

エネルギーシミュレーションソフト—ENEPRO21 の開発

Energy Simulation Software – Development of “ENEPRO21”

株式会社 E.I.エンジニアリング
Energy Integration Engineering Co.,Ltd.
小川彰彦、清水郷志
Teruhiko OGAWA, Satoshi SHIMIZU

キーワード：シミュレーション (Simulation)、分散型発電 (Decentralized Power Generation)、熱源 (Heat Source)、性能データ (performance Data)、再生可能エネルギー (Renewable Energy)

1. ENEPRO21 の開発に至る経過と背景

分散型発電設備 (コージェネレーション) および集中熱源設備 (以下熱電設備とする) は設計及び運転の自由度が高く、多様なシステム構築が可能である。しかし、地域の特性に合った高効率システムの設計や既存設備の運転解析を行うためには、検討すべきパラメータが多岐に亘り、実際上詳細な検討は困難であった。

しかし省エネ・低 CO2 化が浸透し、しかもその要求度が高まるにつれ、精度が高く多岐に亘るパラメータに柔軟に対応でき、しかもエネルギー関係者の誰もが利用できる汎用シミュレーションソフトの開発が求められてきた。

一方、精度の高いシミュレーションを行うためには実際の機器の運転状態を正確に再現できることが必須であり、そのためには実機の詳細な機器性能データが必要となる。しかしそのデータの入手は多くのエンジニアにとっても困難であった。当社はこれらの要求を満足すべくシミュレーションソフトの開発及びメーカー機器データの収集に取り組み、平成 21 年 5 月に ENEPRO21 Ver.2 としてソフトをリリースすると共に ENEPRO21 データベース (機器性能データ、環境負荷データ、電力料金データ、気象データ) を公開した。

以後、このソフトの使い易さと精度の評価も定着し、BEMS の解決策として、又スマートコミュニティの基本ソフトとして注目され始めたこともあり、ここにその紹介と実績の報告を行うものである。

2. ENEPRO21 の概要

ENEPRO21 では電力及び熱負荷 (冷水 4 系統、温水 4 系統、低冷水、高圧蒸気、低圧蒸気、給湯、電力) を計算条件として与える。その内容はそれぞれ 24 時間データで各月 8 パターン (例えば平日・休日に分ければ 2 パターン)、夏季設計日、冬季設計日を含めて年間 98 パターンを設定することができる。設計日は、熱源機器のピーク負荷対応を検討するためのパターンである。

ENEPRO21 では次の条件を設定して熱電設備のシミュレーションを行い、エネルギー消費量、運転コスト、CO2・NOx・SOx 排出量、システム COP 等を出力する。

[シミュレーションを行うための条件設定]

- ① 熱負荷、外気温度・外気湿球温度、冷水・温水の供給温度および戻り温度
- ② 熱電設備の機器構成
- ③ 機器性能データ、環境負荷データ、料金データの読み込み (ENEPRO21 データベースから選択または自由設定)
- ④ 機器の運転パターン (運転優先順位)

