

JEMIMA Whitepaper

製造業における エネルギー効率向上への システムアプローチ

2016 年 3 月 31 日

一般社団法人 日本電気計測器工業会（JEMIMA）

エネルギー・低炭素政策委員会

目次

1.	はじめに	5
2.	エネルギー世界事情と IEC/TC65/JWG14 発足の経緯	6
3.	エネルギー管理	8
3.1.	エネルギー管理の手順	8
3.2.	エネルギー性能 (Energy performance)	9
3.3.	エネルギー性能指標 (EnPI)	9
3.4.	エネルギーベースライン (EnB)	10
3.5.	ベンチマーク	11
4.	システムアプローチ	12
4.1.	システムアプローチとは	12
4.2.	エネルギー効率	12
4.3.	バウンダリー	13
4.3.1.	EMU	13
4.3.2.	EMU の設定	13
4.3.2.1.	物理的設定	14
4.3.2.2.	組織的設定	15
4.3.2.3.	エネルギーシステムの設定	16
4.3.2.4.	EPIA(Energy Performance Improvement Action) 的設定	16
4.3.3.	EMU ステータスと時間的バウンダリー	17
4.3.3.1.	EMU ステータス	17
4.3.3.2.	時間的バウンダリー	17
4.3.3.3.	生産プロセスと時間的バウンダリー	18
4.4.	エネルギーの流れの見える化	19
4.5.	改善プロセス	20
4.5.1.	着眼点	20
4.5.2.	熱回収：熱エネルギーの有効利用	22
4.5.2.1.	熱収支	22
4.5.2.2.	排熱の利用	22
4.5.2.3.	エクセルギー	24
4.5.2.4.	石油化学コンビナートに於ける排熱の有効利用 ⁽¹¹⁾	24
4.5.2.5.	鉄鋼製造プラントにおける排熱の有効利用	25
4.5.3.	トップダウンアプローチとボトムアップアプローチ	27
4.5.4.	SEU (Significant Energy Use)	28
5.	生産システムの構成とエネルギー効率向上のための制御技術	29
5.1.	産業界のエネルギー効率の国際比較	29
5.2.	生産プロセスの特性	30
5.2.1.	連続プロセス	30
5.2.1.1.	石油精製プロセス	31
5.2.1.2.	石油精製プロセスに於ける EMU と EnPI	32
5.2.2.	バッチプロセス	33
5.2.2.1.	バッチプロセスの特性	33
5.2.2.2.	バッチプロセスのモデル	34
5.2.2.3.	バッチプロセスの処方(Recipe)	35
5.2.2.4.	バッチプロセスの処方とモデルの関係	37
5.2.2.5.	バッチプロセスにおけるエネルギー管理	38

5.2.2.5.1.	ロット（バッチ）毎のエネルギー管理	38
5.2.2.5.2.	事例(1) スプレードライヤーの消費電力削減.....	39
5.2.2.5.3.	事例(2) バッチ系重合プロセスにおけるエネルギー管理	40
5.2.3.	ディスクリートプロセス	41
5.2.3.1.	工作機械の消費エネルギー	41
5.2.3.2.	生産における設備の稼働状態：Time model.....	42
5.3.	生産システムの階層構成	43
5.3.1.	生産システムの階層構成とエネルギー管理機能	43
5.3.2.	生産システムにおける制御情報の階層モデル	43
5.4.	プロセス制御技術によるエネルギー効率の改善.....	45
5.4.1.	装置のエネルギー消費特性	45
5.4.2.	モータのインバータ制御	45
5.4.3.	制御ループのチューニング	47
5.4.4.	燃焼制御	49
5.4.5.	高度制御：APC (Advanced Process Control)	50
5.4.6.	供給空気圧制御.....	51
5.4.7.	蒸気ヘッダ圧力制御	52
5.4.8.	連携制御	53
6.	今後の展望.....	54
6.1.	IoT を活用したエネルギー管理.....	54
6.2.	Smart grid：工場とコミュニティによる最適システム構築.....	55
6.2.1.	FEMS Factory Energy Management System ⁽²⁷⁾	55
6.2.2.	FEMS と Smart grid.....	56
6.2.3.	工場とコミュニティによる最適システム構築.....	57
6.3.	次世代生産プロセス	59
6.3.1.	戦略的省エネルギー技術革新プログラム ⁽²⁹⁾	59
6.3.2.	エネルギー関係技術開発ロードマップ ⁽³⁰⁾	60
7.	地球環境保全とエネルギー管理.....	62
8.	参考文献	63
Annex.....		65
A1.	ベンチマーク指標及び中長期的に目指すべき水準	65
A2.	IEC62264 Functional Hierarchy	67
エネルギー・低炭素政策委員会/エネルギー計測・制御 WG(WG1)	2015 年度.....	68

1. はじめに

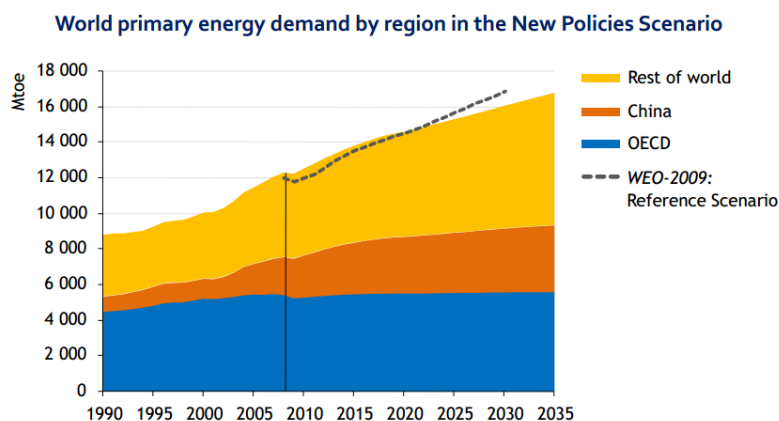
エネルギー効率（Energy Efficiency）の高い低炭素社会の実現を目指して、産業界・ビル・家庭・運輸など様々な分野でのソリューションと共通の社会インフラ基盤が求められている。特に産業オートメーションでは従来生産性向上の一環として取り組まれてきた省エネルギー対策が、単独の設備や組織を対象とするレベルから複合的なシステムレベルでの最適化へとシフトしつつあり、より高度な計測・制御技術の活用も急務となっている。このような背景を受けて、国際標準化組織や地域・業界組織がその社会全体に通じたアプローチを整え、高エネルギー効率社会への移行を推進している。自律分散した管理単位が最高のパフォーマンスで運用されていれば良いとも言えるが、現実的にはその管理単位の設定や施されているパフォーマンスの向上手段が設備や施設、プロセス、企業の組織によってその場限りの解決策になっていることが多く、必ずしも全体として効率良い結果に結びついていないケースもある。更なる改善を進めるためには、個々の装置レベルでの最適化では限界があり、組織横断的な活動を通して全体的な最適解を追求する必要がある。このような複合的なレベルでの見方は「システムアプローチ」としてのガイドが必要であるとの認識から、IEC/TC65 や ISO/TC301 ではこの視点に沿った「アプローチを示した国際標準」の開発が用語の整理とともに進められている。

本 White paper では、国際標準化の方向と整合をとりながら、そこで展開されている方法論を踏まえて、また実務的な省エネ活動とのつながりを取りながら「システムアプローチ」を解説した。企業のエネルギー効率化を推進する立場にある方、省エネ・プロジェクトのリーダーおよび現場担当者の方々のご活動の参考にしていただければ幸いである。

2. エネルギー世界事情と IEC/TC65/JWG14 発足の経緯

世界のエネルギー消費量は、経済成長とともに増加の一途をたどっている。図 1 に 世界のエネルギー消費のトレンドを示す。OECD 諸国の消費量がほぼ一定であるのに対して、中国・インドなど経済成長著しい諸国の消費量の伸びが顕著であり絶対値も大きい。

セクター別のエネルギー消費トレンドは、図 2 に示すように産業用が 50%以上を占めており今後も増加が見込まれている。エネルギー消費の増大とともに環境問題、エネルギー問題が深刻化することが懸念されるので、産業セクターのエネルギー効率の向上が急務となっている。



Global energy use grows by 36%, with non-OECD countries – led by China, where demand surges by 75% – accounting for almost all of the increase

図 1 世界のエネルギー消費のトレンド

出典： IEA World Energy Outlook 2010

Figure 83. World delivered energy consumption in the industrial and all other end-use sectors, 2005-2035 (quadrillion Btu)

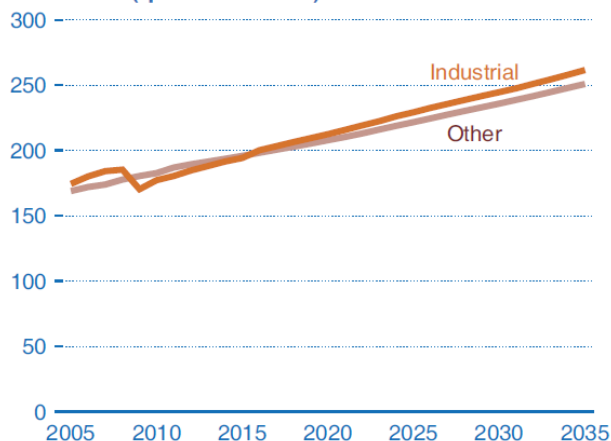
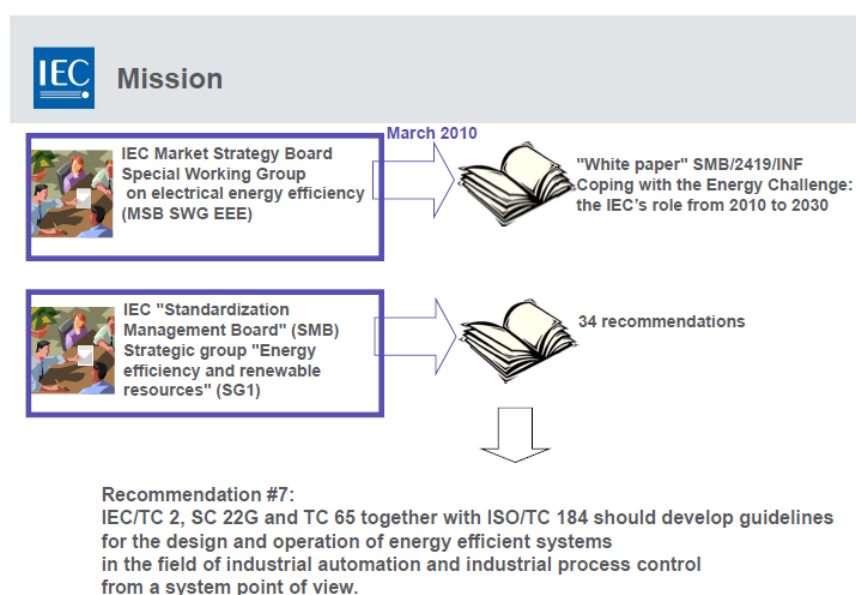


図 2 セクター別のエネルギー消費トレンド

出典： International Energy Outlook 2010 DOE/EIA-0484(2010)

この事情に鑑みて、IEC は 2010 年に Whitepaper を発行し、エネルギー問題に対する IEC の展望が示された。“Coping with the Energy Challenge The IEC’s role from 2010 to 2030”⁽¹⁾。また SMB(Standardizaion Management Board)/SG1 から、エネルギー効率に関する IEC 標準作りに対して 34 の Recommendation が出された。(図 3 参照) これに基づき 2010 年 2 月に Energy Efficiency Joint Workshop が開かれ、Automation の観点から産業界のエネルギー効率を向上させるために IEC/TC65/JWG14 が組織された。

JEMIMA からは、第 1 回 (2010/7/9 Stuttgart) 以降エキスパートとして毎回積極的に参加し、テクニカルレポート IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09, ”Energy efficiency through automation systems”⁽²⁾ の発行に貢献した。JEMIMA エネルギー・低炭素委員会 WG1 が IEC/TC65/JWG14 の国内委員会として中心的役割を担っている。本 JEMIMA Whitepaper は、IEC/TR62837 に盛り込んだ JEMIMA からの提案を中心に、関連してエネルギー・低炭素委員会 WG1 で検討した内容をまとめたものである。



4

図 3 IEC/TC65/JWG14 発足の経緯

3. エネルギー管理

新興国のエネルギー使用の増大を背景に世界のエネルギー需要は増加し、エネルギーコストは短期的な高騰や暴落など不安定な動きをしながらも長期的には上昇し続けると予想されている。そのため企業活動の継続には、今まで以上にエネルギーマネジメントが重要となってくる。

このような世界的状況に対応するため、エネルギーマネジメントシステムの国際規格 ISO50001 が発行され、ドイツ、米国、中国をはじめとする海外企業が積極的に導入し、急速にエネルギー効率を改善してきている。省エネ先進国である日本では長年にわたり多くの省エネ対策が行われ、一般的には限界説が広まっているものの、多くの専門家がさらなる省エネの可能性の大きさを指摘している。この可能性の実現手段の一つとして、国際規格 ISO50001 の積極導入や、その重要な要素である「エネルギーパフォーマンス指標の計測」の部分導入が位置づけられる。日本の先進事例を含め世界各国のベストプラクティスを踏まえて開発された国際規格のエネルギー管理手法を早期に導入し、我が国の企業の省エネ優位性を確固たるものにすることが重要と考えられる。

3.1. エネルギー管理の手順

工場など、実際の企業活動に於けるエネルギー管理は多面的な要素をもち、何を対象として、どのような指標を作って測定し、誰が（どの組織が）どのように改善するのか、などを明確にして進めることが重要である。図 4 にエネルギー管理の手順を示す。はじめにエネルギーレビューを実施して、エネルギーパフォーマンスの関連情報を収集し現状を掌握する。その上でエネルギー管理の対象を定め、そのエネルギーパフォーマンスの指標 **EnPI** とその目標値を設定し、その実現に向けて改善対策を策定する。次に改善の比較対象となるエネルギーベースラインを設定し、対策の実行に入る。実行過程では、エネルギーパフォーマンス指標 **EnPI** を日常的にモニタリングし継続的改善を行う。製造プロセスの変更や設備更新などでエネルギーの使用状況が変わる場合があるため **EnPI** の維持・改良が必要である。なお、エネルギー管理の手順の詳細については、ISO50001⁽⁵⁾、ISO50006⁽⁶⁾が参考となる。

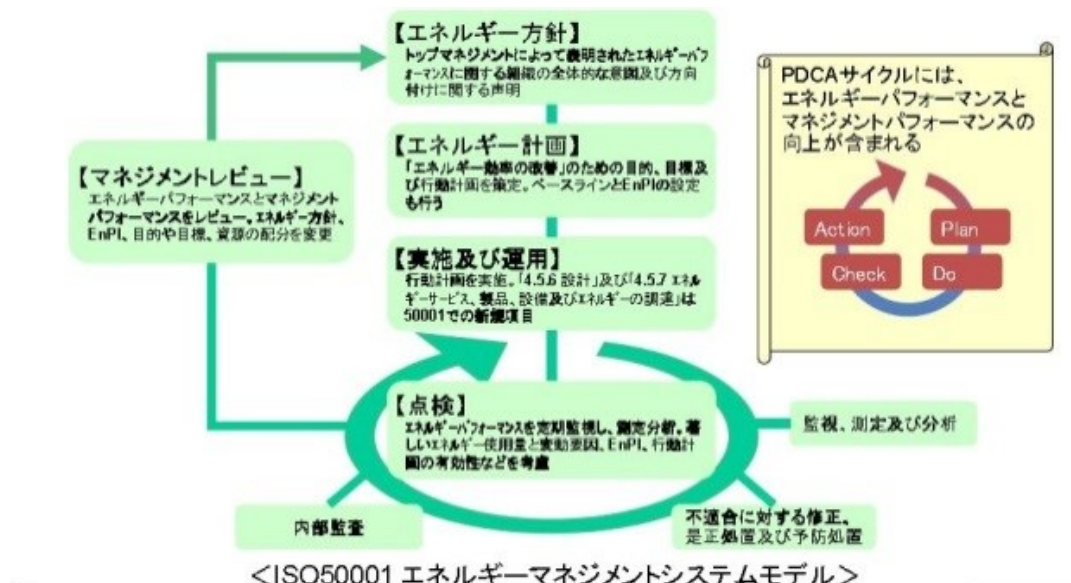


図 4 ISO50001 エネルギーマネジメントシステムモデル

出典：JEITA「エネルギーマネジメントの重要性と IT ソリューション」(2011)

3.2. エネルギー性能 (Energy performance)

ISO50001 には、エネルギー性能とは「エネルギー効率、エネルギーの使用及びエネルギー使用量に関する測定可能な結果」と定義されている。エネルギー消費量、エネルギーの使用（用途）、エネルギー効率などが含まれる。

3.3. エネルギー性能指標 (EnPI)

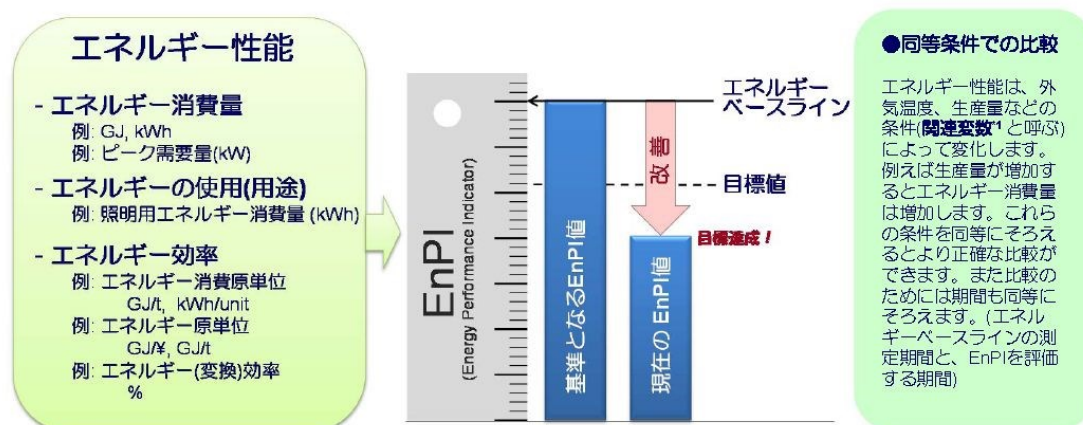


図 5 エネルギー性能指標 (EnPI)

出典：JEITA EnPI 導入ガイド実践編⁽⁴⁾

エネルギー管理の対象としてバウンダリー(EMU)が設定されるが、EnPIはそのバウンダリーと対で設定される。そのためEnPIは組織内の様々な立場のユーザーに適した形で下記の様にEnPIは複数設定されると良い。

- ・これらのEnPIsは設備単位、空調や蒸気などエネルギーシステムの単位、製造プロセスや装置の単位、あるいは組織や活動の単位で設定される。
- ・特に、任意の設備やプロセスを含む領域で行われるエネルギーパフォーマンス向上施策(EPIA)の単位で設定されることが注目される。
- ・図5には、エネルギーパフォーマンスの事例と、それらをEnPIという物差しではかるというイメージが示されている。基準となるEnPIの値をエネルギーベースラインと呼ぶ。目標となるEnPIの値を目指し、現在のEnPIの値を目標値と比較しながらEPIAを実施していく。

3.4. エネルギーベースライン (EnB)

エネルギーベースライン(EnB)は、ISO50001に「エネルギーパフォーマンスの比較のために設けられた定量的な基準(複数の場合もある)」と定義されている。図6に示す様に、エネルギーベースライン(EnB)とは、ベースライン期間におけるエネルギーパフォーマンス指標(EnPI)の値であり、EnPIの初期値である。組織は、ベースライン期間とレポート期間のエネルギーパフォーマンスの変化を比較する必要がある。EnBは、単にベースライン期間のEnPI値を決定するために使用される。EnBを確立するために必要な情報の種類はEnPIの特定の目的によって決定される。EnBはEnPIの初期値なので、EnPIと同じ種類の情報が必要である。

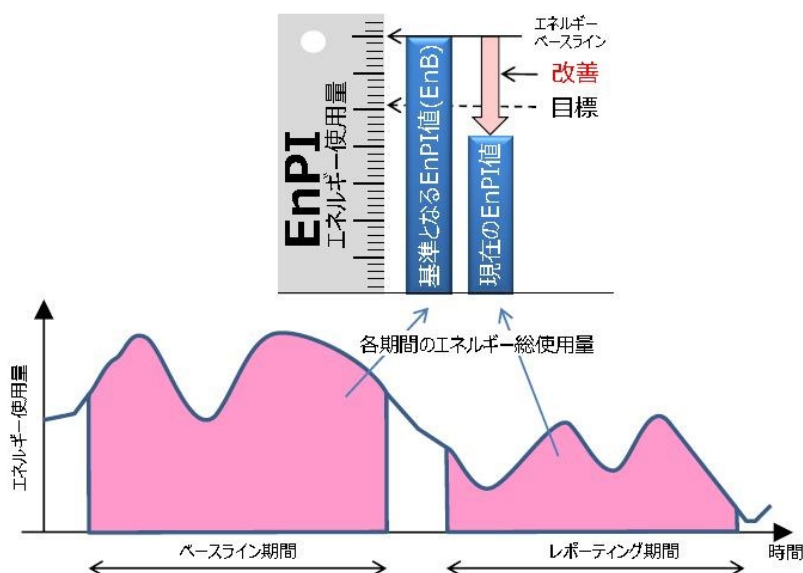


図6 エネルギーベースライン

出典：JEITA EnPI導入ガイド実践編⁽⁴⁾

3.5. ベンチマーク

セクター別ベンチマークとは、同様もしくは非常に近い手法によりエネルギーを使用している特定の事業（製品やその製造方法又は提供サービスの種類やその提供手法等により区分可能な範囲）について、そのエネルギーの使用の合理化の状況を比較できる指標を設定し、省エネルギーが他社と比較して進んでいるか、遅れているかを明確にし、非常に進んでいる事業者を評価するとともに、省エネルギーが遅れている事業者に更なる努力を促すものである。省エネルギー法では、主要なセクター（エネルギー多消費産業等）ごとに、ベンチマーク指標を設定するとともに、中長期的に目指すべき水準が設定された。[ANNEX_A1](#)にベンチマークの対象事業として下記の業種が指定され、それぞれのベンチマーク指標が示されている。

- (1A) 高炉による製鉄業
- (1B) 電炉による普通鋼製造業
- (1C) 電炉による特殊鋼製造業
- (2) 電力供給業
- (3) セメント製造業
- (4A) 洋紙製造業
- (4B) 板紙製造業
- (5) 石油精製業
- (6A) 石油化学系基礎製品製造業
- (6B) ソーダ工業

4. システムアプローチ

4.1. システムアプローチとは

システムアプローチとは、システム構成要素のエネルギーパフォーマンスを個々に追求するのではなく、構成要素の最適運用をはかることによって、システム全体のエネルギーパフォーマンスの最適化をはかるアプローチである。

生産ラインは、様々な機器、装置などから構成されるシステムであり、エネルギー管理の指標も管理の対象ごとに設定される。個々の要素のエネルギー性能を考慮するだけでなく、全体の効率を最適化する上でその要素がアプリケーションに於いていかに効率よく使われているかを評価することが重要である。全体の効率を最適化することは、個々の要素の最適化を必ずしも意味しない。また、生産ラインや製品製造バッチ単位のエネルギー管理も必要であり、それぞれの管理目的に応じた対象領域（バウンダリー）の設定や実施手順を考慮したシステムアプローチの重要性が増してきている。また、「システムアプローチ」としてのガイドが必要であるとの認識から、IEC/TC65 や ISO/TC301 ではこの視点に沿った「アプローチを示した国際標準」の開発が用語の整理とともに進められている。

4.2. エネルギー効率

ISO50001 ではエネルギー効率は「パフォーマンス、サービス、物品、又はエネルギーのアウトプットとエネルギーのインプットとの比の定量的な関係」と定義されている。インプット及びアウトプットの量及び質は明確に特定されかつ、測定可能である必要がある。比で定義されているので、比の分子、分母の取り方には注意が必要である。

例：エネルギー変換効率 %、
必要エネルギー/使用エネルギー、
アウトプット/インプット、
理論的操業エネルギー/実際の操業エネルギー。 製品 /GJ

日本の省エネルギー法ではエネルギー効率を表す量としてエネルギー消費原単位が定義されており、工場全体の省エネルギー指標として使用される。

定義：「エネルギー使用量/エネルギー使用量と密接な関係を持つ量」

エネルギー消費原単位の英訳として SEC (Specific energy consumption) あるいは EI (Energy intensity) が使われる。EI (エネルギー強度) はエネルギー経済効率 (エネルギー使用量/GDP : MJ/US \$) という経済指標として使われる。

