

題 目 プロセス産業における省エネルギー化のための実用的な高度制御に関する研究  
(A Study on Practical Advanced Control Technologies for Energy Conservation in Industrial Processes)

氏名 小比賀 理延

国内装置産業においては、改正省エネ法や ISO50001 においても明示されているように、地球環境保全の観点から省エネルギー化が強く推進されている。とりわけ、石油精製や石油化学における産業界では、エコカーの普及や脱石油製品の社会背景から、石油製品自体の需要が縮小傾向にある。国の施行するエネルギー供給構造高度化法では、これらの社会背景に対応すべく、企業の設備統廃合を促す側面もある。しかしながら、企業における収益性確保の観点においては、設備統廃合のみでは不十分であり、それらの統廃合された設備をどのように有効活用できるかが焦点となっている。特に近年では、上述の通り需要の縮小から、最大負荷一定生産の運転方針から市況対応への運転方針に転換が図られている。市況運転においては、生産量を増やすことによる収益確保ではなく、より一層のコスト削減による収益確保が主体となる。石油・石油化学におけるコストは、大部分が蒸気や化石燃料である。これらのエネルギーコストは 1 工場だけでも、大規模な工場においては、年間数百億円を超える規模となり、その削減は地球環境保護の観点のみならず企業経営においても重要であることがわかる。本研究においては、装置産業における省エネルギーを達成するための、制御技術について考察する。実用性を考慮した場合、以下の要件が必要となる。

- (1) 制御アルゴリズムが簡潔であること (安全要件)
- (2) 計算負荷が低いこと (実装要件)

省エネルギー化のためには、画一的な方法はなく、装置毎に省エネルギー化のための観点や方策は異なる。本論文では、産業界で多く用いられている装置に対する省エネルギー化の方策について検討する。このため、制御対象は、化学分野における培養や製品品質試験等において広く用いられる環境試験機 (恒温恒湿機)、石油化学の分野で多く用いられ、なおかつ多量の蒸気を消費する多重効用缶 (濃縮設備)、3 つ目に石油・石油化学において最もエネルギーを消費する装置の一つである加熱炉を選定し、それぞれに対して実機適用を通して、提案する省エネルギー化のための制御手法の有効性を検証する。本論文は、以下に示す 5 章から構成される。

第 1 章では、研究の背景にある、装置産業のおかれている現状、及びそれらに対する制御の役割、重要性について述べる。省エネルギー化のための方策は、設備自体の高効率化によるハードウェアの側面と、制御や運転方法の高度化によるソフトウェアの側面の 2 つに大別できる。前者の方法は、既存設備との置換や改造を前提とするもので、ROI (Return on Investment) の効果も薄い。後者の方法は、既存設備の改造や置換が不要なため費用対効果が高く、今後の装置産業の省エネルギー化においては、幅広く普及できる後者の技術拡充が必要であることも記述し、本論文の視点が、社会的にも大きな意義をもつことを説明する。

第 2 章では、環境試験機に対する省エネルギー化のための制御設計について述べる。環境試験機は、化学品や自動車、プリンタ、精密機器等の環境変動性能を検証するもので、大型なものは上記の通り自動車を入れる程度のものまでである。試験機内部 (槽内) では、加熱器・冷凍器・加湿器を操作することで所望の温度と湿度を作り出すことができる。従来の市販されている普及品においては、3 つある操作端 (加湿、加熱、冷凍) に対して、制御量が 2 つ (温度、湿度) であったため、制御に冗長性が生まれることによる

エネルギーロスが生じていた。これを解消し省エネルギー化を実現すると同時に、制御性能も改善するための新しい省エネルギー型多変数制御系を提案し、実用例を示しその有効性について考察する。

第3章においては、多重効用缶濃縮設備に対する省エネルギー化の考え方、及びその制御系設計について述べる。多重効用缶は、複数の効用缶が直列に接続されており、それらの缶に別の缶からのペーパーが熱源となり濃縮を順次進める。濃縮の進行度合いは、各缶におけるヒートバランス/マテリアルバランスの均衡度合に加えて、各缶での滞留時間によってほぼ決定される。ある缶の滞留時間安定化は、他方の滞留時間の変動を助長する干渉系であることから、プラントワイドな制御設計が必要となる。この解決策として、各制御ループの制御の強度を最終製品濃度が安定化するように、近年研究が盛んなデジタルツインを用いて最適化する新しい手法を提案する。また、実運用を通じてその有効性を検証する。

第4章においては、産業界で最もエネルギーを消費する装置の一つである加熱炉に対する省エネルギー化制御について述べる。加熱炉制御の省エネルギー化に際しては、排ガス熱損失を最小化することが重要であり、これは同時に NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> といった環境負荷にも関連する。これを実現するためには、排ガス残酸素濃度を極力低減することが重要であるが、下げすぎると不完全燃焼から CO が発生し、場合によっては黒煙を生じ、爆発等の危険性もある。したがって、高安定な酸素濃度制御系を実現し、不完全燃焼が生じない程度に空気比を低減することが重要となる。酸素濃度安定化のためには、酸素の分析・検出遅れを短縮することが重要であるため、この機能を物理モデルと統計的手法の組み合わせによって実現することで推定性能と安全性の両方を改善する方法を提案する。これに加えて、COT (Coil Outlet Temperature) 制御の分散低減による省エネルギー化についても、実用化の過程において新たな知見が得られたため、これについてもまとめる。上記の酸素濃度制御と COT 制御による省エネルギー化について述べ、実用例を通じてその有用性を考察する。

第5章においては、本研究を総括するとともに、その社会的意義及び今後の展望についてまとめる。