冷水・温水の供給温度および戻り温度は、FCU 等 2 次側設備の運転状況を反映させるための条件で、必要に応じて設定する。

ENEPRO21 の計算時間間隔は運転管理システムからのデータ取得を考慮して 1 時間間隔としてい

るが、年間計算は通常 1～3 分で完了する。

ENEPRO21 の基本構成は図 1 の通りとなる。

－ ENEPRO21 モデル フロー図－

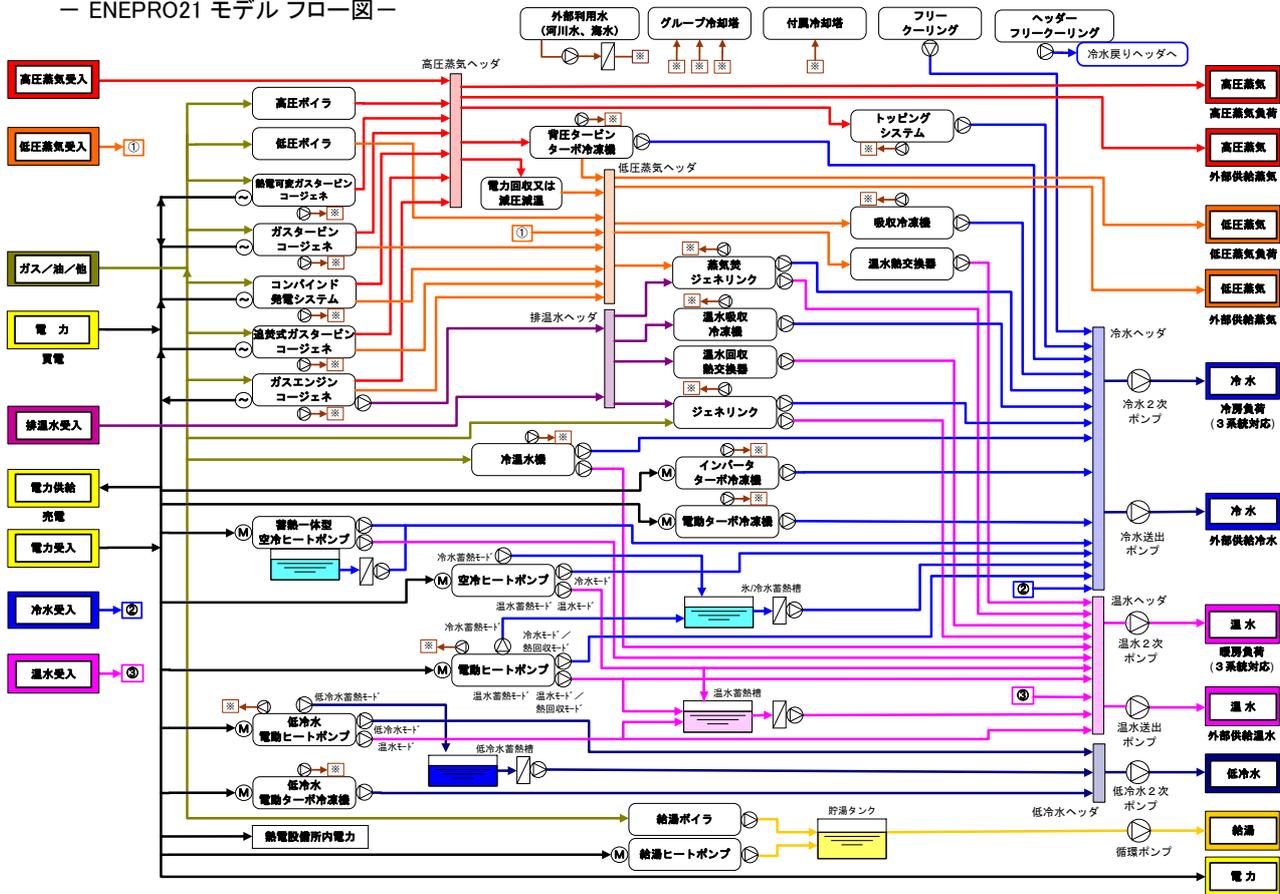


図 1

3. ENEPRO21 の特長

以下、ENEPRO21 の特長とそれを実現している ENEPRO21 の仕組みを詳述していく。

1) 実設備の運転実績を反映できる高い精度のエネルギー計算ができること

実際、計算結果の消費エネルギーと実設備の消費エネルギーとの差を 1～2%程度に収めることができる。

① 電力、熱及び流量のバランス計算による運転状態の正確な再現

以下の各バランスは相互に影響するため、それぞれのバランスの繰り返し計算と同時に全バランスを通した全体の繰り返し計算を行い、バランス点を見いだしている。

【冷熱バランス】－【温熱バランス】－【給湯バランス】－【高圧蒸気バランス】－【低圧蒸気バランス】－【電力バランス】－【排熱バランス】

冷熱及び温熱バランスについては、熱バランスだけでなく 2 次側空調機が要求する冷水(温水)“流量”のバランスもと必要な冷凍機台数及び冷凍機分担(負荷率)を決めている。

