

製造業のサービス化におけるサービス空間の拡張

藤岡昌則^{1*}

¹ 三菱重工業(株) エナジードメイン GTCC事業部 高砂サービス技術部

* Corresponding Author: fujioka_msy1@corp.odn.ne.jp

Abstract

As a practical example of servicing gas turbine power generation equipment at Mitsubishi Heavy Industries, we will introduce a case in which the company overcame the service paradox, which is an issue in servicing the manufacturing industry, and improved the service ratio as a percentage of sales. We will also discuss how technology developments are underway to replace existing fossil fuel supply chains with hydrogen supply chains to reduce resource consumption and foster economic growth. Practical results suggest that Sarasvathy's "bird-in-hand principle" and "crazy-quilt principle" in the effectuation were effective. In order to maintain effectiveness, it is important to create an environment that alleviates friction between organizations, and informal organizations should be controlled. It is believed that servicing the manufacturing industry will contribute to decarbonization, and at the same time, by replacing existing product systems, it will be possible to expand the service space while suppressing resource consumption.

Keywords

Servitization, PSS, Service Paradox, Effectuation, Circular Economy

1 緒言

Neely(2008)によると、世界各国の中で日本は製造業の占める割合が多く、サービス産業が少ない国として位置づけられている。製造業のサービス化は,Wandermerve and Rada (1988)により製品にサービスを付加する事で、モノ製品のサービス化を強化しビジネス化を図ると言う見方があり、Servitizationと呼ばれている。一方で、Goedkoop, Halen, Riele and Rommence(1999)はモノ製品のサービス化であるPSS(Product-Service System)を進めて行く事で、環境負荷の低減を強調するServicizingを主張している。日本において製造業のサービス化を進める事は、売上におけるサービス比率を高める事で収益性を改善すると同時に、モノを中心とした社会からサービスを中心とした社会へと移行することで、環境負荷を低減する意義があると考えられる。

製造業のサービス化についての理解を容易にする為、図1にOliver and Kallenberg (2003)を基に、近藤(2012)が作成した5段階説を示す^{註1}。本稿で取り上げるサービス空間は、売上全体を製品とサービスで構成されている空間と定義し、製造業のサービス化を進めるためには、このサービス空間を拡張し売上におけるサービス比率を高めて行く必要があるが、先行研究や実務上で指摘されている2つの課題が存在する。第1は、Gebauer, Fleisch and Friedli(2005)が主張する、サービス事業に投資をしても利益が向上しない「サービス・パラドックス(Service Paradox)」と呼ばれる

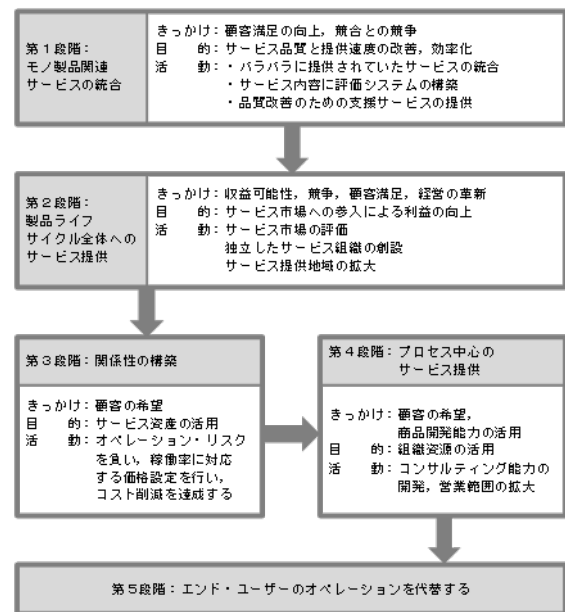


図1 製造業のサービス化5段階説

出典: 近藤(2012), 240頁

出所: Oliver and Kallenberg (2003)

現象に直面する事である。このサービス・パラドックスをどの様に乗り越え、製造業のサービス化を進めるのかが課題となっている。第2は、Tucker(2004)が主張する様に、リース、レンタル、シェア等を進める事で顧客のニーズを充たし市場で取引可能な製品とサービス

の組み合わせにより製品のサービス化を図るPSSと呼ばれる取り組みがある。このPSSの考え方を基盤としKjær, Pigosso, Niero, Bech and McAloone(2019)は、サーキュラー・エコノミー(以下CEと称する。)によって、経済成長を維持しつつ資源(人やモノ)消費の低減を図り、最終的に資源分離(resource decoupling)する事を主張しているが、実践において具体的にどの様に進めて行けば良いのかが課題となっている。

これらの課題を複合的に考えると、サービス・パラドックスをどの様に乗り越えるのかを実践視点で明らかにすると同時に、今日の資源消費型の社会から資源循環型の社会へと移行する為に、どの様な技術開発を行い、環境負荷を低減すれば良いのかについて明らかにする必要がある。本稿では、三菱重工業㈱(以下、当社と称する。)におけるガスタービン発電設備のサービス化の取組を通して、第1に、製造業のサービス化において課題となっているサービス・パラドックスをどの様に乗り越え、売り上げにおけるサービス比率を高め収益性を改善してきたのか。第2に、既存の化石燃料バリューチェーンを水素バリューチェーンに代替し、ガスタービン発電設備の脱炭素化技術開発を進め、CEを実現しようとしているかについて、高砂水素パークでの実践事例を紹介する。

