-C 浮遊型 (単に Floating type)、あるいは、蒸発器水路の観点から“Direct contact type: 直接接触型, 界面型”と呼ばれる (Fig.8 A) の“体積型”に対して“分散型”と呼ばれることもある。

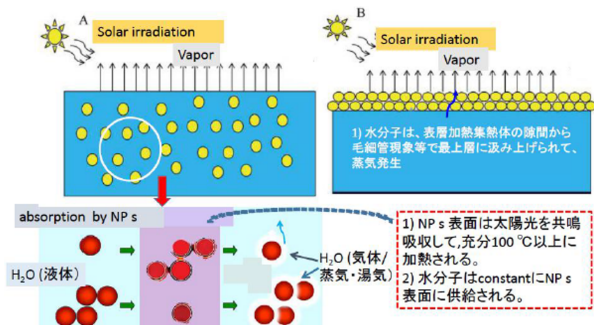


Fig. 8 初期の 2 種の基本的 DSSG 蒸気発生 mechanism 概略図: A) 体積型 (ナノ粒子 (NPs) 流体 type, PSSG type), 及び B) : 直接接触型 (Floating type)。

PTM の蒸発面と水路は DSSG の運転機能にとっては極めて重要で、一体化していると見なし、“蒸発器”、或いは、“蒸発構造体”と呼ぶのが一般的である。本稿では“蒸発器”としておく。尤も、PTM にはそれ自身が構造体となっている場合が多く、加熱・蒸発面となる PTM 表面と、裏面間では熱伝導による損失が発生する。そのためにこの熱損を抑える方策が蒸発器には求められる（太陽集熱器の集熱 panel の裏面は通常断熱材を敷いて casing に収める方式と機能が似る）。

本 type は、自然界で低温の水がそれより温度の高い外気と接すると出現する“湖沼・河川の蒸発霧”（steam fog）の発生 mechanism を模倣した方式と言える（自然霧の濃度は、外気温度が高いほど、かつ湿度が低いほど濃い、本界面型の場合も同じ）。

さらに加えると、PTM が界面に浮遊し界面局在加熱が実現されるので、PTM 内の熱の閉じ込め、及び散逸熱の体積水への拡散を回避できる条件が、前述の体積型に比べ揃っていることから、system の太陽熱利用効率を高めることが merit と考えられている。その理由から急速に台頭し、工夫をこらしながら様々な多様性を蒸発器水路に出現させ、現在に到っている。但し、蒸発器水路を様々な改良した多様な system では、夫々の名称で区別する方が便利で、界面型と一括りにするにはやや難が出てくる。そのため、“PTM + 水路”を一体的に考える蒸発器の type 分類で区別することが、現在この分野では一般的となっている。

もう一点、本 type で注意すべきは、PTM 機能を担う膜系材料を支える支持機能を持つ構造材料と重ね合わせる必要が有る事である。そのため加熱された PTM 表面から支持構造材料を通しての体積水への熱伝導損失を抑える工夫が不可欠となる。さらに、支持材の存在で、体積水は直接 PTM 表面の加熱ゾーンに smooth に絶え間なく輸送される保障は無いので、水輸送のために支持層には、水路の内面に水が広がりやすい親水性材料（支持材としての候補は、親水性の発泡材、多孔質材、アエロゲル材等）が必要となる。

尚、太陽入射光の集光度が大きい場合、得られる蒸気温度は必ずしも充分高いものではないので、電力変換するに当たっては更なる工夫が必要ではあるが、可能性が決して無いわけでは無い（例えば、文献⁵⁶⁾⁵⁷⁾等参照）。しかし、一般的には、低温蒸気であっても様々な適用技術が見込まれることから、あえて高温水蒸気が要る発電に拘る必要もな

く、特に発展途上地域にとって非常に魅力的な水処理・造水技術との評価が定着している。

以上の解説をさらに深掘りする読者のために、citation の多い（citation 数:333～61、2024 年末迄）我々 G の総説報告群⁵⁸⁾、及び他者のそれを⁵⁹⁾ 参考に供しておく。

7-1-2 DSSG の高性能化への課題

DSSG system のさらなる高性能化を図り、商業化に到達するまでには、相互に密接に関連する以下の 4 つの重要課題が横たわる（前出論文¹⁾⁵⁸⁻ⁱ⁾）：

① 先ず、どのような DSSG system にとっても、省エネルギー性、簡便性、及び適用性に優れた soft 合成プロセスを利用する高回収／高変換効率を持つ、各種機能材料の合成等の材料 process が重要となる。夫々の system 要素材料に具体的に要求される特性・機能は（蒸発器は②に述べる）：

a) photo-thermal 材料（PTM：金属ナノ粒子、炭素系材料、狭バンドギャップ半導体、及びポリマー等、金属ナノ粒子についてはいくつか NIRIN でも black 液体集熱材として曾て実験したことがあった）には、界面からの熱損失を抑えるための（必要性は後出の energy 束の balance の考察にある）、太陽集熱 panel と同じような光選択吸収性機能付与が望まれる。尚、当初は、金属 NPs は構成材料が自由電子を多く持つので、単純に赤外領域で反射率が高く、光選択吸収性の期待もあった。しかし、NPs の場合にはバンド内の energy 順位の離散的性質が粒径に反比例して顕著になるので、その分光学的特性は、物質自身、粒径、及び粒子形状に大きく依存するため、光選択吸収性を過大に期待することは避けるのが賢明となる。

b) 支持構造材には、断熱性+親水性+導水機能（体積水から PTM 局所加熱面への絶え間ない給水機能や断熱機能）の付与。

② PTM から bulk 水への伝導熱損失を減らす機能と、逆に、体積水から PTM 局所加熱面への絶え間なく smooth な給水機能を両立させた蒸発器の構造（構成）の最適化が先ず必要不可欠となる：

DSSG では PTM と水の間の熱交換は、PTM と直接接触する水によって影響される。水が多すぎると、蒸発する水の温度上昇が抑制されることから、水の輸送（水路の次元）設計には注意が要る。蒸発効率を上げるためには、システムの伝導熱損失を抑え、かつ蒸発 enthalpy 低減を図るための最適構造の模索は優先順位が高い（ここでは、前出の通り、PTM と蒸発水路を一体として捉えた蒸発器とする）。

Zhu 等⁶⁰⁾によれば、或る仮定の下に計算で得られる理論的な蒸発速度の限界は、照射 energy 密度 $1 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ で $1.47 \text{ [kg/m}^2\text{h]}$ であった。この数値は実用的な応用には未だ十分では無い。この数値の改善を図り、入射光に対する蒸発効率（蒸発に正味使われる energy 効率）を上昇させるには、i) 環境からの温熱エネルギーの harvest, ii) 水蒸発時の潜熱を再利用する及び、iii) 潜在蒸発 enthalpy を低減する等の新しい R & D 戦略が必須となる（これら i ~ iii は相互に関係する）。その戦略の理論的 back ground となる基本式（前出文献¹⁾）から、改善の目標を効果的に達成するためには、PTM 単体の工夫だけでなく、水路も一体として含めた蒸発器単体の外部または内部の“次元構造（水路の次元）”の適切な設計が一番重要であることが見えてくる。

③ 理想的水蒸気回収と浄化水の元の体積水へ戻すなどの再利用・循環 system 追求も、実際の system では課題となる。

④ ①に述べた以外の system 要素の熱絶縁体の材料選択と最適構造化も課題となる。特に、system の performance を上昇させる集光集熱装置の最適設計（集光倍率を何倍にするか？どのような集光 system を利用するのか？）も避けて通れない。

7-1-3 蒸発器進歩の一例

上記の問題点を解決するための種々の考察や提案等は、前出の文献群^{1), 58), 59)}にもある。特に上述した様に蒸発器が一番重要な要素となるが、我々の非常に面白い idea からの approach（2017 年の発刊から 2024 年末までに 186 citation された文献⁶¹⁾）を紹介しておく。