② 機器性能データの提供と適切なシミュレーションモデルの構築

各機器の運転状態を正確に再現できるように、実機約 5,000 基の機器性能をデータベース化した。図 2 にはデータベースとデータをダウンロードして ENEPRO21 に読み込んだときのイメージを示している。

データベース化に当たっては、COP の定義や消費電力に含まれるポンプ・ファン類の範囲など、メーカーによって異なっている点を抽出し、それらを統一した形でデータベース化した。

機器モデルについては、例えば吸収系冷凍機の立ち上げ運転ロスの考慮やガスタービン吸気冷却方式による出力増など実際の運転に近づけるためのこまめなモデリングを行っている。

ENEPRO21 データベース
ダウンロードサイト

ENEPRO21 機器設定画面と
グラフ

The screenshot displays the ENEPRO21 software interface. On the left, there is a navigation menu with categories like 'E1 発電系', 'E2 蒸気系', and 'E3 冷水系'. The main area shows a table of equipment models under the heading '機器性能データ一覧'. The table has columns for '型番' (Model No.), '冷房能力 [kW]' (Cooling Capacity [kW]), '冷房能力 [USRT]' (Cooling Capacity [USRT]), and '機器詳細' (Equipment Details). The model 'AART-45 I' is highlighted with a red box. To the right, there is a '性能データ (負荷率-冷却水温度-COPの関係)' (Performance Data (Relationship of Load Rate - Cooling Water Temperature - COP)) table and a graph showing COP vs. Load Rate.

冷却水温度	20	30	50	60	80	100
12℃	20.82	19.48	20.13	19.58	16.83	13.63
16℃	11.94	12.58	14.51	14.61	13.46	11.5
20℃	7.89	9.06	10.82	11.22	10.81	9.69
24℃	5.72	6.84	8.39	8.95	8.83	8.19
28℃	4.39	5.33	6.78	7.38	7.39	7
32℃	3.49	4.21	5.7	6.3	6.33	6.04

図 2

2) 広範囲の熱電設備の設計や運転解析に対応できること

① ほとんどの実設備に対応できる広範囲な対象機器

特に省エネ対策に欠かせない、コージェネレーションの排熱利用機器や熱回収ヒートポンプ、熱回収蓄熱機器、フリークーリングなども組み込まれている。その他、蒸気タービン駆動ターボ冷凍機、トッピング（ターボ冷凍機と吸収冷凍機のシリーズ接続）にも対応でき、応用的な使用法として燃料電池をガスエンジンモデルで代用できることなど、実用上の使用範囲は極めて広い。

② 再生可能エネルギー、未利用エネルギーの活用検討

太陽熱利用では、低温排温水利用ジェネリンクを組み込んだ冷房設備の検討などを行うこともでき、バイオマス発電に関してもその機器性能データをすでにデータベース化した。また未利用エネルギーの利用については、例えばゴミ焼却設備から余剰蒸気や排温水を受け入れて、それらを優先消費しながら当該設備のシミュレーションを行うことができる。又、海水、河川水は冷却水あるいは熱源水として使用することができる。

③ エネルギーの面的利用の検討

② 項で例示したように、他設備から供給される熱（冷水、温水、蒸気など）を設備内で優先消費する機能及び他設備に供給する熱を当該空調設備が消費する熱とは別に設定できる機能がある。この機能を利用して、複数の熱源設備の最適な運用方法を検討することができる。