2 文献レビュー

2.1 サービス・パラドックス研究

サービス・パラドックス研究の議論は、Gebauer, Fleisch and Friedli(2005)を端緒としているが、最近では組織論の立場とリスクと意思決定の立場から議論が展開されている。Johnstone, Wilkinson and Dainty(2014)は、組織論の立場からサービス・パラドックスを乗り越えるにはエンジニアリング組織とサービス組織を区別し両者を噛み合わせる事が重要であると主張している。彼らの事例研究は、製造業のサービス化の2段階目であるPLMP(Proactive Lifecycle Maintenance Program)と呼ばれる製品の性能・信頼性を保証するメンテナンス・サービスと、3段階目のTLMP(Through Life Maintenance Plan)と呼ばれる製品生涯に渡る稼働率を保証するメンテナンス・サービスとの間の移行における組織構成に係るものであった。Kohtamäki, Einola and Rabetino(2020)も同様に組織論の立場から、標準製品にサービスを付加するサービス形態から、顧客のニーズに基づいてカスタマイズするソリューション・サービスの形態へと移行する際に、起こる製品組織かサービス組織かの組織間対立をサービス・パラドックスと捉え、Bourdieu(1990)の実践理論を援用し緊張やジレンマを解消するマネジメントが有効であると主張している。彼らの議論は、製造業のサービス化の3段階から4段階へ移行する際に係るのである。しかし、この様な組織間対立において、どの様なマネジメントを行うのが適切かは企業が置かれている状況にも依存し明確な指針が示されている訳ではない。Cui, Su, Feng and Hertz(2019)は、製造業のサービス化のリスクと各段階について、プラグマティズムを理論基盤としたエフェクチュエーションと、その対

偶概念であるコーゼーションの枠組みでソリューション・サービスではコーゼーションよりエフェクチュエーションの考え方が支配的である事を事例により明らかにしている。製造業のサービス化の段階が4段階であるソリューション・サービスでは、サービス自体を顧客とのインタラクションによる共創と見れば、Vargo and Lusch(2004)が主張するサービス・ドミナント・ロジック(以下SDLと称する。)へと繋がって行くが、SDLは抽象度が高く実践レベルにおける具体的な行動基準へと展開することが困難である。本稿では、ソリューション・サービスをガスタービンの高リスク・サービスへの挑戦と捉えることで、Saravathy(2008)が主張するエフェクチュエーションの論理枠組みを援用し、具体的な行動基準を考察する。

2.2 エフェクチュエーション

Saravathy(2008)によると、不確実な事業環境下において、事業機会を見つけ成功を収めて行く起業家に共通した5つの行動原則をエフェクチュエーションと名付けている。この様な起業家の行動原則は、図2に示すとおり予測(Prediction)ではなくコントロール(Control)により成されるもので、コーゼーションの対偶概念として位置づけられている。Saravathy(2008)においても、エフェクチュエーションをプロセスの観点からマーケティングのSTP(Segmentation-Targeting-Positioning)と対比させても明らかにコーゼーションの方向性とは正反対である事を指摘している(50頁)。エフェクチュエーションの特徴的な5つの行動原則を以下に示す。

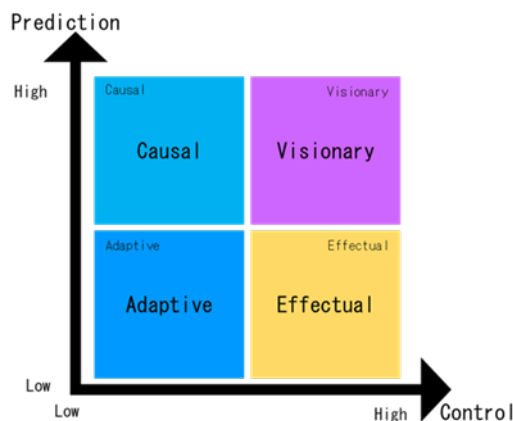


図2: Prediction & Control Space
Saravathy (2022)^{注2}

第1原則は、「手中の鳥の原則」である。これは、目的に導かれるのではなく、手元にある手段の有効活用を考えることであり、完全な機会を待つのではなく、準備できている事(あなたは誰であるか、あなたは何を知っているか、あなたは誰を知っているか。)に基づいて行動することを示している。第2原則は、「許容可能な損失の原則」であり、将来の利益予測によって導かれるのではなく、どの程度の損失まで耐えられるのかを評価し、投資をその範囲内に抑えるよう事業機会を認識することである。第3の原則は、「クレージーキルトの原則」であり、あらかじめ決められたコンセプトを

基に必要な資源を選択するのではなく、協力者が提供してくれる資源を柔軟に組み合わせる価値ある物を作り出すことである。第4の原則は、「レモネードの原則」であり、粗悪品をつかまされたらレモネードを作る様に、偶発性にも柔軟に対応することである。第5の原則は、第1原則から第4原則を統合する世界観を示しており「飛行機のパイロットの原則」と呼ばれている。これは、内部環境にある「局所性」と、外部環境にある「偶発性」の境界において、手段と目的を臨機応変に変化させながら、自らの力と才覚で生き残る事を意味している。