ここでは、水への伝導損失を効果的に抑制するために Fig.9 に模式図を示す“樹木の葉からの蒸散、及び水輸送形態を模倣”した、1D 水路に区分され

る“植物蒸散模倣 DSSG”を提案し、DSSG 性能を proto-type system で実験検証した（前出文献⁶¹⁾）。

Fig. 9, a) を先ず説明する：①炭化天然木材（ヒノキあるいはヒノキ科の木材、Carbonated wood slice (CW-S)）を PTM に利用し「葉」に、②熱伝導率が 0.026 [W/mK] と低く、かつ撥水性の高い商業用拡張ポリエチレン foam (EPEF) を PTM 支持構造物として、背面からの損失を低減させると共に体積水からの水路保護の両機能を併せを持つ「幹」に、③ EPEF の芯に埋め込んだ親水性、吸湿性、及び保水性に優れた air laid paper（不織紙、乾燥状態 熱伝導率： $0.05\text{--}0.1 \text{ [W/mK]}$ 、湿潤状態：前記の値から増加）を「根」として、処理水 reservoir（体積水）から PTM への揚水水路機能を持たせた。

さしずめ、前記の reservoir が樹木全体を支える「土壌」に相当することになる。この構造は、温度の高い PTM + 断熱材と体積水との間の、二次元的直接接触による余分な熱伝導損失を、断熱材と水の間に空間隔離を導入することで避け、根の役割を持つ細くて熱伝導率の低い不織紙による channel に水輸送機能、及び伝導熱損失を一次元化したところに最大の特徴を持つ。

尚、Fig.9a) には実験で得られた蒸発効率 91.3% が記載されている。これを、伝熱工学的に妥当かどうか検証したのが Fig. 9b) である。

Fig. 9b) の説明に先立って、用いた CW-S PTM について若干説明しておく：我々がこの材料を吸収体を選んだ理由は、第一に、開放チャンネルには光の反射を低減する光トラッピング能力があり、光から熱への変換性能が向上すること、第二に、秩序立った垂直孔チャンネルを持つため、水の輸送と蒸気の流れを効率的に促進すること、第三に、天然木材は低コストであり、簡単な熱分解法で得られる太陽光

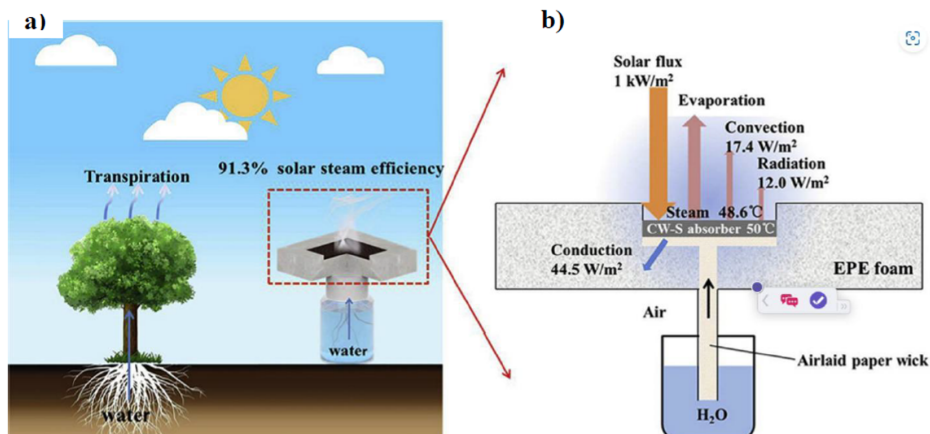


Fig. 9 植物の葉からの蒸散を模倣した DSSG（植物蒸散模倣 DSSG）の概略（a），及びその主要構成要素（（a）図の拡大部）の熱損失量評価（b）。

吸収率の高い黒体として利用できることからである。いずれも木材ならではの intrinsic な特性である。実際に本 CW-S は太陽集熱機能のみならず、その小さな熱伝導率（一般的に、乾燥状態：約 0.5 ~ 1.0 [W/mK]，湿潤状態：0.1 ~ 0.5 [W/mK]，我々の場合湿潤状態で ca 0.43 [W/mK]）から断熱材としての機能，さらに PTM の上を覆う蒸気の吸収機能も併せ持つ。

最後の機能の起因は以下の通り：PTM の分光放射率（吸収率）は中赤外～遠赤外域で高いので，温まった PTM を覆う発生水蒸気はその熱放射を吸収しながら温まる。一方，350 - 2,500 [nm] の範囲の水蒸気を透過した太陽光は PTM に結局吸収されることによる，いわゆる温室効果である。

Fig. 9b) では上述の様な熱的様相を取り入れて，伝熱工学的に評価（具体的方法は前出文献⁶¹⁾。ここに，PTM：50 °C，蒸気温度：48.6 °C と諸条件から推定。後の実証試験で良い推定と確認された）すれば，本 DSSG の理論的蒸発 energy 効率（蒸気発生に使われる energy と入射太陽 energy の比）は，1 [sun] (= 1kW/m² の太陽強度) の照射で ca. 92.5% となる。ここに，蒸発に使われる energy は Fig.9b) から，1,000 - (17.4 + 12.0 + 44.5) = 925.3 [W/m²] と算出される。この理論値は実験値 91.2% から ca 1.3% 程度過剰となる。しかし，この程度の差異なら simulation は概ね妥当と見なされよう。

木材モノリスを 500°C で 4 時間，2°C / 分の速度でチューブ炉内で炭化し，その後数回の脱イオン水での洗浄後，蒸気生成実験のために 20 × 20 × 1 (厚さ) [mm] のスライスに切り乾燥させた試料 500CW-S の蒸発速度は，1 [sun] 照射で 1.45 [kg/m²h]，及び 3 [sun] の下では 4.03 [kg/m²h] であり，CW PTM が太陽蒸気生成に優れた性能を持っていることを示した。尚，集光度が上がれば蒸発速度が上がり，ほぼ間違いなく，先に述べた蒸発限界 1.47 [kg/m²h]⁶⁰⁾ をいとも簡単に越えることは，前出の Gasheme 等の文献⁵⁹⁾ でも示された，半ば DSSG の特性とも言える。用いた材料に関して言えば，温度 900°C で同じ process で作製された 900CW-S 試料よりも，500 CW-S が親水性が高く，かつ孔径が大きいため，より高い蒸発速度を持つ。

以上纏めると，CW-S を利用する“植物蒸散模倣 DSSG system”による記録的な高い太陽蒸気発生 energy 効率は，以下の 3 つの要因による：

- ①植物蒸散模倣 system の熱管理と PTM を覆う蒸気の温室効果により，熱損失を効率的に削減す

ることが出来たこと

- ②高い太陽光吸収率を実現出来たこと

- ③蒸発プロセスでの蒸気の流れを確保するための開放孔と垂直 channel が有効に働いたこと

次に，我々は，もう少し簡単で安価な PTM を用いる“植物蒸散模倣 (MTS) DSSG system”を構築し，それが蒸発速度や蒸気発生効率を，どの程度まで到達できるか実験的に確かめた^{62-i, ii)}。これら論文も評価が高く，前出文献⁶²⁻ⁱ⁾ の citation 数は 2018 年の発刊時から 2024 年末迄に 86，及び前出文献⁶²⁻ⁱⁱ⁾ の発刊時からのそれは 111 である。前者の文献⁶²⁻ⁱ⁾ では nano カーボンブラック粒子 (NCBPs) を含む安価な市販インク (nano carbon ink : NCI) を利用して，NCBPs を二段階の超音波処理により，柔軟な filter paper に堆積させ，優れた太陽光吸収率 (約 95%)，優れた水輸送能力，さらには十分な柔軟性と安定性を持つインク染色紙 (ISP-ブラック) を作製し，それを PTM とし，前述と同様の不織紙で作られた 1D 水路を採用した，いわゆる“植物蒸散模倣 (MTS) DSSG system- mark- II” (MKII) を構築した⁶²⁻ⁱ⁾。実験室での 1 [sun] 照射下で，安定した蒸発速度 1.25 [kg/m²h]，および蒸気発生 energy 効率 85.8% を，一方 3 [sun] 照射下で，安定した蒸発速度 3.70 [kg/m²h]，及び，蒸気発生 energy 効率 85.5% を確認できた。後者の文献⁶²⁻ⁱⁱ⁾ は次項で説明する。

7-1-4 水処理実証実験結果

この MKII を scale up した屋外 proto type の“太陽蒸留システム”を組み上げて，学内の池の水を浄水に変える水質浄化実験を行った⁶²⁻ⁱ⁾。詳細は原論文を御参照頂くこととして結果のみ記載する。その浄水生産能力は 8 時間の晴天時屋外暴露で 1.24 [kg/m² d] に達した。同時に，重金属イオンで汚染された水の脱塩および浄化実験を実験室規模（太陽光照射：1 [sun]，ICP 測定は少量の蒸発水で充分なので照射時間は数十分以下）で行い，重金属群と塩類の有害物質除去機能の優秀さも Fig.10 で確認した。