④ 設備の実運用を反映して諸運転条件を設定できる柔軟性

- i. 時間帯ごとの機器運転優先順位の設定
- ii. 発電設備の多様な運転モードへの対応

発電設備の運転モードには電主運転、熱主運転、最大発電運転、最低買電制御運転、電力の外出し運転等があり、熱源設備と一体の総合的な検討ができる。
- iii. 冷凍機ごとに冷水出口温度を変更した際の COP の自動補正

iv. 設備の経年変化に伴う能力低下や COP 劣化などの反映

3) エネルギー関係者の誰もが使える汎用技術ソフトであること

- ① フロー図から視覚的にシステムの構築が可能である。さらに機器モデルは機能でまとめられているため、例えば冷熱機器については冷水ポンプ、冷却水ポンプ、付属冷却塔などが機器の設定と同時に組み込まれ、機器間の接続という手間を要しない。
- ② ユーザが行う計算を極力減らすため、ポンプ容量の自動計算、蒸気の温度・圧力-エンタルピー換算、JIS に基づくポンプ効率の設定、相対湿度-湿球温度換算等の機能を組み込んでいる。
- ③ ブラックボックスをなくし、取説・ヘルプ等で計算内容を明確にしている。

4. ENEPRO21 のシミュレーションでできること-機能の紹介

1) 新設設備の設計での使用例

種々の発電機器、熱源機器（図 1 参照）を組み合わせ、諸要求条件を満たした設備の設計を行うことができるようになっている。

- ① 種々の機器の組合せが可能
一般的な熱源機器は勿論のこと、省エネ機器としてのジェネリンクやフリークーリング、熱回収蓄熱などを取り込んだシステムの検討を簡単に行うことができる。また発電設備を導入する場合は電力負荷、熱負荷、熱源設備内での熱の利用度合いなどによって種々の発電機器を組み合わせることも可能である。
- ② 負荷に見合った機器の最適な容量分割方法の検討
- ③ 機器の運転優先順位の検討
熱電負荷のパターンごとに適切な（システム COP 最大、節電運転、コスト最小、CO2 最小）機器の運転パターンを設定することができる。
- ④ その他、エネルギーの面的利用、未利用エネルギーや太陽熱の利用などを織り込んだ設備設計を行うこともできるようになっている。

2) 設備更新検討での使用例

- ① 冷水 1 次ポンプ、冷水 2 次ポンプ、冷却水ポンプのインバータ化
- ② ジェネリンクなどの採用による排熱利用率の向上
- ③ 既設冷却塔を活用したフリークーリングの採用
- ④ 冷水 1 次ポンプ、温水 1 次ポンプの過流量制御による運転熱源機の台数低減
- ⑤ 大型コージェネレーション導入による電力売電事業の検討

3) 設備運用の検討での使用例

- ① 冷凍機の冷却水温度を低くして、COP を高めて運転するケース
- ② 高効率冷凍機の冷水出口温度を低くしてその負荷分担を高めて運用するケース
- ③ 温熱機器についても同様
- ④ 高効率ボイラを優先的に使用するためにその運転優先順位を最上位にして運用するケース
- ⑤ 蓄熱システムの最適な運転方法の抽出（蓄熱の可否、蓄熱量、放熱量と放熱時間帯）
- ⑥ コージェネレーションの最適な運転方法の抽出（電主運転、熱主運転、最低買電量運転、吸気冷却等による契約電力低減と排熱利用率の向上）
- ⑦ 形式の異なるコージェネレーション（ガスタービン、ガスエンジン）が複数台ある場合の最適な運転方法の検討（優先順位のラスト機の部分負荷運転、全機を同一負荷率運転等）

4) ガスエンジンコージェネの導入－排熱利用の検討事例

本事例は、冷熱をターボ冷凍機と吸収冷凍機でまかなっている設備だが電力負荷も大きいいためガスエンジンコージェネレーションを導入し、同時に排熱を利用して冷熱を発生させるジェネリンクも導入しシステム COP を向上させようという主旨である。

表 1 に設備構成を示している。

2. 機器構成		現設備	排熱利用設備
冷水系機器	吸収冷凍機(1)	879kW×1、定格COP 1.35	○ ○
	吸収冷凍機(2)	1583kW×1、定格COP 1.2	○ -
	ターボ冷凍機(1)	2110kW×1、定格COP 5.28	○ ○
	ジェネリンク(1) (川重冷熱 TZJ-450)	1583kW×1	- ○
発電系機器	ガスエンジンコージェネ(1) (日立 JMS-420GS-N,L)	-	○
温水系機器	温水熱交換器(1)	1150kW×1	○ ○
	温水熱交換器(2)	440kW×1	○ ○
	温水回収熱交換器(1)	800kW×1	- ○
	温水回収熱交換器(2)	440kW×1	- ○
蒸気系機器	蒸気ボイラ	○ ○	○ ○

