

エネルギー最適化への連携制御の考え方・進め方  
～ その基礎から応用まで

JEITA 制御・エネルギー管理専門委員会 WG1

本内容は 工業技術社の雑誌「計装」2016年3月号 (Vol.59 No.3) に掲載されたものです。

1. 連携制御技術とは

昨年末パリで開催された COP21 において、「CO2 排出量を 2030 年までに 2013 年比で 26%削減する」と日本政府は約束した。この約束を実現するためには、産業部門、業務部門等でこれまで以上に省エネを進めることが喫緊の課題となっている。政府としても、従来に増して各種政策により、省エネ推進を支援していくものと思われる。

省エネ法では、トップランナー制度により 2014 年 11 月現在 31 品目が特定機器として指定され、機器単体の高効率化が図られてきている。多くの工場や業務用施設等では、単体レベルのリプレース等の次のステップとして新たな省エネ方策・技術を模索しているのが現状であるが、更なる省エネを進める場合、新たな取り組みが必要になる。これに応える手段の一つとして、連携制御がある。

産業や業務部門のエネルギー供給設備（電力、熱、蒸気、圧空等）は、一般に最大需要に合わせた設計がされているため、需要が少ない時には、部分負荷運転となり、効率の悪い運転となりやすい。このような動力・熱源設備等の供給設備を、変動する需要にあわせて最適運用する全体最適アプローチを考える必要がある。そこで、従来の制御の枠組みを更に進化させ、需要側、供給側の設備同士を互いに連携してエネルギー利用の全体最適を実現する「連携制御」が注目される。本稿では、既存の供給・需要設備に適用し大幅な省エネを実現する、投資対効果の高い先進的な技術である連携制御について解説する。

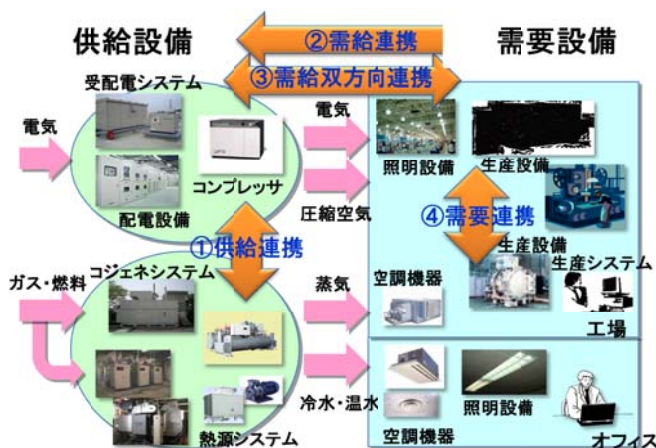


図 1 連携制御の概念図（注 1）

連携制御は次の4つのカテゴリーに分けられる。

#### ① 「供給連携」

供給設備内での各機器の個々の特性を考慮して最適運用する手法である。

機器の組合せや負荷を最適配分してエネルギー使用量やコストあるいはCO<sub>2</sub>排出量を最小化する。

電気を使う熱源と燃料・ガスを使う熱源の負荷の最適配分や、ボイラ、ポンプ、コンプレッサなどの複数の機器の最適運転制御など、機器個々の特性（例：大型/小型、旧式/最新などの組合せ）を考慮した負荷の最適配分を行う。更には、工場内にある複数の供給設備、あるいは近隣の供給設備と連携させ、一つの供給設備とみなした負荷の最適配分などを行う。

#### ② 「需給連携」

需要設備の需要量に応じて供給設備の運転を制御する手法である。

需要量の実値に基づいた供給機器の負荷の最適配分を行うもの、需要量の予測値に基づくものなどがある。

例えば、小さな規模では設備冷却水の設備側運転状態に応じた流量の制御などが該当する。大きな規模では工場のエネルギーセンターや地域冷暖房プラントにおける生産情報や気象情報による需要予測等に応じた熱源の最適運転制御などがある。