4.3. バウンダリー

エネルギー管理において、エネルギー効率の変化(向上/低下)を評価する対象範囲、すなわちバウンダリーを特定することは重要である。

4.3.1. EMU

エネルギーを管理する単位を **Energy Managed Unit (EMU)** と呼ぶ。IEC/TR 62837⁽²⁾ では、**EMU** の構造を図 7 のように定義している。**EMU** は、エネルギー管理の対象とする“バウンダリー（境界）”を持ち、管理の目的としての **KPI(EnPI:ISO50001)** が定義される。**EnPI** としては、エネルギー使用量、エネルギー効率、エネルギーコストなどがあげられる。**EMU** の“入力”としては、エネルギーと原材料が、“出力”としては、最終製品、再利用可能な原料、廃棄物、排出エネルギーなどが考えられる。入出力にはエネルギーを使用するサービスも含まれる。

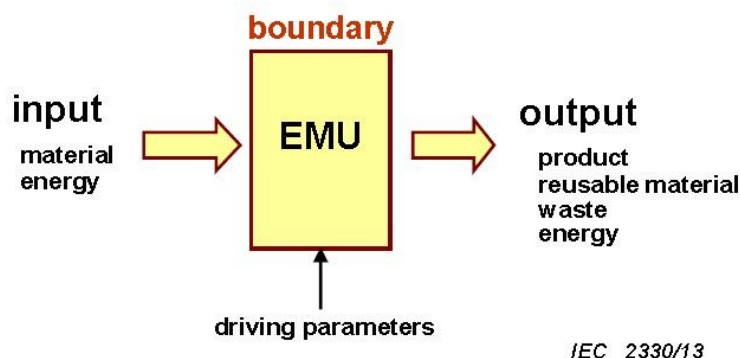


図 7 EMU (Energy Managed Unit)

出典：IEC/TR 62837⁽²⁾

“影響要因 (driving parameter)” とは、**EMU** の入出力特性 (エネルギーパフォーマンス) に影響を与える外的要因を意味しており、生産量、主要装置・設備の運転/停止などがあげられる。外気温などの気象条件も、影響要因のひとつである。

ISO50006 ではエネルギーパフォーマンスに影響を与える外的要因として、「日常的に変化する計測可能な要因」 **Relevant variable** (関連変数) と、工場操業のシフト数などのようにエネルギーパフォーマンスに影響を及ぼすが「日常的には変化しない要因」 **Static factors** (静的要因) とが定義されている。**Driving Parameters** には **Relevant variable** と **Static factors** が含まれる。

4.3.2. EMU の設定

工場など、実際の企業活動に於けるエネルギー管理は多面的な要素をもち、何を対象として、どのような指標を作って測定し、誰が (どの組織が) どのように改善するのか、などを明確にして進めることが重要である。そのためにエネルギー管理の対象(バウンダ

リー)としての EMU は目的に応じてフレキシブルに設定できる。図 8 では EMU1 は企業全体を、EMU2 は工場（事業所）の生産ラインなどを、EMU3 は複数の装置をまとめて、EMU4 はデバイス単体を、それぞれ EMU として設定した例を示している。

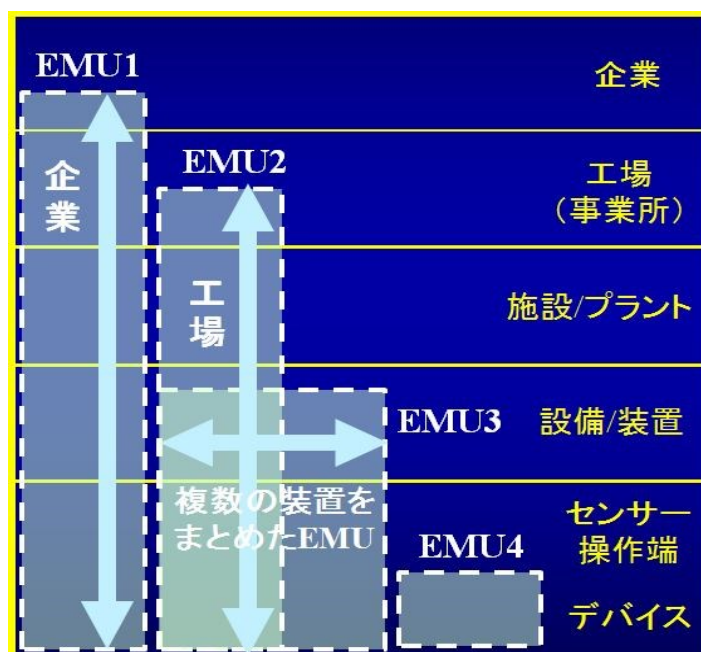


図 8 EMU の設定

エネルギー管理の目的に応じた EMU の設定の視点を以下に述べる。

4.3.2.1. 物理的設定

生産設備や各種の装置など、ハードウェアの物理的な単位を EMU として設定することができる。例えば一つの生産ラインを EMU として設定した場合、その構成要素である各種の装置やデバイスなどもそれぞれ新たな EMU として設定できるので、図 9 のように表すことができる。ハードウェアの物理的な階層構造に対応した EMU の階層構造を示している。

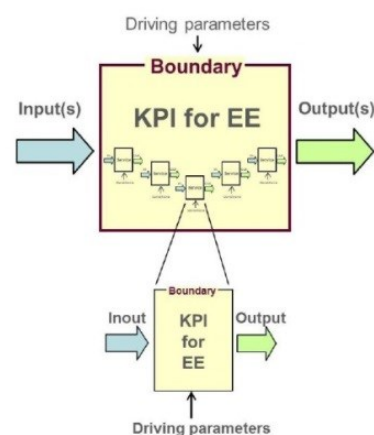


Figure 2 - Broader boundary description

図 9 EMU の階層

4.3.2.2. 組織的設定

図 10 は一般的な生産工場の機能とその運営組織の関係を表したものであるが、組織とその役割に対応して EMU を設定することができる。各 EMU に設定される EnPI は、その組織の長が管理するエネルギーマネジメントの指標である。図 10 の会社では、工場棟には生産部門と動力部門が、事務棟ビルには販売・技術部署が入っている。BusinessUnit (BU) として製品 A を担当する BU と製品 B を担当する BU があり、それぞれ生産部門と販売・技術部署をもっている。工場にはエネルギー管理者がおかれている。会社の共通組織として経理部門がある。

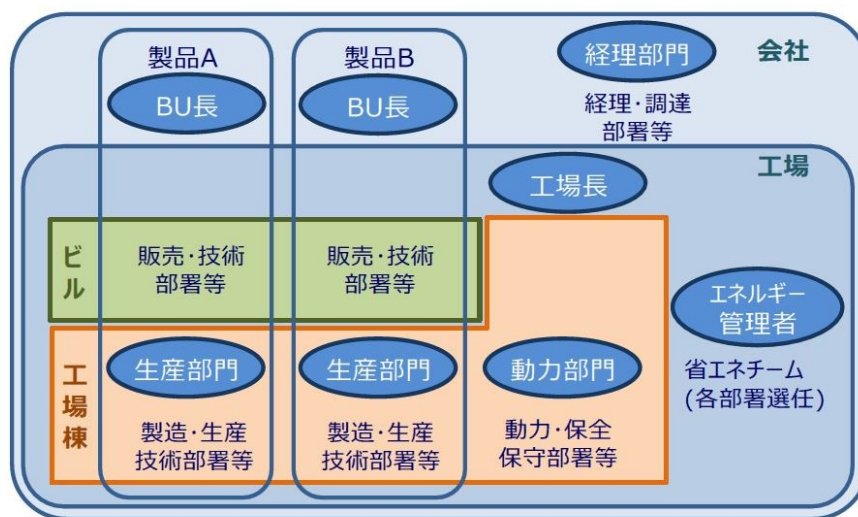


図 10 工場の組織と EMU

出典：JEITA 国際標準のエネルギー管理手法 ～EnPI 導入ガイド～ 実践編⁽⁴⁾

表 1 に組織に対応した EMU と EnPI の例を示す。

表 1 組織に対応した EMU と EnPI

ユーザ	EMU	EnPI の例	EnPI の目的
工場長	工場全体	工場のエネルギー使用量など	省エネ効果の把握など
製品 A,B の BU 長	担当製品の製造ラインおよびサブライン	エネルギー消費原単位、エネルギーコストなど	製品を製造するエネルギーコストの把握、削減など
製造部門	工場内の製造施設・設備・装置群など	エネルギー消費原単位など	エネルギー効率向上施策の立案、および、実行、エネルギー目標の達成など
動力部門	熱および動力設備、動力等の配送設備など	エネルギー使用量など	蒸気や電力発生の効率向上施策の立案、実行など
エネルギー管理者	エネルギー効率向上施策に応じた様々な単位	エネルギー効率など	エネルギー効率向上施策の管理、立案、実行など
省エネチーム（各部署より選任）	エネルギー効率向上施策に応じた様々な単位	エネルギー効率のトレンドチャートなど	エネルギー効率向上施策の管理、立案、実行など

出典：JEITA 国際標準のエネルギー管理手法 ～EnPI 導入ガイド～ 実践編⁽⁴⁾

4.3.2.3. エネルギーシステムの設定

エネルギー使用システムの例として、空調システム、蒸気システムなどがあるが、エネルギーの変換、搬送、使用に関わる設備や配管／配線などを含む系全体をひとつの EMU として設定する。

4.3.2.4. EPIA(Energy Performance Improvement Action) 的設定

全社エネルギーコストの削減や特定製品のエネルギー原単位の改善など、エネルギーパフォーマンスの改善活動は組織横断的な活動になる場合が多い。このような場合は、関連する組織や設備を横断的に含んだ形、すなわち任意に EMU を設定することが必要となる。また工場のエネルギー消費量は製品の生産量や種類に大きく依存するので、生産計画と連動したエネルギー管理が必要となる。製造工場が必要とするエネルギーは Utility プラントから供給されるが、Utility プラントは工場側の最大需要に対応した供給能力を持っているので、生産量の変動するとエネルギーの無駄が発生する。図 11 に示すように EMU を設定し、生産計画と連動して工場内のエネルギー受給の最適運用を図ることにより、エネルギー効率の大幅な改善が図られる。（[5.4.8 連携制御参照](#)）

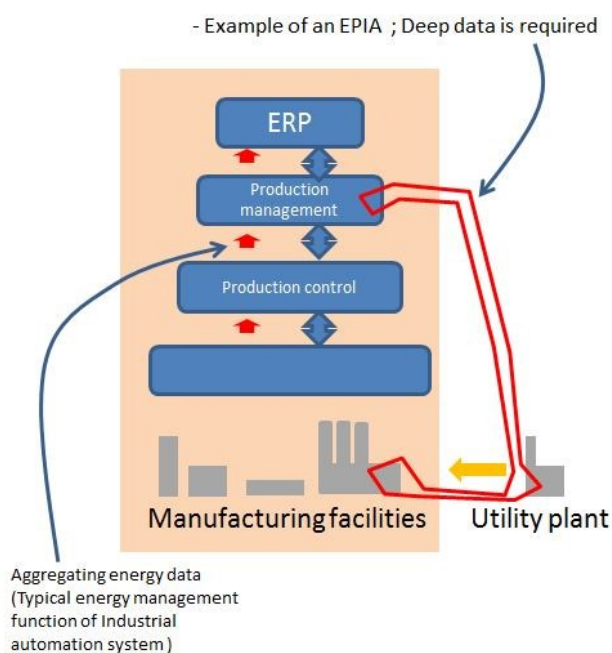


図 11 生産システムに於ける EPIA バウンダリー

4.3.3. EMU ステータスと時間的バウンダリー

4.3.3.1. EMU ステータス

生産プロセスや装置は、例えば「停止」、「立上げ」、「運転」、「立下げ」、「停止」など、操業上有意な状態(ステータス)が定義され、ステータスに基づいて運転されている。このことは EMU が時間軸方向にステータスをもつことを意味している。図 12 はこれを一般化して表したもので、EMU ステータスと消費エネルギーとの関係を示したものである。S1～S5 のステータスが定義されていて、それぞれのステータスで E1～E5 のエネルギー消費があることを示している。それぞれのステータスは固有のエネルギー消費特性を有している。これらはプロセスによって異なるが、それぞれの操業状態にあわせて細分化して定義することが可能である。工程全体のエネルギー消費の総量は、これらの E_i の積分で与えられるので各ステータスに於ける E_i を下げることと併せて、時間軸の要素も検討することが重要である。「立上げ」や「停止」中にもエネルギー消費を伴うが、これは生産に直接寄与しないエネルギーである。操業上の計画的停止以外に、故障など予期しない停止もありエネルギーの無駄に繋がる。高信頼で生産性の高い生産ラインを構築し、エネルギーの無駄をなくすることが重要である。

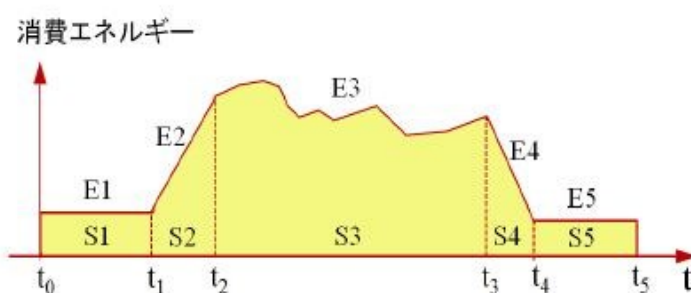


図 12 EMU ステータスと消費エネルギー

出典：JEITA 時空バウンダリー⁽⁷⁾

4.3.3.2. 時間的バウンダリー

図 13 は操業の全行程を「停止」、「立上げ」、「運転」、「立下げ」、「停止」に区分して時間軸上に表し、各 EMU のエネルギー消費量を測定し、この総エネルギー消費量の多い EMU の順に並べて空間軸上に表示したものである。各工程ごとの区分をエネルギー管理の時間的バウンダリーと呼ぶ。4.3.3.1 で述べた EMU ステータスは時間的バウンダリーととらえることができる。時間的バウンダリーはアプリケーションにより定義して運用管理される。

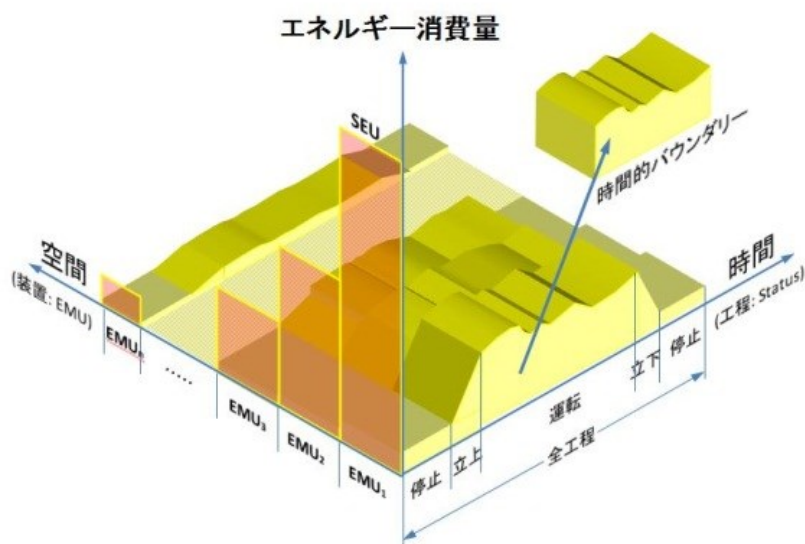


図 13 時間的バウンダリー

出典：JEITA 時空バウンダリー⁽⁷⁾

4.3.3.3. 生産プロセスと時間的バウンダリー

図 14 はバッチプロセス(上段)と連続プロセス(下段)の時間的バウンダリーの例を対比して示したものである。バッチプロセスでは、1 バッチ内での時間的バウンダリーが定義されている。また銘柄変更が比較的頻繁に発生するが、銘柄毎のエネルギー消費特性が大きく変わる場合には、「運転」工程を銘柄で区分する。石油精製などの連続プロセスでは、同一の運転状態が、比較的長時間継続するが、原料（油種）の切り替え時にはエネルギー消費特性が変わる。連続プロセスも時間的バウンダリーをもち、時間軸の長さや頻度が異なるだけで、この観点からはバッチプロセスと同等と見なすことができる。工場に於ける Utility はエネルギー供給設備として、操業中は連続的に稼働するので長時間の時間的バウンダリーをもつ。バウンダリーには空間的バウンダリーと時間的バウンダリーがありそれらを統合する概念を時空バウンダリーと呼ぶ。

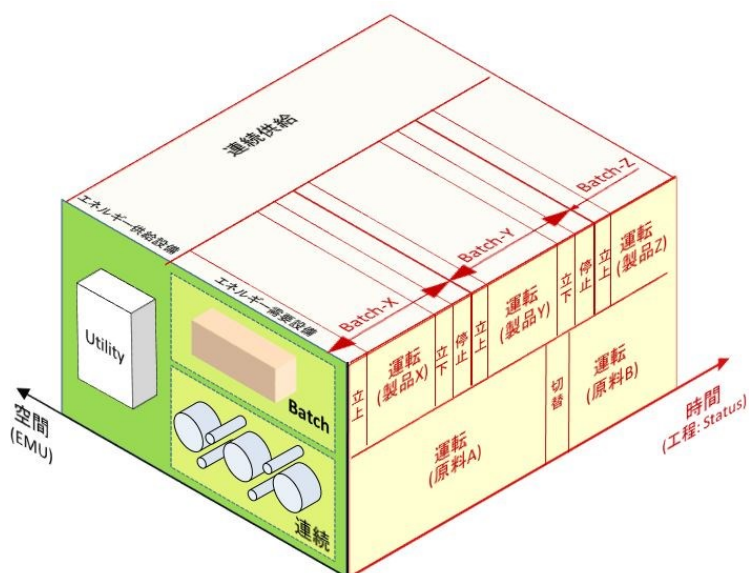


図 14 生産プロセスと時間的バウンダリー

出典：JEITA 時空バウンダリー⁽⁷⁾

4.4. エネルギーの流れの見える化

エネルギー管理では、全体のエネルギーの流れの見える化が重要である。図 15 にフェンス図を用いた工場に於けるエネルギーの流れの例を示す。フェンス図は、製品の製造工程とともにエネルギーの流れを視覚的に表すことができ、あわせてエネルギー管理上必要な計測ポイントを明確にすることができる。図 15 の工場では天然ガス、電力、窒素および原材料を外部から受け入れ、製品 A、製品 B、製品 C が作られている。ビル 1 用、ビル 2 用の製造工程に必要な蒸気はビル 2 のボイラーから供給されている。生産工場では、この流れがエネルギーパフォーマンスに影響するため、管理の目的に応じて、工場全体、生産ライン毎、工程毎、製品毎など、それぞれの単位でエネルギー使用量を把握する必要がある。

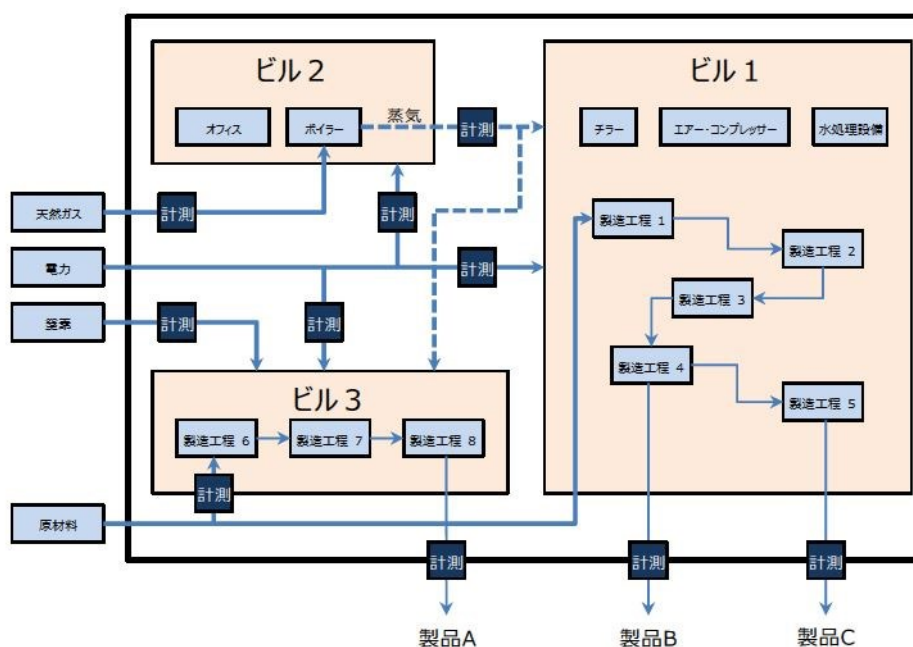


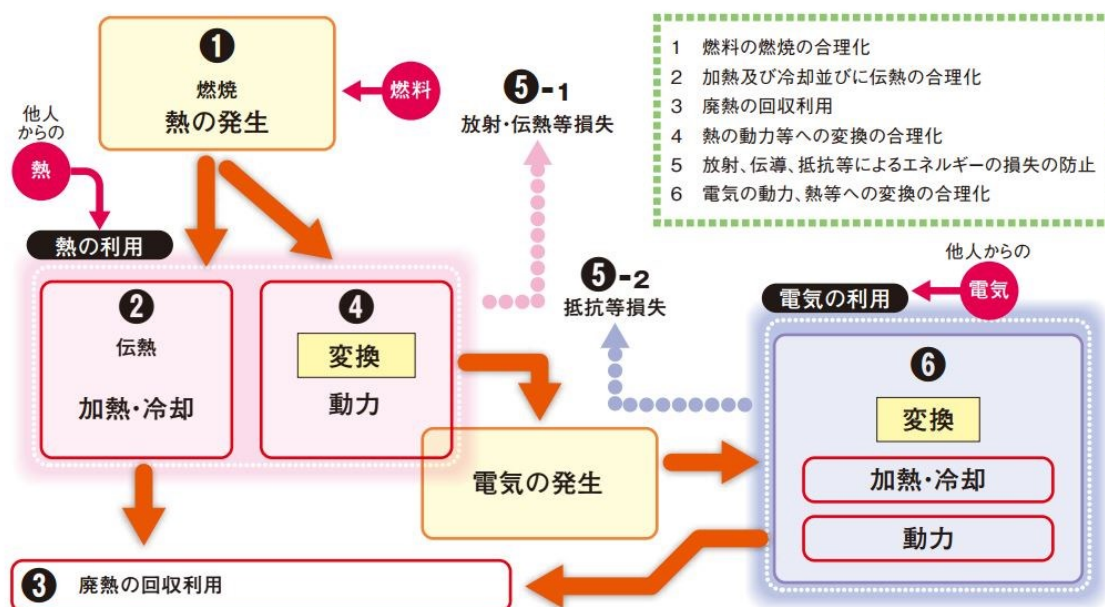
図 15 フェンス図によるエネルギーの流れの見える化

出典：JEITA：国際標準のエネルギー管理手法～EnPI 導入ガイド～実践編⁽⁴⁾

4.5. 改善プロセス

4.5.1. 着眼点

図 16 に工場におけるエネルギーの流れに基づいた省エネルギーの着眼点が①から⑥に示されている。工場ではエネルギー源として電気とならび熱エネルギーが多く使われる。①燃料の燃焼効率を高め、②得られた熱エネルギーの利用効率を上げることが重要である。③排熱は回収して利用する。④発電変換効率を高める。⑤断熱を強化して熱の放射、伝導、抵抗等による伝熱損失を減らす。⑥電気の熱や動力への変換効率をあげる。



出典

図 16 省エネルギーの着眼点⁽⁸⁾

出典：省エネ診断・節電診断の進め方（省エネルギーセンター）
電気と保安 電気と保安 2013 年 1・2 月号

表 2 に省エネルギーの着眼点の例を記す。機器・装置単体のレベルでは、効率の良い機器・装置の導入が検討される。一方既存の設備のままでも、その運転方法によって改善を図る事ができる場合がある。制御系における PID 定数の最適 Tuning なども運用面での改善要素のひとつである。また、エネルギー管理の対象範囲（バウンダリー）を広く取ることにより、個別の設備レベルでは見えてこなかった改善点が、全体最適の視点か

ら見えてきて、かつ大きな改善につながる場合があるので、さまざまな連携の可能性を検討するとよい。

表 2 省エネルギーの着眼点

	機器・装置単体	運用/制御/Tuning	Boundary/連携
0 共通	機器の効率化 トップランナー装置 メンテナンス 配管での圧力損失	設備の点検 設定値に含まれる過剰 非稼働時の消費 アイドルストップ 制御手法の選択 安定化 負荷の平準化 PID 定数 運転時間見直し	組織間連携 Boundary 設定 ピンチテクノロジー 連携制御
1 燃料の燃焼の合理化		燃焼制御 空燃比 余熱	
2 加熱及び冷却並びに伝熱の合理化	工業炉の断熱向上 ヒートポンプ		ホットチャージ
3 廃熱の回収利用	廃熱回収設備		未利用エネルギー活用 被加熱物の排熱
4 熱の動力等への変換の合理化	断熱		
5 放射、伝導、抵抗等によるエネルギーの損失の防止	断熱		
6 電気の動力、熱等への変換の合理化	高効率モータ インバータ化 トップランナー		

