

34

再生可能エネルギーを利用した空調システムの
エネルギー消費量及び CO₂削減効果の推定

Estimation of energy saving and CO₂ reduction by the use of renewable energy in air conditioning system

京都大学 矢野順也 浅利美鈴 平井康宏 酒井伸一

Kyoto Univ. Junya YANO, Misuzu ASARI, Yasuhiro HIRAI, Shin-ichi SAKAI

1. はじめに

中長期的な視点から、再生可能エネルギーを用いる等環境に配慮したエコキャンパスを立案していくことが重要である。その一方策として「エネルギー等の地産地消エコキャンパスに向けた地域協働モデル試行 ～低炭素化へのチャレンジプロジェクト～」(以下、地域協働モデル)を平成22年度より実施し、CO₂排出量削減に向けた先進的取り組みとして再生可能エネルギーを空調システム等で利用することが検討されている。再生可能エネルギーの空調への使用は京都大学及び国内他大学においては現状でほとんど取り組まれていないが、海外の大学ではバイオマスや自然エネルギーの積極的な利活用に取り組んでいる^{1,2)}。環境負荷低減への取り組みを一般に広くアピールし普及の一助とできることから、本実験を京都大学で実証することには意義がある。

バイオマスや太陽熱といった地域の再生可能エネルギーを利用したこの地域協働モデルの省エネ効果及びCO₂削減効果を明らかにすることを目的に実施した解析結果をここに報告する。本研究ではまず、化石資源由来エネルギー消費量とCO₂排出量の機器間比較を行い機器毎の特徴を整理した。その上で、宇治キャンパス宇治北4号館を想定したケーススタディによる解析を行った。

2. 研究内容

2.1 地域協働モデル実験概要

本モデルの導入施設は京都大学宇治キャンパス宇治北4号棟である。既設の直焚ガス吸収式冷温水機及びモジュールチラーから、太陽熱利用吸収式冷温水機と木質ペレット焚吸収式冷温水機へ機器更新を実施し再生可能エネルギーをハイブリッド利用する。そして、市内の間伐材から木質ペレットを製造、調達することで地域の再生可能エネルギー利用促進を図る。なお、モジュールチラー

は今後も使用していく予定である。但し、本モデルの本格的な稼働は平成23年6月以降であるため本研究評価時の使用実績はない。なお、直焚ガス吸収式冷温水機は「直焚ガス」、太陽熱利用吸収式冷温水機は「ソーラー」、ペレット焚吸収式冷温水機は「ペレット」、モジュールチラーは「モジュール」と省略して表記した。

2.2 空調機器性能と機能単位

表1に各空調機器の性能を示した。但し、成績係数COP(Coefficient of Performance)は機器効率を示す指標であるが、使用燃料の製造段階の消費エネルギー等は含まれていない。空調機器間比較の機能単位は

表 1 空調機器の性能

		燃料消費			冷暖房能力 (kW)	COP ^{※2}
		都市ガス (Nm ³ /h)	電力 (kW)	木質 ペレット (kg/h) ^{※1}		
直焚ガス	冷房	47.2	6.85	-	600	1.02
	暖房	50.7	6.85	-	555	0.88
モジュール	冷房	-	131.4	-	212	4.80
	暖房	-	143.4	-	212	3.86
ソーラー ^{※3}	冷房	11.8 / 17.3	2.25	-	282	1.31
	暖房	11.8 / 17.3	2.25	-	187	0.86
ペレット	冷房	-	1.27	22.2	106	0.95
	暖房	-	1.27	22.2	84	0.75

※1：木質ペレットは含水率10%、低位発熱量18.0 MJ/kg
※2：ソーラークーリングは運転負荷率55%以上で都市ガスを併用する。
都市ガス使用量は太陽熱使用時 / 太陽熱不使用時を表記している。
※3：COP = 冷暖房能力 / 消費エネルギー