2.3 PSS研究とCE

PSS (Product Service System) の端緒は、Goedkoop, Halen, Riele and Rommence(1999)らが定義した「消費者のニーズを充たし、市場で取引可能な製品とサービスを組み合わせる事」に始まる。当時の目的は、生産と消費の両面から環境負荷を低減させる事であり、企業の競争力を向上させ新しいビジネスチャンスをもたらす潜在可能性が主張された。Tukker(2004)は、このPSSを製品視点(Product oriented)、使用視点(Use oriented)、結果視点(Result oriented)、の3つの視点で分類し、さらに8つに詳細分類している。強調されているのは、リース、レンタル、シェアと呼ばれる今日一般的となっているサービスである。PSSを基盤として、上位の概念枠組みとして登場しているのが、Kjær, Pigosso, Niero, Bech, and McAloone(2019)が主張するCEである。かれらは、資源消費を伴った経済成長から資源分離(resource decoupling)を図った経済成長への移行を促す2段階のフレームワークを提唱している。第1段階の鍵となるPSSとして4点挙げられている。第1に運転効率化(Operational efficiency)として製品運転時のエネルギー消費を抑えること。第2に製品寿命延長(Product longevity)として製品寿命を延長可能なメンテナンスやアップグレードに関わる事。第3に意図的製品使用(Intensified product usage)として、製品シェアと呼ばれるサービスに関わる事。第4に製品システムの代替(Product system substitutions)として、カーシェアにおいて従来の車を電気自動車に代替し資源消費を低減すること、などが挙げられている。これらのPSSにより相対的に資源低減を図る事を主張している。また、第2段階として3点を挙げている。第1は、旧式のモノを新式に置換えた場合に、まだ十分使える旧式のモノを捨ててしまうこと。第2は、1つのライフサイクル段階で最適化すれば別の段階で資源消費が増えてしまうリバウンドを回避すること。第3は、燃費の良い車に乗ったら逆に走行距離が長くなってしまふ事に配慮すること等、個々のPSSをマネジメントし絶対的資源分離を図る事を主張している。本稿では、第1段階のPSSの第1項目から第3項目は、製造業のサービス化5段階説においても包含されている内容であるが、PSS第4項目に挙げた製品システムの代替は、5段階目である、エンド・ユーザーのオペレーションをAIやICTに代替させ資源消費を減らす事と一部交差する部分であり、先行研究にお

いても十分議論されて来なかった為、この点に焦点を当てる。

2.4 リサーチ・クエスチョン

既存研究の残された課題は、実践レベルで企業はサービス・パラドックスをどの様に乗り越え企業の経済的成長を図ろうとしているのか。また、どの様に資源分離を図り環境負荷を低減させようとしているのかと言う点である。従って、リサーチ・クエスチョンは以下となる。

RQ1:企業は、エフェクチュエーションの行動基準を使って、どの様なソリューション・サービスを創出しようとしているのか。

RQ2:企業は、既存の設備を代替するために、どの様な技術開発を行い、サービスを創出すると同時に環境負荷を低減しようとしているのか。

3 製造業のサービス化実践の概要

図1の5段階説に照応させて、当社ガスタービン発電設備における製造業のサービス化の実践内容を、著者自らの体験に基づいて以下に示す^{註3}。

第1段階(1995年以前):この時期のサービスは、メンテナンス自体を顧客が行うため、そのために必要な部品を供給する事が主な受動的サービス契約が中心であった。従って、当社においてもサービスに関連する人員は、製品組織の中に配置され、サービス全体を所掌する独立した組織は無かった。

第2段階(1995年~2000年):当時の発電用ガスタービン販売シェア世界1位であったGE社のローター・トラブルを端緒として、製品ライフサイクル全体への積極的サービス提供としてLTPM(Long Term Parts Management)と呼ばれる長期に渡る部品単価保証契約へと移行して行った。同時に、IPP(Independence Power Producer)と呼ばれる発電事業者が台頭し、顧客の要望として、稼働率、性能劣化等の保証を行う為、遠隔監視システムが付加され詳細な運転状態を監視する体制が構築されていった。当社においてもサービスに関連する人員を結集しサービス全体を所掌する組織が確立された。

第3段階(2000年~2010年):1999年に高砂工場内に遠隔監視センターを設立し、遠隔監視システムを付加したLTSA(Long Term Service Agreement)と呼ばれる包括契約の台数を増やすと同時に、稼働率や性能劣化を含めた保証を付加していった。さらに、海外における販売拠点や補修拠点を増やすことで、顧客に密着した包括サービス提供体制を構築していった。

第4段階(2010年~2020年):上位機種技術を下位機種に転用する事で、性能の向上並びに余寿命を延長させるアップグレードと呼ばれるソリューション・サービスを展開して行った。アップグレードする為には、既存の技術の転用を検討するために、遠隔監視システムの運転状態監視データと設計部門の知識や製造部門の技能を統合する部門横断的で緊密な協力関係が重要とな

る。そのため、他部門との積極的な人事交流を行う事で相互コミュニケーションが活発に行なわれた。

第5段階(2020年以降):自動化・省力化を推進するDX化と同時に、火力発電業界全体として脱炭素化に対応するGX化の要請が高まる中、既存の天然ガスバリューチェーンを水素バリューチェーンに代替する為に、高砂製作所内に高効率GTCC発電設備のみならず、水素製造・貯蔵が可能な水素パークを併設し、水素製造・貯蔵・活用の一気通貫技術の実証が進められている。

4 製造業のサービス化実践の詳細

4.1 定期点検とサービス提案(1-2段階)

ガスタービン発電設備のメンテナンスは、日常点検と定期点検に分類される。日常点検は、顧客による現場の定期的な見回りが中心であるが、ガスタービンの定期点検は図3に示す様に行われている。

定期点検は、燃焼器点検(CI)、タービン点検(TI)、本格点検(MI)があり通常6年間でC-T-C-M/1サイクルで回す事となるが、信頼性の高い部品が投入され点検のインターバル延長が可能となり、現在では運転条件によりT-M6年やT-M8年の商談が成されている。また、燃焼器点検(CI)、タービン点検(TI)、本格点検(MI)などの各点検期間を短縮する事が検討され、ガスタービン発電設備の稼働率が向上することで発電所の経済性が改善する。この様な、ライフタイムの延長、インターバルの延長、定検期間の短縮をサービスとして提供する事で、顧客は稼働率が上がり発電所の収益性が向上し、提供する側はコストを低く抑えることが出来るためお互いWIN-WINの関係を築く事が出来る。