4.5.2. 熱回収：熱エネルギーの有効利用

4.5.2.1. 熱収支

プロセスプラントでは、燃料の燃焼、流体の加熱、冷却など熱エネルギーを多く扱い、また化学反応による発熱や吸熱もあるので、系全体の熱収支を管理することが求められる。熱収支とは、系に投入された熱エネルギーに対して系から排出された熱エネルギーおよび系の内部での発熱、吸熱の総和との関連をあらわす。プロセスプラントでは熱エネルギーの収支が大きな比率を占めている。図 17 はサンキーダイアグラムといい、熱収支を図式的に表したものである。熱の大きさを幅であらわし、下から入るのが入熱、そして上に抜けるのが出熱と損失熱、右でぐるっと回っているのが回収熱を表している。これらの指標はプロセスがどれだけうまく熱を使っているかを示すものがある。プロセスに入るエネルギーが入熱、製品保有熱などの様に製品に加えられる熱量を出熱、大気や冷却水などに放熱されて失われる熱を損失熱、プロセスの運転に必要な熱で熱回収によって賄われる熱を回収熱と言う。入熱には原料保有熱、注水保有熱、電力保有熱、加熱炉燃焼熱、空気燃料保有熱、反応熱(発熱)などがある。

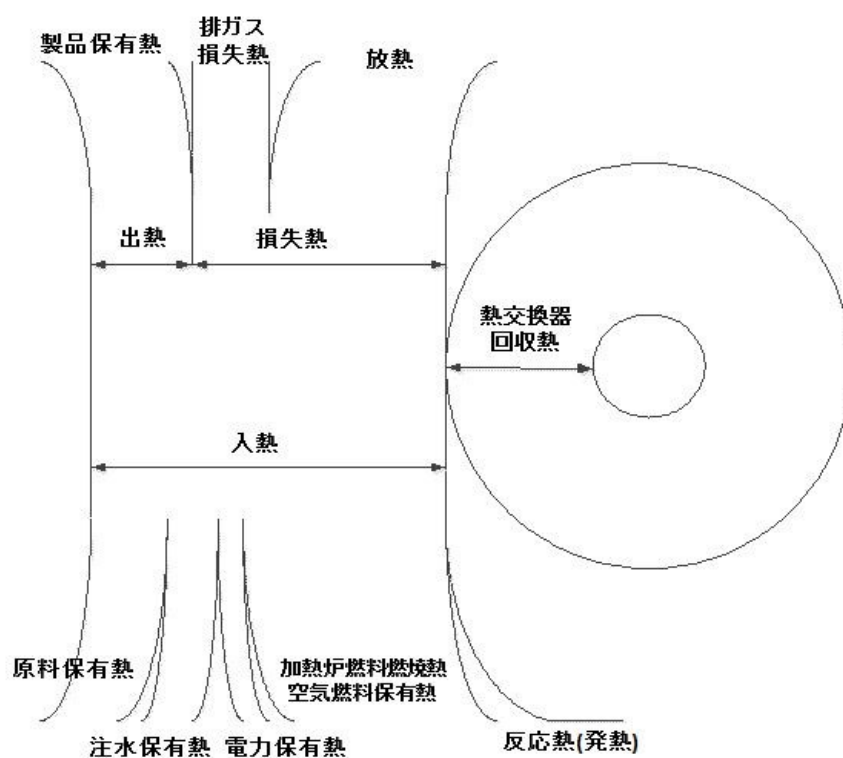


図 17 サンキーダイアグラム

4.5.2.2. 排熱の利用

プロセス産業は燃焼はじめ多くの熱エネルギーを使用しているが、排出される熱エネルギーの有効活用がエネルギー効率向上の決め手になっている。図 18 は物質生産プロセスにおけるエネルギーフローを示す。プロセスに投入されたエネルギーは、①製品と

しての物質が持ち去る熱エネルギー②プロセスで生ずるエクセルギー損失③廃熱となつて出力される。化学産業では、投入エネルギーの 60%が物質（製品）中に保存され、30%がエクセルギー損失となり、廃熱は約 10%であると言われている。これらの熱エネルギーを可能な限り再生/回収し、環境に廃棄される未利用熱エネルギー（廃熱）を最小化することがプロセス産業における省エネの基本である。

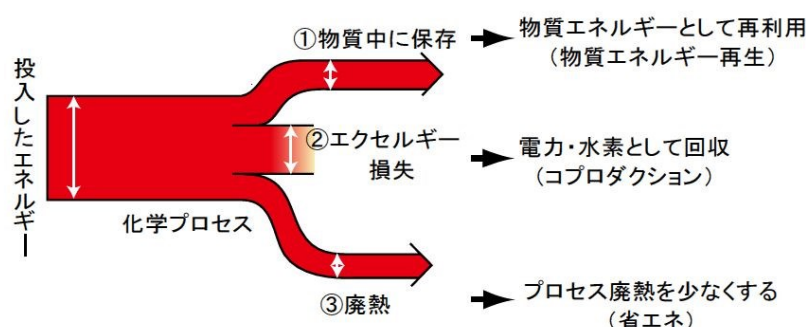


図 18 物質生産部門におけるエネルギー消費

出典：超長期エネルギー技術産業分野ロードマップ解説（産総研）[\(9\)](#)

表 3 に産業別の排熱の特徴を示す。図 19 に業部門別の熱需要の利用温度および排熱温度を示す。石油化学や鉄鋼といった一部の業界以外は、180℃以下の濃縮、乾燥、殺菌等の中低温の熱需要がほとんどである。温度の低い熱需要に対して、燃料の化学エネルギーを熱エネルギーに変換して利用することは、大きなエクセルギー損失を生ずるので、熱力学に基づいたエクセルギー損失の小さい熱利用技術を普及させる必要がある。実際は、不可逆過程に伴うエクセルギー損失が発生し、エクセルギーが消費されていき、最終的には仕事を取り出せない無価値なエネルギー（環境温度の熱エネルギー）となる。低温排熱は依然として回収されないまま残っており、有効利用法については産業界の大きな課題である。

表 3 産業別の排熱の特徴

産業	排熱の特徴
電力	150℃以下の低温ガス排熱部分が約 95%と圧倒的な割合を占めている。
化学	150～200℃の比較的回収しにくい低温のガス排熱部分が 45%と半分程度を占めている。排熱は比較的に全温度範囲に分布している。また、40～60℃の低温排水もかなりある。
鉄鋼	200℃までの比較的回収しにくい低温ガス排熱が、50%弱と大きな割合を占めていると同時に 350℃までの回収しやすい高温排熱もかなりある。また、500℃以上の固体排熱がかなりある。
清掃	150～300℃の排熱が多いことおよび蒸気排熱の多いことが特徴である。
窯業	150℃までの低温ガス排熱が 40%弱と大部分を占め、低温排熱もかなりある。
紙・パルプ	150℃までの低温ガス排熱が大部分を占める。
石油	150～200℃の比較的回収のしにくい低温排熱部分が多い。

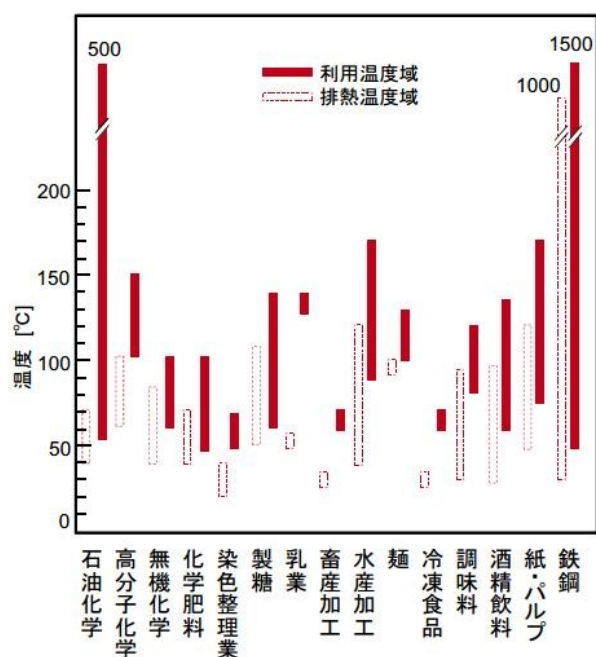


図 19 業部門熱需要の利用温度および排熱温度

出典：中低温熱利用の高度化に関する技術調査報告書⁽¹⁰⁾
(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター

4.5.2.3. エクセルギー

排熱の利用はエクセルギーで測られる。エクセルギーとは、「標準周囲状態（25℃、1気圧、大気組成）の環境と力学的、熱的、化学的に非平衡にある系が、可逆過程によって平衡状態に達するまでに取り出すことができる最大仕事」と定義され、仕事として取り出すことのできる価値のあるエネルギーを表す。流体の有するエクセルギーは高温ほど高く、周囲温度においてゼロとなる。高温の流体から低温の流体に熱を伝えると、その温度差に応じてエクセルギーが失われる。一般的に言われている「エネルギー効率」とは、エクセルギー効率を意味している。高いエクセルギーの熱源に対してはエクセルギーの損失が小さくなるようなエネルギー変換方法を取り入れ、また低いエクセルギーの熱源もできる限り活用できるシステムを構築することにより、エネルギー効率の改善を図ることができる。実際は、熱力学的不可逆過程に伴うエクセルギー損失が発生し、エクセルギーが消費されていき、最終的には仕事を取り出せない無価値なエネルギー（環境温度の熱エネルギー）となる。エネルギーの高度有効利用を図るためには、プロセスのエクセルギー損失をいかに低減するかが鍵である。

4.5.2.4. 石油化学コンビナートに於ける排熱の有効利用⁽¹¹⁾

コンビナート内の複数工場で発生する低温排熱(低位エクセルギー)を、熱利用解析技術(ピンチテクノロジー)を用いて、複数の装置、プラント、工場、企業の間を広げて熱の授受を行い、熱のカスケード(Heat cascade)利用をはかり、低位のエクセルギー範囲ま

で共有し利用するシステムが開発され運用されている。図 20 に示す様に、石油会社内の複数プロセスプラントにおいて、廃棄されている 80～150℃程度の低温排熱を、熱交換器にて熱水として回収し、隣接する化学会社へ供給する。化学会社では、その低温排熱にてユーティリティボイラーへの補給水を加熱し、ボイラー燃料の削減が図られている。このようにピンチテクノロジーは、大量の低位熱を有する石油・化学・鉄鋼・製紙・セメント等の大規模工場に於ける省エネルギーに極めて有効である。

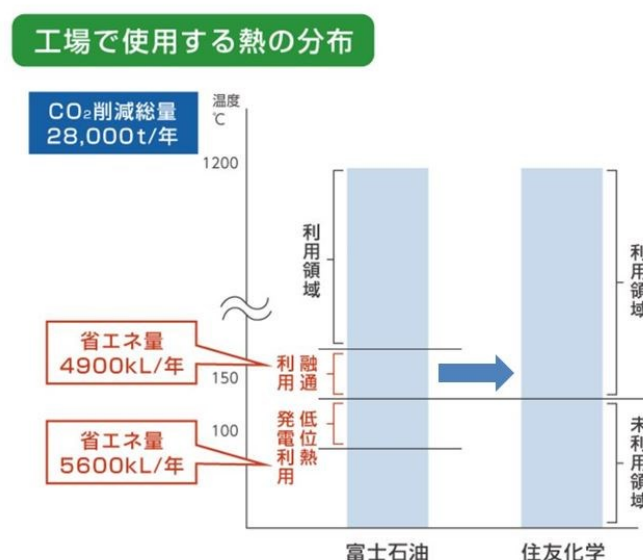


図 20 ピンチテクノロジーによる熱の有効利用例

出典：(NEDO) 複数工場間で熱を共有しコンビナート全体での省エネを実現⁽¹¹⁾

4.5.2.5. 鉄鋼製造プラントにおける排熱の有効利用

鉄鋼製造プラントは高炉、転炉、連続鋳造、圧延などのプロセスを経て、鉄鉱石から鋼材へと加工するが、いずれも高温プロセスであり、大量の熱エネルギーが投入されているので、徹底した熱回収が行われている。また高炉の炉頂部から出るガス(BFG)は、3～4気圧の圧力を持ち、このガス圧でタービンを回転させて発電し、電気エネルギーとして回収する（高炉炉頂圧回収発電設備）。高温(温度ポテンシャルの高い領域)の熱風炉・加熱炉の排ガス回収、発生転炉ガス(LDG)、赤熱コークス、焼結鉱等から発生する排熱エネルギーを蒸気や電力として回収する技術が確立している。図 21 に製鉄所における熱回収の現状を示す。日本鉄鋼業のエネルギー効率は世界で最も高いが、このように高温の排熱回収が進んでいる一方、表 3 に示すように 200℃までの比較的回収しにくい低温ガス排熱が、50%弱と大きな割合を占めており、この有効活用が課題である。

製鉄所における排熱回収の現状

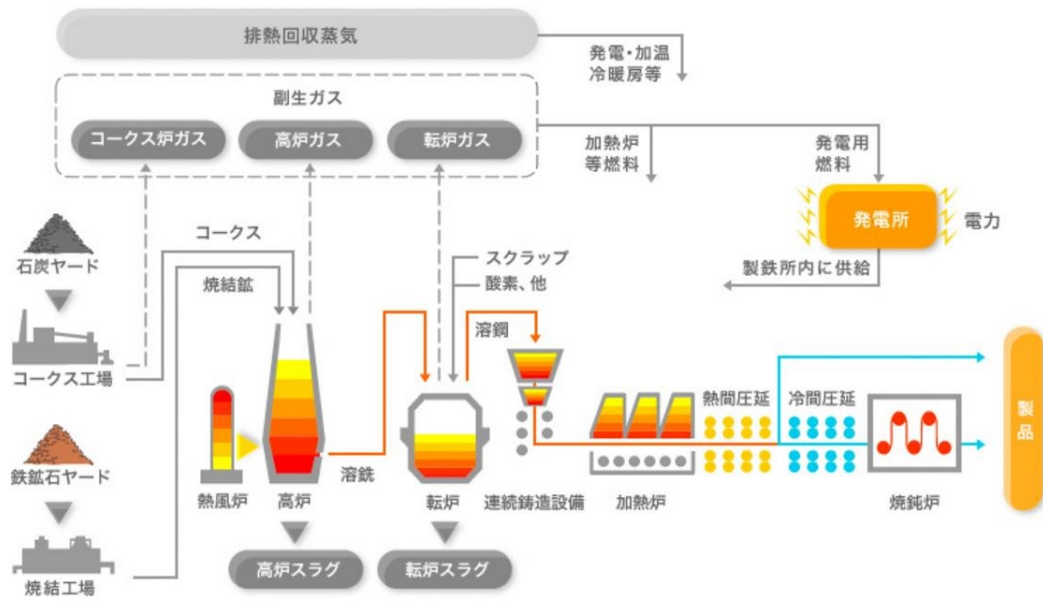


図 21 製鉄所における熱回収の現状

出典： COURSE50 を支える技術_革新的製鉄プロセス⁽¹²⁾

4.5.3. トップダウンアプローチとボトムアップアプローチ

トップダウンアプローチとは、企業や工場といったエネルギー効率化を図る最上位の EMU を起点とし、その EMU におけるパフォーマンスを最大化することを目的に、EMU を分割、階層化していく手法である。図 22 は、企業/工場から生産ライン、更に装置/設備に分割した例である。ボトムアップアプローチとは、装置や設備単独での検討を出発点としたアプローチである。例えばボイラーの効率改善のように範囲を限定した検討は効果を明確にしやすく、即効性がある。しかし、企業や工場というレベルから俯瞰すると、例えば装置のエネルギー使用量より空調に用いられるエネルギー使用量の方が多く、そちらの改善を優先する方が効果が期待できる場合もある。このような問題を防ぐために、検討している改善対象を EMU と捉え、その上位 EMU（可能であればその組織における最上位）のエネルギーパフォーマンス改善への貢献度合いを確認する必要がある。装置や設備単独での改善プロジェクトは、身近な分、アイデアが出しやすく、実現可能性が高いことが多い。ボトムアップアプローチにより、貢献度合いの確認を行うことが、組織としての重要性を共有化し、より円滑にプロジェクトを進めることにつながる。トップダウンアプローチとボトムアップアプローチは、どちらか一方を行えばよいというものではなく、相互に補完するものである。例えば、最初はボトムアップで考えたが、組織の観点から見直すために、トップダウンでもう一度考え直してみる。あるいはその逆で、トップダウンで絞り込んだ結果、装置や設備での改善策を考えたが、組織全体での貢献度はどの程度かを見極めるためにボトムアップアプローチでもう一度考え直してみる、といったことも考えられる。

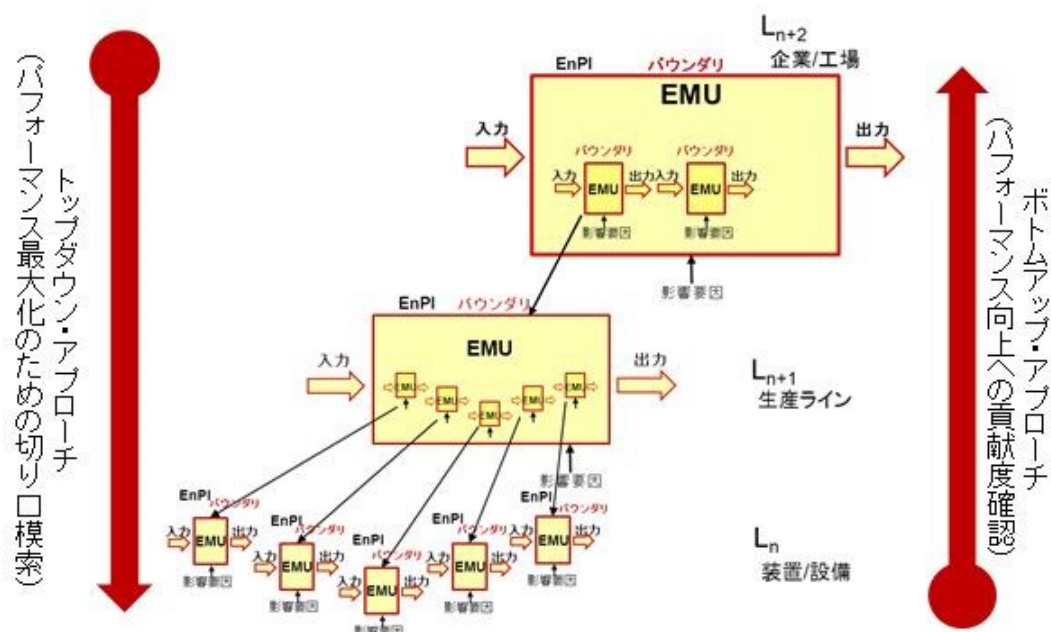


図 22 トップダウンアプローチとボトムアップアプローチ

出典：(JEMIMA) エネルギー効率化のためのシステムアプローチ入門⁽¹³⁾

4.5.4. SEU (Significant Energy Use)

ISO50001 では、SEU (significant energy use)とは「多量のエネルギーの使用量とみなせる及び／又はエネルギーパフォーマンスの改善のために高い可能性をもつエネルギーの使用」と定義されている。SEU はエネルギー使用量が多いものだけでなく、改善の可能性が高いものも含まれている。著しさ（多量又は高い可能性）の基準は、組織によって決定される。図 23 にバウンダリー分割による SEU 特定のプロセスを示す。

生産システムに於けるエネルギー効率改善にあたっては、システムに於ける最も効率の悪い部分を特定することが重要である。図 23 の例では、最初のステップで工場全体が EnPI バウンダリーに設定されている。第 2 ステップでは、工場内で EnPI バウンダリーとして SEU 施設を対象にする。さらに第 3 ステップでは SEU 施設内の SEU 設備を特定する。このように順次 EnPI バウンダリーをサブバウンダリーに狭めて行き、エネルギー管理の対象とする SEU 設備を特定する。

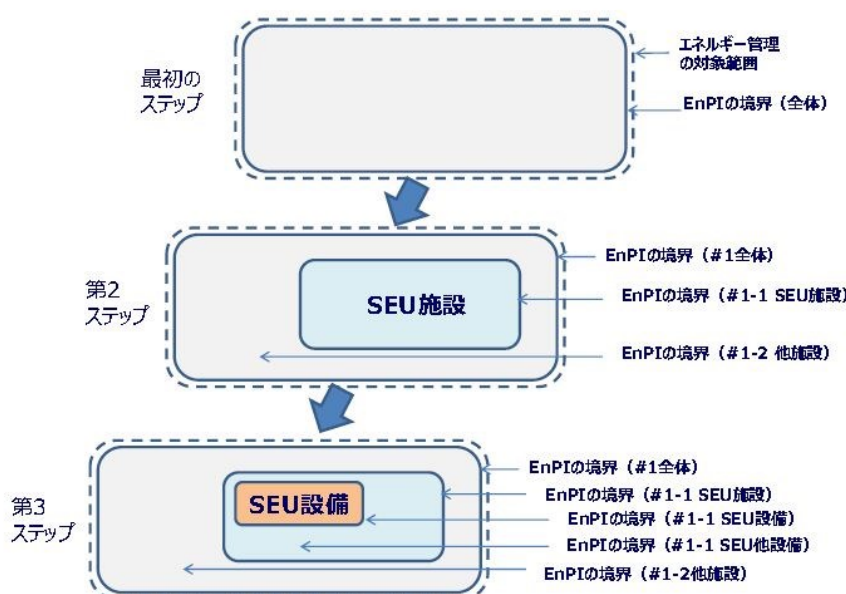


図 23 EnPI バウンダリー分割による SEU 特定のプロセス

出典：国際標準のエネルギー管理手法 --エネルギー性能指標(EnPI)導入ガイド—(4)

5. 生産システムの構成とエネルギー効率向上のための制御技術

近年、プラントの制御システムに対して、より高い省エネルギー性能が求められている。最適な運転点を求めてそれを目標値とすること、そして目標値への制御の性能を評価・監視し、制御性能を高く維持することが必要である。制御技術やモデリング技術を用いることにより、これらの要求の実現に向けて取り組んでいる。最近の主な取組みとして、ポンプの最適流量配分制御、制御性能評価・監視およびイベント駆動型のモデリング技術などがある。

5.1. 産業界のエネルギー効率の国際比較

エネルギー資源を輸入に依存している我が国では省エネの取り組みが他国に比べ進んでいる。特に産業の中でもエネルギー消費規模の大きな鉄鋼、セメント等の素材産業では省エネルギー型の生産技術が発達しており、世界でも最高水準のエネルギー効率を誇っている。図 24 は主要な素材の生産に使うエネルギーが日本を 100 とした場合に他国ではどれだけ必要かを指数で比較したものである。例えば鉄鋼 1 トンを生産するのに韓国では日本の 4% 増し、中国では日本の 17% 増しのエネルギーを必要としている。どの業種でも日本のエネルギー効率が他国に比して高い。これらの産業のエネルギー効率は生産性と密接に関係しており、プロセス制御技術の貢献が大である。日本の高い技術が世界のエネルギー効率改善に貢献できることを期待したい。

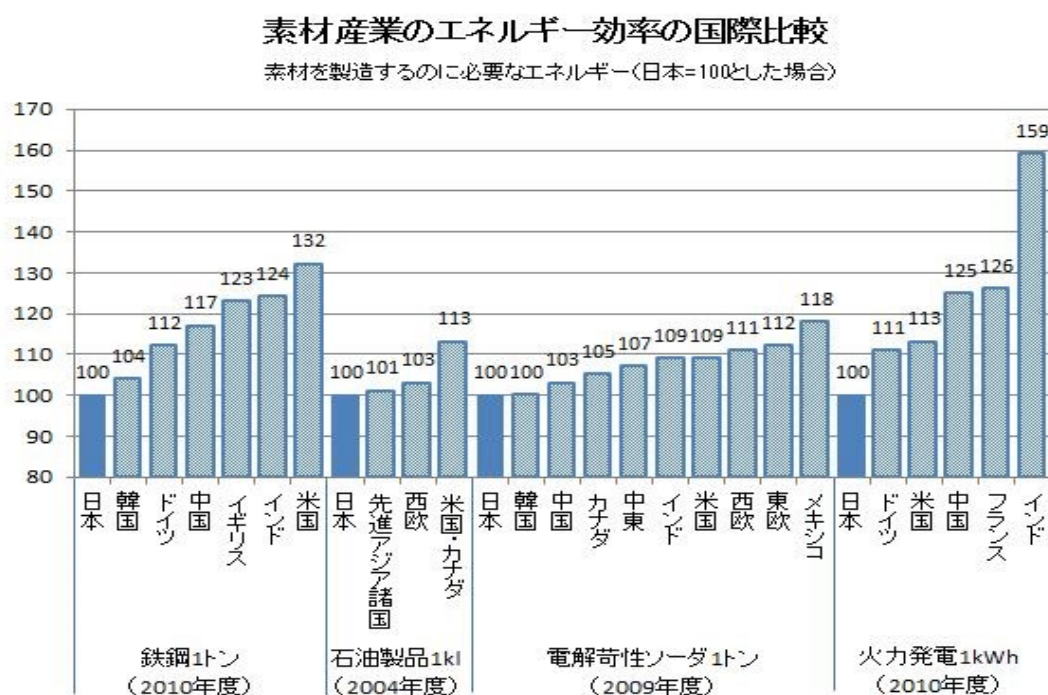


図 24 素材産業に於けるエネルギー効率の国際比較

出典：(経団連) 環境自主行動計画〔温暖化対策編〕 2013 年度フォローアップ結果⁽¹⁴⁾ をもとに作成

5.2. 生産プロセスの特性

図 25 にプロセス産業と制御の形態を示す。プロセスで扱う原材料や製品の形態によって連続プロセス、バッチプロセス、ディスクリートプロセスに大別される。制御対象は主として液体や気体、液体・粉体、固体である。本書では、バッチプロセスに焦点をあてて解説した。ディスクリートプロセスはバッチプロセスの一種とみなすことができ、連続プロセスも原料の変更や製品構成比率の原料の変更などが発生する場合はバッチプロセスとして扱う必要があるためである。