「1kWの冷房の提供」、「1kWの暖房の提供」とし、4機器を冷房、暖房について比較した。太陽熱利用吸収式冷温水機は日射量が不十分な場合等には都市ガスにより補足的に熱を供給する。機器間比較では運転負荷率55%までは太陽熱のみ、100%では太陽熱に加えて都市ガスも使用することとし、それぞれ「ソーラー（太陽熱のみ）」、「ソーラー（太陽熱+都市ガス）」と表記した。運転負荷率は式1で定義した。 R_l は運転負荷率、 E_s は実運転時の冷暖房出力(kW)、 E_p は定格運転時の冷暖房出力(kW)である。

$$R_l = E_s / E_p \quad (\text{式1})$$

京都大学宇治キャンパス宇治北4号館を対象としたケーススタディでは、機能単位を「宇治北4号棟への1年間の冷房2,860 GJ (795 MWh)、暖房543 GJ (150 MWh)の提供」とした。5年間の同建物における直焚ガスの都市ガス使用実績平均値をエネルギー換算し、COPと機器の運転時間の実績平均値から建物内へ提供した月別冷暖房負荷を計算した。なお、空調機器の年間を通じた運転時間は5,484 h、7～9月はほぼ24時間運転であった。

2.3 システム境界

システム境界は都市ガス・電力等の燃料については原料の採掘・製造から使用（燃焼）までとした。木質ペレットに関しては間伐材の伐採からペレット製造及び使用（燃焼）までである。機器設備の製造や灰等残渣の処理はシステム境界外とした。

2.4 評価指標

評価指標として化石資源由来エネルギー消費量およびCO₂排出量を評価した。したがって、再生可能エネルギーである木質ペレットおよび太陽熱は未計上である。購入電力のエネルギー換算は一次換算係数9.0 MJ/kWhを用いた。また、空調機器から建物内へ供給されたエネルギーに関しては二次換算係数3.6 MJ/kWhを用いた。また、木質ペレットの使用（燃焼）によるバイオマス由来CO₂はカーボンニュートラルであるとしてCO₂排出量に計上していない。購入電力のCO₂排出原単位や都市ガスの低位発熱量(LHV)は0.555 kg-CO₂/kWhおよび40.6 MJ/Nm³を用いた。

2.5 宇治北4号館ケーススタディの設定条件

ケーススタディの空調システムは複数の機器からなる組み合わせシステムである。機器運転の優先順位は化石資源由来エネルギー消費量、CO₂排出量削減ともに最も効果的と考えられるソーラー（太陽熱のみ）、ペレット、モジュール、ソーラー（都市ガスのみ）の順とし、平成21年度まで使用されていた直焚ガス吸収式冷温水機単独での空調システムと比較することとした。空調機器の冷暖房負荷（消費エネルギー）は初期運転時の負荷が高く、建物内の温度が安定すると低下する。また、不安定な運転状況ではソーラーと併用される都市ガス利用により柔軟に対応することが有効である。以上のことから、運転状態を初期運転、不安定運転、安定運転に3分類し、次の前提条件で評価することとした。

- ・ 初期運転として各日0.5 hは全機器運転負荷率100%で稼働する。
- ・ 不安定な運転が各日1 hはあるとし、不安定運転時は上述の運転順位とは別にソーラー併用の都市ガスが運転負荷率30%で運転する。但し、7～9月については機器がほぼ24時間運転していることから、不安定運転はないものとした。

安定運転時の機器の切替は運転負荷率が一定値に達した時点で行われるものとした。本試算は冷暖房負荷(kW)を瞬間値ではなく、各月毎の月間平均値をベースに試算しているため、月当たりの負荷率は低くなる。また、ソーラー（太陽熱のみ）、ペレットは冷温にタイムラグが生じるなど不安定であることから、余裕をもって運転を切り替える必要がある。したがって、ソーラー（太陽熱のみ）、ペレットは運転負荷率30%で次の機器に切り替わるとし、モジュール、ソーラー（都市ガスのみ）は運転負荷率70%まで運転することとした。