処理前後の各イオンの濃度 [mg/L] の比較を標示し，処理前の原水中濃度は重金属，及び塩類に対して，夫々 1500 [mg/L]，及び 1,000 [mg/L] に調整された。水処理後，総ての重金属イオンの濃度は 1 [mg/L] 以下になり，飲料水中の重金属イオンに関する中国政府標準 (GB5749-2006) の要件を満たした。脱塩では，各元素の濃度が大幅に減少し，膜分離（残留濃度：10 ~ 500 ppm）および蒸留（残

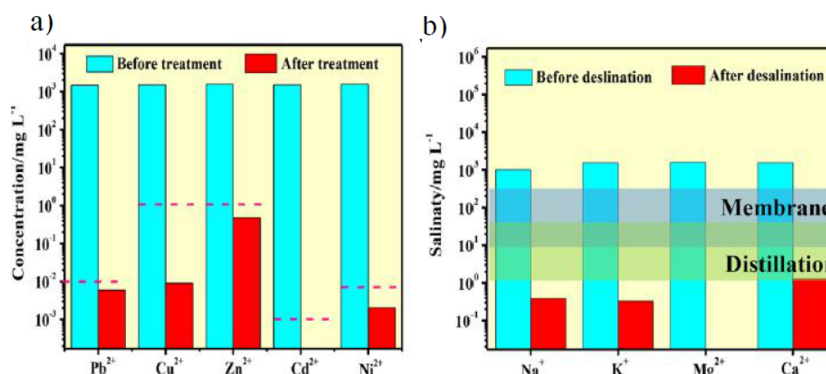


Fig. 10 MTS-MKII DSSG の水処理能力試験結果：a) 重金属，b) 塩類.

留濃度：1～50 ppm）によって得られた値以下，またはその近くであることが判る．尚，総ての実験は，気温 26° C，湿度 60% の環境で実施された．

結局，ISP-ブラックは，PTM シートとして安価で容易に製造可能な柔軟材料であるが故に，これと前項 3 の MTS 水路を組み合わせる蒸発器は simple な構成にでき，かつ，その柔軟性から，実際の用途状況に応じた様々な形状の支持構造材（例：円筒形蒸発器等の非平坦基板）に利用可能で，排水処理の広範な需要にも適用できる見通しを得た．

次に，我々は MKII の PTM 以上の高性能 PTM を目指す改良を文献⁶²⁻ⁱⁱ⁾ で図った．ここでは，蒸気の ink 染色法を 3D 基材であるポリビニルアルコール（PVA）sponge に適用し，2×2×1（厚さ）の size で，三層のエンボス構造の NCI（ナノカーボン・インク）染色 PVA スポンジを作製し，それを PTM として使用した．水路には引き続き“植物蒸散模倣 MTS 1D”水路を用いた．言わば，前の“MK II”から進化させた“MKIII”とでも名付けられよう．詳細は文献⁶²⁻ⁱⁱ⁾ に譲るが，その性能は，1 [sun] の照射で高い蒸発速度 2.15 [kg/ m²h] を得た．その結果，新鮮な淡水の収量は最大で 1.24 [kg/ m² 日] に達した．混合有機染料や生活排水を処理する優れた能力も示した．この結果から，エンボス構造を有するナノインク染色 PVA スポンジは，発展途上地域や遠隔地における水浄化の実用化に向けて，持ち運び可能なソリューションを提供できると考えている．最後に，PTM を 3D 構造にした merit を強調した漫画を Fig. 11 に示す．三層のエンボス構造の NCI 染色 PVA スポンジ PTM の SEM による構造写真（拡大含め）も，円内と右下に示される．網目構造が MTS-MKI や MTS-MKII より一層明瞭になっており，水路となる導管も炭化木質材料並みに明確な構造を持つ．SEM 像から PTM の網目の大きさは ca. 10–60 [μm] と分散する．

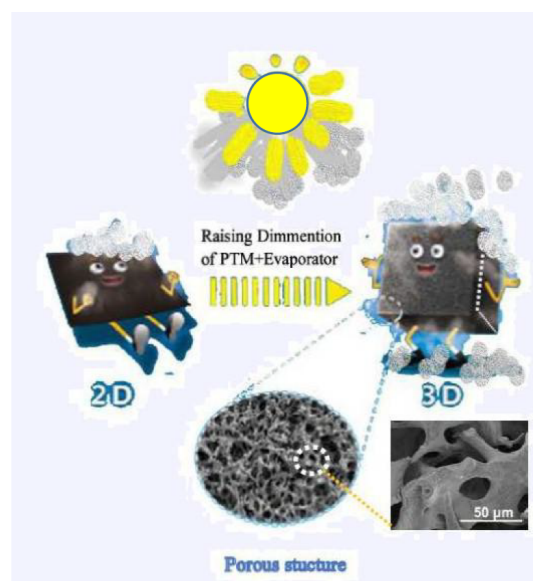


Fig. 11 3D エンボス構造の PTM の merit を示す漫画（2D と 3D の PTM を Boxer に擬人化）.

8. 結言（若い研究者への老人からの encouragement)

太陽熱 energy 技術の世界規模，及び日本での重要性は，たとえ太陽光発電技術や他の低排出電源技術が完成したとしても，過去から未来にわたって変わるもので無い．その理由は，先ず第一に熱力学原理に根ざした必然性からである．即ち，エントロピーが最低（最高品位）の光エネルギーを，低エントロピーの電気エネルギーに何割かの変換ロスを伴って変換し，その電気エネルギーを Fig. 2 に list up した類縁技術とその応用分野，あるいは文中に述べた産業プロセスにある様な温度 level の熱 energy（高 entropy で低品位）として再転換して利用するのは，カルノーサイクルの原理に基づくと，熱力学の第二法則（孤立系のエントロピーは自然に増大し，エネルギーは不可逆的に一方向に energy 損失を伴ってのみ変換されるため，エネルギー効率は著しく低下し，結局完全なエネルギー変換は不可能であるとす

る)に逆らう、最も効率の悪い利用法となる。結局、energyの最終形態としての熱利用には、折角大枚はたいて達成した低排出電源を使うのではなく、太陽光から必要な温度レベルの熱エネルギーを直接変換することが物理法則に適った利用法となる。

では、一体 end-use として 2050 年にどの程度の熱 energy 需要が世界規模で予想されているか考察してみる。IEA report 群⁶³⁾の解析からは、NZE (= Net Zero Emissions by 2050 Scenario: 2050 年までに全世界のエネルギーセクターがネットゼロ CO₂ 排出を達成し、気候変動に対する国際的な取り組みの一環としての地球温暖化を 1.5℃以下に抑えることを実現するために、各国の取り得る政策・対策を総動員する最も厳しい) scenario においても、世界の電力需要は、人口増加や所得の増加、global south と呼ばれる国や Africa での急速な経済発展、最終需要の各セクター(産業部門、家庭・事業所・商業・公共施設部門、輸送部門、及びその他部門(農業・水産業・林業・畜産業等))での最終用途での電化の増加・促進、さらには、IT や AI、ビットコイン、それらのための data センターの必要性等の新興技術の急速普及もあって(この部分の電力消費増加は NZE senario で全体の 10-15%と推定されている)などから、2050 年までに現在のレベルから電力需要は ca. 2.5 倍程度まで増大する。但し、その増大分を賄うためには、化石燃料では無く、風力や PV などの再生可能 energy の台頭・成長、及び、電気自動車、ヒートポンプなどの技術の急速進展による energy 効率改善や低排出燃料化が進むことから、電力供給システムそれ自身が再構築されると予測している。即ち、再生可能 energy 依存を senario 全体で強調する報告となっている。

また、世界の energy 需要において、最終形態の中で熱 energy (電気 energy の再転換分を除いた、石油製品、天然ガス、石炭、バイオ・waste 燃料等の燃焼により冷暖房空調、調理・給湯、工業プロセス熱に変換される)、輸送用動力燃料(航空、海運、長距離輸送などで使用される石油製品、液体燃料等)、及びその他の energy (水素など)(これは現在も、さらに 2050 年に到っても、その寄与は少ない見込み)を合算)の割合は約 80% (2010) ~ 約 77% (2022) ~ 約 48% (2050 年、NZE senerio) と、依然として高水準にあると予測できる。