#### ③ 「需給双方向連携」

需要設備の需要量に応じて供給設備の運転を制御し、供給側の制約に応じて需要側を調整することにより、供給設備と需要設備の全体最適化を狙う手法である。需要側の調整としては、操業調整を行う場合や生産計画の変更を行う場合がある。

#### ④ 「需要連携」

需要設備の生産システム同士を連携させ、需要側の調整を行う手法であり、具体的な調整項目として、操業調整や生産計画の変更等がある。

たとえば、電力デマンドの制約量に合わせた操業調整などが、電力を大量に消費するプラント等で既に実施されている。

現状は生産ラインの同時起動・停止がほとんどであるが、今後、生産スケジュールをもとに、生産システムの順次起動・停止など、制御方式の高度化が進むと予想される。

各カテゴリーの連携制御の代表的な事例を次表に示す。

表1 連携制御の主な適用例

	カテゴリ	主な事例
1	供給連携	<ul style="list-style-type: none"> <li>・熱源機器、ユーティリティ機器の負荷配分の最適化</li> <li>・熱源機器/圧縮機/ポンプ等の最適化台数制御</li> <li>・熱源設備間、ユーティリティ設備間の負荷配分の最適化</li> <li>・複数コンプレッサ室の統合制御など</li> </ul>
2	需給連携	<ul style="list-style-type: none"> <li>・熱源設備、ユーティリティ設備の需要予測に基づく最適化</li> <li>・地域冷暖房、圧縮空気系、冷却装置系の需要との連携</li> <li>・店舗のショーケースと冷凍機の連携</li> </ul>
3	需給双方向連携	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製鉄所のエネルギー供給と圧延計画の連携最適化</li> <li>・データセンターの空調とサーバ負荷連携最適化</li> <li>・デマンドサイドマネジメント/デマンドレスポンス</li> </ul>
4	需要連携	<ul style="list-style-type: none"> <li>・生産ライン同士のスケジュール調整</li> <li>・ピークカット</li> </ul>

## 2. 連携制御適用事例

### (1) 「圧縮空気供給システムにおける連携制御（供給連携、需給連携）」

多くの工場では、プラント空気、計装空気という形で圧縮空気を使用している。圧縮空気は、空気を取り込み原料ということもあり、コスト意識が欠けていることが散見されるエネルギー使用分野であり、その意味で改善の余地が大きい領域である。

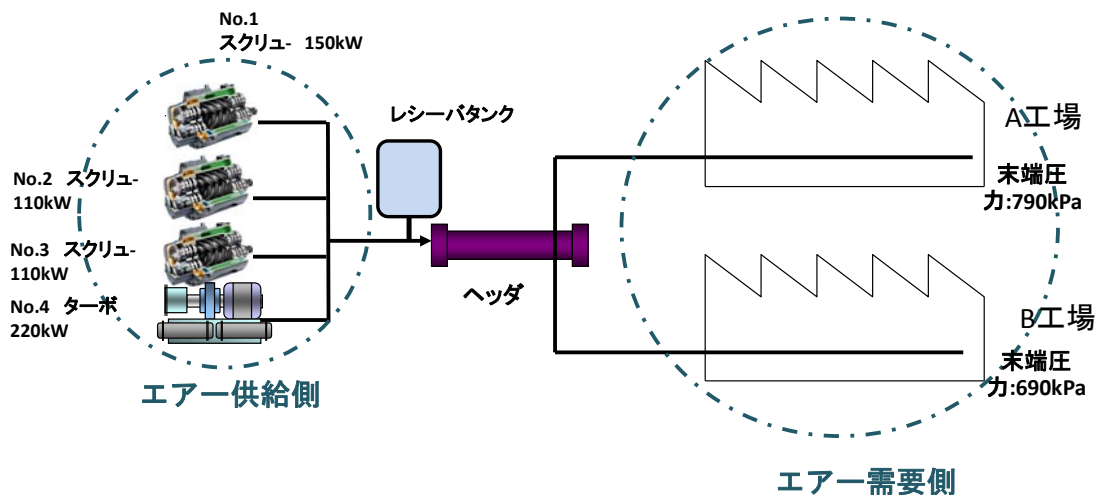


図2 対象圧空設備

以下に、図2に示す圧空設備への連携制御適用例を紹介する。

本事例においては、「ヘッダ圧制御＋コンプレッサ台数制御」は供給連携の事例に該当し、さらに、そこに「エア減圧制御＋最適ヘッダ圧制御」を追加することで、需給連携の事例となっている。