3. 結果と考察

3.1 空調機器間比較

各機器の1kW供給時の化石資源由来エネルギー消費量およびCO₂排出量結果を図1、図2に示したソーラ

ー(太陽熱のみ)ではモジュールと比べ90%以上の化石資源由来エネルギー削減、ペレットにおいても約70%の削減が可能と試算された。ソーラーに関しては都市ガス併用の有無で結果が大きく異なることから、日射量が不十分な雨天や曇天など、天候により結果が左右されることが示唆される。但し、都市ガス併用時であってもソーラーは直焚ガスやモジュールと比べて化石資源由来エネルギー消費量が低いか同程度であることから、都市ガス併用の有無に関わらず機器更新による削減効果は期待できると推察される。CO₂排出量も同様の傾向を示した。

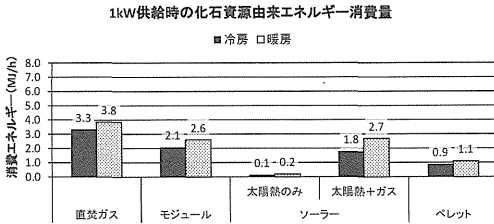


図 1 1kW 供給時の化石資源由来エネルギー消費量

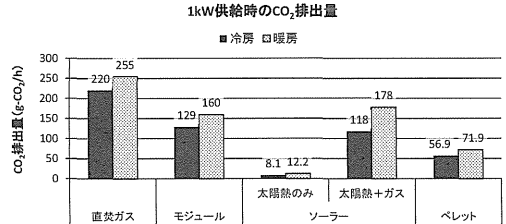


図 2 1kW 供給時の CO₂ 排出量 (統一係数)

3.2 宇治北4号館ケーススタディ

月別の運転負荷率を示した図3より、ペレットは4-5月、1-3月の負荷率が切替条件に達しておらず、同期間は初期運転、不安定運転を除いてソーラー(太陽熱)、ペレットのみで空調を提供可能であったことを示している。一方、8-9月は全機器を運転させなければ十分な空調を提供できないことが示唆された。年間平均では、ソーラー(都市ガス)は約10%、それ以外の機器は約30%の運転負荷率となった。

試算結果を図4、図5に示した。直焚ガスと比較した削減量としては夏場の寄与が冬場より大きかった。すなわち、夏場の冷房対策が化石資源由来エネルギーおよびCO₂削減により効果的であることが示唆された。年間の化石資源エネルギー削減量は1,729 GJ/yr(削減率53.7%)、CO₂削減量は119 t-CO₂/yr(削減率55.7%)と推計された。

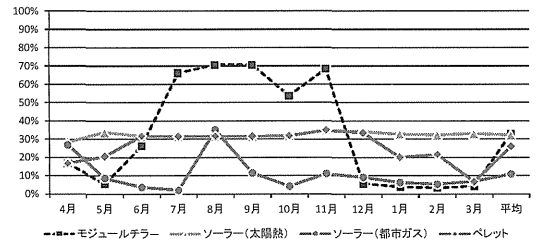


図 3 組合せシステム各機器の月別運転負荷率

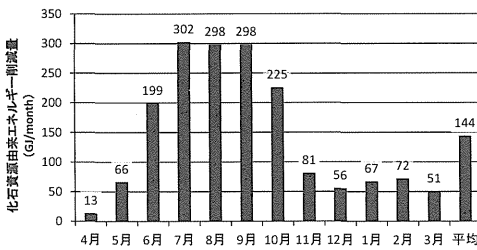


図 4 直焚ガス単独と比較した

組み合わせシステムの化石資源由来エネルギー削減量

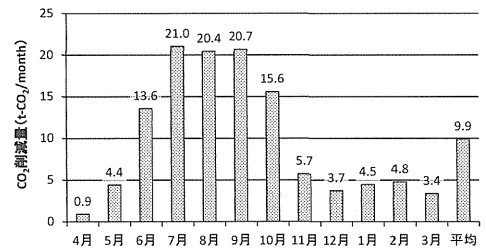


図 5 直焚ガス単独と比較した

組み合わせシステムの CO₂ 削減量

3.3 不確実性分析

本ケーススタディでは前提条件や切替条件が結果に大きく影響するものと考えられることから不確実性分析を実施した。条件1~4として再生可能エネルギー利用であるソーラー(太陽熱)及びペレットの切替時の運転負荷率をそれぞれ10、50、70、100%と変化させた。切替運転負荷率を高く設定する程、ソーラー(太陽熱)およびペレットで供給されるエネルギー割合が高くなる。条件5では前提条件で設定した初期運転、不安定運転を考慮せず安定運転のみ設定した場合の試算を実施した。