その結果、① 2022 年と 2050 年の最終的な energy 消費量は 122 [PWh]、及び約 134.6 [PWh]、② 2022 年と 2050 年の消費電力 energy は 28[PWh]、

及び約 [70 PWh]、③ 2022 年と 2050 年の運輸輸送燃料量は約 11.3 [PWh]、及び約 20 [PWh]、④ 結局、2022 年と 2050 年の熱 energy 消費量の最低値は 82 [PWh]、及び 44.6 [PWh] と見積もられる。実際には電力 energy から熱 energy への再転換分(全消費電力の中でどの程度の割合を占めるかはシナリオや地域によって異なるが、現在一般的には、産業プロセス熱は産業 sector の電力消費の約 20-30%、一方家庭・事業所・商業施設・産業の冷暖房や給湯等の熱 energy 転換はその sector の電力消費の約 40-50%と言われている(前出文献^{63-ii,iii)})。但し、2050 年にこの比率がそのまま通用するかどうかははなはだ疑問で、むしろ drastic ではないものの低下するとの見方もある(前出文献⁶³⁻ⁱ⁾) が、終局的な熱 energy 需要は前記の値 (82 [PWh] (2020)、及び 44.6[PWh])を超えることは確実に見込まれる。いずれにしても、熱 energy 需要は相当大きいことは確かである。

ここから世界を俯瞰的に捉えれば、過去～現在～未来に亘って人類社会での熱 energy の大きな需要は確実に存在するということである。その中でも Fig. 4 に関連して述べた太陽熱 energy 技術の得意とする温度 level への需要も決して小さくないので、本節最初に述べた物理原理からして、太陽熱 energy が世界の熱 energy 需要に対して重要な供給源の役割を担うことは、当然あってしかるべきことと帰結される。

では、世界規模で現在どの程度 energy 供給寄与を、太陽熱利用技術は担っているかを、IEA の最新文献⁶⁴⁾から考察する。2023 年の太陽熱利用 (S.Th)、風力 (Wind)、太陽電池 (PV)、地熱発電 (G.Th.)、及び太陽熱発電 (SThPG) の世界の供給量は、それぞれ 456 [TWh th]、856 [TWh el]、1805 [TWh el]、93 [TWh el]、及び 17 [TWh el] ([GWth] 単位は S.Th のみ、他は全て [GWel] 単位。)であり、太陽熱利用 (S.Th) の供給熱 energy 量を熱単位から電気単位に換算する。換算係数は発電効率になるので、発電方式の違いが出る。(一般には換算係数 0.35-0.45 と見込んでいる。ここでもその値を使う)、PV の約 7.6% ~ 10.1% 程度、風力の約 16.0% ~ 21.3% 程度で、地熱や太陽熱発電と比較して再生可能 energy の中で充分その役割を果たしている。

同 report によれば、2023 年現在で S.Th の設備容量が傑出して多いのは地中海に面した諸国(キプロス、ギリシャ、イスラエル、フランス領、トルコ、レバノン、パレスチナ、スペイン等)、続いてオー

ストラリア、中国、ヨーロッパ中西部（日射条件が悪い地域にも拘わらず！）、ブラジルとなる。またこの分野の市場成長が顕著な国として、英国（！）、モザンビーク、インド、南アフリカ、ギリシャ、メキシコ等々が列挙されている。残念ながら、この分野は、我が国においては、2000年代に入ってから成熟産業となって久しく、この ranking には見当たらない。尚、集熱器市場に関しても言及があり、高性能真空管型集熱器が58.47%、平板型高性能集熱器が33.6%、pool等の温水用の平板型集熱器（unglazed collector：集熱板表面に光選択吸収膜をつけないtypeや風防ガラスを付けないtype等の総称）が7.4%、及びその他が0.53%を占める。その他には、空気式集熱器0.28%、PV複合平板型高性能集熱器（0.2%：集熱と発電で全energy供給量が普通の平板型高性能集熱器のほぼ34倍期待できるとして現在相当の勢いでR & Dが進められている）、及び集光式集熱器（0.05%）が含まれる。尚、全体として大きな市場では無いが、空気式集熱器の市場規模では日本は世界2位となっている。これはこの分野で1970年代から牽引してこられた小泉尚夫博士（現（株）東洋ソーラーシステム研究所COE）の御功績と言える。

世界のSTh marketの中で、その利用が成長している分野として、①ヨーロッパを中心とする地域暖房給湯system（現在336の地域都市で1,909 MWth、内訳はヨーロッパが60%、その他40%（その他の中で中国93%、日本も1plant 0.9MWth 寄与））、②SIPH（工業process用太陽熱利用）分野。スペイン、フランス、及び中国で市場成長。その42%は集光式高性能集熱器による大規模system。適用分野は、化学プロセスや食品・農業プロセス（例えば、AI製造（ボーキไซด์をアルカリ処理する初期段階（250℃）と後半の濾過乾燥過程（100℃）において大量の熱energyが要る）、麦芽製造等）が挙げられる。

こうした世界の趨勢を見れば、我が国の“carbon neutral”への取り組みに際し、今後の更なる再生energy導入加速化は不可欠な施策であるが、その中で太陽熱利用は住宅・ビルの冷暖房給湯のみならず、SIPH分野でもっと考慮されて良いのではないかと考えるが、如何であろうか？

尚、詳述はしないが、IEAは2025年6月5日、世界エネルギー投資報告書⁶⁵⁾を発表し、経済の不確実性や地政学的緊張（Ukraineや中東の戦争等）にもかかわらず、クリーンエネルギー分野への投資

の急増により、2025年の世界全体のエネルギー投資額が過去最高の3兆3,000億ドル（2兆8,900億ユーロ）に達するとの見通しを示した。その中で、再生可能エネルギー、原子力、エネルギー貯蔵などのクリーンエネルギー技術には、化石燃料への予想投資額の2倍に当たる2兆2,000億ドルの投資が集まるとしている。特に、中国は世界の約3分の1を占めるまでに成長し、太陽光発電、風力発電、水力発電、原子力、バッテリー、電気自動車（EV）など幅広い技術に戦略的投資を進めている。クリーンenergy技術への大きな投資は、2025年時点の世界の潮流がこの方向に向かっていることを顕著に示す。

次に、SThを今後とも進めるために最も重要なcomponentである太陽集熱器に関する現状・課題点を、2021年のIEAレポート⁶⁶⁾と、他の文献⁶⁷⁾、⁶⁸⁾から摘出してみる。SHCDhW systemの導入目標（capacityの増加目標）と、その達成の為の提案が以下の様になされている：

- ① 地球温暖化を1.5℃に抑えるための施策の一つとして、『すべての利用可能なクリーンエネルギー技術の総動員、及び建物の脱炭素化のための技術と政策の急激かつ即時のシフトの必要性』を強調し、Mercure論文⁶⁷⁾では『SHC + DhW systemが住宅／ビルなどの建築での完全な脱炭素化において主要な役割を果たすことに疑いの余地は無い』と述べている。
- ② IEA SHC Vice ChairmanのHall氏の見積もり⁶⁸⁻ⁱ⁾によれば、結局IEAの上記温暖化抑制のsenario（NZE）に應えるために、世界でSHC + DhW system（給湯専用の太陽温水器含め）は2030年までに少なくとも4億台、2050年までに12億台が稼働している必要があると指摘している。またこの目標達成には2020年代に少なくとも約3億台の太陽熱温水システムを展開する必要があることも示唆した（現状は、2000年に1900万台、2010年に1.2億台、及び2020年に2.56億台が達成され、2030年の予想2.8億台としている（前出文献⁶⁸⁻ⁱⁱ⁾による）。
- ③ 数値が非常に高い理由を考察し、その一つは、2000年代までに設置された多くの低コストの太陽温水器（特に、農村部を中心に）が、運用寿命を迎え、2030年頃までに廃止されるので、供給熱energy維持のためにそれを代替せねばならない事も含まれよう。また、SHC + DhW（給湯）systemが1990年代から2015年頃迄に大きく伸びた（2000年にはせいぜい2千万台弱だったものが2億台に達した）理由は、そもそも中国の農村部での簡単な太陽温水器の大規模な普及が反映している（日本でも

1950 年 -1960 年代に似た状況があった)。その結果、2030 年には太陽熱の市場シェアが地球温暖化を 1.5℃に抑えるために必要な水準を大幅に下回る事も予想できる (Kramer & Haigh⁶⁹⁾ の言う “エネルギー技術展開の第二法則 (=壁)”)。