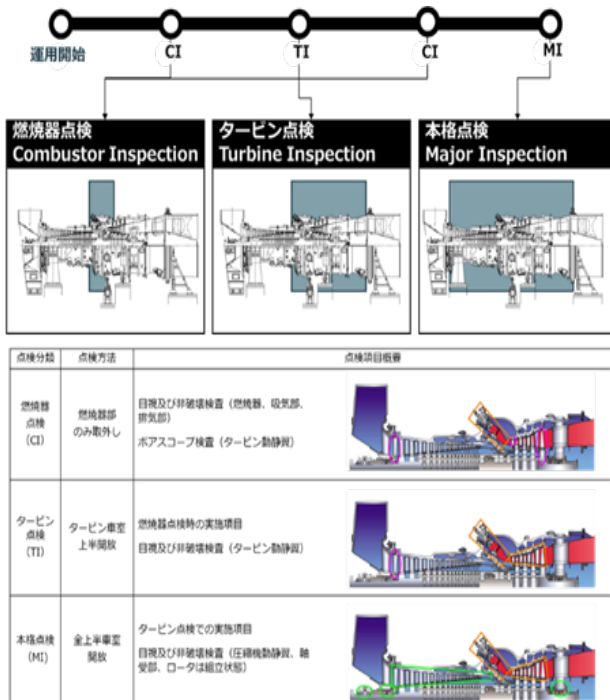


図3 定期点検の概要

出典:今北(2022)

4.2 遠隔監視システムの確立と包括契約(3段階)

第1段階の部品供給契約から、第2段階のLTPM長期部品単価契約や第3段階のLTSA包括契約へと移行する中では、部品の長寿命化を図り前述の点検インターバルを延長し点検期間を短縮する事に加え「トリップ(Trip)」と呼ばれる発電設備の停止回数を最小限に引き止める事が課題とされた。特に、稼働率を保証し包括契約を結ぶためには、トリップの可能性を事前に予知し、それを回避する事前行動が重要となる。トリップに至る前には、「アラーム(Alarm)」と呼ばれる警報が発令されるが、オペレーターの対応が遅れるとガスタービン発電設備はトリップに至る。そこで、ガスタービン1台当たり、2000点あまりの遠隔監視項目について1つのマハラノビス距離と言う指標を設定し、この距離が閾値を超えそうになると、アラームが発令される前に回避行動をとることが出来る、MT(マハラノビス-タグチ)法と呼ばれる監視方法を考案した。このMT法による監視方法が確立できたため、少人数の遠隔監視センター人員で従来起こっていたトリップ回数を低減する事が出来る様になった。第3段階の包括契約では、表1に示す様に、従来電力会社が行っていた定期点検作業は、日常の運転状況を熟知した熟練スタッフの知識や技能が重要となる。定期点検作業を当社で行うに当たり、遠隔監視システムを付加し運転状況を熟知する事で契約数を増やして行った。

表1 部品供給契約から包括契約へ

出典:著者作成

サービス・メニュー	部品供給契約		包括契約	
	お客様	三菱	お客様	三菱
運転	○	×	○	×
日常点検	○	×	○	×
定期点検	点検内容立案	○	×	○
	技術指導員	○	×*1	○
	現地作業員	○	×	○
	高温部品手配	○	×*1	○
	消耗品手配	○	×*1	○
	部品履歴管理	○	×	○
工事納期管理	○	×	○	
遠隔監視システム	無		有	

*1 お客様からの御依頼により手配実施。

また、遠隔監視によるトリップ回避のみならず、定期点検の期間短縮において海外の補修拠点や営業拠点の拡充とスタッフ教育が必要となる。第3段階では、主に海外補修拠点や営業拠点を整備する事が行なわれた。熟練スタッフの獲得が困難なIPPのお客様に対し、定期点検作業を代替し、稼働率・性能劣化保証を契約に付加させる事で、相互にWIN-WINとなる関係を強めていった。次頁図4に、米国オーランドに設立した遠隔監視センターと、タイ電力庁(EGAT)と共同で設立したJVであるEDS(EGAT Diamond Service)を示す。遠隔監視センターと補修拠点を世界各地に整えることで、顧客密着の包括サービス展開が可能となった。



図4 遠隔監視センターと海外補修拠点
出典: 著者作成

4.3 アップグレード・サービス(4段階)

第4段階では、上位機種を低位機種に適用することで現状の性能を改善するソリューション・サービスのメニュー開発を行った。ガスタービン発電設備では、タービン入り口温度を高温化させることで、大出力・高効率化を図って来ている。高温化を支える技術として、冷却技術の高度化とコーティングや耐熱材料の開発が挙げられる。すでに運用されている既存のガスタービン発電設備において、遠隔監視のデータを基にこれら新技術を適用できるかを検討し、現状の効率を改善することによるアップグレードとしてソリューション・サービスに繋げる事が出来る。図5は性能改善