コンプレッサの容量制御の方法は各種ある。ターボコンプレッサには一般に吸込み弁による容量制御が適用されているが、余り絞りすぎるとサージ現象を起

こし不安定になってしまう。そのため、従来、ターボコンプレッサは一定負荷運転されており、ロード・アンロード制御方式の3台のスクリーコンプレッサで負荷調整を行っていた。

今回の連携制御導入時に、スクリー・コンプレッサのうち1台（No.1）はインバータ方式容量調整のコンプレッサに置き換えられた。インバータ方式は、圧空負荷と消費動力がほぼ比例しているのに対して、ロード・アンロード制御方式のものでは負荷が零でも動力が20%ほど消費されるので、それらはできるだけ部分負荷でなくフル負荷で運転することが望ましい。

また、コンプレッサの吐出圧と消費電力には、吐出圧が高いほど、同じ容量の圧縮空気を吐き出すのに消費電力が大きくなるという関係がある。一般のスクリーコンプレッサでは、吐出圧を0.1MPa低減すると8%の動力削減となるため、できるだけ吐出圧を下げても運転することが省エネにつながる。

一方、工場では、製造現場により違うが、エアブローやエア漏れが圧空消費の8割前後を占める場所が多く、各系統ヘッダ圧力をできるだけ低減することによりエアブローやエア漏れを低減することができ、エア消費量の削減となる。更に休日や昼休みなどの非稼働時間帯は、通常より圧力低減が可能になるため圧力を下げるによりエア漏れを大幅に削減することができる。

以上を考慮して、事例では圧空設備に図3のような制御を導入することにより省エネを図った。

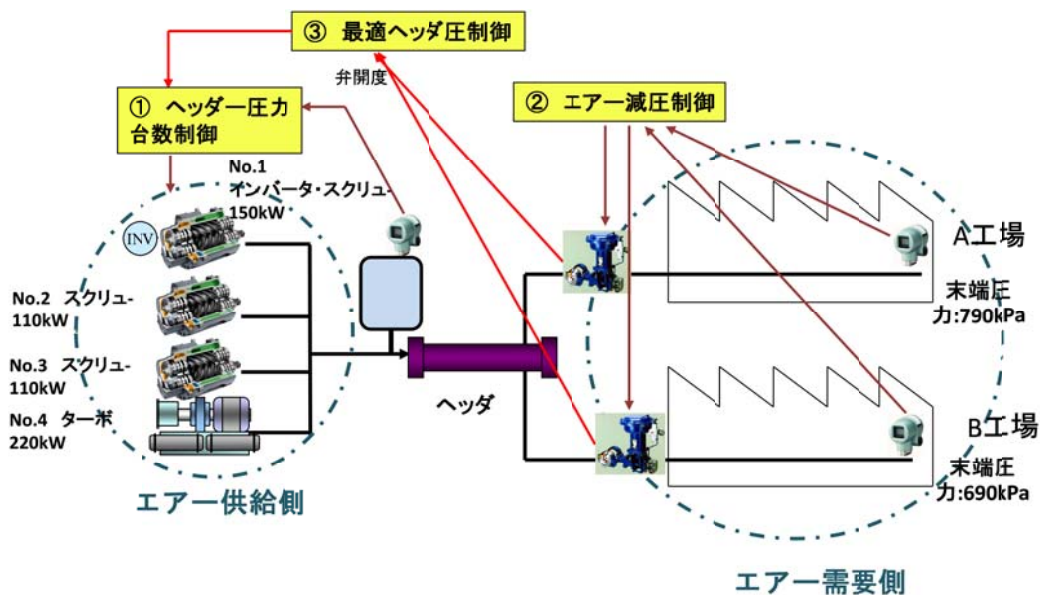


図3 圧空設備の省エネ制御

#### ① ヘッダ圧制御、コンプレッサ台数制御

既存のスクリー・コンプレッサは、それぞれが吐出圧上限・下限設定によりロード・アンロード制御をしている。台数制御を行うために、各コンプレッサに異なる上下限を設定し、稼働の優先度を付けている。ヘッダ圧は最大の上限設定と