④ 上述の “壁” を乗り越えて、②の目標値を達成するためには、『技術的なブレークスルーにより新たな形態の SHCDhw system や NSE system の開発を進める』以外に策は無いこと。即ち、いわゆる従来技術の復興による太陽温水器の製造を増産させ普及化させる方法だけでは、農村部への普及に限られるからで目標達成は覚束ない。従って、都市部での市場拡大を target として進めねばならない。

⑤ SHC + Dhw system を都市部で普及させるため何をすべきか? となれば、真空管式の様な高性能集熱器の R & D とその生産 system の強化、吸収式冷凍機のさらなる効率化や他の冷却技術の R & D と普及化、PV 電池等との hybrid 化、さらには現代の AI や IT 技術と SHCDwh を hybrid 化した smart 化等々が必要な R & D target となる。

2024 年現在、世界上位 10 社 (ドイツ 4 社、イタリア 1 社、スペイン 1 社、及びアメリカ 4 社) に ranking される太陽熱給湯 system maker は、こうした新しい技術と innovation を推進する革新的なプレーヤーの一例である⁷⁰⁾。この後述べるが、日本がこうした世界潮流の “海流に乗れない状況” に置かれている現状を見るのは、SS 計画参加者として誠に辛く悲しい。

⑥ このような背景から、2022 年～2025 年の期間で IEA SHC Task 69 “Solar Hot water for 2030” が進行している⁷¹⁾。この中では 2 つの sub task a 太陽温水器 system、及び sub task b 太陽光発電 (PV) 自家消費型太陽温水器 system (PV と S 太陽温水器 hybrid 化) が活動している。この Task の OA は中国の He Tao 博士と Australia の Robert Taylor 博士であり、日本は参加していない。

翻って、日本の現状と問題点を私見として以下に挙げてみる：

① ソ振協の資料⁷²⁾ には強制循環式太陽給湯 (冷暖房も極めて少ないが統計には count されている) system と太陽温水器の設置実績 (1973 ～ 2023 年) が示されている。そこでは、前者は後者に比べて、積年ベースで 20%、直近では 13% と圧倒的に市場規模は小さい。市場への登場は SS 計画での SHC の初期開発がほぼ終わった 1980 年頃からで、市場の peak は 1983 年頃にあり、1990 年以降現在に致るま

で、極めて低調な市場で推移してきた。後者は 1980 年代前半に市場が急速に拡大し、1990 年代後半迄は市場の勢いがあったが、徐々に勢いを失って 2015 年以降は微々たる市場となっている。

③ 日本の 2020 年の全消費 energy 量は石油換算 0.265 億トン、全世界のそれは 133 億トンで、日本の消費量は世界のその約 0.2% と見積もられる。さすれば、荒っぽい言い方だが、本文に述べた Hall 氏の見積り (2020 年の全世界での設置目標台数 3 億台)⁶⁸⁻ⁱ⁾ の少なくとも 0.2% の太陽集熱器台数分の寄与 (597,000 台) が求められよう。前記の 2020 年迄の太陽温水器設置の積年台数 (3,456,699 台；ソーラシステムは太陽温水器に比較して、前述した程度なので count しない) が、全て現役で稼働しているとすれば、数字上は日本の国際貢献目標値の約 5.8 倍の台数に達し、全世界の消費 energy 低減にそこそこ寄与していると言えよう。但し、先の Hall 氏の懸念⁶⁸⁻ⁱ⁾ である system の寿命とその交換・代替の問題の解決が図られなければ、日本の今までの世界貢献は、“単なる過去の栄光の歴史” として語られるだけとなる。事実、6 節に紹介した我が家の強制循環式給湯機器の failure を見ると、機器 maintenance をしっかりやらなければ、機器寿命は甘く見積もってせいぜい 30 年程度ではないかと懸念される。この程度の寿命ならば、1990 年代に設置 peak であった太陽温水器の寿命はほぼ尽きかけていることになる。この点については機器 maker、或いはソ振協の見解を伺いたいと思う。私が間違っていれば、キツくお叱り下さい。

④ 最後に、最近の日本市場の低調さが今後も続けば、2030 年は未だしも 2050 年代には、先に述べた世界貢献への list up は覚束なくなると危機感を持っている。幸いにして東京都の「熱と電気の有効利用促進事業」(令和 7 年度予算：702 億円)、及び経産省の「給湯省エネ 2025 事業」等の補助事業もある現在、異業種参加を含めた元気ある makers による日本市場の再活性化を期待したい。

さて、少々話が pesimistic になったので、最後に太陽熱 energy 技術の innovation に関して、若い研究者・技術者にとっても魅力的で positive な方向に、国際社会は動いていることを紹介しておく：

① 4 節で説明した IEA SHCP⁸⁾ (太陽冷暖房プログラム) は、Task 65 “Solar cooling for the sunbelt region” から Task 73 “PVT heating system” まで 9 本の国際共同研究が進行している。Task 69 については『太陽集熱器に関する問題点』の⑤で紹介し

た。その扱う太陽熱技術も Agriculture, Historic Buildings, Water Heating, Space Heating, Heat Pumps, Building Integrated, Passive Solar Buildings, Zero Energy Buildings, Urban Planning, Cooling, Large Systems, District Heating, Process Heating, PV/Thermal, Photovoltaics (住宅・ビル), Daylighting, Lighting, Collector Components, Collector Performance, Collector Testing & Rating, Standards & Certification, System Components, System Performance, Storage, Design Tools, 及び Resource Assessment と 27 分野に広がっている。

② また、私の専門分野の国際学術誌・国際学術会議から窺い知れる、太陽熱技術を包括する基礎研究及び応用実証研究では、keywords のみを紹介すると、7 節で取り挙げた DSSG 始め、高温超耐久性光選択吸収膜、dual 機能調光薄膜、Dual-Purpose Solar Collector, 熱電素子 (TE) 組み込み集熱器 (TE-SC) による熱電気併給、solar thermoelectricity-freshwater cogeneration (太陽熱電併産による淡水・電力同時生成)、high ZT 熱電素子、TE-SC integrated super capacitor, TE wearable 発電機、PV integrated super capacitor 等々の材料科学の分野を中心に活発な研究活動が進捗している。

このように、国際的には太陽熱利用研究は SS 計画開始時期よりも、その platform をますます大きく (国際的な連携・共同を図る) して活発化している。このような世界の趨勢を日本の研究者、特に本学会員の若手研究者の方々には、“ガラパゴス化を脱する好機”と捉えて、『innovation を目的とした国際 platform が形成出来る、先進太陽熱利用の研究を牽引していただきたい』が、この分野で 50 年強研究活動を展開し、今まさに研究の第一線を退きたい私の願いである。ご健闘をお祈りしています。

謝辞

冒頭述べた様に回折結晶学を専門としていた私を、光選択吸収膜の光学機能材料としての面白さを語って、この道に誘って下さった故野口哲男博士には、感謝してもしきれません。また、この新しい研究に飛び込むことを「国の重要プロジェクト SS 計画に参加出来るなどということは、研究者にとって希有な chance。研究予算も潤沢な様だから、しっかり新しい分野で泳ぎなさい」と encourage していただいた、大学・大学院での指導教授 X 線結晶学の世界的泰斗 故加藤範男先生、及び電子顕微鏡学