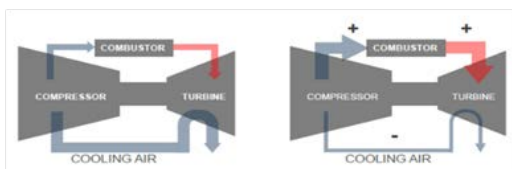
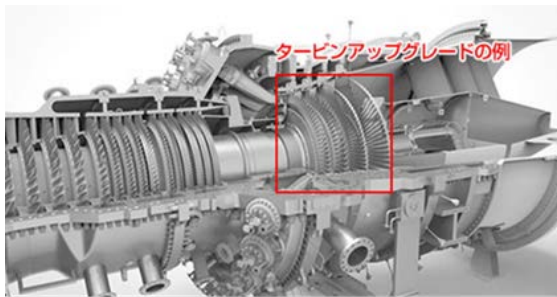


図5 性能アップグレードの事例
出典: 今北(2022)

として、タービン翼のアップグレードを事例とした概念図である。ガスタービンはその高温燃焼ガスに耐えるため、タービン翼などの高温部品は内部に冷却構造を設置し空気で冷却している。その冷却空気には圧縮機からの抽気や圧縮機出口空気が利用されるため、タービンで仕事をする燃焼用空気を使うことになり、ガ

スタービンの熱効率向上のためには、これらの冷却空気を削減することが必要となる。

高温部品の信頼性の観点では一定の冷却が必要であり、このトレードオフが技術的課題となるが、新機種に導入される最先端の冷却技術や遮熱コーティングは冷却性能を改善するもので、その技術を既存のガスタービンに適用することでガスタービン性能を改善することがアップグレードのコンセプトであり、タービンの改良翼を導入することで実現できる。

タービン翼は高温部品として定期的な保守を要することは前述の通りで、寿命管理のもと運用時間に応じて定期的に取り替えが行われる。そのタイミングでこのようなアップグレード翼を提案することは、比較的投資額も限られた有効な性能改善策として採用される場合が多い。その一例として、シンガポールにおいてタービンアップグレードを適用した事例が、熱効率の向上により年間約1万5,000トンのCO₂（二酸化炭素）排出量の削減が可能となるなどその有効性が評価され、シンガポール政府国家環境庁のエネルギー効率向上への努力・功績を表彰するEnergy Efficiency National Partnership Award 2021において、Best Practice Award²⁴を受賞した。このように、発電プラントの経済性改善に留まらず、CO₂削減など社会的課題にアプローチしたソリューションとして既設ガスタービンへの効率改善メニューが評価されている。

また環境性能として NO_x（窒素酸化物）についても、規制の強化などにより既存ガスタービン設備に対して改良ニーズがある。ガスタービンの高効率化は作動流体となる燃焼ガスの高温化によって実現されており、燃焼温度の上昇とともに NO_x が発生しやすくなるため、高温化とともに低 NO_x 化技術も開発されている。この高温化のために開発された低 NO_x 技術は既設ガスタービンに適用が可能で、市場の環境ニーズの高まりに対応できる。その一例として台湾の 1500℃級既設 GTCC プラントに、冷却空気を低減したタービン翼による性能アップグレードとともに、最新の低 NO_x 燃焼器に換装し NO_x レベルをそれまでの 25ppm から 9ppm 以下に抑えることを実施し、環境負荷をさらに低減させることができた。図6はその際に適用された燃焼技術である。

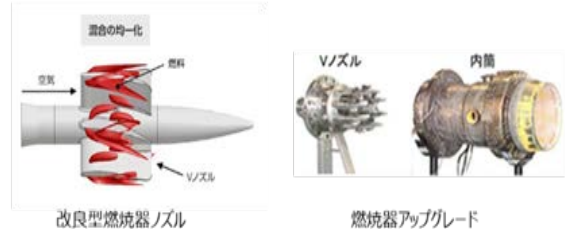


図6 エミッション改善事例
出典: 今北(2022)

このように、新たに開発された技術の導入は、経済性や環境負荷を改善し経年的な競争力の低下を回復するための GTCC プラントの保守として設備稼働率の維持に寄与している。

4.4 サービス・パラドックスの克服(3-4段階への移行時)

図7に示す様に第3段階から第4段階に移行する際には、当社もサービス・パラドックスと呼ばれる事象に直面している。先行研究では、製品組織とサービス組織の対立が指摘されているが、当社の場合は、製品組織とサービス組織との間の人事交流を積極的に行い、組織間の厚くて高い壁を、低く薄くする工夫を行っている。

部品交換と言う従来の伝統的サービスから、顧客の保有するガスタービン発電所の採算を改善するソリューション・サービス提案と言う質の異なったサービスへ移行する段階では、どの様なサービスを提案するのが良いか試行錯誤があったが、上位機種先進技術を既存の下位機種に適用する事でアップグレードする方針に落ち着いた。この様なアップグレード適用には大きなリスクを伴うが、遠隔監視により蓄積されたデータを活用し、具体的な検討を行うことが可能となったので、夫々の発電所の運用状態に合ったソリューション・サービス提案が具体化された。また、自席のPCで簡単に会議が可能となったので、検討の際には可能性の高い案件に絞り、サービス組織以外の製品組織の協力が得易くなり、上位機種に関連した知識・技能がサービス組織へと徐々に移転されて行った。その結果、縦割り組織の弊害を乗り越えアップグレードを遂行しサービス拡大する事ができた。