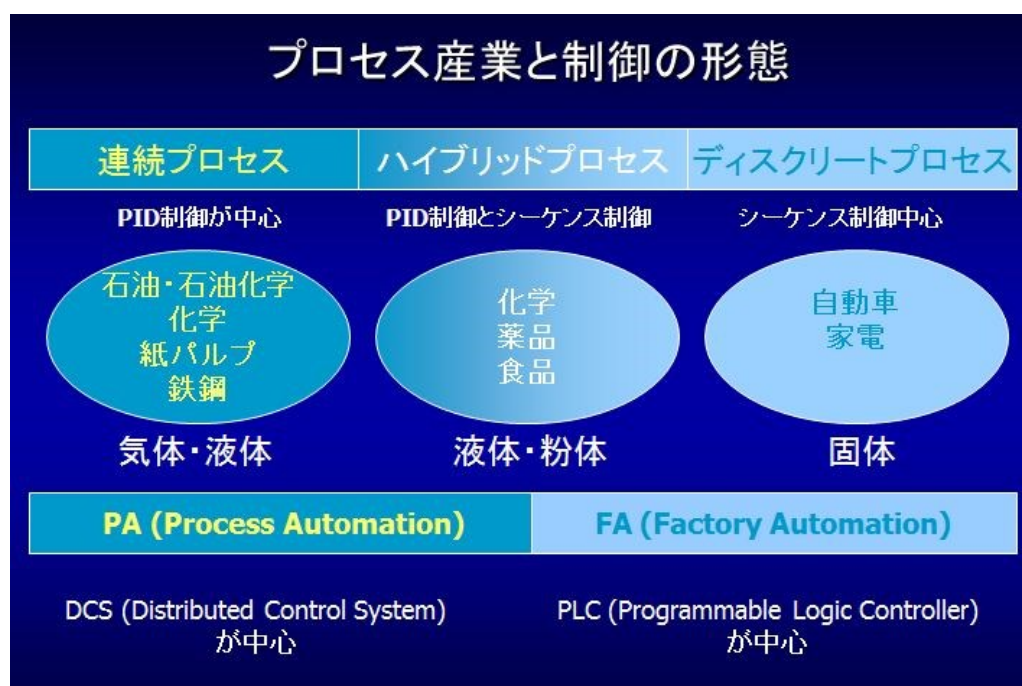


図 25 生産プロセスの特性

5.2.1. 連続プロセス

同一設備や装置を使用し、同一品種の製品を連続的に製造するプロセスを連続プロセスという。連続プロセスが主体のプラントとして、石油精製プラントや石油化学の高分子製造プラント、製鉄所の高炉、製紙プラントの原料生成などがある。

5.2.1.1. 石油精製プロセス

図 26 に石油精製プロセスのフローを示す。常圧蒸留装置は、原油を常圧下（通常 $0.5 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 程度）で加熱（通常 $300 \sim 360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）し、原油に含まれる沸点の異なる成分を、その沸点差を利用して、一定の沸点範囲を持った留分に分離し、ガス、ガソリン、灯油、軽油、残油などの各留分に分離する。下図に見るように、石油精製には常圧蒸留、脱硫、接触分解など多くの工程があるが、それぞれの工程ごとに加熱炉が存在する。加熱炉は石油精製の工程中でも最大のエネルギーを消費する機器である。加熱炉の熱効率を高めると同時に、プロセスの各所で熱交換器を組み合わせることで徹底的に熱回収を行い、プラント全体のエネルギー効率を上げるよう工夫されている。

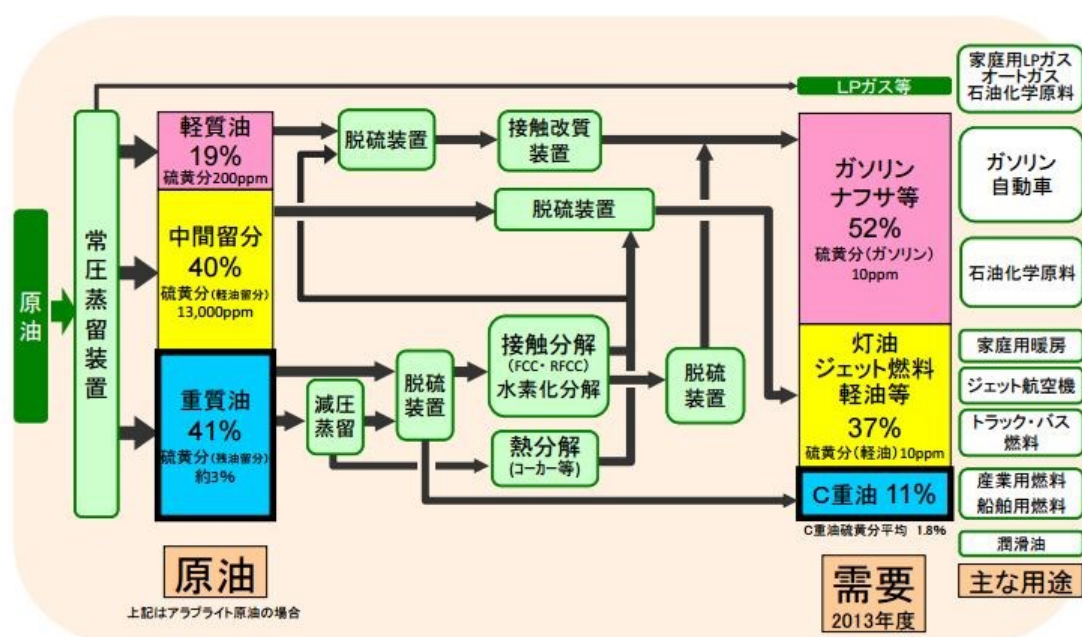


図 26 石油精製プロセス

出典：石油連盟

5.2.1.2. 石油精製プロセスに於ける EMU と EnPI

図 27 は石油精製プラントにおける設備階層に対応した EMU 設定の例を示す。はじめにプラント全体を EMU と設定し、プラント全体のエネルギー消費量およびエネルギー原単位などを EnPI に設定する。次に接触改質装置 (catalytic reforming) を EMU として設定し、そのエネルギー効率を評価するために、EnPI として、接触改質装置のエネルギー消費量、エネルギー原単位、熱回収率が設定される。接触改質装置とはナフサを触媒反応によって処理しガソリンのオクタン価を高める装置である。そのプロセスにおいて、ナフサは加熱炉によって反応温度まで加熱される。次にエネルギー消費の大きい加熱炉を EMU に設定する。加熱炉はエネルギー消費の大きい設備であり、EnPI としては燃料消費量、エネルギー効率などが設定される。これらの EnPI に影響を与える関連変数には、空燃比、排ガスの O_2 又は CO 濃度、COT : (加熱炉出口温度) などが設定され連続的に監視される。空燃比については [5.4.4 燃焼制御参照](#)。

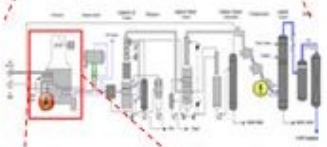
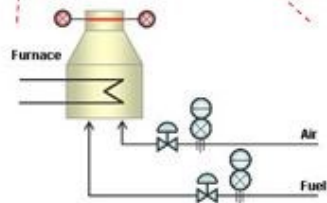
階層	バウンダリ	EnPI
プラント	製油所 	エネルギー消費量 (エネルギー種類毎) エネルギー消費原単位
装置	改質装置 	エネルギー消費量 (エネルギー種類毎) エネルギー消費原単位 エネルギー利用効率 熱回収率
機器	加熱炉 	エネルギー消費量 (燃料) エネルギー効率

図 27 石油精製プラントにおける EMU 設定の例

5.2.2. バッチプロセス

5.2.2.1. バッチプロセスの特性

バッチプロセスとは、JIS C 1807 に「一つ以上の設備を用いて有限時間の間に入力物質を供給し、順序付けられた一連の処理を行うことによって、有限量の物質を生産するプロセス」と定義されている。バッチプロセスは、化学、医薬、食品などの製造プラントに多く使われている。図 28 にバッチプロセスの中心に位置するリアクタ（反応槽）の構成を示す。各種の原料、触媒を「投入」し、所定の条件下で「反応」させ、出来上がった製品を「排出」する、といった製造工程を持つ。反応工程では攪拌機が作動し反応時間、温度等の運転条件が計測・制御される。バッチプラントでは、バッチプロセスの性格上ロット（バッチ）単位に生産が管理されるが、生産性向上のために複数の装置（ユニット：反応槽、溶解槽など）が直列/並列に接続され複数ロットの生産が並列に進行できるようスケジュールされて運転される。これらの産業では、製品の種類が多いうえに新製品の開発が頻繁に行われるため、市場ニーズへ即応できる変種変量生産に適した生産性の高いバッチプロセスが構築されている。また新製品投入時には、プロセス設計にさかのぼって検討される場合もあるが、そのたびに新プラントを建設するのではなく、既存のプラントを利用して対応できるよう、バッチプロセスの機能的特性に着目したハード・ソフト面の標準化が進められている。

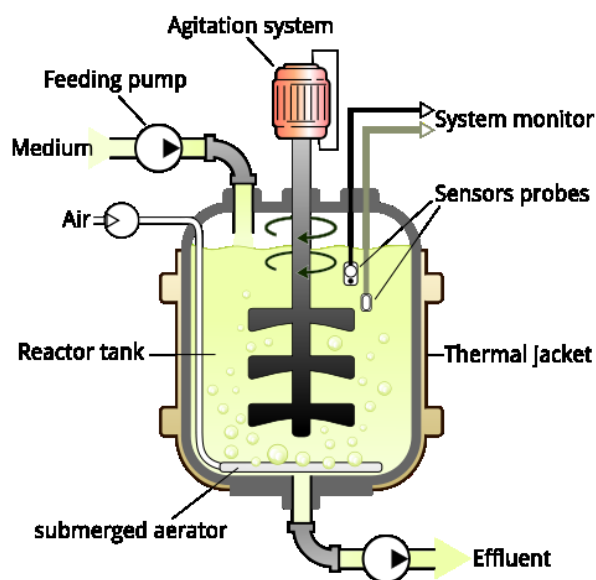


図 28 リアクタの構成

出典：Wikipedia⁽¹⁵⁾

5.2.2.2. バッチプロセスのモデル

バッチシステムでは、製品、プロセス、手順は相互に関連している。新製品が投入されるたびにシステム装置やソフトウェアの変更が避けられず、コストかさむ。コスト削減・リードタイム削減のためにも標準的な手順が求められ、IEC61512 (ISA S88)が開発された。

以下に示す4つのモデルが定義されている。

(1)プロセスモデル (Process model) … プロセス設計(どのような製品を作るのか)

プロセスモデルとは、“ある物質を作るために、何を行うか”を記述する。原料の種類、調合の割合、触媒の有無、反応温度等の製品になるまでの物質の化学的、物理的変化という点のみ記述したもので、どのような設備で製造するか of 概念を持たない。

(2)物理モデル (Physical model) … プラント設計(どの装置を使って作るのか)

図 29 に IEC61512 (ISA S88)で定義された物理モデルの7つの階層、企業、サイト、エリア、設備、装置、機器、計装機器を示す。設備(プロセスセル)は複数の装置(Unit)で構成される。装置は機器、計装機器からなり、反応などの処理が実行される。リアクタは典型的な装置(Unit)の例である。機器(Equipment modules)は 計装機器その他の機器からなり特定の処理機能を有する。計装機器(Control modules)は .制御に必要なセンサ、アクチュエータなどで構成される。

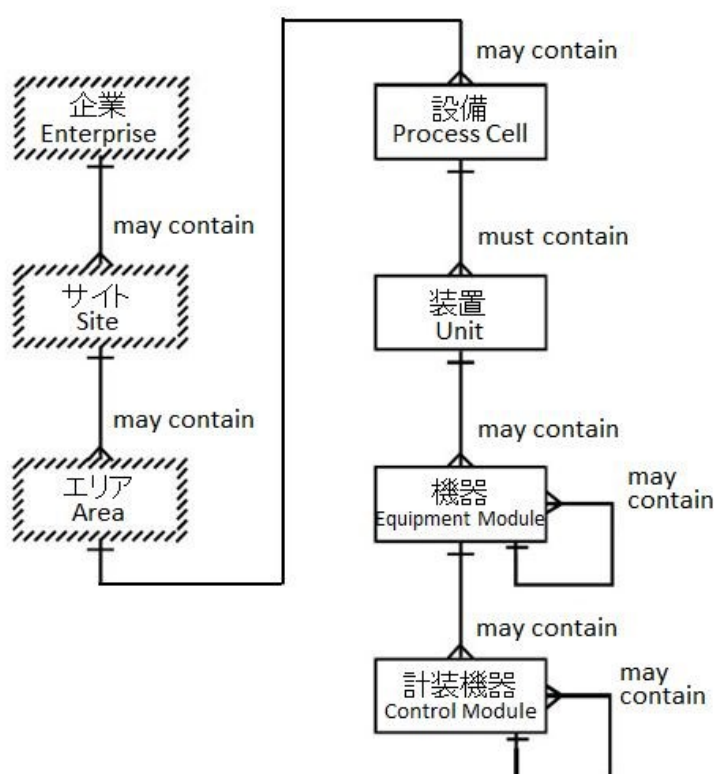


図 29 物理モデル IEC61512 (ISA S88)

出典：IEC61512 (Formerly ANSI/ISA-S88.01-1995) [\(16\)](#)

プロセスセルの物理的構成はシングルパス、マルチパス、ネットワークに分類される。図 30 はマルチパスプロセスの例で複数のバッチが平行して処理される。また設備系列 (train) は一つのバッチの物質を作るのに必要な能力をもつ一つ以上の装置と付随する機器及び計装機器の集合である。

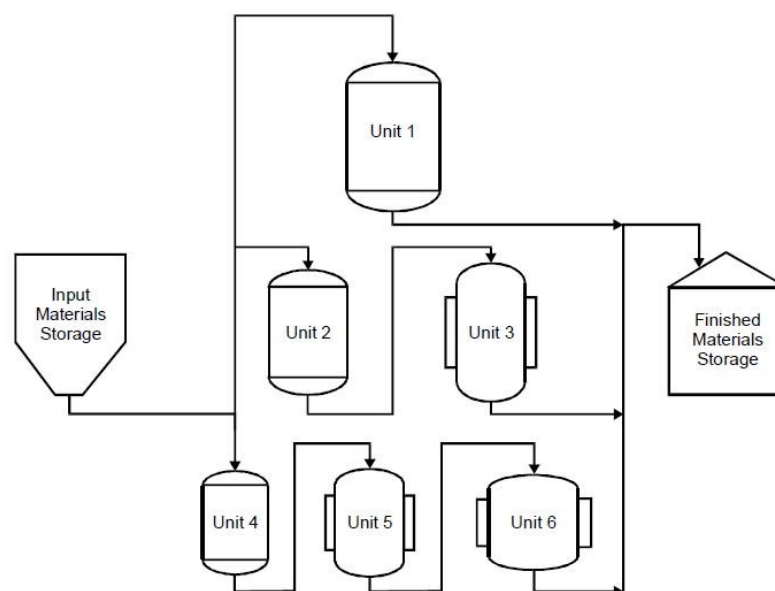


図 30 プロセスセルのマルチパス構成

出典：IEC61512 (Formerly ANSI/ISA-S88.01-1995) [\(16\)](#)

(3)手順制御モデル(Procedural Control Model) … 計装設計(どのように製造するか)

手順を階層化したモデルで、手順(Procedure)、単位手順(Unit Procedure)、単位操作(Unit Operation)、フェーズ(Phase)に区分される。

(4)管理業務モデル (Management activity model) … 情報管理

バッチプロセス制御に関する情報管理モデルである。

5.2.2.3. バッチプロセスの処方(Recipe)

IEC61512(ISA S88)において、バッチプロセスの動作を規定する“処方 (Recipe)”は、“特定の製品の生産要件を一義的に定義するのに必要な情報の集合”と定義されている。いずれも具体的な設備を想定していない。以下の4つの処方からなる。

- 1) 原処方 (General Recipe) 製品固有の処理情報
- 2) サイト処方 (Site Recipe) サイト固有の情報
- 3) 基本処方 (Master Recipe) 設備特有の情報

製品を製造するために必要な装置や工程の手順、設定値、設備要件などを指定する。

- 4) 実行処方 (Control Recipe)

基本処方にバッチ ID やバッチサイズ、プロセス、操作員、使用装置の指定など、実際の運転に必要な情報を付加したもの。

処方の構成：処方は図 31 に示すように以下の構成要素からなる。

ヘッダ(Header)

処方名やコメント、バージョン、作成者などの処方を管理する上での基本情報。

処方手順(Procedure)

製品を生産するための手順を表す

ユニット単位の処理内容を記述するユニットプロシジャはユニット内の処理工程を表す。さらにオペレーションに分割され、オペレーションの処理順序が定義される。例えば、重合缶における原料移送、温調、攪拌などに分解される。オペレーションはさらにオペレーション内の詳細工程のフェーズに分解され、フェーズの処理内容が記述される。例えば、温調オペレーションでは 40℃ まで昇温し、10 分定温で放置するなどのフェーズが定義される。

処方データ (Formula)

製品を生産するためのパラメータを記述する。

設備要件 (Equipment requirements)

設備要件には、各階層レベルのプロシジャに対して、必要となる装置の条件を記述する。ユニットプロシジャでは利用可能なユニット群などが記述される。

その他(other information.)

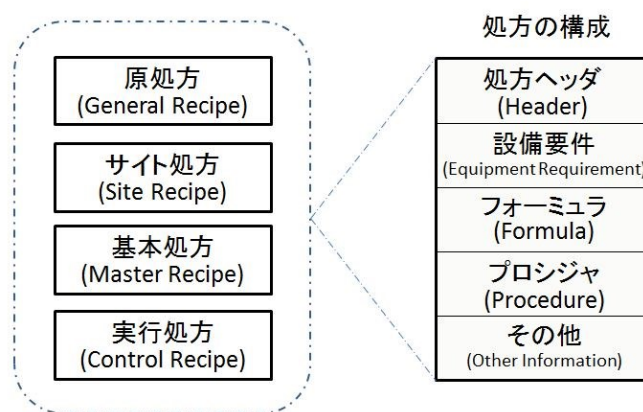


図 31 処方の構成

5.2.2.4. バッチプロセスの処方とモデルの関係

バッチプロセスの運転において、どのような製品(プロセスモデル)を、どの装置(物理モデル)を使って、どのような手順(手順制御モデル)で製造するか、は処方に指定された情報に基づいて実行される。図 32 に処方と各モデルの関係を示す。処方に含まれる“Equipment requirements”は物理モデルに対応している。処方の“Procedure”は手順モデルの“手順”、“単位手順”、“単位操作”、“フェーズ”に対応している。手順モデルのユニットプロシジャは装置(ユニット)内の処理工程を表す。さらにオペレーションに分割され、オペレーションの処理順序が定義される。例えば、重合缶における原料移送、温調、攪拌などに分解される。オペレーションはさらにオペレーション内の詳細工程のフェーズに分解され、フェーズの処理内容が記述される。例えば、温調オペレーションでは 40℃ まで昇温し、10 分間定温で放置するなどのフェーズが定義される。計装機器を含む機器の制御はフェーズの指令で実行される。

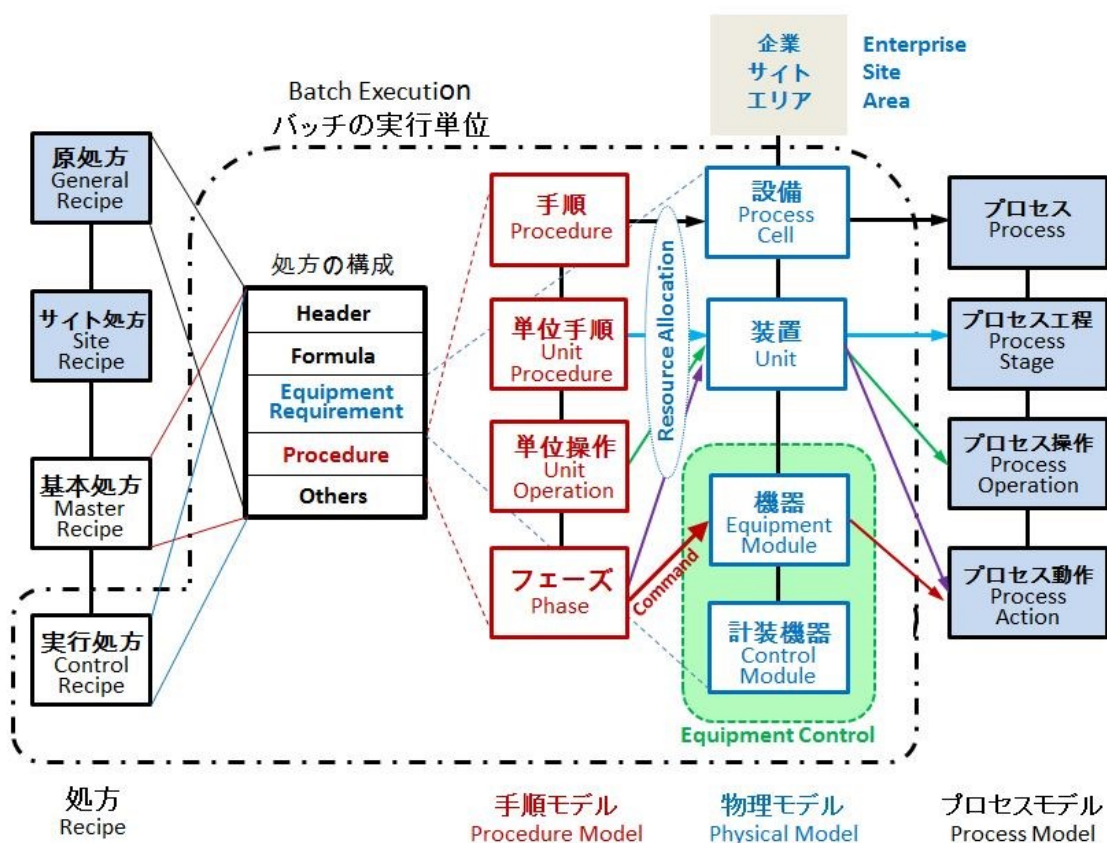


図 32 処方とモデルの関係

出典： Sugiura, 38th Seminar The Society of Chemical Engineers, Japan, 2004⁽¹⁷⁾

5.2.2.5. バッチプロセスにおけるエネルギー管理

バッチプロセスにおけるエネルギー管理の方法と、その事例を示す。

5.2.2.5.1. ロット（バッチ）毎のエネルギー管理

多品種の製品を製造するバッチプロセスでは、製品の各ロット（バッチ）ごとのエネルギー管理が行われる。EnPI としては、管理の目的に応じてエネルギー消費量、原単位、エネルギー効率、省エネ削減量、CO₂ 排出量、エネルギーコストなどが選択される。過去の同一ロットの実績値と比較し、改善に繋がる運転条件を見いだすことが重要である。過去のベストプラクティスは“ゴールデンバッチ”と呼ばれている。

図 33 に製品ロット毎のエネルギー消費量の計算例を示す。製品銘柄 α が、ロット番号 1234、ロットサイズ 100kg で、工程 A,B,C を通って生産された例が示されている。工程 A は、時刻 13:00～13:40 の間に実行され、そのエネルギー消費量が $E(A)$ である。同様に工程 B、C の実行時刻とエネルギー消費量が示されている。このロットの生産に要したエネルギー消費量は $E(A), E(B), E(C)$ の総和で求められ、そのロットの原単位計算に使用される。