最小の下限設定の間で変動し、その変動幅は大きい。ヘッド圧の変動が大きいと、圧が下がったときでも必要なヘッド圧を保持する必要があるため、どうしてもコンプレッサの平均吐出圧を上げざるを得なくなり余計な動力を必要としていた。そこで、新たに導入した制御では、レーシーバ・タンクの圧力をPIDコントローラで制御し、そのコントローラ出力により台数制御を行って、各コンプレッサを連携させることにより、ヘッド圧の変動幅を抑えている。その結果、コンプレッサの吐出圧設定を低減することができ、省エネとなっている。

また、台数制御では、インバータ機を1台導入したことにより、図5のように、負荷変動はできるだけインバータ機の部分負荷で吸収し、他のコンプレッサは可能な限りフル負荷で運転するようにしている。新たに導入した制御は、効率の良い運転を実現する供給連携といえる。

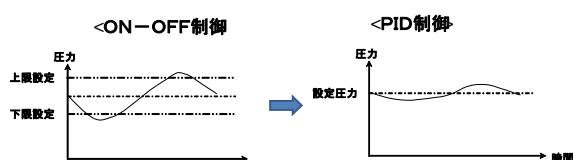


図4 PID制御の適用

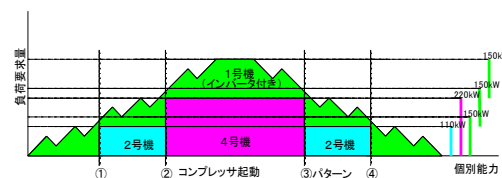


図5 台数制御

## ② エアー減圧制御

図2において、A工場では790kPa、B工場では690kPaの末端圧が必要とされているが、既存の設備では、余裕のあるコンプレッサの吐出圧で、そのまま末端まで送気していた。

各工場の末端圧を制御する減圧制御を導入することにより、ヘッド圧のまま各分岐に圧縮空気を送るのではなく、系統ごとのヘッド圧設定を行うことが可能となる。各分岐の運用状況に合わせ圧力を下げることができ、エアブローやエア漏れの量が削減され、省エネとなる。

この例では、A工場では、スケジュール機能で非稼働時の圧力低減を行うことができ、B工場ではA工場に比べて常に100kPa低い圧力設定が可能となった。

## ③ 最適ヘッド圧制御

更に省エネを図るために、次に述べる需給連携制御を導入している。各分岐の減圧制御弁の開度を監視し、その弁のうち開度の一番大きいものがフル開度近くになるように、ヘッド圧すなわちレーシーバタンクの圧力設定を下げる最適ヘッド圧制御である。

これによりコンプレッサの吐出圧を下げる事ができ、省エネにつながる。従来空気消費量が大きく配管圧損が大きい時に合わせてヘッド圧を高めに設定したものを消費量に応じてヘッド圧設定が変更できるので、平均ヘッド圧設定を下げる事ができ、コンプレッサの消費動力の削減となる。