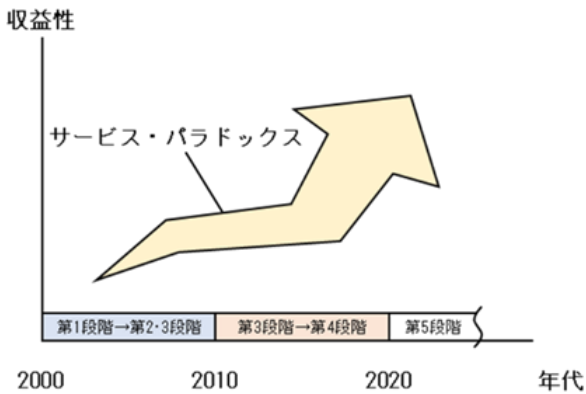


図7 サービス・パラドックスと収益性

出典: 著者作成

4.5 TOMONI(5段階)

第5段階は、エンド・ユーザーのオペレーションを代替する事であるが、CEでは製品システムの代替と位置づけられている。当社の取組みとして従来の遠隔監視設備に使われているアナログ技術を、AIを含めたデジタル技術に代替する事で高度化した「TOMONI[®]」と呼ばれる次世代遠隔監視設備の開発を進めている。オペレーションにおける課題は、運転条件の多様化や燃料の多様化に対応できる機能を持たせることであり、一方で、メンテナンスにおける課題は、人材育成、技術伝

承、業務効率化、人手不足解消などが挙げられる。オペレーションの課題に対して、現場に設置されたセンサーやスイッチなどのプロセス信号を、制御システム経由でセキュアにクラウドにデータを蓄積し、それらのデータを予測・分析・最適化・評価を実施する。その結果をWeb画面やタブレットで表示する他、得られた計算結果、ガイダンス情報をもとに、発電所を動かす制御装置 (Netmation) やその付加装置 (ボイラAI燃焼調整)、定検工事を支援する。さらには定検工事の現場作業で使用されるスマホアプリ等多岐に渡っており、お客様提供向けや自社利用向け、更には両者を繋ぐものもある。様々なデジタル製品を相互に接続・連携することで、データの最大活用を目指すとともに、お客様の投資対効果の最大化、自社の業務効率化を狙うものである。また、メンテナンスの課題に対して、紙媒体から脱却し、保全に関する各種ドキュメント等あらゆる情報をデジタルデータ化し、必要な時にすぐ活用可能な状態を目指している。保全現場での困りごとをヒヤリングする中で、多くの現場では、日々の保全業務を行う過程で、「メンテナンス履歴が整理できていない」、「欲しい資料が欲しい時に見つからない」、「資料作成に時間が取られる」等の課題が挙がることが多い。そのため、保全のあらゆる記録・ドキュメント類をデジタル情報として一律データ管理し、いつでもどこでも活用可能な状態にする。そして、デジタル化した保全情報を分析、可視化することで、バリューチェーンを構成する部門毎に必要な情報として容易に参照、評価・判断を支援する。これにより個別保全活動に要する工数を低減し、保全業務の包括的な効率化、高品質化を目指している。例えば、過去の保全業務に関する補修履歴・検査報告書等を時系列に整理・分析し可視化することで、次回定期点検の計画段階で実施すべき工事を洗い出すきっかけに繋がり、効率的な保全の確保が可能となる。その結果として、設備運用時の発電プラントの計画外停止を未然に防ぐことに繋がる。単にデータ化するだけではなく、保全業務に活用可能な形に整理・分析することが重要なポイントとなっている。さらに、「TOMONI[®]」にEMS (Energy Management System) と呼ばれる電力需給をマネジメントする機能^{注5}を付加する事で、図8に示す様に BESS (Battery Energy

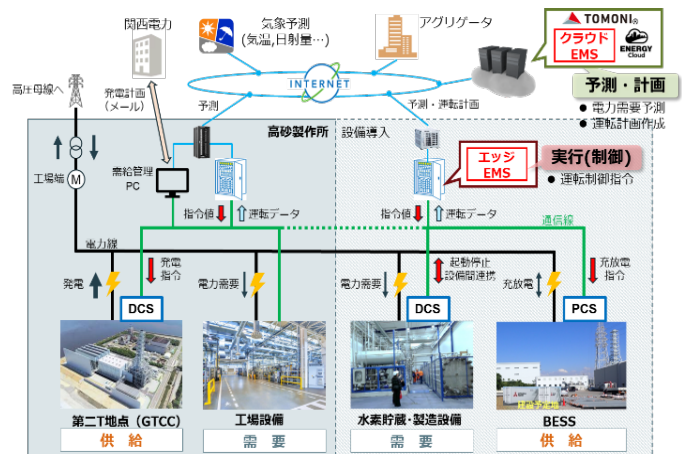


図8 EMSとBESSの組合せ

出典: 著者作成

Storage System)で蓄電し、工場内の電力需要のピークカットを行うと同時に、蓄電した電気はアグリゲータと連携し電力取引が行なわれている市場で販売するサービスを創出できる。

5 既存バリューチェーンの代替

第5段階に関連する発展的な議論として、先行研究では製品システムの代替が挙げられている。図9に示す既存の化石燃料バリューチェーンを水素バリューチェーンに代替する事で環境負荷を低減すると同時に、発電以外でも脱炭素化に向けて、車・鉄鋼・化学製品のような分野で、水素を車のFCVや製鉄の原料や還元剤として用いビジネス化することが検討されている。水素利用技術のすそ野は広いが、その実現には大規模かつ安定的で安価な水素供給が必要となる。当社の、火力発電設備においてクリーン燃料である水素を活用し、水素発電を実証する高砂水素パーク、原子力を活用し核熱を使って大量の水素を低コストで大量生産する高温ガス炉の取組について概要を示す。