の世界的権威 故上田良二教授のお二人にも、深甚な感謝を捧げます。また、現在までの 52 年間、「太陽熱利用分野での機能材料創製とその物性」の研究を支えて頂いた、NIRIN の研究者群 (五十嵐博士、金平博士、故小坂博士、山東博士、多井博士、田澤博士、田尻博士、三木博士、村上博士、故早川博士、故藤井主任研究官、山田博士、及び吉村博士)、名工大 (種村真幸教授、皆合博士、森博士)、ファイナセラムックスセンターの Fisher 博士、及び名工大+ファイナセラムックスセンター+中国での共同研究者 苗蕾教授 (現広西大学物理科学与工程技術学院教授) にも感謝申し上げます。また、外国の共同研究者群 (特に、元 Sydney 大学の Collins 教授、カナダ Concordia 大学 Truong 教授、アメリカ Star Science (元 UC バークレー) の Lampert 博士、Uppsala 大学の故 Granqvist 教授、FhG Freiburg の Willson 博士) にも大変お世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 産工会 web site : 『AIST 秘話』, “SS 計画での太陽熱利用 system の R & D (名工研)”, [https://sankoukai.org/wp4/AIST % E7% A0% 94% E7% A9% B6% E7% A7% 98% E8% A9% B1/](https://sankoukai.org/wp4/AIST%E7%A0%94%E7%A9%B6%E7%A7%98%E8%A9%B1/),
- 2) 久田太郎氏の本業績に関して一部記載があるのは、太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編, “太陽エネルギー利用ハンドブック (初版)”, pp482, 日本太陽エネルギー学会, 東京, 1985,
- 3) 名古屋工業技術協会 (名古屋工業技術試験所協会) 刊, “名古屋工業技術試験所 25 年史”, 1978,
- 4) 産総研中部センター刊, “名古屋工業技術研究所 50 年史”, 2003,
- 5) 野口哲男, “超高温セラミックス材料の作成”, 日本結晶学会誌, 16, 288-293, 1974,
- 6) 野口哲男, i) “太陽炉”, 耐熱材料ハンドブック (今井, 河嶋編), pp 1005-1011, 朝倉書店, 1965, ii) “太陽炉”, 新しい工業材料の科学--超高压超高温の物性と応用 (河嶋編), pp 268-288, 金原出版, 1967, iii) “輻射加熱炉の利用”, 実験化学講座続 (I), pp 484-494, 丸善, 1966,
- 7) サンシャイン計画 10 周年記念事業工業技術院実行委員会編, “サンシャイン計画 10 年の歩

- み”, 1984, 産業技術振興協会刊, i) “第 II 章「新エネルギー技術研究開発の展望」第 1 節「太陽エネルギー」”, pp 51- 260, ii) 同, “第 4 項「太陽ソーラーシステム」”, pp207-260,
- 8) IEA SHC Program, i) <https://www.iea-shc.org/about> (Program 全体, 参加国, 各 Task 成果物等), ii) <https://www.iea-shc.org/tasks> (SHCP 傘下の Task の題名, 内容 abstract, 参加国, 期間, 主たる成果物等),
- 9) O. Jorgensen Edt., *IEA SHCP Task 1 Report*, i) “Data requirement and thermal evaluation procedures for solar cooling and heating systems”, 1979, ii) “Modeling and simulation”, 1979, iii) “Optimization”, 1981, iv) “Validation of simulation models using measured performance data from Los Alamos Study Centre”, 1981, v) “Simulation program validation using domestic hot water system data”, 1982,
- 10) Task 1 に関して一例として：種村 榮, “ソーラーシステム評価法の世界的傾向, 太陽冷暖房システムに関する IEA TaskI の最近の活動”, *Solar Systems* (専門商業誌), No.8, pp 16-30, 1980,
- 11) T. Noguchi Edt/Compiled., *IEA SHCP Task 2 Report*, i) “Survey of component R & D projects for solar heating, cooling and hot water supply systems”, 1978, ii) “Survey of solar energy R & D projects for solar heating and cooling component”, 1980, iii) “Survey and Review of National R & D plan”, 1981 (これ以降, 毎年 1984 年迄刊行), iv) “Survey on commercialization of and experience with solar heating and cooling systems and component”, 1984,
- 12) H. Taralek Edt., *IEA SHCP Task 3 Report*, i) “Results and analyses of IEA round robin testing”, 1979, ii) “Survey of solar simulator test facilities and initial results of IEA round robin tests using solar simulator”, 1979, iii) W. Dokos, E. Aranovich, B. Gillett, *Conference proceedings paper for “European Commission and IEA joint workshop on solar simulators”*, Ispra, Italy, 9 Feb 1982, “Presentation of some US solar simulator characteristics”, 1982, ((Report Number : CONF-8202106, Reference Number : EDB-85-078184), US DOE, Office of Science,
- 13) S.Tanemura, *Technical Report for Task 3*, “Solar simulators for collector testing specifications and operating characteristics. Subtask C. Investigation of the potential of solar simulators : evaluation of the functional characteristics of the simulator”, 1983, (Report Number : NP-5901682, Reference Number : EDB-85-112087), US DOE, Office of Science,
- 14) P.V. Perdersen Edt., *IEA SHCP Task 3 Report*, i) “Failure modes of solar collectors”, 1981, ii) “Proc. of Workshop on service life of solar collector components and materials”, 1983,
- 15) B.A. Rodgers, *IEA SHCP Task 3 Report*, “Environmental factors of collector degradation”, 1987,
- 16) S. L. Harrison, *IEA SHCP Task 3 Report*, “The characterization and testing of solar collector thermal performance”, 1993,
- 17) Task 3 に関して一例として：i) 藤井 篤, 山東睦夫, 種村 榮, 野口哲男, “IEA -1 国際ラウンドロビンコレクター特性の再現性と試験法の妥当性”, *流体熱工学* (東海熱工学研究会会誌), **15**, 97-103, 1981, ii) 山東睦夫, 種村 榮, 藤井 篤, 野口哲男, “平板型集熱器の集熱特性”, *空気調和・衛生工学論文集*, No.17, 41-50, 1981,
- 18) K. Hayakawa, T. Noguchi, S. Tanemura, *IEA SHCP Task 10 Report*, “Working Document of Survey Research on Test Procedures and Measurement Techniques”, 1987,
- 19) S.Tanemura, K. Hayakawa Edt., *IEA SHCP Task 10 Report*, “Proc. IEA SHCP Task 10 Workshop on Material demand”, 1987,
- 20) C. Lampert, *IEA SHCP Task 10 Report*, “Failure and Degradation Modes in Selected Solar Materials : A Review”, 1989,
- 21) B. Carlsson, *IEA SHCP Task 10 Report*, “Survey of Service Life Prediction Methods for Materials in Solar Heating and Cooling”, 1989,
- 22) G. B. Brouwer Edt., *IEA SHCP Task 10 Report*, “Solar Materials Research and Development : Performance Criteria for New Solar Materials”, 1992, (ISBN : 91-7848-472-3),
- 23) B. Carlsson, U. Frei, M. Koel, K. Moeller, *IEA SHCP Task 10 Report*, “Accelerated Life Testing of Solar Energy Materials : Case Study