この事例では、こうした連携制御により、従来システムに比較し約18%の省エネ

を実現している。

## (2) 「空調負荷を主体とした原動力設備の連携制御（需給連携）」

次に、製造工場の原動力設備に連携制御を導入した事例を紹介する。

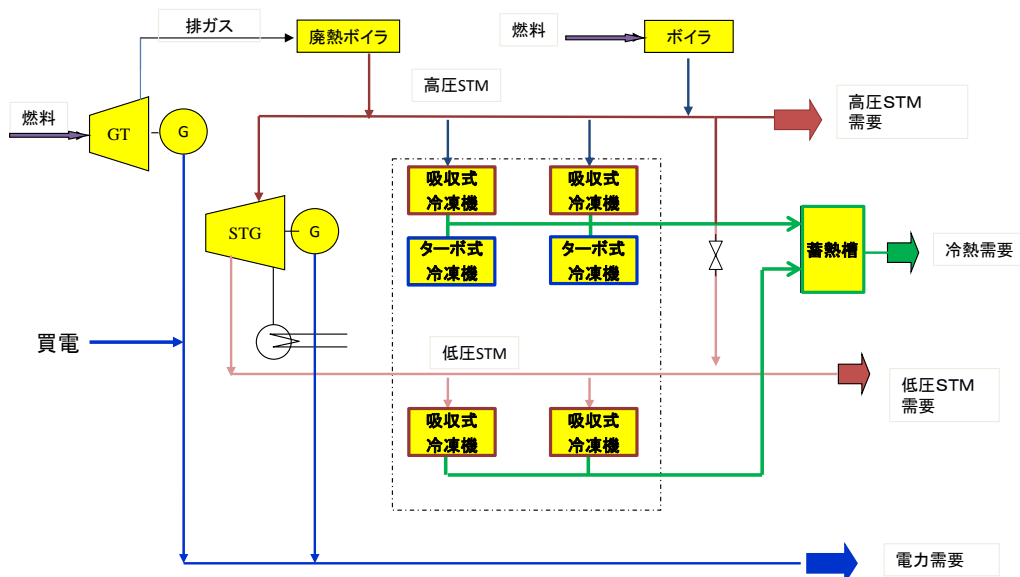


図6 対象動力設備

図6に示す原動力設備が供給する熱需要は冷熱がほとんどを占めている。その供給源として電力エネルギーを利用する2台のターボ冷凍機と、ガスタービンとスチームタービンから得られる廃熱蒸気を利用する4台の蒸気吸収式冷凍機がある。また、電力需要に対しては購入電力、ガスタービン、スチームタービンから供給している。蒸気需要に対してはスチームタービンからの抽気蒸気が利用できるが、不足時には燃料を使ってボイラで蒸気を発生させている。

これらの原動力設備の運転にあたっては、昼の電力料金の高い時は熱エネルギーを使用する吸収式冷凍機を優先的に使用し、夜間の電力料金が安い時は電力エネルギーを使用するターボ冷凍機を使用することでエネルギーコストをできるだけ抑えている。また、吸収冷凍機を併用することにより、プラントの廃熱を有効利用し、かつ契約電力も削減されている。更に、同設備には冷水の蓄熱槽が設置されており、それを活用し安い夜間電力の時に蓄熱し、昼の需要をまかなっている。しかし、電力、蒸気、冷熱の各エネルギーには相互に関連があり、運用にあたっては様々なトレードオフが存在する。例えば、電力料金が低い昼間の時間帯はガスタービン、スチームタービン優先させるが、蒸気負荷が少ない場合には廃熱を使いきれない場合もありうる。また、冷却水温度を下げると冷却塔の動力は増加するが、冷凍機動力は減少する。さらには、送水温度を下げると冷凍機動力が増加するが、搬送動力が減少する。これらのトレードオフ問題を運転員がエネルギーコスト最小化を意識して、常に正しい運用をするのは極めて困難である。

これに対して連携制御では、原動力設備の運転を最適化問題として定式化し数



学的に解を求めることで、最適な運転を決定することができる。これにより、需要と供給のバランスや各設備の出力上下限などの制約を満足した上で、蓄熱量や冷凍機の負荷配分や上記のトレードオフ問題を解き、購入電力費と燃料費の総和を最小化することが可能となる。このように、今までは運転員の経験で運用されてきたものを連携制御を導入することにより、更なる省エネを図ることが期待できる。