表 1

図 3 に 8 月平日パターンでの冷水バランスと電力バランスを対比させている。

[現設備]

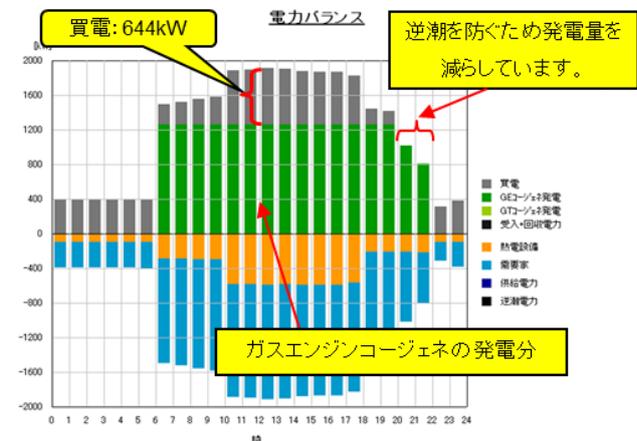
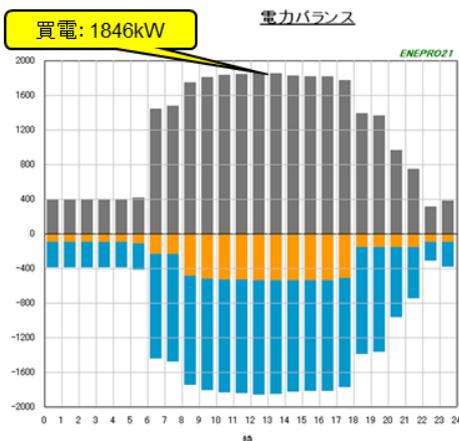
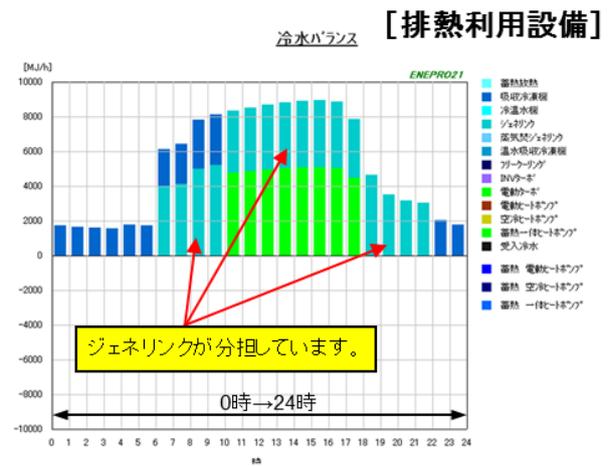
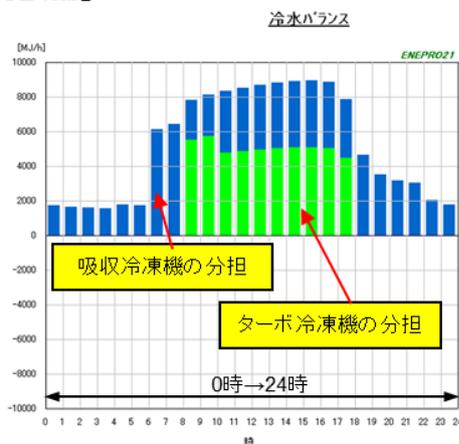


図 3

昼間のコージェネレーション運転時間帯では、ジェネリンクが吸収冷凍機にほぼ置き換わって冷熱を分担している。また受電電力のピークも 1846kW から 644kW に低減されている。なお、20 時～22 時の間は電力消費量が少ないためコージェネレーションの出力を自動的に下げ電力