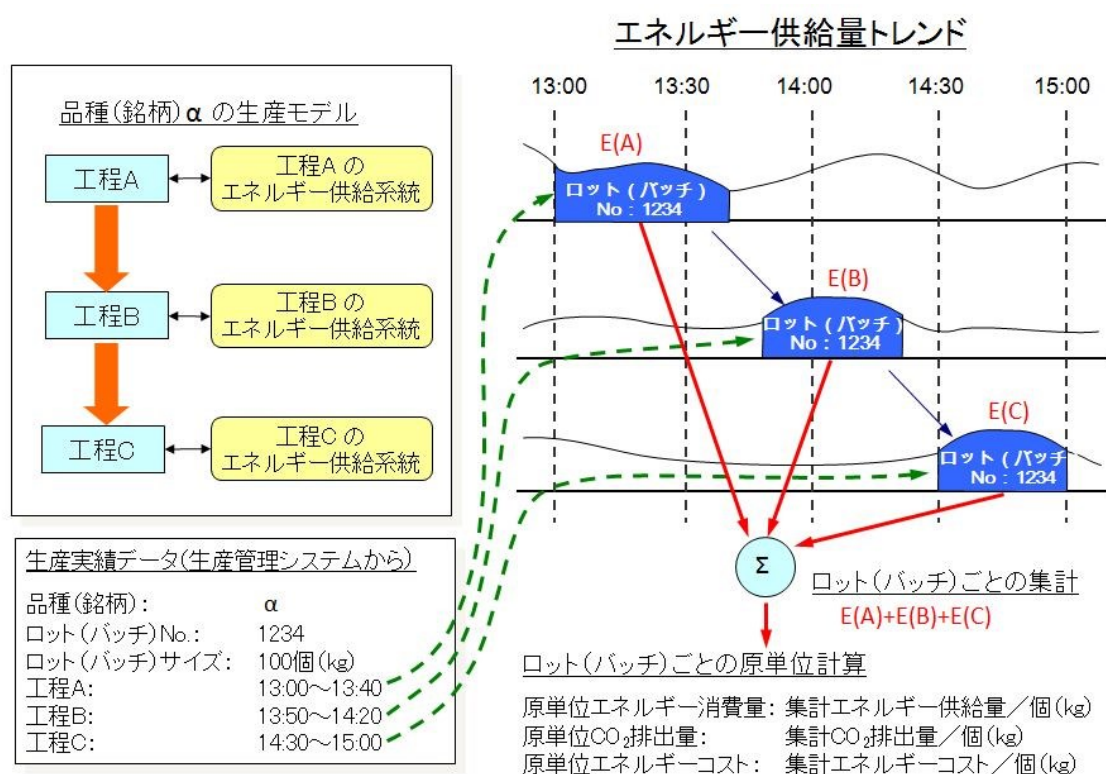


図 33 製品ロット毎のエネルギー消費量の計算

5.2.2.5.2. 事例(1) スプレードライヤーの消費電力削減

スプレードライヤーは、液状原料を粉末加工するための装置である。オペレータの習熟度によってロットごとに電力消費量にばらつきが出てしまう傾向があったので、その原因を追求し改善を図った事例である。

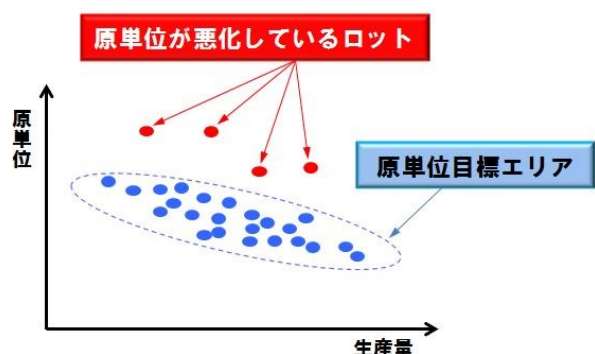


図 34 ロット毎のエネルギー原単位

図 34 は、ロットごとにロットサイズ（生産量）とエネルギー消費原単位の実績をプロットしたものである。この実績から原単位の目標エリアを設定し、この目標エリアから外れているエネルギー原単位の悪いロットに対して、原単位悪化の要因を追及し改善をはかる。なお、生産量を分母にとった原単位に対しては目標エリア内でロットサイズ（生産量）が小さいと見かけ上原単位が悪化する傾向を示すが、これは設備の固定エネルギー消費量

に起因する計算上の結果である。

図 35 に改善のためのドリルダウンアプローチを示す。この事例のプロセスでは、エネルギー源として蒸気、冷却水、電力、エアーを使用しているが、エネルギー別原単位の測定結果から、電力消費量がロットにより大きく差があることが判明した。その要因を究明すると、プロセスの立ち上げ時間のプロファイルに大きな差があり、オペレータの熟練度による運転の差異が電力使用量に影響を与えていることが明らかになった。適切な立上げ時間、液体投入のタイミング、温度プロファイル管理など多くの改善ポイントが発見でき、消費電力量削減につながった。

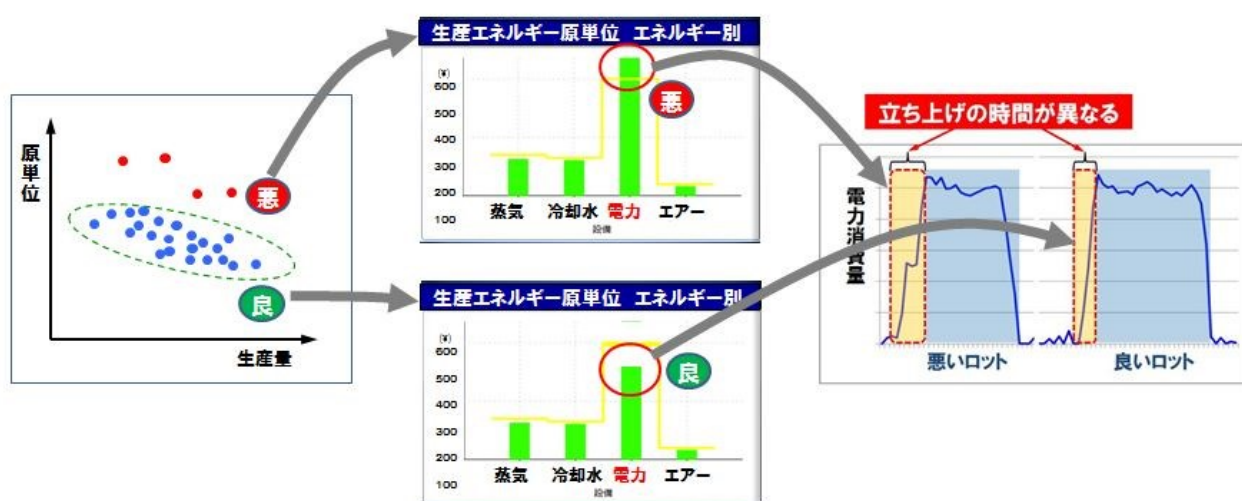


図 35 ドリルダウン解析

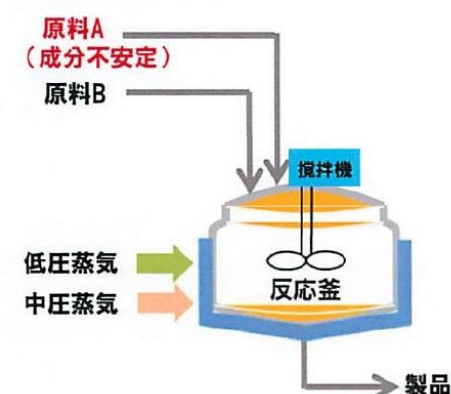


図 36 重合プロセス

図 36 は、2 種類の原料 A,B を混合し、反応釜にて規定温度まで上昇させ、重合反応させ製品を作るプロセスである。加熱は 2 種類の蒸気を用いて行っているが、釜内部が低温時にはコスト単価の小さい低圧蒸気(低温)を使用し、設定された切替温度まで上昇すると中圧蒸気(高温)に切り替えて重合反応の規定温度まで加熱する。この事例では、原料 A は成分が安定していないため、含有成分の組成を考慮し、投入量を決定している。(生産量・品質を確保)

図 37 に示す様に、ロット毎のエネルギーコスト原単位の実績から目標より悪いロット③があり、その原単位の悪化原因はロットにより原料 A の成分が変動したためであり、反応の差により反応釜内部の温度上昇に時間差がでることと判明した。蒸気切替は一定の設定温度に達したポイントで行っていたが、ロット③では原料 A の成分が変動したことで、熱量の少ない低圧蒸気では釜内部温度が上昇しにくい状況が生まれていた。その結果切替温度に達するまでの時間が長くなり、蒸気の切替までの低圧蒸気消費量が増加していたことが原因であった。

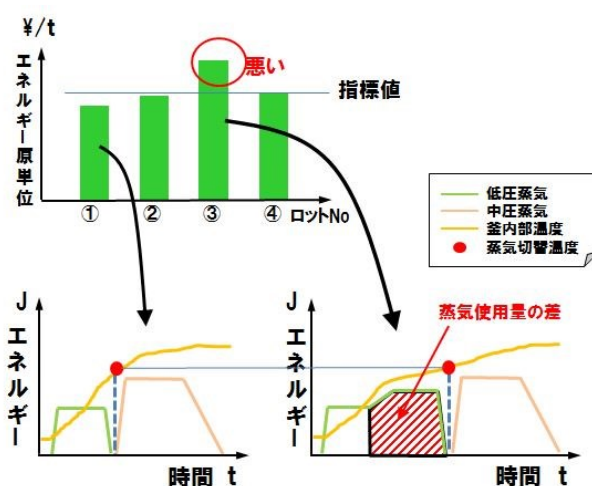


図 37 ロット毎のエネルギー消費

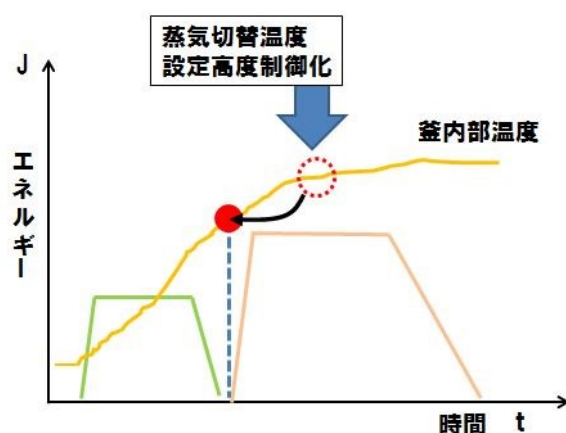


図 38 高度制御による蒸気切替温度の変更

原料 A の成分とエネルギー消費との関係性を検証し、低圧蒸気の消費量が増えずに済むよう、蒸気切替タイミングを「エネルギー投入量」「原料 A の性状」「内部圧力」等、複数の因子を用いて高度制御システムで制御し、図 38 に示す様に蒸気切替温度の変更し効率よく生産出来るようにした。これによりエネルギーコスト減少と生産時間短縮が達成された。高度制御については [5.4.5 高度制御参照](#)。

5.2.3. ディスクリートプロセス

ディスクリートプロセスは、自動車や家電など個体部品の加工や組立のラインを主体とする生産プロセスで、NC（数値制御）工作機械や産業用ロボットの導入により、生産ラインの自動化や構内物流の自動化といった、シーケンス制御が中心のFA（ファクトリー・オートメーション）化が進んでいる。

5.2.3.1. 工作機械の消費エネルギー

金属加工に使用される工作機械（研削盤やマシニングセンタなど）には、切削油や冷却油などを循環させるためにクーラントポンプが使用されている。このクーラントポンプが、工作機械の総電力量の約4割を消費していると言われている。クーラントポンプをインバータ駆動することにより、工作機械の消費電力の大幅な削減が実現出来る。

図 39 に工作機械の消費エネルギー特性と削減の着眼点を示す。

- ①「待機エネルギー」は電源投入時には加工をしていなくても消費されるエネルギーで、こまめに電源を切るアイドルストップなどきめ細かい節電が必要である。
- ②「定常エネルギー」は加工状況によらず生産時間全体に渡り消費されるエネルギーで、この絶対量を低減することにより生産時間に比例した削減効果が得られる。
- ③「動的エネルギー」は加工状況などで変動し、加工効率を高め加工時間を短縮することと、必要なエネルギーを低減することの両方が必要となる。

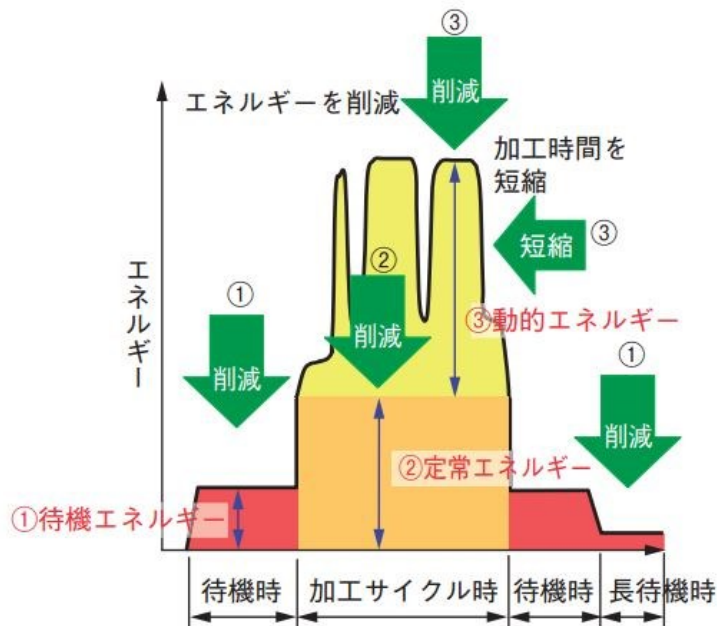


図 39 工作機械の消費エネルギー

出典:工作機械における省エネルギーへの取り組み⁽¹⁸⁾
JTEKT Engineering Journal No.1010(2012)

5.2.3.2. 生産における設備の稼働状態：Time model

ISO22400 “Manufacturing operations management-Key performance indicators” では、生産における設備の稼働状態を“Time model”として図 40 のように定義している。計画生産時間(POT)に占める実行生産時間(TPT)を、生産時間(BT)、装置稼働時間(PCT)、生産寄与時間(PDT)に区分し、その中で輸送(TT)、段取り替え(WT)、故障などによる遅延時間(DeT)、セットアップ時間(ESUT)など生産に寄与しない時間を位置づけている。

エネルギー管理の観点から生産における設備を EMU として設定すると、上記の時間単位は EMU のステータスととらえることができ、そのステータスごとにエネルギー消費特性をもっている。エネルギー管理の視点からは、各ステータスのエネルギー消費特性を考慮した消費量の低減をはかると同時に、生産に寄与しない時間を最小化することが重要である。4.3.3.2 で示した「時間的バウンダリー」は、上記のような作業上の時間単位をエネルギー管理上のバウンダリーとしてとらえたものである。

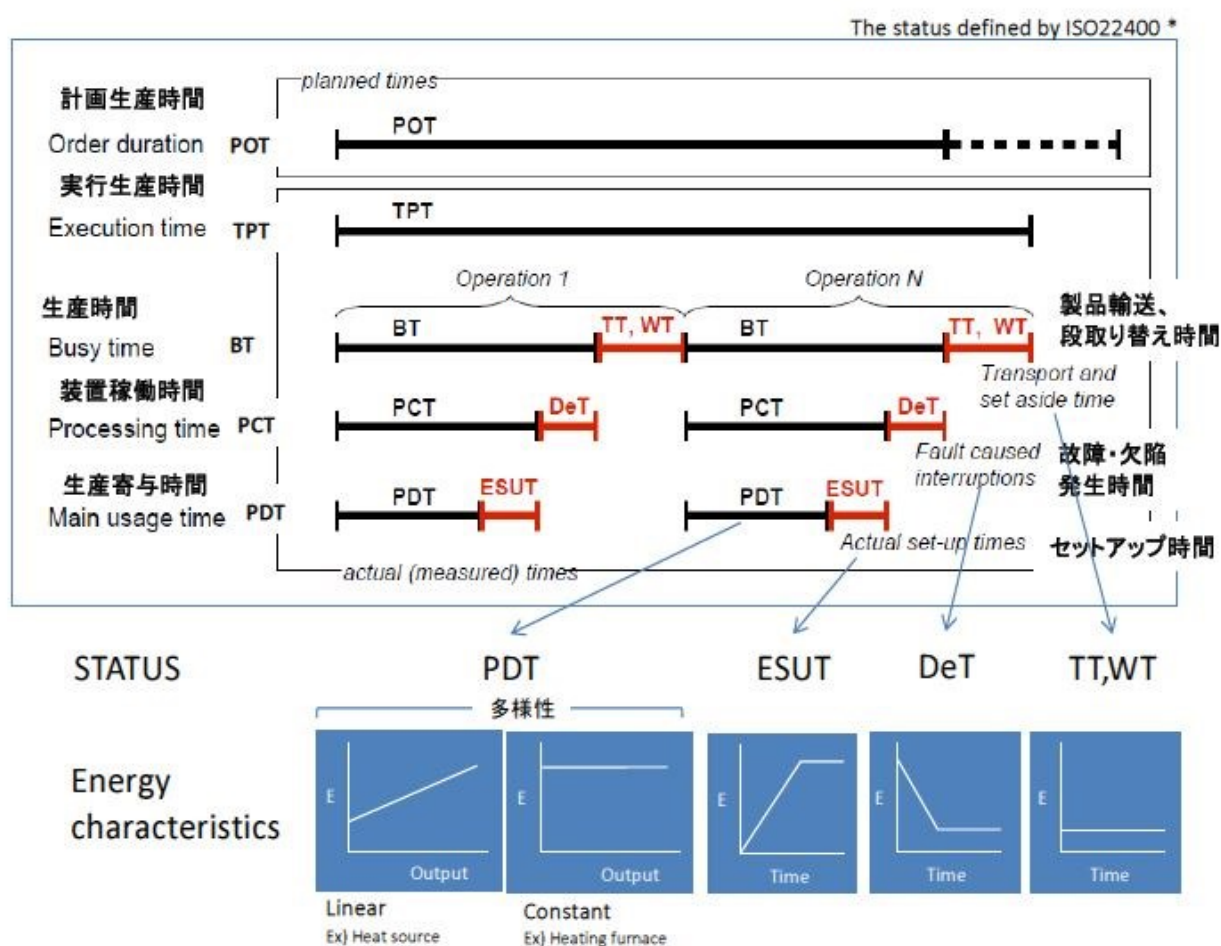


図 40 設備の稼働状態と Time model

出典：(JEITA) 時空バウンダリー(7)

ISO22400-2 Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management -Part 2 を基に作成

5.3. 生産システムの階層構成

5.3.1. 生産システムの階層構成とエネルギー管理機能

図 41 は IEC 62264-1⁽¹⁹⁾ で定義されている生産システムの階層構成と、各階層に於けるエネルギー管理項目の例を示している。

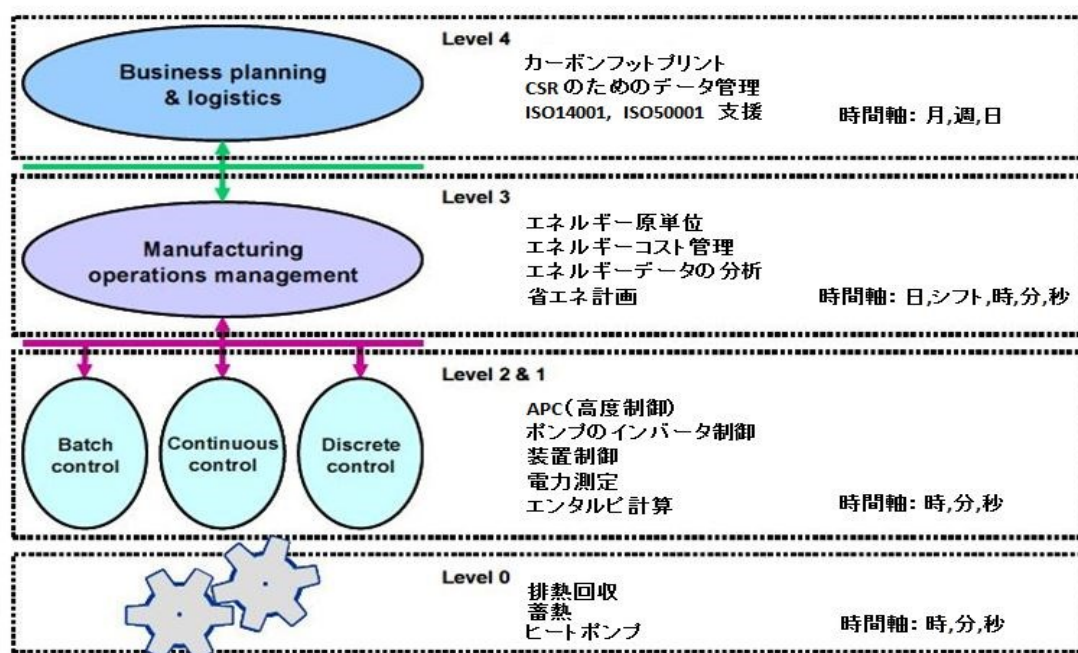


図 41 生産システムの階層構成とエネルギー管理機能

出典：IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
“Energy efficiency through automation systems”⁽²⁾ を基に作成

レベル 4：経営計画とロジスティクス

ERP, SCM など製造部門を管理するために必要な経営に関するアクティビティ。生産計画、資材、納入出荷、在庫管理、最適化やエネルギー管理を含む管理機能

レベル 3：製造オペレーションマネジメント

製造実行システム(MES)。要求された製品を生産するためのワークフロー/レシピ制御などを実行する。生産の記録、生産プロセスの最適化、製造オペレーション管理、製造の進捗状況、品質データや履歴情報などをリアルタイムで管理する。

レベル 2 および 1：スーパーバイザリ制御や自動化された制御の監視。実プラントの計測と制御。

レベル 0：物理的な生産プロセス

5.3.2. 生産システムにおける制御情報の階層モデル

企業の製造工場は IEC62264-1 の階層化モデルに対応して図 42 に示すような機能の階層構成をとっている。全体システムはサブシステムと装置に分解される。企業は企業目標を最大化または最小するように運営される。例えば利益、コスト、品質、エネルギー

一効率などがあげられる。これらの目標は相反する場合が普通である。したがって、工場操業はこれらの相反する条件を満たしながら目標を最大/最小化するための操業上の最適操業条件を見いだすことが必要である。

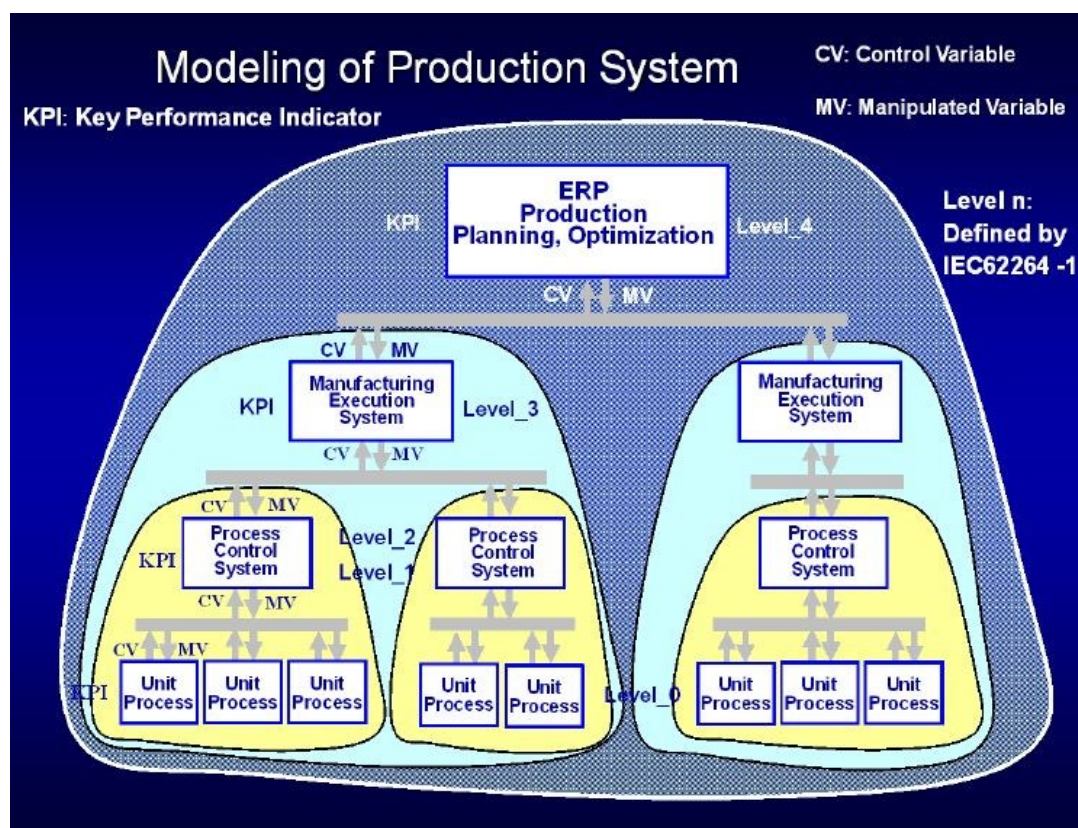


図 42 制御情報の階層モデル

出典：IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
“Energy efficiency through automation systems”⁽²⁾