次図に運用最適化システムの導入例を示す。

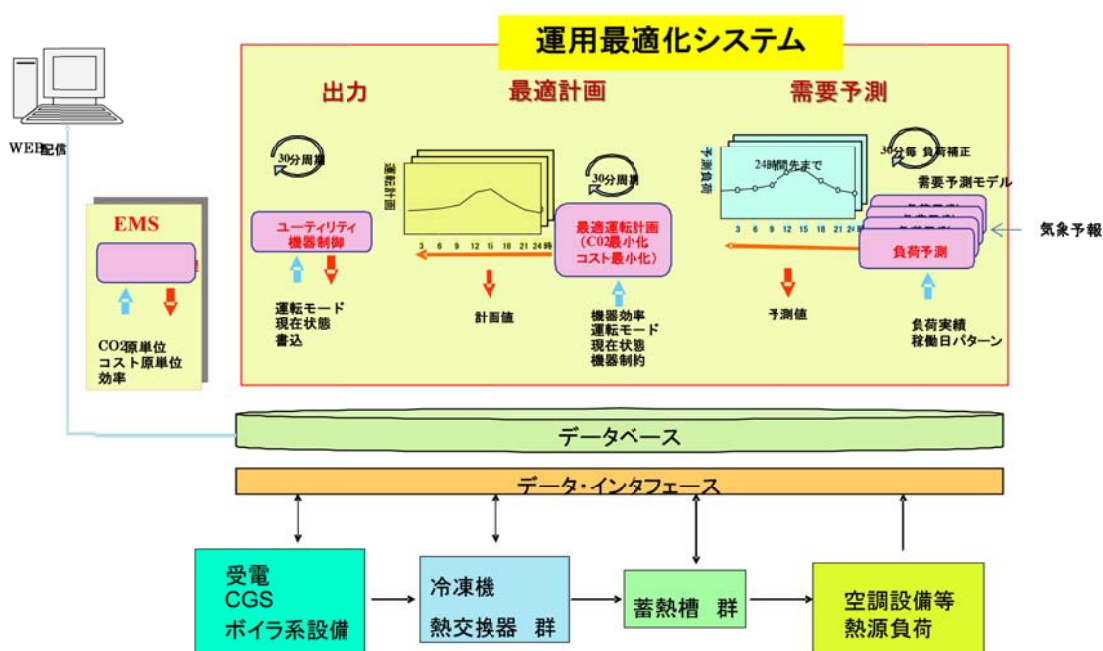


図7 ユーティリティ設備 運用最適化システム

運用最適化システムでは、先ず設備からの運転データをエネルギー・マネジメント・システム(EMS)に取り込む。そして、運用最適化システムの需要予測機能で冷水需要を30分きざみで24時間先を予測する。この例では、空調負荷が大部分を占めているので、空調負荷と大きな相関を持つ気象情報および過去の運転パターンから予測を行っている。

次に、最適計画機能で、その需要予測値からエネルギーコストを最小とする蓄熱槽の蓄熱量、冷凍機の負荷配分の24時間先までの最適計画値を最適化アルゴリズムにより計算する。その最適運転計画値に基づき、現在のあるべき運転状況を下位の自動制御システムに出力する。