の逆潮を起こさないように制御されている状態が再現されている（“買電制御運転”）。ENEPRO21 ではこの他に“最大出力運転”、“熱主運転”などの運転モードも選択できるようになっている。

【冷水バランスと電力バランス】

冷水バランスは冷熱負荷に対する冷凍機の負荷分担を表しており、これは冷熱負荷、冷水流量、冷凍機的能力、冷凍機の出口温度などから決まり、時間毎に計算されている。

電力バランスは熱源設備の消費する電力とその他の電力負荷（図3の下側のグラフ）に対してコージェネレーションの発電出力と購入電力との分担（図3の上側のグラフ）を示したものである。

【排熱利用設備の評価】

表2に示すように、8月平日パターンではシステムCOPは0.95から1.11と大幅に向上しており、それに伴い1次エネルギー消費量、CO2排出量、運転コストなどもかなり低減している。これはコージェネレーションの排熱利用率が100%、すなわち全排熱が有効に利用されていることが大きな要因である。

年間を通してでもシステムCOPは0.89から1.03と同程度改善されており、契約電力を下げることができるため年間の運転コストも約83%に低減している。

3. 比較

		現設備	排熱利用設備	(b)/(a) %
8月パターン1 (平日、23日)	システムCOP	0.95	1.11	116.8
	1次エネルギー(GJ)	8,937	7,651	85.6
	CO2(ton)	402	367	91.3
	最大購入電力(kW)	1,846	644	34.9
	購入電力量(MWh)	654	216	33.0
	使用ガス量(千Nm3)	55.7	123	221.5
	運転コスト(千円)	14,648	12,418	84.8
	ガスエンジン排熱量(MJ/日) ---(c)	-	39,668	
	ジェネリンクの使用排熱量 (MJ/日)---(d)	-	39,668	
	排熱利用率(d)/(c) (%)	-	100	
年間 (Case2_排熱利用.EIP)	システムCOP	0.89	1.03	115.7
	1次エネルギー(GJ)	114,236	98,617	86.3
	CO2(ton)	5,125	4,767	93.0
	最大購入電力(kW)	2,425	1,370	56.5
	契約電力(kW)	2,500	1,400	56.0
	購入電力量(MWh)	8,643	2,568	29.7
	使用ガス量(千Nm3)	651	1,647	253.0
	運転コスト(百万円)	218	182	83.4
	ガスエンジン排熱量(GJ)---(c)	-	12,925	
	ジェネリンクの使用排熱量 (GJ)---(d)	-	8,765	
	温水回収熱交の使用排熱量(GJ) ---(e)	-	1,542	
	排熱利用率{(d)+(e)}/(c) (%)	-	80.0	

表 2

5. ENEPRO21 を使った研究事例の紹介

本節では、ENEPRO21 を使った研究事例の一つとして空気調和・衛生工学会に発表された「神戸大学附属病院におけるシミュレーションによる熱源設備の省エネルギーに関する研究」を紹介する。これは病院における熱源設備の種々の省エネ手法を定量的に評価したものだが、ここでは紙面の都合で設備概要及び検討結果の結論のみを記すので詳細は原論文を参照して頂きたい。

掲載論文：空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 2009年度 38巻
執筆：神戸大学、(株) E.I.エンジニアリング

1) 病院および熱源設備の概要

① 病院の概要

- (1) 延床面積 140,336m² (2) 病床数 920
- (3) 熱源設備は第 2 棟の機械室（中診棟、新病棟）に設置

② 設備の概要

(1) 中診棟の熱源機器

- ・ガス吸収冷温水機：冷房能力 2,810kW×2 台、1,050kW×1 台
- ・蒸気ボイラ：8.97t/h×2 台 (0.69MPaG)、他

(2) 新病棟の熱源機器

- ・氷蓄熱槽：2,635kWh×4 台
- ・空冷スクリーヒートポンプ：製氷能力 527kW×2 台
- ・放熱器：530kW×2 台
- ・空冷スクリーヒートポンプ：1,050kW×1 台、他