- of Some Selective Solar Absorber Coating Materials for DHW Systems, 1994,
- 24) C.M. Lampert, *IEA SHCP Task 10 Report*, "Glazing Materials for Solar and Architectural Applications", 2005,
 - 25) Task 10 に関して一例として：種村 榮, "IEA の太陽冷暖房システムに関する国際共同研究協定について, PartII", *太陽エネルギー (JSES 会誌)*, **19**, 2-14, 1993,
 - 26) K. Hinotani, K. Kanatani, O. Masato, "An evacuated glass tube solar collector and its application to solar cooling, heating and hot water supply system for the hospital in Kinki University", *Solar Energy*, **22**, 535-545, 1979,
 - 27) その集熱特性評価に関して：i) 山東, 藤井, 種村, 野口, "真空円筒式コレクターの集熱特性試験の問題点", *流体熱工学研究*, **15** [2], 89-96, 1981, ii) 山東, 藤井, 野口, 戸山, "真空ガラス管型太陽集熱器の集熱効率の理論計算", *化学工学論文集*, **11** [5], 548-554, 1985,
 - 28) 非常に文献が多いので, 主要文献として：i) G.L. Harding, D.R. McKenzie, B. Window, "DC sputter coating of solar-selective surfaces onto tubes", *J. Vac. Sci. Technol.*, **13**, 1073-75, 1976, DOI : <https://doi.org/10.1116/1.569076>, ii) G. L. Harding, "Sputtered metal carbide solar selective absorbing surfaces" *J. Vac. Sci. Technol.* **13**, 1070-1072, 1976, iii) I.T. Ritchie, G. L. Harding, "Sputtered metal carbide and metal silicide solar absorbing surfaces", *Thin Solid Films*, **37**, 315 - 320, 1976,
 - 29) 非常に文献が多いので, 主要文献として：i) Y. Zhiqiang, G.L. Harding, B. Window, "Water-in-glass manifolds for heat extraction from evacuated solar collector tubes", *Solar Energy*, **32**, 221-230, 1981, ii) Harding G.L., Moon T.T., "Evacuation and Deterioration of All-Glass Tubular Solar Thermal Collectors", *Solar Energy Materials*, **7**, 113-122, 1982, iii) R.E. Collins, "The Future for Evacuated Tubular Collectors", *Conference Paper : ISES Conference Brisbane 1982*, 1982, iv) G.L. Harding, T.T. Moon, "Evacuation and deterioration of all-glass tubular solar thermal collectors", *Solar Energy Materials*, **7**, 113-122, 1982,
 - 30) 山東睦夫, 藤井 篤, 種村 榮, 野口哲男, "真空断熱円筒形集熱器の集熱特性", *空気調和・衛生工学会論文集*, No.18, 63-75, 1982,
 - 31) JIS A 4112 : 2020, 『太陽集熱器』,
 - 32) i) 種村 榮, 吉村和紀, "パッシブソーラー素子", *サンシャインジャーナル (紀要)*, **1** [1], 25-33, 1990, ii) 種村 榮, "パッシブソーラー素子", *太陽エネルギー (JSES 会誌)*, **17**, p2-9, 1991, iii) 種村 榮, "パッシブソーラー利用のためのビル用新素材", *エネルギー・資源 (エネルギー・資源学会会誌)*, **12**, p241-246, 1991, iv) 種村 榮, "パッシブソーラー素子", *材料マニュアル (商業誌)*, No. 11, p 14-29, 2001, v) 種村 榮, "パッシブソーラー素子", *新エネルギー大事典 (茅陽一監修)*, (株)工業調査会 刊, pp223-233, 2002, vi) S.Tanemura, "Advanced Building Materials For Passive Solar Application", *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn*, **18A**, pp529-533, 1994,
 - 33) i) "Large Area Chromogenics : Materials and Devices for Transmittance Control", ed. by C. M. Lampert & C. G. Granqvist, SPIE Optical Engrg Press, Bellingham, Washington, USA, Part 4 (pp122-167), 1990, ii) C.M. Granqvist, "Handbook of Inorganic Electro Chromic Materials", Elsevier, Amsterdam, 1995,
 - 34) i) 河原秀夫, 齋藤靖弘, "光を制御するニューガラス", *応用物理*, **62**, [4], 343-351, 1993, ii) NSG Group 100th Anniversary Website, People & Technology, Story10 "UMU, utilizing the characteristics of liquid crystals", <https://100th.nsg.co.jp/story/10/?form=MG0AV3>,
 - 35) 例えば, 経済産業省生活産業局編, "ゆとりと豊かさの快適住宅のために", 工業調査会刊, 1990,
 - 36) 塩沢文郎, "産業分野, 熱エネルギーの脱炭素化 - 電化と水素エネルギーの重要性と可能性", *太陽エネルギー*, **46** (No.3), 48- 58, 2020, <http://id.ndl.go.jp/bib/030479077>,
 - 37) i) 新エネルギー産業開発機構 (NEDO) 委託 "『調光材等の研究開発 (冷暖房等代替エネルギー量シミュレーション)』平成2年度報告書 (1991)", NEDO, 東京, (1991), ii) "同名書, 平成3年度報告書 (1992)", NEDO, (1992)
 - 38) 宿谷昌則, "数値計算で学ぶ光と熱の建築環境

- 学”，丸善，東京，1993，第6章2節「窓と自然室温：窓の熱収支」，pp167-207，及び，第7章5節「建築の光環境・熱環境評価，コンピュータによる窓システムの解析」，pp228，図7-16，
- 39) 世界省エネルギー等ビジネス協議会+（一財）省エネルギーセンター，“国際展開技術集 2024 (JSES World 2024)”，“Low-e 複層ガラス (O- 01)，AGC”，<https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies-j/pdf/office/O-01.pdf>，
- 40) K. Yoshimura, Y. Yamada, M. Okada, “Optical Switching of Mg-rich Mg-Ni Alloy Thin Films”, *Applied Physics Letters*, **81** [25], 4709-4711, 2002,
- 41) 吉村和紀，“省エネルギー特性に優れた調光ミラーガラスの創製”，*応用物理*，**79** [7]，628-632，2010，
- 42) K.Yoshimura, Y. Yamada, “Development of gasochromic sheets using thin-film switchable mirror coatings”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **273**, 112949 (文献番号)，2024，<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112949>
- 43) 浅田秀男，田澤真人，金平，“熱応答型調光ガラスが照明・暖冷房に及ぼす影響に関する数値解析”，*日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 分冊*，659-660，2004，<https://scripts.aij.or.jp/scr/annual/annual.asp>，
- 44) 種村，“T・S－省・太陽エネ住宅の仕様と年間エネルギー節約”，*太陽エネルギー*，**24**，29-43，1998，
- 45) R. Hastings, “*Solar Low Energy Houses of IEA Task 13*”，James & James Science Publishers, London, 1995 (ISBN- 1-873936-37-0)，
- 46) i) IEA, “*Key world energy statistics 2020*”，2020，“<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/final-consumption>”，及び“<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>”，ii) IEA, “*Data & Statistics*”，(2023 Nov. 21) + (2) “<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-efficiency-indicators#complete-database>” (2024) + (3) Tables Senario Projection, (2023 Oct.23), Total Final Consumption, A2 World final energy consumption. “<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-outlook-2023-free-dataset-2#data-files>”，
- 47) 資源エネルギー庁，総務課戦略企画室編，“令和4年度（2022）におけるエネルギー需給実績（確定値）”，https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2022fykaku.pdf，
- 48) 穴田和喜，“太陽熱利用～最新の導入状況・事例と効果”，ソーラシステム振興協会再生可能 energy 熱利用 system on line symposium 資料 (p6-7)，2022，https://www.ssda.or.jp/files/news/saienesympo_3_taiyonetsu.pdf，
- 49) 野上正行，“ガラスへのガス透過”，*New Glass*，**30**，34-37，2015，
- 50) i) T. Minaai, M.Kumagai, A.Nara, S.Tanemura, “Study of the outgassing behavior of SnO₂ : F films on glass in vacuum under external energy excitation”, *Materials Science and Engineering : B*, **119** (2005) 252-257, ii) T.Minaai, M. Kumagai, A.Nara, S.Tanemura, “Adsorption and desorption properties on the fluorine doped tin oxide film surface on a glass substrate under UV light irradiation in vacuum”, *Vacuum*, **80**, pp957-961, 2006, iii) 皆合哲雄，名古屋工業大学博士論文“断熱複層真空ガラスにおける SnO₂ : F 膜表面でのガス吸脱着機構の解明に関する研究”（指導教官：種村 榮），2006，
- 51) 加藤和彦，吉富政宣，北側孝太郎，“PV R_{ess}Q: PV, Reliable, Safe and Sustainable Quality データ計測調査報告 Case file #073 愛知県名古屋市 (1)，(2010.12.27 作成)”（加藤氏から私信），
- 52) 例 え i) E.D.How, B.W. Tleimat. “Twenty years of work on solar distillation at the University of California”. *Solar Energy* , **16** (2) , 97-105, 1974, ii) T. Hetal K., D.V. Bhatt. “Renewable resources used for seawater desalination”. *Int. J. Adv. Engineering Res. & Studies*, **1** (1), 35-41. 2011, iii) L. Garzia-Rodriguez. “Seawater desalination driven by renewable energies : a review”, *Desalination*, (143), 103-113, 2002, iv) J. S. Mehta, “*Impending Power Demand and Innovative Energy Paths*”，pp143-156 (A Comparative Study of Sea Water Desalination Technologies Driven By Solar Power), ISBN : 978-93-83083-84-8, v) R. Alrowais, M. W. Shahzad, M. Burhan , M.T. Bashir , Q. Chen , B. B. Xu , M. Kumja , C. N. Markide , Kim Choon Ng, “A thermally-driven seawater desalination system : Proof of concept