以上について30分間ごとに、最新の気象情報、冷水負荷、機器の運転制約、電力・燃料単価等に基づき更新している。

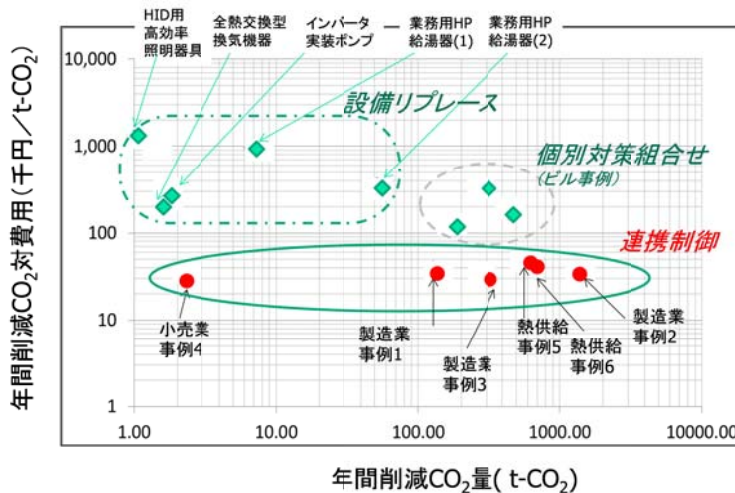
本設備には自家発用のガスタービンや蒸気タービン、水管ボイラもあり、それら

も併せて運用最適化している。  
この事例では、6%の省エネ効果を実現されている。

この事例と同じように空調負荷を主体とした施設として、地域のオフィスビルや商用施設等に冷温水を供給する地域冷暖房がある。こうした施設では、ボイラ、ターボ冷凍機、吸収式冷凍機、熱交換器、蓄熱槽等の複数の多種多様な熱供給機器が設置されており、要求される冷温水の温度を維持しながら、時々刻々に変わる冷・温水需要に対応し、かつ設備全体の効率をいかに良い状態に保つかが課題となっており、連携制御が導入されつつある。

### 3. 連携制御の投資対効果

連携制御は他の手法に比べ投資対効果が高いと述べた。図8に、「設備リプレース」、「個別対策組合せ」の事例と「連携制御」の事例を、投資対効果の視点で具体的に比較する。



注：  
設備リプレースの事例は「BE建築設備」2005年12月号、2006年1月号より引用。個別対策組合せの事例は村越千春「我が国におけるESCO事業の発展経緯と事業特性に関する研究」(2008)による。連携制御の事例はJEITA調査による。

図8 省エネ方策の投資対効果の比較

図8の横軸は1年間に削減するCO<sub>2</sub>の量で、省エネ方策の規模(省エネ量の大きさ)を示している。縦軸は1年間に削減するCO<sub>2</sub>の1トンあたりの費用(千円)を示している。この値が小さいほど投資対効果が高い省エネ方策といえる。

設備リプレースや個別対策組合せは、概ね100~1,000千円/t-CO<sub>2</sub>以上であるのに比べ、連携制御は30~50千円/t-CO<sub>2</sub>程度であることがわかる。これは、連携制御が、制御用のサーバやコントローラ等を既存の設備に付加し、連携制御アルゴリズムを実装するだけで、新たに高額な高効率設備や機器を導入する必要がないことによる。このように連携制御は投資対効果の高い技術であるといえる。



#### 4. 連携制御の導入手順

連携制御の導入にあたっては、事前調査（Feasibility Study：FS）を実施し、導入した場合の効果を試算して、十分な投資効果があると判断できた場合に、システムを導入するのが一般的である。連携制御の導入手順（ステップ）を図9に示す。

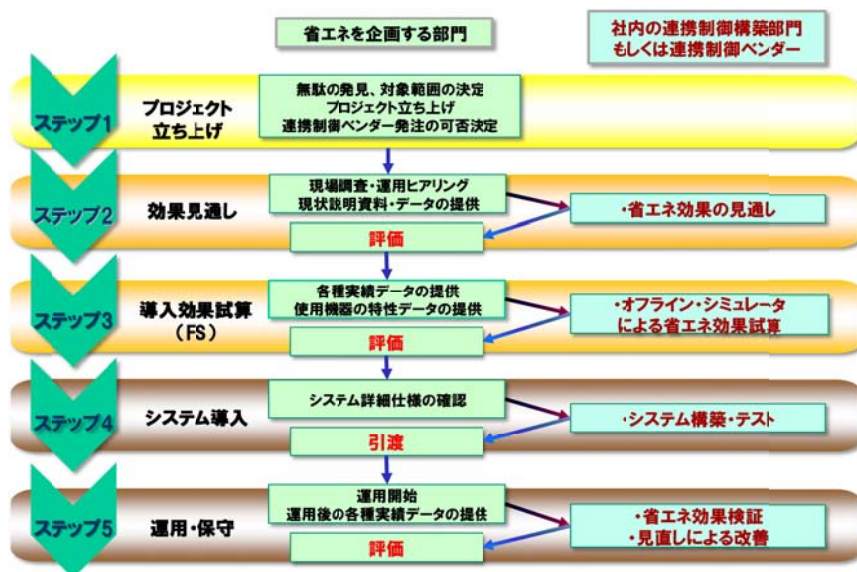


図9 連携制御導入の手順

以下に各ステップの要点を記す。

**ステップ 1**：エネルギー使用データや運転データを解析し、エネルギー使用効率の悪い個所を探すことにより、連携制御の適用範囲を特定する。プロジェクトチームを立ち上げ、自社で構築するか連携制御ベンダーに発注するか、自社の資源を勘案して判断する。