2) 運転状況の ENEPRO21 による再現

省エネ手法を検討するに当たり、まず機器の性能解析及び現状運転の ENEPRO21 上での再現を確認し、99%以上の精度で運転が再現されていることが確認できた。

3) 運転改善及び設備更新のケーススタディー及び検討結果

以下のケースについて検討を行った。検討結果は、設備更新を伴うケース 6)～10) についてそれぞれのシステム COP 改善率と CO₂ 削減率を図 4 に示している。

- ・ケース 1) 吸収冷温水機の冷却水温度を、32℃一定から 24℃を下限としてなるべく低い温度を維持する運転を行う。
- ・ケース 2) ケース 1+吸収冷温水機の冷却水ポンプをインバータ制御する。
- ・ケース 3) ケース 2+バックアップ用のヒートポンプを夜間のみ運転する。
- ・ケース 4) ケース 2+バックアップ用のヒートポンプを昼夜運転する。
- ・ケース 5) ケース 2+氷蓄熱を運転せずに空冷スクリーヒートポンプを冷水モードで運転する。
- ・ケース 6) ケース 2+吸収冷温水機（現状 10%の性能低下）を高効率型に更新
- ・ケース 7) ケース 2+炉筒煙管ボイラ 1 台を小型還流ボイラ 2 台に更新
- ・ケース 8) ケース 2+インバータターボ冷凍機を 1 台追加
- ・ケース 9) ケース 2+製氷用の空冷スクリーヒートポンプを冷水ターボ冷凍機に更新
- ・ケース 10) ケース 2+ケース 6)～9) を合わせて実施

システムCOP改善率とCO₂削減率

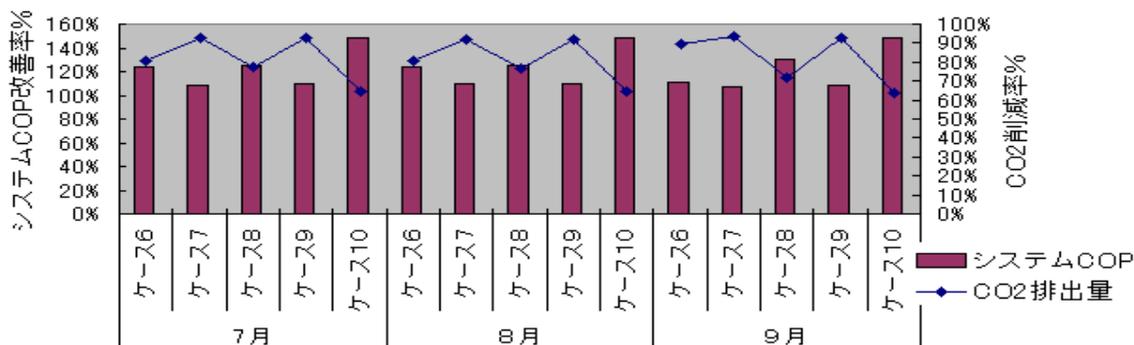


図 4

設備更新の検討結果はインバータターボ冷凍機を 1 台増設したことで 25～30%のシステム COP 改善効果が見られ、またこれら全てを実行するケース 10) では 47%のシステム COP の改善効果が見込めることが確認できた。

6. おわりに

東日本大震災以降、再び注目を集めている分散型発電設備及び集中熱源設備は、その有効な活用のためには適切なシステム構築と定量的なシステム検討が必要である。その意味ではまさに時宜を得た本ソフトのリリースであり、また本ソフトが機器性能データと併せて各方面のユーザに使用され始めていることは、設備の評価に当たってカタログの定格性能のみによるエネルギー計算の手法では設備検討のニーズに応えられなくなりつつある状況を示しているようにも思える。ENEPRO21 の普及とともに、設備の実態を反映したシミュレーションによる設備の評価手法が今後さらに定着していくことを期待するものである。

おわりに、このソフトの開発に助言を与えて頂いた関係各位、ならびに機器性能データのご提供に労を惜しまずご協力頂いたメーカーのご担当各位に心からの謝意を表するものである。