図 42 は階層間の情報の流れを示す。CV (制御変数：controlled variable)、MV (操作量：manipulated variable)はプロセス制御の用語である。CV はその階層の KPI など上の階層へ報告される現在値のセットを表している。上位階層は下位階層からの CV を受けて MV 値を計算し下位の階層に出力する。Level 4 ERP は下位階層からの CV 値を使ってプラント全体の最適化計算する。各階層ごと KPI(EnPI)が定義され最適値に制御される。各階層に於ける個々の KPI(EnPI)の最適化は必ずしも上位階層の最適化につながるとは限らない。例えば生産量変動した場合、Level 4 ERP はエネルギー効率が目的関数の場合、工場全体のエネルギー消費量を最小にするよう MV を計算し下位システムに出力する。Level 4 から出される MV は、プラント全体最適操業するための指令である。KPI の設定については ISO 22400-2⁽²⁰⁾ Table 4.参照。工場におけるエネルギー消費の全体最適をはかる手法については [5.4.8 連携制御](#) に解説されている。

5.4. プロセス制御技術によるエネルギー効率の改善

5.4.1. 装置のエネルギー消費特性

図 43 に装置のエネルギー消費特性を示す。横軸は装置の出力（負荷）に対応し、安全性等から上限、下限が決められていて、その間で運転する。エネルギー消費量は出力とともに増加するが、エネルギー効率の最適点が上下限の中間に存在する場合もあるので、複数装置間の負荷配分時に配慮することも必要である。

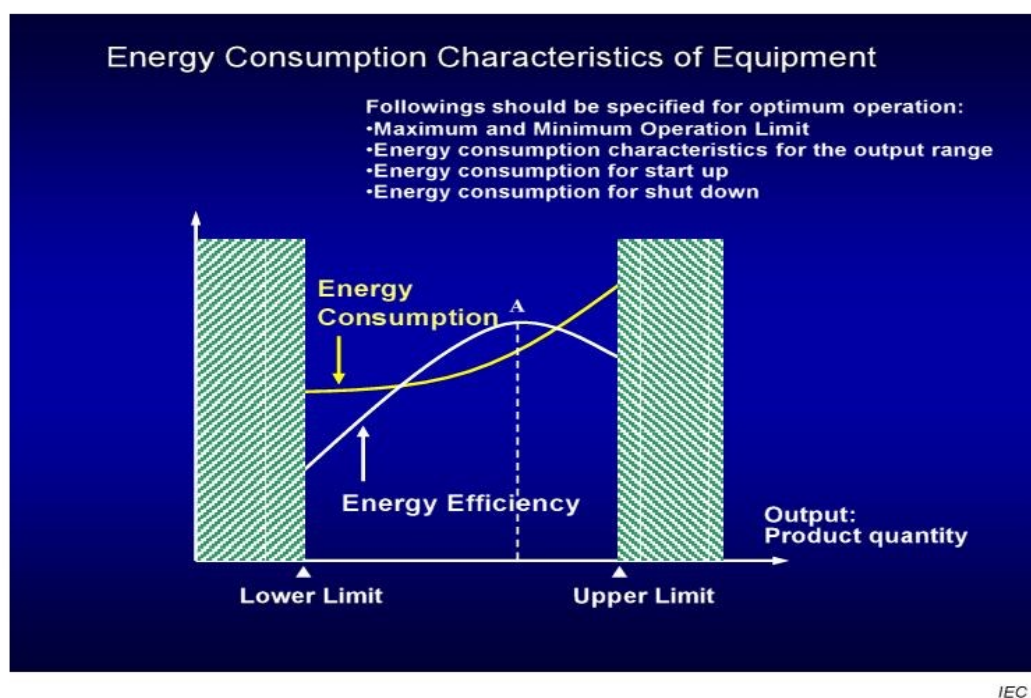


図 43 装置のエネルギー消費特性

出典：IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
“Energy efficiency through automation systems”⁽²⁾

5.4.2. モータのインバータ制御

日本国内の電力消費量のうち、モータを搭載した機器が消費する電力は、全体の 60% 近くを占め、またモータの全消費電力の 9 割以上を 3 相誘導モータが占めていると言われている。その 3 相誘導モータのうち、97% が効率の低い効率クラス「IE1」と呼ばれる種類のものである。プロセス産業では、モータで駆動されるファンやポンプが風量や流量を制御するために多数使用されているが、モータを商用電源で回転数一定で駆動しておいて、ダンパやバルブなどの開度を調節することにより流量を制御している場合が多い。これを、ダンパやバルブは全開にしたままで、インバータによりモータの回転数を調節する事により流量を制御するようにすれば、図 44 に示す様にモータの消費電力を大幅に削減することができる。例えば、流量を 80% に制御する場合、回転数を 0.8 倍

にするとモータの使用電力量はほぼ半分になるが、バルブの開閉による制御では回転数は一定であるため、モータで消費する電力量はほとんど変わらない。

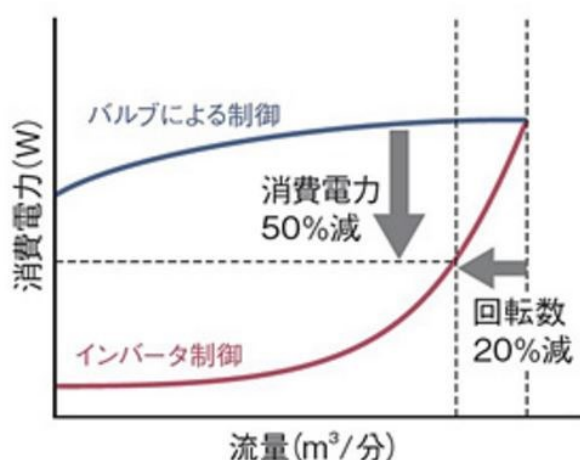


図 44 インバータ制御によるモータの省エネ化

出典：モータの省エネ化が日本を救う [\(21\)](#) (nikkeiBPnet)

図 45 のようなバルブで流量を制御している系ではバルブの圧力損失がそのままエネルギー損失となっている。図 46 のようにモータをインバータで回転数制御を行って、バルブは 100%の全開にすることでバルブのエネルギー損失分が省エネとなる。

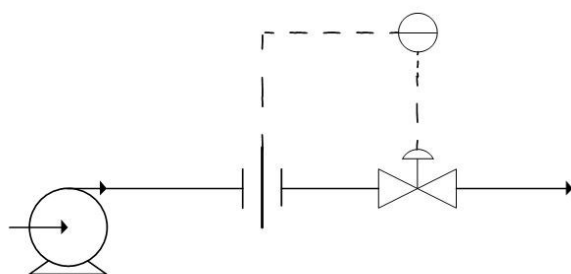


図 45 バルブで流量を制御

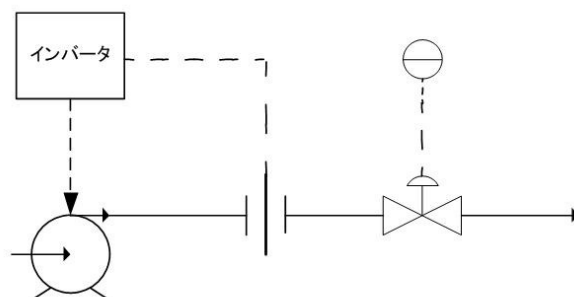


図 46 インバータで回転数制御

流量は回転数に比例し、圧力は回転数の 2 乗に比例する。ポンプ駆動力は圧力×流量なのでポンプ駆動力は流量の 3 乗に比例することになる。ポンプの吐出流量を 60%に低減した場合は $0.6 \times 0.6 \times 0.6$ でポンプ駆動力は 0.216 となり約 80%の省エネとなる。

図 47 に示す様に、トップランナーモータは JIS C 4210(2010)規格値と比較すると約 35%の損失低減効果が期待できる。トップランナー化により、それらが全て効率クラス「IE3」に置き換えられたとすれば、期待される電力削減量は、我が国の全消費電力量の約 1.5%に相当すると試算され、極めて大きな省エネ効果が期待できる。

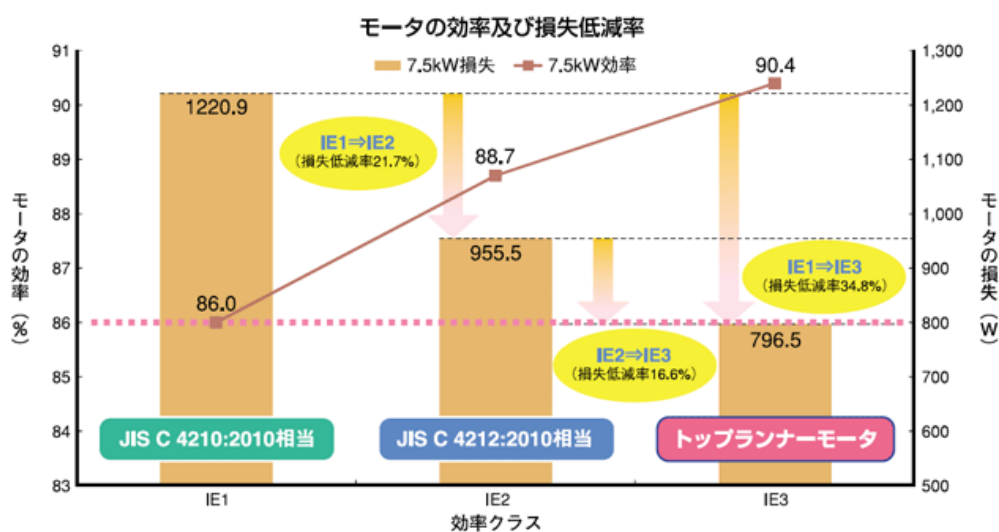


図 47 トップランナーモータ

出典：トップランナーモータ [\(22\)](#)(JEMA)

5.4.3. 制御ループのチューニング

プラントには温度、圧力、液位、流量など、多くのプロセス変数があり、それぞれが目標値に制御される。図 48 に示す制御ループの基本構成は、多くの工業プロセスで使われている。センサや伝送器によるプロセス入力(PV)が PID 制御などの制御機能(FC)に入力され、その値が設定値(SV)になるよう調節弁などにプロセス出力 (MV) され、制御ループが構成される。制御性の改善によりプロセスのエネルギー消費を削減することができる。

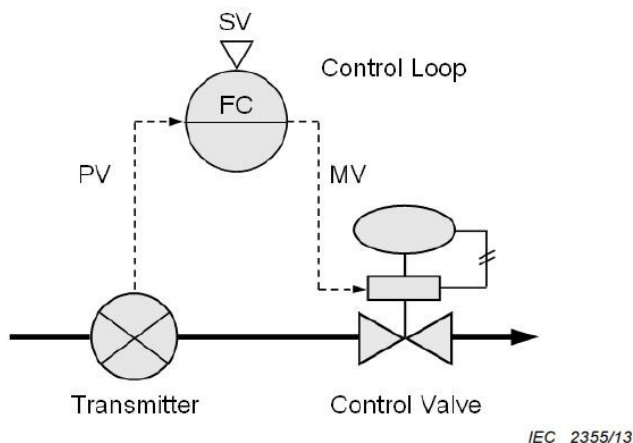


図 48 制御ループの基本構成

出典：IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
“Energy efficiency through automation systems” [\(2\)](#)

図 49 は製造プロセスの6つのライン (Zone1~6) に流れる流体の温度が PID 制御されている例を示している。生産量の変動によりラインスピード (流量) が変動するが、この変動は温度制御ループに対して外乱として作用する。PID 定数が適正に設定されていないと、制御系に外乱があるとオーバーシュートや振動を生じて制御が不安定になり、エネルギー損失が増大する。PID 定数を最適チューニングすることにより、その制御系のエネルギー効率を高めることができる。

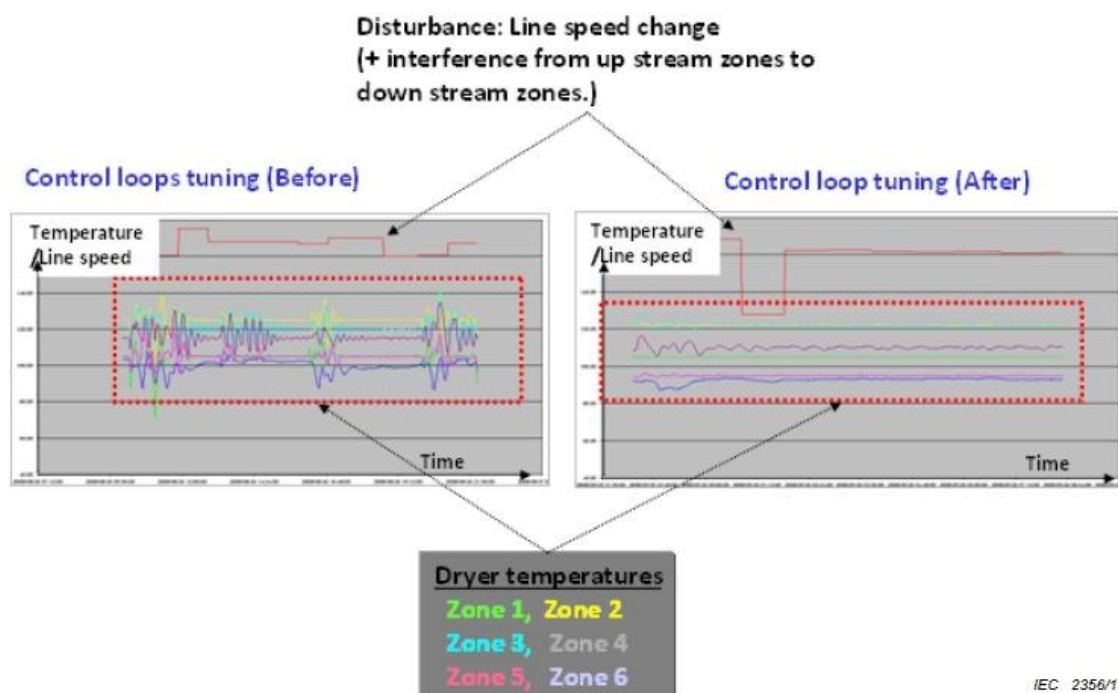


図 49 制御ループのチューニングによる制御性改善例

出典：IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
 “Energy efficiency through automation systems”⁽²⁾

5.4.4. 燃焼制御

燃焼には燃料と空気（酸素）が必要であり、空気が不足すると燃料が残り不完全燃焼状態となりばい煙が発生する。一方、空気が過剰となると、排ガス量を増加させ、余分な空気を加熱することになり、燃料効率が悪化する。図 50 に示す様に、最適な燃焼となる空燃比が存在し、そのとき燃焼の熱効率が最大となる。グラフの横軸の空気比は、燃料を燃やすために必要となる理論的な空気量（理論空気量）に対して実際に供給する空気の量の比率である。

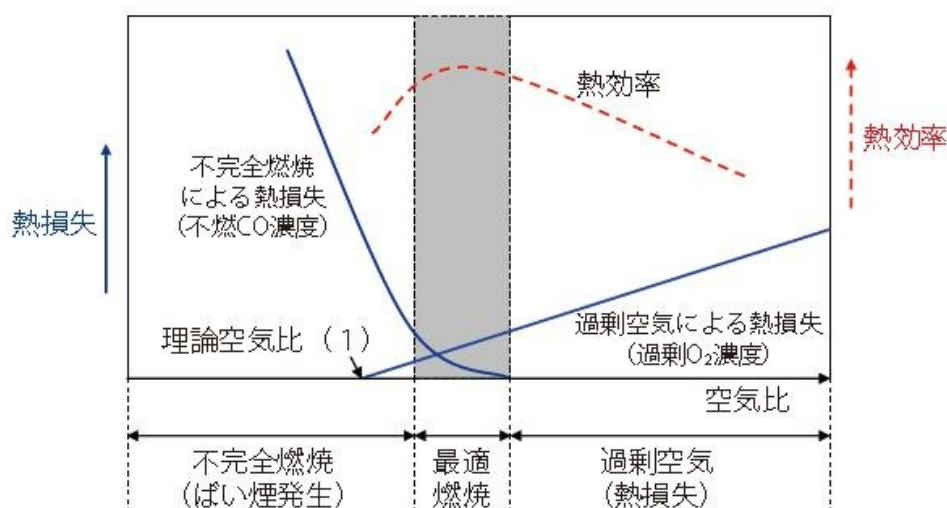


図 50 空気比と熱（燃焼）効率の関係

出典： レーザガス分析計による最適燃焼制御ソリューションソリューション⁽²³⁾
横河技報 VoL53 No.1(2010)

プラントや工場で利用される加熱炉やボイラーなどの燃焼炉では、適正な燃料と空気の比率で燃焼効率が良くなるような空燃比制御を行っている。また、大型燃焼炉では高度制御（多変数予測制御等）も適用される。その主な制御は空燃比制御、炉内圧力制御であり、CO、CO₂、NO_x（窒素酸化物）などの排出を抑え、また、不完全燃焼を防止するクロスリミット回路を用い、燃焼効率が最大になるような燃焼制御が行われる。

図 51 に燃焼制御システムの構成を示す。排ガスに含まれる CO 及び CO₂ の濃度は、レーザガス分析計などでリアルタイムに計測され、燃焼制御システムにより空燃比の制御が行われる。

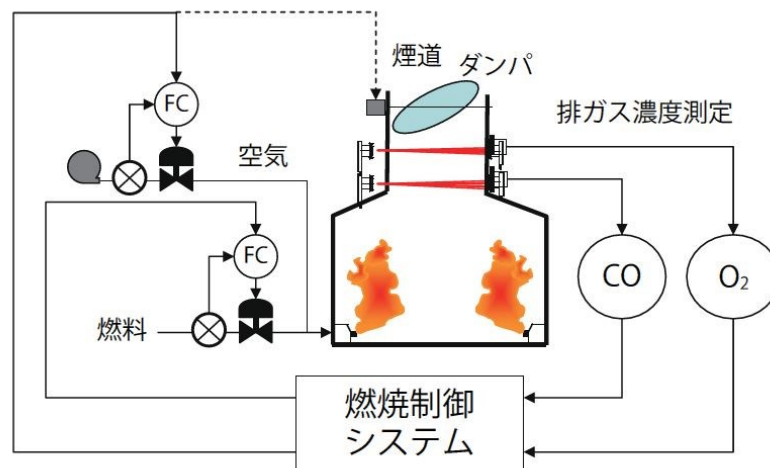


図 51 CO, O₂ 燃焼炉燃焼制御システム

出典： レーザガス分析計による最適燃焼制御ソリューションソリューション(23)

横河技報 VoL53 No.1(2010)

5.4.5. 高度制御：APC (Advanced Process Control)

高度制御とは、対象プロセスを多入力多出力モデルで表現し、数ステップ先のプロセスの挙動を予測して制御を行う“多変数モデル予測制御”を核にした制御である。対象プロセスが運転限界値を持ち、その運転限界値を超えない範囲で可能な限り余裕を小さくすることで省エネルギーを実現することができる。

図 52 のトレンドデータで、左側の振幅の大きい期間は高度制御 OFF（高度制御の導入前）の状態である。この期間は、流量、温度、レベル、圧力などの基本的な制御ループは DCS(Distributed Control System)などで制御しているが、それらの設定値を運転員が手動で調整して、省エネルギーなどの目的を実現している。そのため、一般にデータのばらつきが大きく、不測の変動に備えて、運転限界値に対して余裕を持たせて運転することになる。高度制御を導入すると、制御性の向上が期待できるため、“高度制御 ON”の期間に示すようにデータのばらつきが小さくなる。データのばらつきが小さくなることで、運転限界値との間の余裕が大きくなることから、最適化制御によって、“最適化制御 ON”の期間に示すように、より運転限界に近づけることが可能となる。このように、高度制御とは、制御性を向上させることだけが目的ではなく、最適化の方向に自動的に近づけることによって、省エネルギーなどの効果を最大限得ることを目的とした制御である。石油・石油化学プロセスへの高度制御の応用例を以下に示す。

- ・加熱炉
- ・パスバランス制御
- ・排気ガス中の酸素濃度制御
- ・蒸留塔
- ・反応装置

- ・コンプレッサ
- ・ユーティリティ設備（ボイラー・タービン・発電機）

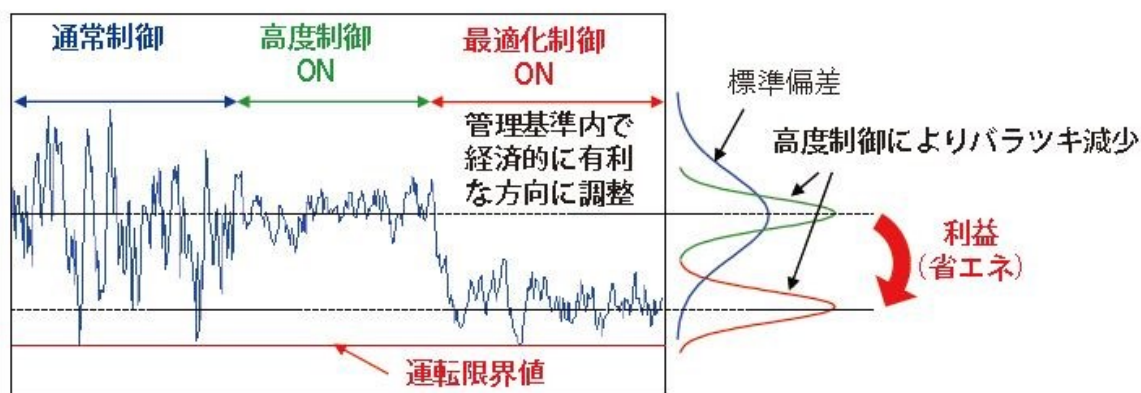


図 52 高度制御によるプロセスの安定化

出典：高度制御技術による省エネルギーソリューション⁽²⁴⁾
 横河技報 Vol.53 No.1(2010)

5.4.6. 供給空気圧制御

図 53 に工場における圧縮空気の供給における供給圧力制御の構成を示す。ヘッダを通して工場 A,B に末端圧 790kpa の圧縮空気が供給されている。生産ラインの末端圧を計測し、低負荷時にはヘッダ圧を下げるよう制御することにより、コンプレッサの負荷を軽減することができる。これにより約 3%の省エネが実現された。

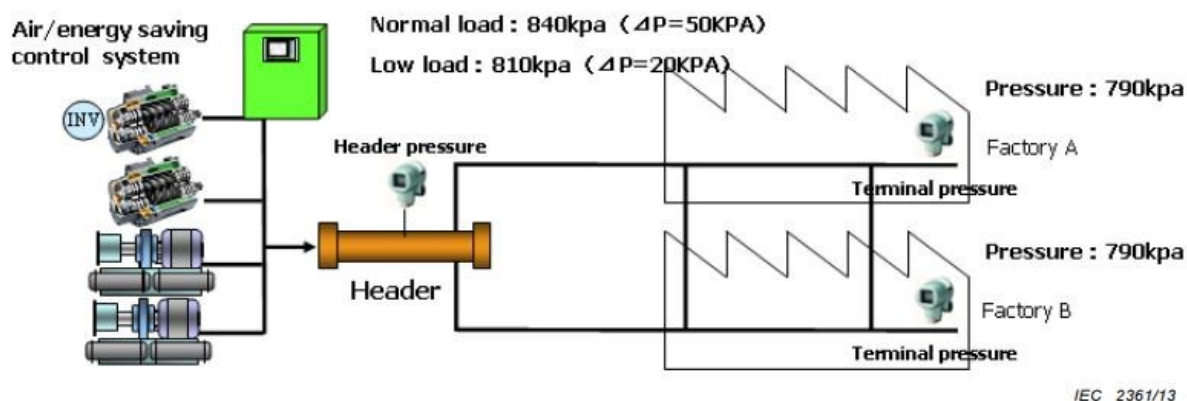


図 53 供給圧力制御

出典：IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
 “Energy efficiency through automation systems”⁽²⁾

5.4.7. 蒸気ヘッド圧力制御

図 54 コンプレッサの台数制御による蒸気ヘッド圧力制御の例を示す。負荷の変動に対して、複数台のコンプレッサの能力を最適に組み合わせることによって、稼働させる台数を最小になるように運転する。これによってエネルギー削減がはかれる。

コンプレッサ No. 1: 15 kW インバータ制御付き.

コンプレッサ No. 2: 11 kW.

コンプレッサ No. 3: 22 kW.

コンプレッサ No. 4: 22 kW.

コンプレッサ No. 5: 37 kW.