結果を図6、図7に示した。デフォルトと条件5の結果から初期運転、不安定運転の設定による結果への影響は小さいことが確認され、機器切替の運転負荷率の影響が大きいことが示唆された。条件1～4で化石資源由来エネルギー削減量は1,110～2,667 GJ/yr、CO₂削減量は77～177 t-CO₂/yrの変動幅であり、倍以上の開きがあることが確認された。実際のシステム導入に当たっては、運転負荷率の機器別変動をモニタリングすることが重要と考えられる。

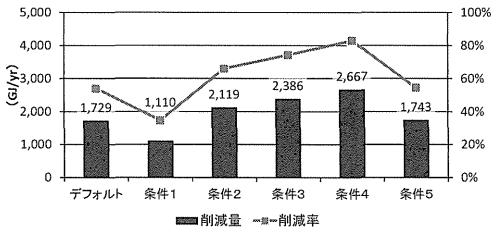


図6 不確実性分析結果：直焚ガス単独と比較した化石資源由来エネルギー削減量 (GJ/yr)

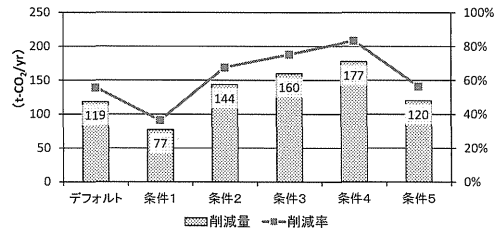


図7 不確実性分析結果：直焚ガス単独と比較したCO₂削減量 (t-CO₂/yr)

4. 結論

本研究では、地域協働モデルの導入効果を評価するため、各機器およびケーススタディによる組合せシステムの省エネ効果やCO₂削減効果を明らかにした。まず、機器間比較により得られた知見を以下に纏めた。

- ・ ソーラー（太陽熱のみ）ではモジュールと比べ90%以上の化石資源由来エネルギー削減、ペレットにおいても約70%の削減が可能と試算され、機器更新の有効性が確認された。
- ・ ソーラークーリングによるCO₂排出量の削減効果は都市ガス併用の有無が大きく影響した。日射量が足りない場合はペレットやモジュールで代替する等、都市ガスを利用しない新しい組み合わせシステムが有効だと考えられる。

そして、宇治北4号棟のケーススタディにより次のことが明らかとなった。

- ・ 組み合わせシステムの導入により直焚ガス単独と比較して、年間で化石資源由来エネルギー1,729 GJ/yr（削減率53.7%）、CO₂排出量119 t-CO₂/yr（削減率55.7%）の削減が可能と推定された。
- ・ 夏場の冷房の消費エネルギー（負荷）を低下させることが化石資源由来エネルギーおよびCO₂削減により効果的であることが示唆された。
- ・ 機器の切替条件が結果に大きく影響した。切替時の運転負荷率10～100%で不確実分析を行った結果、化石資源由来エネルギー削減量、CO₂削減量ともに倍以上の開きがあることが確認された。

以上より、各機器の組み合わせ条件により効果に幅はあるものの、地域の再生可能エネルギーの空調システムへの利用が化石資源由来エネルギー及びCO₂排出量の削減に大きく貢献できることが明らかとなった。実際のシステム稼働に当たっては運転負荷率の機器別時間変動をはじめとする運転状況のモニタリングが求められる。

参考文献

- 1) Yale University: (2008): Yale's Greenhouse Gas Reduction Strategy.
- 2) Arizona State University.: Campus Solarization Photo Gallery,
http://www.asu.edu/fm/albums/energy/campus_solarization.htm [2011.6.3 accessed].

キーワード：空調、温室効果ガス、再生可能エネルギー、木質ペレット、太陽熱

Key Words : Air Conditioning, Greenhouse Gas, Renewable Energy, Wood Pellet, Solar Heat