図9 水素バリューチェーンの構築

出典：三菱重工業㈱, HP²⁶より

5.1 高砂水素パーク

兵庫県高砂市に、火力発電用ガスタービンの開発・製造拠点を置く高砂製作所において水素製造から発電までの技術を一貫して検証できる“高砂水素パーク”を、同製作所構内の実証設備複合サイクル発電所（通称：第二T 地点と称する。）に隣接させて整備中である。この“高砂水素パーク”の全景を図10に示す。



図10 高砂水素パークの全景

出典：三菱重工業㈱, HP²⁷より

水素パークは、大型ガスタービン1600℃級(M501JAC形)からなる水素発電実証設備、中小型ガスタービン(H25形)及び燃焼試験設備に、水素を供給するために隣接配置している。また、再生可能エネルギーによる水電解・水蒸気電解への適用を期待される電気分解装置及び天然ガス(メタン)の熱分解を行うメタン熱分解装置において、それぞれ製造したグリーン/ターコイズ水素²⁸を水素貯蔵設備で貯蔵し、各種実証試験設備で燃料として発電し、発電した電気は関西電力の送電網に供給する。グリーン/ターコイズ水素からの水素発電の一貫実証、更には二次電池(BESS)による電力貯蔵と全体最適エネルギーマネジメントシステム(EMS)を組み合わせた、電解水素と二次電池による余剰電力貯蔵、及び高需要期に水素発電ガスタービンと二次電池からの電力供給を行うことで、高度なエネルギーマネジメントを一貫実証できる設備を構築している。

現在、稼働開始に向けて水素貯蔵設備が建設完了し、水素製造装置として5.5MW アルカリ電解装置をHydrogen-Pro社から購入し運用開始に向け準備を進めている。運用開始後にガスタービンでの水素燃焼技術の試験・実証運転に着手する予定である。水素発電の一貫実証は、水電解装置として既に実用化されているアルカリ水電解方式を導入して先行させるが、同パーク内に、開発中の高温型水電解装置としてSOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)、低温型水電解装置としてアニオン交換膜(Anion Exchange Membrane: AEM)水電解装置、更にはターコイズ水素の製造などの実証機を設置して、次世代水素製造技術の試験・実証を順次行う予定である。図11は、当社が参画中の水素プロジェクトの一例である。米国ユタ州の水素製造・貯蔵施設となる水素ハブ(Advanced Clean Energy Storage プロジェクト)では、地下岩塩層に空洞を作り水素貯蔵施設を整備して再生可能エネルギーによるグリーン水素を貯蔵し、水素ガスタービンで発電するプロジェクトである。このプロジェクトで採用される水素製造設備は、“高砂水素パーク”に設置する物と同じHydrogen-Pro社製であり、“高砂水素パーク”が先行実証となる。英国では、Zero Carbon Humber として、既設発電所の天然ガス焚きから水素焚き転換プロジェクトが進行中である(正田ら, 2022)。

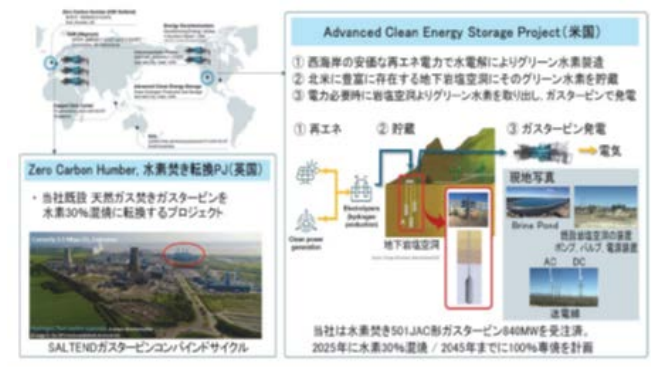


図11 低炭素海外発電PJ

出典：正田淳一郎, 寺内方志, 由里雅則, 北川雄一郎, 小阪健一郎, 堂本和宏(2022)

5.2 高温ガス炉

900℃以上の核熱利用する高温ガス炉は、カーボンフリー高温熱源であり大量かつ安定的に水素製造を行うことができるため、発電のみならず車や鉄鋼業界をはじめとした産業分野の脱炭素化を推進することができる。また、高温ガス炉の特徴として、炉心・燃料の構成材に耐熱性の高い黒鉛（減速材）やSiCのセラミック材料（燃料被覆）を、核熱を取り出す冷却材に化学的に安定なヘリウムガスを用いており、万一の事故時にも炉心内の熱を原子炉外表面から自然に放熱、除去することができ、炉心熔融を起こさない「固有の安全性」を有している。

当社は、1970年代から高温ガス炉開発に携わり、国内唯一の高温ガス炉である日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）の試験研究炉HTTR（High Temperature engineering Test Reactor）の建設に主幹会社として参画している。これらの知見を活用して、2019年度から経済産業省のNEXIPイニシアチブのもと、2040年頃の実用化を目指して、炉心出力最大600MWtの高温ガス炉による高温の熱源（950℃）を利用して、年間数十万トン規模の水素製造が可能なプラントの開発を進めている（図12参照）。また、2022年4月からJAEAと共同で高温ガス炉を活用した水素製造技術の実証事業を開始しており、既存のHTTRに水素製造施設を新たに接続し、高温ガス炉から得られる高温熱を活用した水素製造接続技術の実証を行う計画である。カーボンフリー水素製造技術については、産業技術総合研究所と共同で高温ガス炉の超高温の核熱利用により、効率的に水蒸気を電気分解して水素製造する高温水蒸気電解技術の開発にも着手している。このように高温ガス炉を活用した水素製造技術については、まずは早期実用化に向けて技術成熟度の高い水蒸気改質法を適用して核熱を利用した水素製造を実証し、将来に向けては高温水蒸気電解やメタン熱分解といったカーボンフリー水素製造技術を適用することにより、大規模かつ安定的なカーボンフリー水素製造の実現を目指していく予定である（神崎ら、2022）。