**ステップ 2**：対象設備の構成や仕様を確認し、現状の運用状況や問題点を関連部門からヒアリングし、適切な連携制御のあり方と想定される大まかな省エネ効果を見通す。

**ステップ 3**：前述の検討で投資対効果が見込まれる場合は、詳細な機器・運転データを用いてフィージビリティスタディを実施する。詳細な運転データが無い場合には、仮設で計測器を取り付け必要なデータを収集する場合もある。一般的にステップ3は工数がかかる作業となるため、連携制御ベンダーに作業を依頼する場合は有償になることが多い。なお本ステップの導入効果試算に用いるデータは、ステップ5の効果検証に必要となる。

**ステップ 4**：フィージビリティスタディの結果、十分な導入効果が得られると判断した場合には、現状のシステムを確認の上、連携制御システム構築の仕様をまとめ、外製する場合は連携制御ベンダーに見積を依頼する。当該見積書を基に投資対効

果を吟味し、導入可否を決定する。導入決定後は発注し、通常のプロジェクト実施手順と同様のプロセスを経てシステムを導入する。

ステップ 5：システムの運用を開始したら必要な各種データを収集・記録し、省エネの効果を検証する。対象設備や運用の変更があった場合には、制御ロジックやモデルの見直し、連携制御の効果を維持するためのチューニング等のメンテナンスを実施する。連携制御の効果を維持し、最大限に得るためには、導入後の保守が重要となる。

## 5. 今後の課題とまとめ

連携制御は、新たな機械設備など大型の投資が不要、すなわち既存の設備にサーバやコントローラなどの制御システムを追加するだけで実現できる投資対効果の高い省エネ手法である。さらに、比較的単純な供給連携から、生産計画立案やデマンドレスポンスなどを含む需給双方向連携へと段階的に連携の範囲を広げていく分割投資が可能な手法である。

連携制御の投資コストは、対象設備の数や複雑さ（組み合わせの制限など）に多く依存し、エネルギー消費量の規模にはあまり依存しないことから、これまで投資対効果の点でエネルギー消費量の大きい施設への適用が多かった。今後は、パッケージ化、標準化により投資コストを下げ、より多くの施設に適用できるようにしていくことが必要と考えている。

また、ピーク対策に効果的な需要設備連携、デマンドレスポンスに対応した需給双方向連携、再生可能エネルギーや蓄電池を含む供給連携、スマートシティへの対応など、連携制御の適用範囲の拡大も期待できる。

エネルギーの効率的使用を目指し、異なるシステムや設備同志を連携させることでスタートした連携制御は、以前より IoT (Internet of Things) を先取りした概念を持っていた。今後、IoT の普及により、生産設備やエネルギー変換設備など多くの設備や機器が、それぞれのエネルギー特性を共有して最適な運用がなされるような連携制御が実現され、エネルギー効率のみならず生産性や品質の向上などを通して社会の変革を支援することが期待される。

以上

一般社団法人電子情報技術産業協会（JEITA）制御・エネルギー管理専門委員会  
WG1

鈴木康央（主査：アズビル）、松井哲郎（副主査：富士電機）、植木和夫（委員：  
アズビル）、井上賢一（委員：横河電機）、宇野達朗（委員：横河電機）、池山智之  
（委員：横河電機）、藤田賢一（委員：荏原電産）、川合岳児（委員：千代田シス  
テムテクノロジーズ）、下江政義（委員：三菱電機）、若狭裕（オブザーバ：日本  
電気計測器工業会）、花形将司（オブザーバ：省エネルギーセンター）

<http://home.jeita.or.jp/cgi-bin/page/detail.cgi?n=461&ca=1>

（注1）（JEITA）WG では「連携制御ガイドブック」を作成しているので、詳細はそれを参照して  
いただきたい。