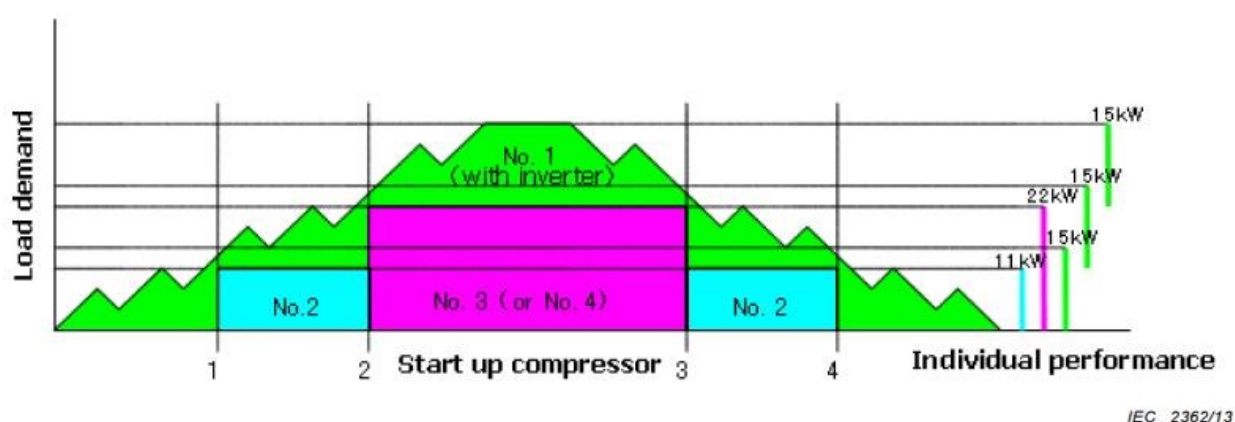


図 54 コンプレッサの台数制御による蒸気ヘッド圧力制御

出典：IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
“Energy efficiency through automation systems”⁽²⁾

負荷が増加してゆく時:

- 1) コンプレッサ No. 1 を 100 %で運転し、 所定の空気消費量に達した時点で
コンプレッサ No. 2. を立ち上げ不足分をコンプレッサ No. 1.で補充
- 2) コンプレッサ No. 2 と No. 1 を 100 %で運転し、所定の空気消費量に達した時点で
コンプレッサ No. 2.を停止し コンプレッサ No. 3 を立ち上げ、不足分をコンプレ
ッサ No. 1.で補充

負荷が低減してゆく時:

- 3) コンプレッサ No. 2 と No.1 を 100 %で運転し、所定の空気消費量に達した時点
でコンプレッサ No. 3 を停止, コンプレッサ No. 1 を 100 %.で運転
- 4) コンプレッサ No. 1 を 100 %.で運転し、所定の空気消費量に達した時点でコンプレ
ッサ No. 2.を停止

5.4.8. 連携制御

連携制御は、需要と供給のミスマッチによる無駄や、複数の供給設備間で生じる無駄を削減するため、需要側、供給側の設備同士を互いに連携させ、全体を最適に制御するコンセプトである。連携制御にはさまざまな形態があり、需要に合わせた供給設備の運転を行うことで無駄を省く需給連携、供給設備内の機器や負荷配分を最適に組合せることで無駄を省く供給連携などが実施されている。また生産計画や気象予報などに基づいた需要予測に基づく供給設備の運転、供給設備の能力を超える需要があった場合の操業調整や生産計画変更を行うこともある。さらに供給設備、需要設備を段階的に連携させることにより、一步一步省エネを進めることが可能である。このように連携制御は既存の供給設備、需要設備を有効に使う省エネを実現する先進的な制御技術である。

連携制御を導入することにより、生産側のエネルギー需要と供給側の供給のミスマッチによる無駄や、複数の供給設備間で生じる無駄を削減するため、生産側、供給側の設備同士を互いに連携させ、全体を最適に制御するシステムが構築できる。

図 55 に連携制御の概念図を示す。連携制御には、供給側の設備群を連携する供給連携、需要側と供給側を連携する需給連携、需要側同士を連携する需需連携などの基本的な分類がある。なお、連携制御には自動制御だけではなく、ガイダンスシステムによる手動制御も対象に含まれる。自動制御システム導入では費用がかかりすぎる場合や、自動的な判断ではリスクが大きい場合などには、ガイダンスシステムが用いられている。

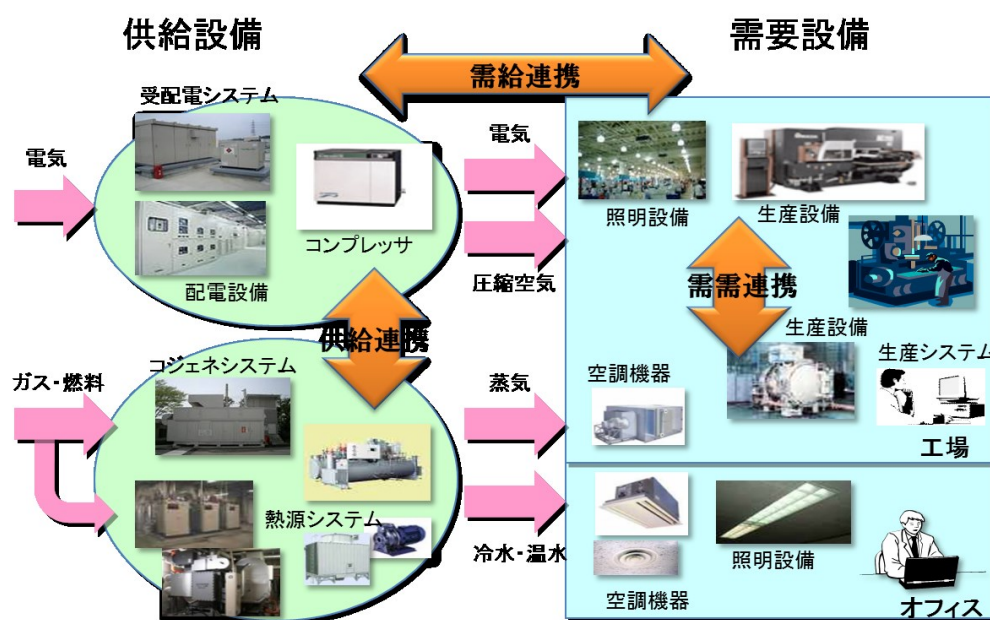


図 55 連携制御の概念

出典：連携制御ガイドブック [\(25\)](#) (JEITA)

6. 今後の展望

6.1. IoT を活用したエネルギー管理

IoT（Internet of Things：モノのインターネット）は、あらゆる製品（モノ）をインターネットにつなぎ、M2M（Machine to Machine：機器同士）によるデータ収集機能が強化され、相互通信や積極的なデータ活用を可能にする技術である。集められたデータはビッグデータとして新たな活用形態が期待される。センサやカメラを用いた情報収集により、設備のエネルギー使用状況・稼働状況がリアルタイムに把握され、生産性の向上によりエネルギー原単位向上につながる。設備の動作温度、電力量、振動、音、配管の漏れ、臭気などさまざまな稼働状態の監視が可能となり、プラントの予知保全機能が強化され、よりきめの細かい高度の FEMS（Factory Energy Management System）の構築が可能になる。無線通信で接続されたモバイル端末による設備の巡回監視の導入は既に始まっている。また、ロボットや人工知能などを活用してプラントの運転ノウハウや経験知識の集約をはかり、操業効率向上や技術者の育成に活用される事が期待されている。IoT の産業界への活用については、経済産業省により「IoT 推進ラボ」などが組織され、図 56 に示す様な新しい産業形態を展望し検討が進められている。

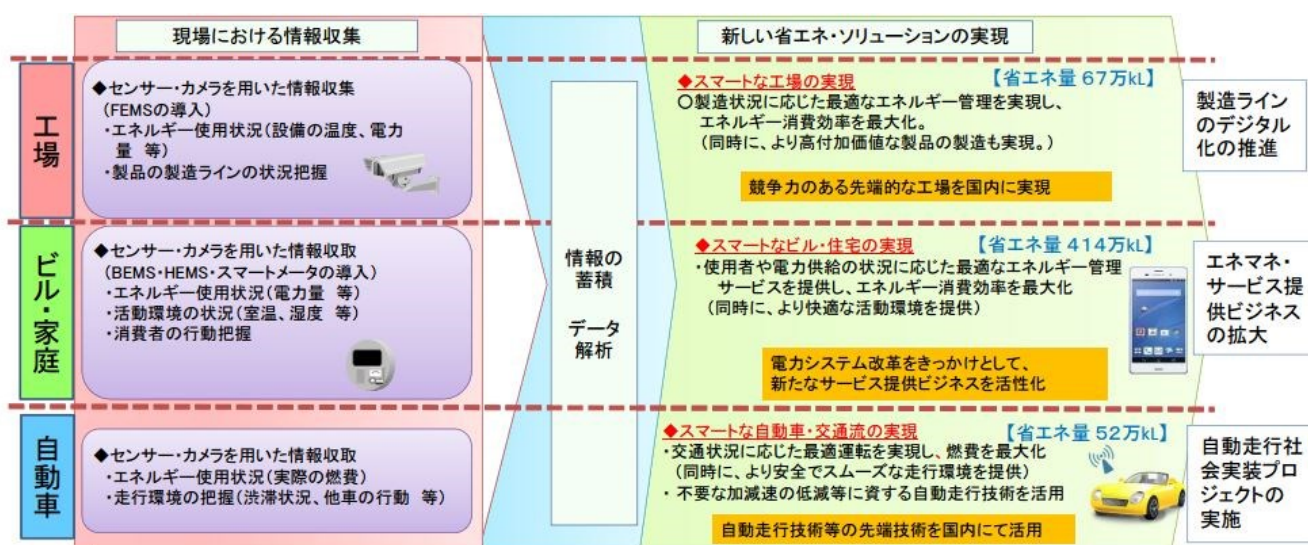


図 56 IoT 等を活用した新たなエネルギーマネジメントの実現

出典：省エネルギー対策について（資源エネルギー庁）[\(26\)](#)

6.2. Smart grid : 工場とコミュニティによる最適システム構築

6.2.1. FEMS Factory Energy Management System⁽²⁷⁾

図 57 はスマートグリッドにおける電力供給サイドから見た顧客ドメインの概念を示している。顧客ドメインは、ホーム、ビル／店舗、産業の 3 つのサブドメインに分かれ、それぞれにエネルギー管理システム HEMS(Home Energy Management System), BEMS(Building Energy Management System), FEMS(Factory Energy Management System)が存在する。

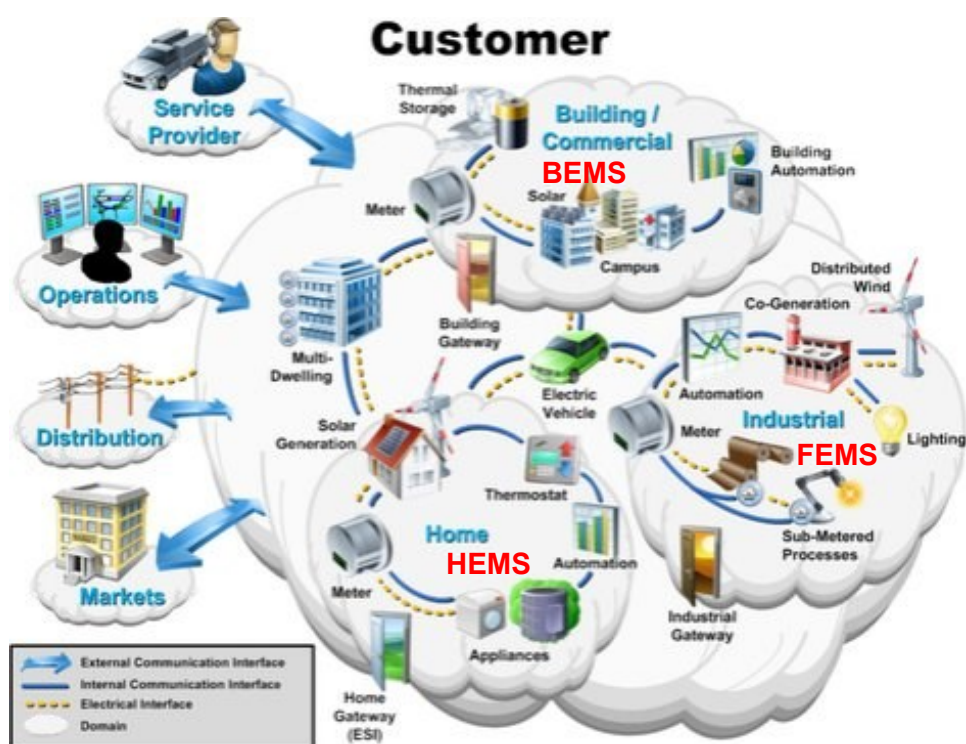


図 57 顧客ドメインの概念

出典 : Smart Grid and Dynamic Power Management⁽²⁷⁾

図 58 に FEMS(Factory Energy Management System : 工場エネルギー管理システム) の概念を示す。FEMS とは、工場操業時のエネルギー効率を向上させるために、必要な管理指標をもち、センサ・計測機器、分析ソフトウェアなどによって生産プロセ

スおよび設備のエネルギー使用状況・稼働状況を計測しデータ収集と分析することによって管理指標達成を支援するエネルギー管理システムである。

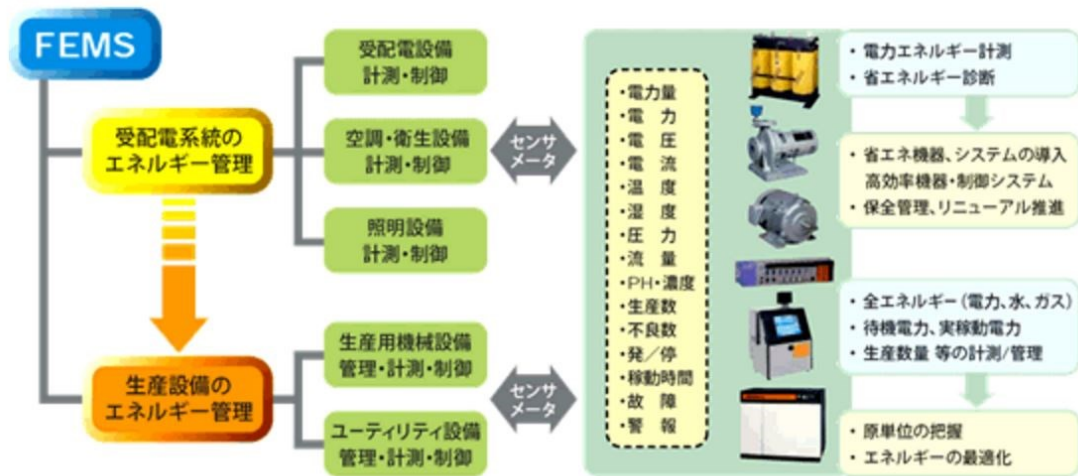


図 58 FEMS の概念

出典：JEMA が提唱する FEMS⁽²⁸⁾

6.2.2. FEMS と Smart grid

工場は電力系統から見て電力の需要家であると同時に、自家発電設備や太陽光発電、風力発電、蓄電池など DER(Distributed Energy Resource：分散エネルギー資源) を供え電力の供給能力を有しており、工場の操業状態によって余力が生ずる場合は系統に対して供給者にもなり得る。Smart grid を介して工場と系統間で効果的に需給情報をやりとりすることによって、負荷の平均化や電力の安定供給がはかられる。工場（FEMS）とのインターフェイスの国際標準化が IEC/TC65/WG17 によって進められ、IEC/TS62872（System interface between industrial facilities and the smart grid）が発行された。図 59 に FEMS と Smart grid との接続形態を示す。電力(青)と情報(赤)が双方向にやりとりされる。やりとりすべき情報は定義された 7 つの Usecase ごとに定められている。

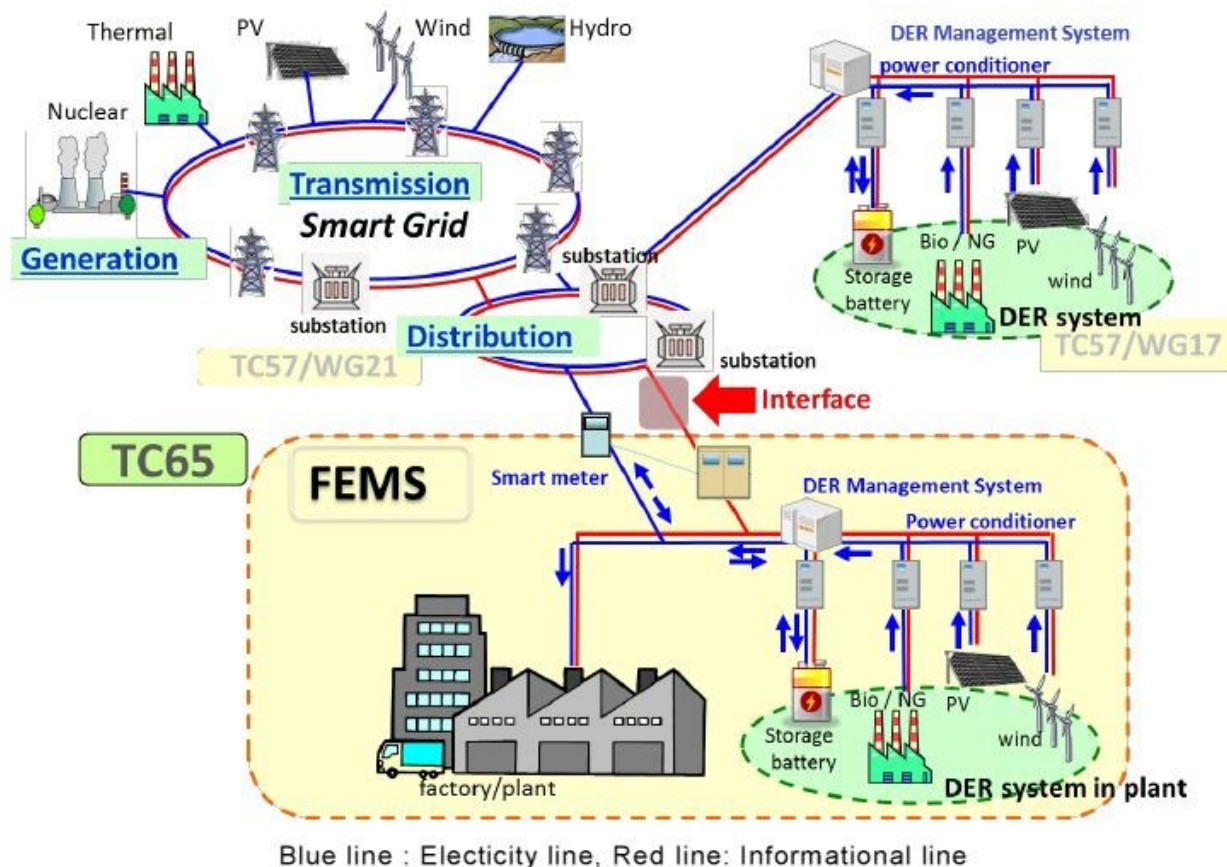


図 59 FEMS と Smart grid との接続形態

出典: IEC/TS 62872 :System interface between industrial facilities and the smart grid⁽³⁾

6.2.3. 工場とコミュニティによる最適システム構築

“スマートコミュニティ”や“スマートシティ”を目指して CEMS（Community Energy Management System）の開発が進められている。CEMS はコミュニティ内の各種需要家を ICT で結び、地域における分散電源の活用をはかりつつ、コミュニティと電

力系統との需給調整をすることによって全体最適をはかり、電力の安定供給、省エネルギー化などを達成するシステムである。コミュニティ内のエネルギー需要は電力だけでなく、冷温水、熱、ガスなどがあるが、これらは工場からの排熱の利用も含め供給可能性があり、コミュニティ(CEMS)と FEMS との連携をとることにより、エネルギーの最適運用が可能となる。図 60 に工場とコミュニティによる最適システムの構築の構想を示す。

参考：CEMS, BEMS, FEMS, HEMS

4 地域におけるスマートシティ／スマートコミュニティ実証実験の位置付け

経済産業省は 2009 年 11 月に「次世代エネルギー・社会システム協議会」を設置。次世代のエネルギー流通および社会システムのあり方にスマートグリッド/スマートシティの社会実証地域が公募され、横浜市、豊田市、けいはんな学研都市、北九州市の 4 地域が選ばれ、2010 年からの 2014 年までスマートグリッドおよびスマートシティのための技術、仕組み、ビジネスモデルまでが社会実証が行われた。

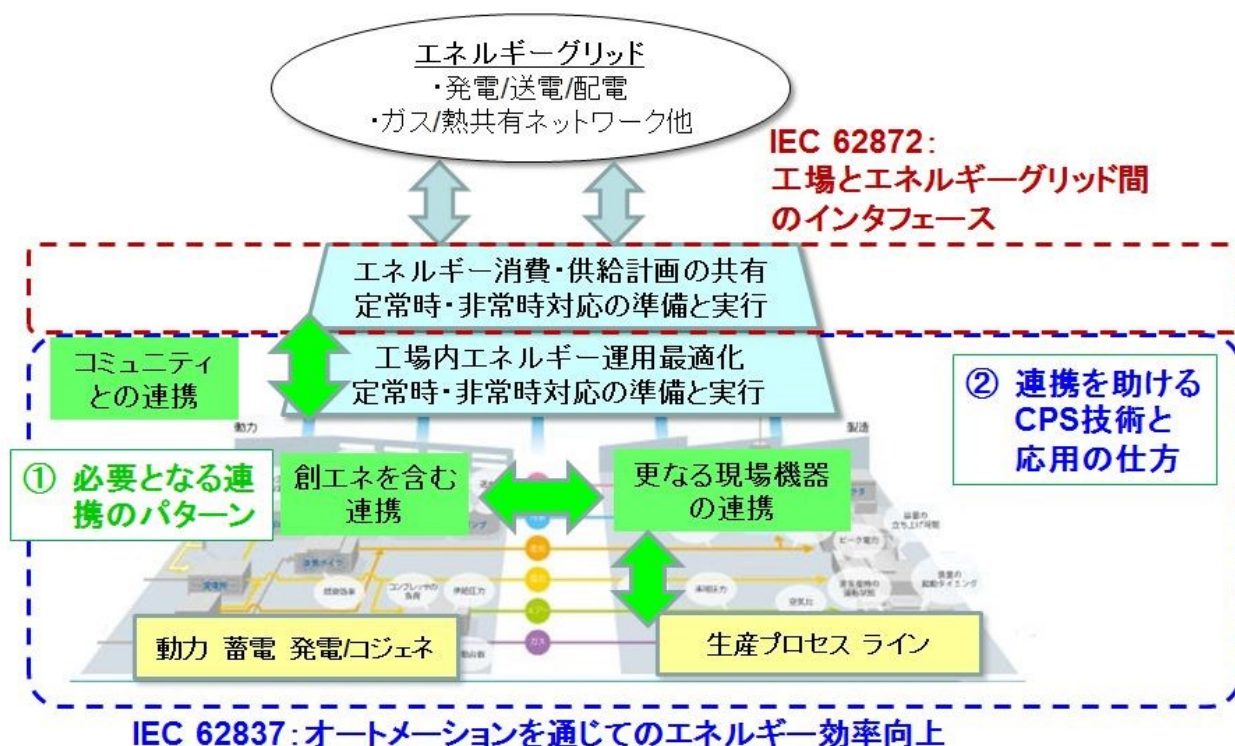


図 60 工場とコミュニティによる最適システムの構築

6.3. 次世代生産プロセス

6.3.1. 戦略的省エネルギー技術革新プログラム⁽²⁹⁾

NEDO と経済産業省が定める「省エネルギー技術戦略」において、日本のエネルギー消費部門毎に「重要技術」を設定している。省エネ技術は広範多岐にわたるため省エネ推進に貢献する技術、重点的に取り組むべき技術として選定している。図 61 に戦略的省エネルギー技術革新プログラムを示す。

平成 26 年 4 月に第 4 次「エネルギー基本計画」が閣議決定され、中長期のエネルギー需給構造を視野に入れて、エネルギー政策の基本的な方針がとりまとめられ、徹底した省エネルギー社会とスマートで柔軟な消費活動の実現として、民生、運輸、産業各部門における省エネルギーの取組を一層加速していくことなどが掲げられた。引き続き、経済成長と両立する持続可能な省エネルギーの実現が重要課題であるが、省エネルギー技術は多分野かつ広範に跨るため、これらの着実な実現には、「省エネルギー技術戦略」に掲げる産業・民生・運輸部門等の省エネルギーに資する重要技術を軸に、戦略的に省エネルギー技術の技術開発を強力に推進することが必要である。