- and vision for future sustainability”, *Case Studies in Thermal Engineering*, **35**, 102024, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102084>, vi) 前出文献 2) , Ch.10, pp849 - 867,
- 53) i) O. Neumann, A. S. Urban, J. Day, S. Lal, P. Nordlander, N. J. Halas, “Solar vapor generation enabled by nanoparticles”, *ACS Nano*, **7**, 42-49, 2013, https://www.researchgate.net/profile/Oara-Neumann/publication/233534551_Solar_Vapor_Generation_Enabled_by_Nanoparticles/links/5cc9b33992851c8d2213e01d/Solar-Vapor-Generation-Enabled-by-Nanoparticles.pdf, ii) O. Neumann, C. Feronti, A. D. Neumann, A. Dong, K. Schell, B. Lu, E. Kim, M. Quinn, S. Thompson, N. Grady, P. Nordlander, M. Oden and N. J. Halas, “Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles”, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **110**, 11677–11681, 2013,
- 54) H. Ghasemi, G. Ni, A.M. Marconnet, J. Loomis, S. Yerci, N. Miljkovic, G. Chen, “Solar steam generation by heat localization”, *Nat. Commun.*, **5**, 4449, 2014, <https://doi.org/10.1038/ncomms5449>,
- 55) i) Z. Wang, Y. Liu, P. Tao, Q. Shen, N. Yi, F. Zhang, Q. Liu, C. Song, D. Zhang, W. Shang, T. Deng, “Bio-Inspired evaporation through plasmonic film of nanoparticles at the air-water interface”, *Small* **10** (16), 3234–3239, 2014, <https://doi.org/10.1002/sml.201401071>, ii) D.W Zhao, H.Z. Duan, S.T. Yu, Y. Zhang, J. Q. He, X. J. Quan, P. Tao, W. Shang, J. B. Wu, C. G. Song & T. Deng, “Enhancing Localized Evaporation through Separated Light Absorbing Centers and Scattering Centers”, *Scientific Reports*, **5**, 17276 , 2015, DOI : 10.1038/ srep17276,
- 56) A.H. Cavusoglu, X. Chen, P. Gentine, O. Sahin, “Potential for natural evaporation as a reliable renewable energy resource”. *Nature Communications*, **8**, 617 (Article number), 2017, <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00581-w>,
- 57) S. M. Sajadi, N. Farokhnia, P. Irajizad, M. Hasnain, H. Ghasemi, “Flexible artificially-networked structure for ambient/high pressure solar steam generation”, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 4700–4705, 2016, <https://doi.org/10.1039/C6TA01205A>,
- 58) i) Z. Y. Deng, J. H. Zhou, L. Miao, C. Y. Liu, Y. Peng, L. X. Sun, S. Tanemura, “The emergence of solar thermal utilization : solar-driven steam generation”, *J. Mater. Chem. A* , **5**, 7691-7770, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7TA01361B>, ii) J. H. Zhou, Y. F. Gu, P. F. Liu, P.F. Wang, L. Miao, J. Liu, A. Y. Wei, X. J. Mu, J. L. Li, J. Zhu, “Development and Evolution of the System Structure for Highly Efficient Solar Steam Generation from Zero to Three Dimensions”, *Adv. Funct. Mater.*1903255-75 (20pages), 2019, doi : 10.1002/adfm.201903255, iii) X.J. Mu , Y. F. Gu , P. F. Wang , A. Y. Wei , Y. Z. Tian , J. H. Zhou , Y. L. Chen , J. H. Zhang , Z. Q. Sun , J. Liu , L. X. Sun , S. Tanemura, L. Miao, “Strategies for breaking theoretical evaporation limitation in direct solar steam generation”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **220**, 110842, 2021,
- 59) i) X. Wu, G.Y. Chen, G. Owens, D. Chu, H. Xu, “Photothermal materials : a key platform enabling highly efficient water evaporation driven by solar energy”, *Mater. Today Energy*, **12**, 277–296, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2019.02.001>, ii) M. Gao, L. Zhu, C.K. Peh, G.W. Ho, “Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production”, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 841–864, 2019, <https://doi.org/10.1039/C8EE01146J>, iii) P. Tao, G. Ni, C. Song, W. Shang, J. Wu, J. Zhu, G. Chen, T. Deng, “Solar-driven interfacial evaporation”, *Nature Energy*, **3**, [12], 1031-1041, 2018, iv) P. Zhang, Q. Liao, H. Yao, Y. Huang, H. Cheng, L. Qu, “Direct solar steam generation system for clean water production”, *Energy Storage Mater.* **18**, 429–446, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.10.006>, v) X. Hu, J. Zhu, “Tailoring aerogels and related 3D macroporous monoliths for interfacial solar vapor generation”, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1907234, 2020, <https://doi.org/10.1002/adfm.201907234>, vi) F. Zhao, Y. Guo, X. Zhou, W. Shi, G. Yu, “Materials for solar-powered water evaporation”, *Nat. Rev. Mater.*,

- 5, 388–401, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0182-4>, g) 前出文献 55),
- 60) X. Li, J. Li, J. Lu, N. Xu, C. Chen, X. Min, B. Zhu, H. Li, L. Zhou, S. Zhu, T. Zhang, J. Zhu, “Enhancement of interfacial solar vapor generation by environmental energy”, *Joule*, **2**, 1331–1338, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.004>.
- 61) P. F. Liu, L. Miao, Z. Y. Deng, J. H. Zhou, H. Su, L. X. Sun, S. Tanemura, W. J. Cao, F. G. Jiang, L. D. Zhao, “A mimetic transpiration system for record high conversion efficiency in solar steam generator under one-sun”, *Mat. Today Ene.*, **8**, 166–173, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.04.004>,
- 62) i) Z. Y. Deng, P. F. Liu, J. H. Zhou, L. Miao, Y. Peng, H. Su, P. F. Wang, X. Y. Wang, W. J. Cao, F. M. Jiang, L. X. Sun, S. Tanemura, “A Novel Ink-Stained Paper for Solar Heavy Metal Treatment and Desalination”, *Sol. RRL.*, **2** [10], 1800073 (paper No, 9 pages), 2018, doi : 10.1002/solr.201800073, ii) Z. Y. Deng, L. Miao, P. F. Liu, J. H. Zhou, P. F. Wang, Y. F. Gu, X. Y. Wang, H. F. Cai, L. X. Sun, S. Tanemura, “Extremely high water-production created by a nanoink-stained PVA evaporator with embossment structure”, *Nano Energy*, **55**, 368–376, 2019,
- 63) i) Int. Energy Agency (IEA), “*World Energy Outlook 2023*”, 2023 Nov. 15, OECD, Paris, ii) IEA, “*Key world energy statistics 2020*”, 2020, “<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/final-consumption>”, 及び “<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>”, iii) IEA, “*Data & Statistics*, (2023 Nov. 21) + (2) “<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-efficiency-indicators#complete-database>”, (2024) + (3) Tables Senario Projection, (2023 Oct.23), Total Final Consumption, (A2) World final energy consumption“, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-outlook-2023-free-dataset-2#data-files>”, iv) IEA Special Report “*Strategies for Affordable and Fair Clean Energy Transitions*”, 2024 May, “<https://www.iea.org/reports/strategies-for-affordable-and-fair-clean-energy-transitions>”.
- 64) W.Weiss, M. Spoesk-Duer, “Solar Heat World Wide 2024 version”, *IEA SHC report on Global Market Development and Trends 2023*, doi : 10.18777/ieashc-2024-0001
- 65) IEA, *世界エネルギー投資報告書 2025*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2025>,
- 66) IEA, “*Net Zero by 2050 : A Roadmap for the Global Energy Sector*”, 2021, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoad>
- 67) Mercure, J.-F. *et al.* “Reframing incentives for climate policy action”, *Nature Energy*, **6** [12], 1133–1143, 2021, doi : 10.1038/s41560-021-00934-2,
- 68) i) R. Hall, “Opinion : On 400 Million Residential Solar Water Heaters by 2030”, *IEA Task 69 Data*, 2022, <https://task69.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/2022-07-400-Million-Residential-Solar-Water-Heaters-by-20301.pdf>, ii) “Solar thermal technologies deployed in around 400 million dwellings by 2030”, *IEA, Repot 2022*, www.iea.org/reports/solar-thermal-technologies-deployed-in-around-400-million-dwellings-by-2030?formCode=MG0AV3,
- 69) G.J. Kramer, M. Haigh, “No quick switch to low-carbon energy”, *Nature*, **462**, 568–569, 2009,
- 70) <https://www.verifiedmarketreports.com/ja/blog/top-10-companies-in-solar-water-heaters/>),
- 71) IEA SHC Task 69, <https://task69.iea-shc.org/?formCode=MG0AV3>,
- 72) ソーラシステム振興協会, “太陽熱を学ぶ, 設置実績”, <https://ssda.or.jp/result/>,

著者略歴



種村 榮 (タネムラ サカエ)

工学博士 (名古屋大, '71), Bristol 大 ('71-'73), 豊田理化学研究所 ('71-'74), 名古屋工業技術研究所 ('74-'00), 名古屋工業大 ('00-'06, '06-'14), JFCC ('06 ~), 広州能源研究所 ('08-'14), 桂林電子科技大 ('15-'21), 広西大 ('22-'25), JSES 理事 ('86-'06), ISSES Treasurer ('98-'00)