●製造プロセス省エネ化技術

様々な一貫した製造プロセス（化学品、製鉄・ガラス・セメントなど）における省エネ化技術。

従来のエネルギー使用量削減の考え方に加え、エクセルギー（有効仕事）の利活用という面からも見直して、製造プロセスの大幅な改善を目指す技術

【具体例】

- ・省エネ型部素材製造プロセス
- ・革新的製鉄プロセス
- ・産業用ヒートポンプ
- ・コージェネ・熱利用システム

●省エネ化システム・加工技術

技術の組み合わせや蓄熱・熱輸送を用いた熱利用の柔軟化などシステム化や熱加工・動力等個々の製造プロセス共通の生産加工プロセスの改善により、大きな省エネルギーを促進すると期待される技術

●省エネプロダクト加速化技術

その製造プロセス自身では大幅な省エネルギーは期待できないが、製品使用段階における省エネルギー効果が極めて高い省エネプロダクトを生み出すことで省エネルギーに寄与する技術

重要技術

産業部門

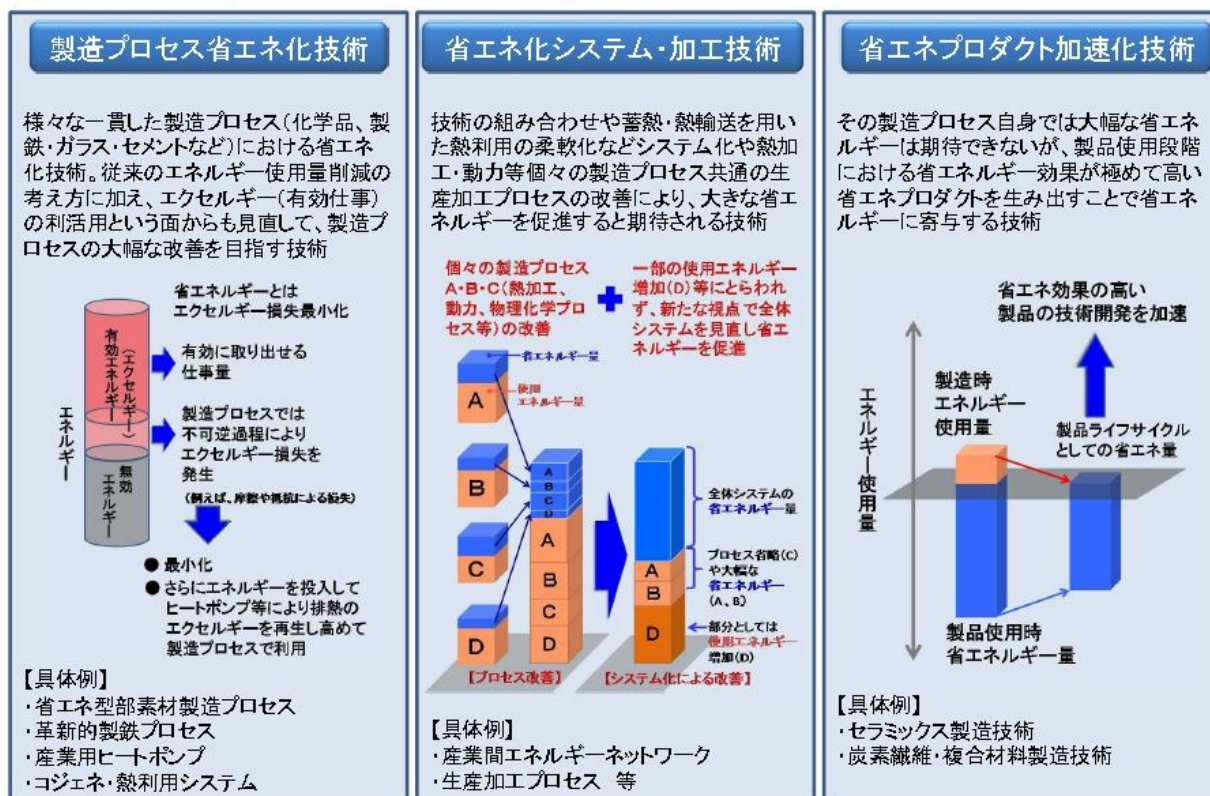


図 61 戦略的省エネルギー技術革新プログラム

出典： 戦略的省エネルギー技術革新プログラムの概要⁽²⁹⁾ (NEDO)

6.3.2. エネルギー関係技術開発ロードマップ⁽³⁰⁾

2014 年 4 月に閣議決定された第 4 次エネルギー基本計画に基づき、日本のエネルギー需給を安定させ、安全性や効率性を改善するため、中長期的観点から技術課題を俯瞰し、革新的技術開発を含む「エネルギー関係技術ロードマップ」が策定された(2014 年 12 月)。エネルギー多消費プロセスの革新的なエネルギー効率向上を目指し、下記のテーマが掲げられている。

高効率エネルギー産業利用
環境調和型製鉄プロセス
革新的石油精製プロセス
革新的セメント製造プロセス

図 62 に環境調和型製鉄プロセスのイメージを示す。

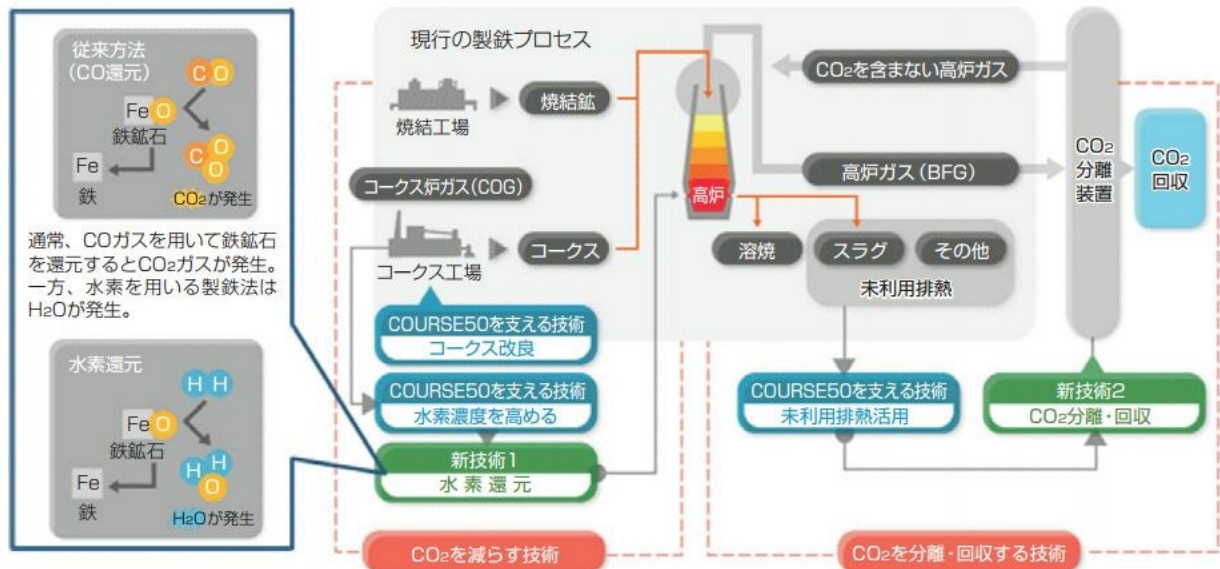


図 62 環境調和型製鉄プロセスのイメージ

出典：徹底した省エネルギー社会の実現 エネルギー白書 2014⁽³⁰⁾

参考：「COURSE50」とは、CO₂ 排出の抑制と、CO₂ の分離・回収により、CO₂ 排出量を約 30%削減する革新的製鉄プロセスを確立する技術開発。下記の略称。

CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking process by innovative technology for Cool Earth 50

7. 地球環境保全とエネルギー管理

2015年11月30日から、フランス・パリで開催されていたCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）が、2020年以降の温暖化対策の国際枠組み『パリ協定』を正式に採択した。このパリ協定は、京都議定書と同じく、法的拘束力を持つ強い協定として合意された。日本政府は2030年時点でのCO₂などの地球温暖化につながるガスの排出量を、2013年比で26%削減するという目標を掲げていたが、COP21でこれが国際公約となった。これは5030万kl(原油換算)の削減に相当し、2013年度の我が国の全世帯(約5600万世帯)の年間エネルギー消費量とほぼ同じである⁽³¹⁾。この目標達成に向けて、国をあげて取り組まなければならないが、すでに世界トップの省エネを達成している日本の産業界も、従来から進めてきたエネルギー効率改善手法に加えて、組織間の連携による全体最適、生産プロセスの革新、などあらゆる手法を駆使してエネルギー効率の更なる改善が必要となる。また、エネルギー管理の視点からは、国際標準のエネルギー管理手法をベースにしたシステムアプローチが必要であるという認識から本報告をまとめた次第である。図63に要点をまとめた。日本が率先して国際的イニシアチブを発揮し、世界的な省エネルギー推進のために貢献することが期待されている。

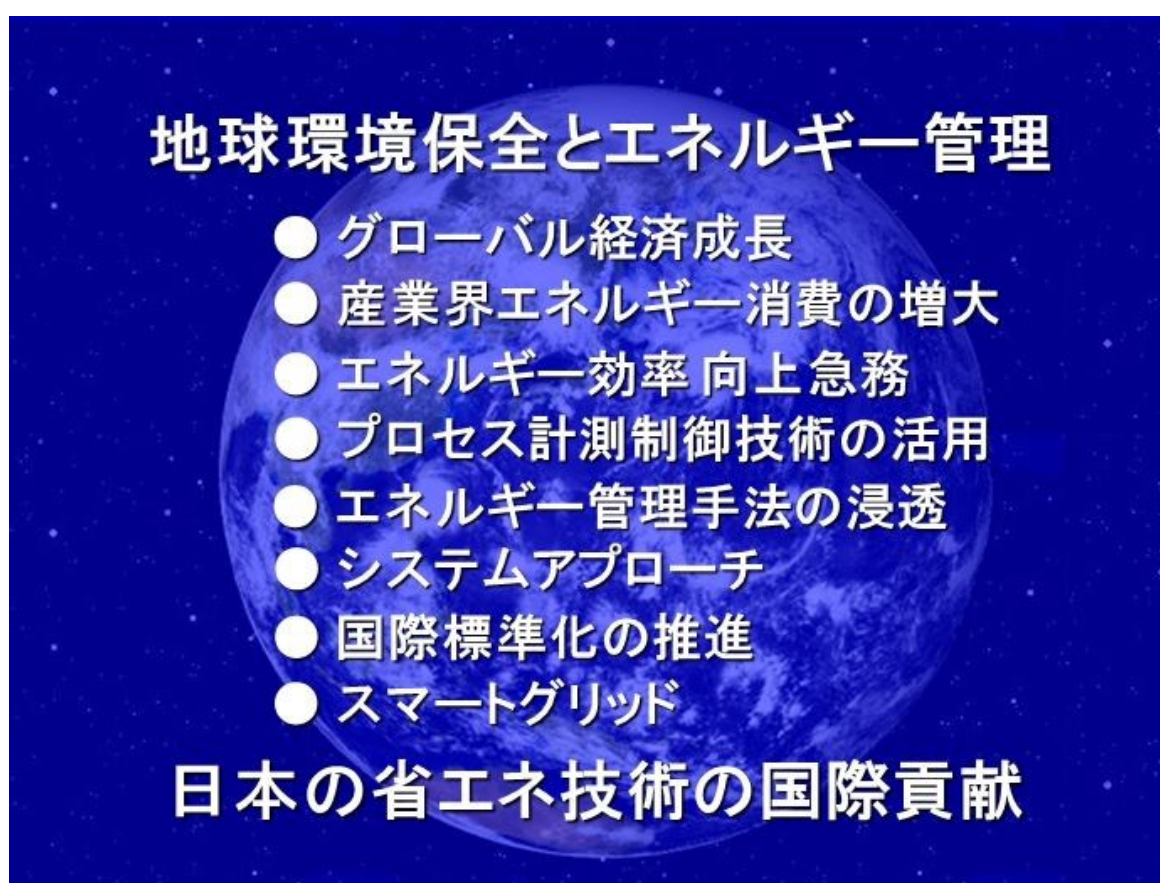


図 63 地球環境保全とエネルギー管理

8. 参考文献

- (1) IEC SMB/2419/INF
Coping with the Energy Challenge: the IEC's role from 2010 to 2030
http://www.iec.ch/smartenergy/pdf/white_paper_lres.pdf
- (2) IEC/TR62837 Edition 1.0 2013-09、
“Energy efficiency through automation systems”
- (3) IEC TS62872
“System interface between Industrial Facilities and the Smart Grid.”
- (4) JEITA エネルギー性能指標(EnPI)導入ガイド
国際標準のエネルギー管理手法 ---エネルギー性能指標(EnPI)導入ガイド---
- (5) ISO50001
Energy management systems —Requirements with guidance for use
- (6) ISO50006
Energy management systems —Measuring energy performance using energy
baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) —General
principles and guidance
- (7) 時空バウンダリー
http://home.jeita.or.jp/upload_file/20140124100601_wPWULotVCN.pdf
- (8) 省エネ診断・節電診断の進め方 (省エネルギーセンター)
電気と保安 電気と保安 2013 年 1・2 月号
- (9) (独)産業総合技術研究所 超長期エネルギー技術産業分野ロードマップ解説
http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/ene_vision_2100/07_san_gyoRM.pdf
- (10) 中低温熱利用の高度化に関する技術調査報告書
(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/RR/CRDS-FY2013-RR-02.pdf>
- (11) 複数工場間で熱を共有しコンビナート全体での省エネを実現 NEDO
<http://www.nedo.go.jp/hyokabu/articles/201315chiyoda-corp/index.html>
- (12) COURSE50 を支える技術_革新的製鉄プロセス技術開発
<http://www.jisf.or.jp/course50/tecnology03/>
- (13) エネルギー効率化のためのシステムアプローチ入門
<https://www.jemima.or.jp/publication/report/tr001-2014j.html>
- (14) 環境自主行動計画〔温暖化対策編〕 2013 年度フォローアップ結果
https://www.keidanren.or.jp/policy/2013/101_honbun.pdf
- (15) バイオリアクタ (Wikipedia)

https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%82%AF%E3%82%BF%E3%83%BC#/media/File:Bior_eactor_principle.svg

- (16) ANSI/ISA-88.01-1995 (Formerly ANSI/ISA-S88.01-1995) IEC 61512
- (17) Sugiura, 38th Seminar The Society of Chemical Engineers, Japan, 2004
- (18) 工作機械における省エネルギーへの取り組み
http://eb-cat.ds-navi.co.jp/jpn/jtekt/tech/ej/img/no1010/1010_03.pdf
- (19) IEC 62264-1 Ed 2: Enterprise system integration
- Part 1: Models and terminology
- (20) ISO22400-2
Automation systems and integration-Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management-Part 2:Definitions and descriptions
- (21) モータの省エネ化が日本を救う(nikkeiBPnet)
<http://www.nikkeibp.co.jp/article/reb/20110622/275169/>
- (22) トップランナーモータ
https://www.jema-net.or.jp/Japanese/pis/top_runner/sansou_yudou.html
- (23) レーザガス分析計 TDLS200 による最適燃焼制御ソリューションソリューション
結城義敬ほか 横河技報 VoL53 No.1(2010)
- (24) 高度制御技術による省エネルギーソリューション
若杉宏之ほか 横河技報 Vol.53 No.1(2010)
- (25) 連携制御ガイドブック(JEITA)
http://home.jeita.or.jp/upload_file/20120301182840_T3oyjIQduw.pdf
- (26) 省エネルギー対策について_資源エネルギー庁
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/007/pdf/007_05.pdf
- (27) Smart Grid and Dynamic Power Management
<http://www.intechopen.com/books/energy-management-systems/smart-grid-and-dynamic-power-management>
- (28) JEMA が提唱する FEMS
http://www.hitachi-ies.co.jp/solution/energy_fems/jema_fems.htm
- (29) 戦略的省エネルギー技術革新プログラムの概要
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
<http://www.nedo.go.jp/content/100773783.pdf>
- (30) 徹底した省エネルギー社会の実現 エネルギー白書 2014
http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014pdf/whitepaper2014pdf_3_5.pdf
- (31) 5030 万 kL(原油換算)の削減目標をどう達成するか
月刊「省エネルギー」 Vol.68 No.1 2016

Annex

A1. ベンチマーク指標及び中長期的に目指すべき水準

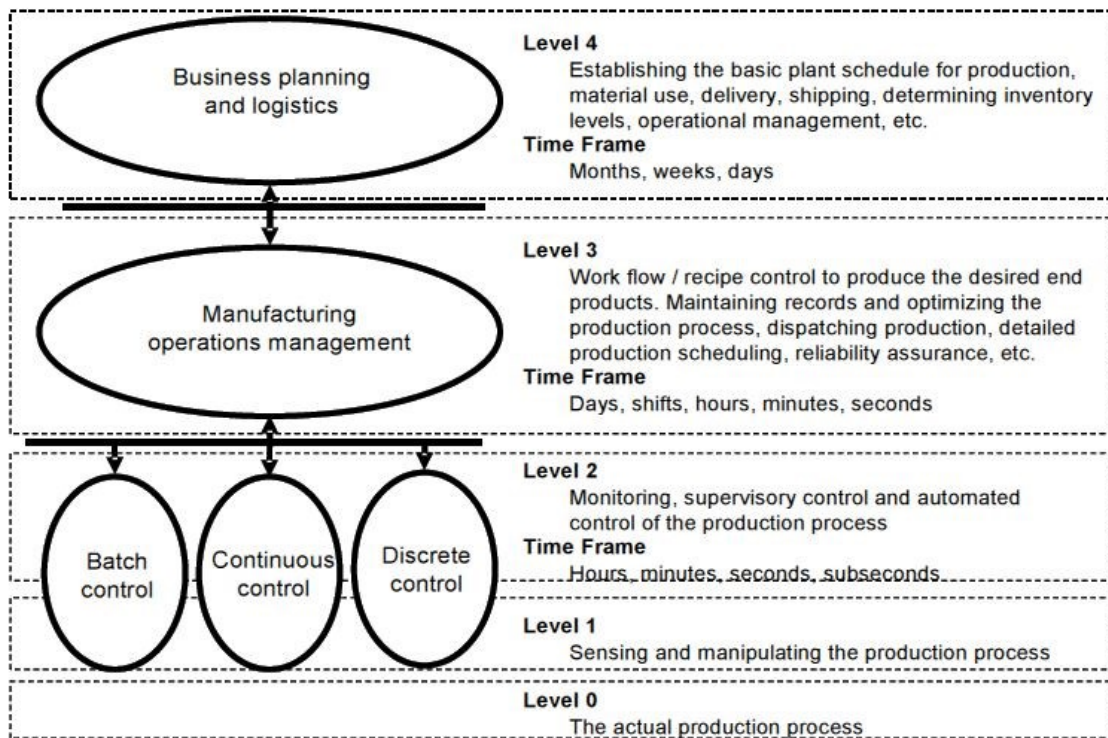
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90819a08j.pdf>

別表第6 ベンチマーク指標及び中長期的に目指すべき水準

区分	事業	ベンチマーク指標	目指すべき水準
1A	高炉による製鉄業（高炉により銑鉄を製造し、製品を製造する事業）	高炉による鉄鋼業におけるエネルギー使用量を粗鋼量にて除した値	0.531kl/t 以下
1B	電炉による普通鋼製造業（電気炉により銑鉄を製造し、圧延鋼材を製造する事業（高炉による製鉄業を除く））	①と②の合計量 ①電気炉により粗鋼を製造する過程におけるエネルギー使用量を粗鋼量にて除した値 ②鋼片から普通鋼圧延鋼材を製造する過程におけるエネルギー使用量を圧延量にて除した値	0.143kl/t 以下
1C	電炉による特殊鋼製造業（電気炉により銑鉄を製造し、特殊鋼製品（特殊鋼圧延鋼材、特殊鋼熱間鋼管、冷けん鋼管、特殊鋼冷間仕上鋼材、特殊鋼鍛鋼品、特殊鋼鋳鋼品）を製造する事業（高炉による製鉄業を除く））	①と②の合計量 ①電気炉により粗鋼を製造する過程におけるエネルギー使用量を粗鋼量にて除した値 ②鋼片から特殊鋼製品（特殊鋼圧延鋼材、特殊鋼熱間鋼管、冷けん鋼管、特殊鋼冷間仕上鋼材、特殊鋼鍛鋼品、特殊鋼鋳鋼品）を製造する過程におけるエネルギー使用量を出荷量（販売量）にて除した値	0.36kl/t 以下
2	電力供給業（電気事業法第2条第1項第1号に定める一般電気事業又は同項第3号に定める卸電気事業のうち、エネルギーの使用の合理化に関する法律第2条第1項の電気を供給する事業）	当該事業を行っている工場の火力発電設備（低稼働のもの等を除く。）における定格出力の性能試験により得られた発電端熱効率を定格出力の設計効率で除した値を各工場の定格出力によって加重平均した値（熱効率標準化指標） 当該事業を行っている工場の火力発電設備における発電端電力量の合計値を、その合計値を発生させるのに要した燃料の保有発熱量（高位発熱量）で除した値（火力発電熱効率）	熱効率標準化指標において 100.3%以上
3	セメント製造業（ポルトランドセメント（JIS R5210）、高炉セメント（JIS R 5211）、シリカセメント（JIS R5212）、フライアッシュセメント（JIS R 5213）を製造する事業）	①から④の合計量 ①原料工程におけるエネルギー使用量を原料部生産量にて除した値 ②焼成工程におけるエネルギー使用量を焼成部生産量にて除し	3891MJ/ t 以下

		た値 ③仕上げ工程におけるエネルギー使用量を仕上げ部生産量にて除した値 ④出荷工程等におけるエネルギー使用量を出荷量にて除した値	
4A	洋紙製造業（主として木材パルプ、古紙その他の繊維から洋紙（印刷用紙（塗工印刷用紙及び微塗工印刷用紙を含み、薄葉印刷用紙を除く）、情報用紙、包装用紙及び新聞用紙）を製造する事業（雑種紙等の特殊紙及び衛生用紙を製造する事業を除く））	洋紙製造工程におけるエネルギー使用量を洋紙生産量にて除した値	8532MJ/t 以下
4B	板紙製造業（主として木材パルプ、古紙その他の繊維から板紙（段ボール原紙（ライナー及び中しん紙）及び紙器用板紙（白板紙、黄板紙、色板紙及びチップボールを含む））を製造する事業（建材原紙、電気絶縁紙、食品用原紙その他の特殊紙を製造する事業を除く））	板紙製造工程におけるエネルギー使用量を板紙生産量にて除した値	4944MJ/t 以下
5	石油精製業（石油の備蓄の確保等に関する法律第2条第5項に定める石油精製業）	石油精製工程におけるエネルギー使用量を、当該工程に含まれる装置ごとの通油量に当該装置ごとの世界平均等を踏まえて適切であると認められる係数を乗じた値の総和として得られる標準エネルギー使用量にて除した値	0.876 以下
6A	石油化学系基礎製品製造業（一貫して生産される誘導品を含む）	エチレン等製造設備におけるエネルギー使用量をエチレン等の生産量（エチレンの生産量、プロピレンの生産量、ブタン-ブテン留分中のブタジエンの含有量及び分解ガソリン中のベンゼンの含有量の和）にて除した値	11.9 GJ/t 以下
6B	ソーダ工業	①と②の合計量 ①電解工程におけるエネルギー使用量を電解槽払出カセイソーダ重量にて除した値 ②濃縮工程における蒸気使用熱量を液体カセイソーダ重量にて除した値	3.45 GJ/t 以下

A2. IEC62264 Functional Hierarchy



Level 0 defines the actual physical processes.

Level 1 defines the activities involved in sensing and manipulating the physical processes. Level 1 typically operates on time frames of seconds and faster.

Level 2 defines the activities of monitoring and controlling the physical processes. Level 2 typically operates on time frames of hours, minutes, seconds and sub-seconds.

Level 3 defines the activities of the work flow to produce the desired products. It includes the activities of maintaining records and coordinating the processes. Level 3 typically operates on time frames of days, shifts, hours, minutes and seconds.

Level 4 defines the business-related activities needed to manage a manufacturing organization. Manufacturing-related activities include establishing the basic plant schedule (such as material use, delivery and shipping), determining inventory levels and making sure that materials are delivered on time to the right place for production. Level 3 information is critical to Level 4 activities. Level 4 typically operates on time frames of months, weeks and days.

石隈 徹（アズビル株式会社）エネルギー・低炭素政策委員会 委員長
高山 仁（アズビル株式会社）エネルギー・低炭素政策委員会 WG1 主査
水越邦明（横河電機株式会社）
渡辺 洋（横河電機株式会社）
池山智之（横河電機株式会社）
鈴木 聡（富士電機株式会社）
岩崎正彦（株式会社堀場製作所）
若狭 裕（JEMIMA）執筆
野里一七（JEMIMA）
松元敏行（JEMIMA）



一般社団法人
日本電気計測器工業会

〔本部〕計測会館

〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町2-15-12
TEL.03-3662-8181 FAX.03-3662-8180

〔関西支部〕

〒530-0047 大阪市北区西天満6-8-7 電子会館
TEL.06-6316-1741 FAX.06-6316-1751

www.jemima.or.jp