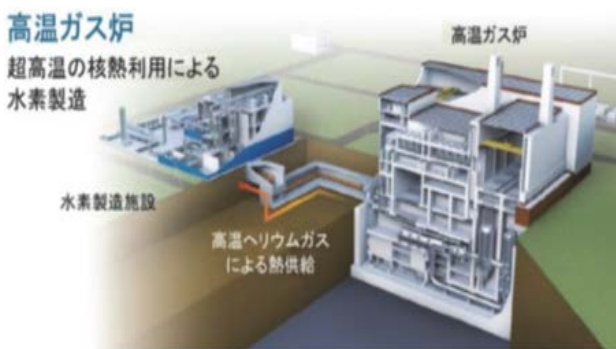


図12 高温ガス炉

出典：神崎寛，西谷順一，北川敬明（2022）

6 考察

本稿では、先行研究からリサーチ・クエスチョンを立て、製造業のサービス化の5段階説に照応させて当社

のガスタービン発電設備のサービス化がどの様に為されてきたのか、また既存の化石燃料バリューチェーンをどの様に水素バリューチェーンに代替しようとしているかを見て来た。

第1(RQ1)のリサーチ・クエスチョンに対しては、Sarasvathy(2008)が主張するエフェクチュエーションと呼ばれる、熟達した起業家の5つの行動原則の内、事例では目的に導かれるのではなく、手元にある手段の有効活用を考える「手中の鳥の原則」と、あらかじめ決められたコンセプトを基に必要な資源を選択するのではなく、協力者が提供してくれる資源（知識・技能）を柔軟に組み合わせて価値ある物を作り出す「クレージーキルトの原則」の2つが有効に働いていると考えられる。「手中の鳥」は、遠隔監視で得られたデータを活用し、開発して来た技術が適用できるかと言った視点でリスクを検討しソリューション・サービスに繋げサービス・パラドックスを克服している事が明らかになった。また、「クレージーキルトの原則」は、「Asking」と呼ばれる製品組織とサービス組織の対話を図ることでサービス組織に知識・技能の移転を加速させている。対話における、電子メールやWeb会議システムは、コミュニケーションを促進させるToolとしても役立っている。組織間の壁が厚く高い企業において、エフェクチュエーションの行動原則が受け入れられる前提条件は、製品組織とサービス組織の人事交流による相互コミュニケーションの円滑化が不可欠であると考えられる。近藤(2012)によれば、サービス・イノベーションにおける重要な要素として「組織学習」を挙げている(87頁)。また、Barnard(1938)は、組織を「公式組織」と「非公式組織」に分けて考え、どの公式組織にも支配されない個人的な接触や相互作用の総合、および人々の集団の連結を非公式組織と定義し、公式組織は非公式組織により活気づけられ条件づけられると主張している(121-126頁)。大多数の企業では、公式組織はコーゼーション主体の意思決定が図られていると考えられるが、非公式組織にエフェクチュエーション主体の行動原則を取入れ、知識や技能の移転を促進する学習を活性化させる事でソリューション・サービス創造を加速させる事が出来ると考えられる。

第2(RQ2)のリサーチ・クエスチョンに対しては、既存の遠隔監視設備においてAIを含むデジタル技術に代替することで、既存のサービス空間を拡張する事ができる。また、水素バリューチェーンを確立する技術を実証することで、発電設備のみならず車・鉄鋼・化学産業において水素に関連した幅広い製品とそれに付随した新たなサービス創造が可能となる。水素バリューチェーンを成立させる前提条件は、水素製造単価の低減が図れるかどうかで、安全性のみならず規模の経済性により設備をスケールする事でコストダウンを図る必要がある。その事で、既存の化石燃料資源の消費に頼った社会から資源分離を図ると同時に経済成長が期待出来ると考えられる。

さらに将来に向けての考察となるが、田中(2020)によれば、哲学者西田幾多郎が講義の中で、次頁図13に示すように、現実の世界の理論的構造を縦軸に直線的に

過去から未来へと進む時間を取り、横軸に空間を取ることで平面的に判り易く説明しており(176頁)、サービス空間の理論的構造が示唆されている。この場合の縦軸は、企業が置かれている経時的な製造業のサービス化の各段階を表しており、横軸である空間は製品とサービスの全体空間と見ることも出来る。西田は、現在を e として、過去を $e_{-1}, e_{-2}, e_{-3} \dots$ とし、未来を $e_{+1}, e_{+2}, e_{+3} \dots$ とすると、縦方向に何時でも現在と言うものから、過去、未来が考えられ、現在においては過去と未来が同時存在的に横方向に並ぶと考える事で、過去・現在・未来を含む円環的な空間を想定している。円環的とは空間において過去が現在に関係し未来に影響を及ぼすことを示している。この様に現実の世界の理論的構造を示すことで、唯心論に代表される主観-時間-心-個物と、唯物論に代表される客観-空間-物-一般とを統合する考えを主張している。モノではないサービスを、従来のプロセスのみならずサービス空間と捉え直す事で、全体空間を客観的に認識することが出来る。サービス・パラドックスを乗り越え、時系列的に製造業のサービス化のステップを進め、同時にサービス空間を現状の資源消費に依存したリニア・エコノミー(以降LEと称する。)から資源循環によるCEへと捉え直す事で、現状のサービス空間をさらに拡張する事が可能になると考えられる。

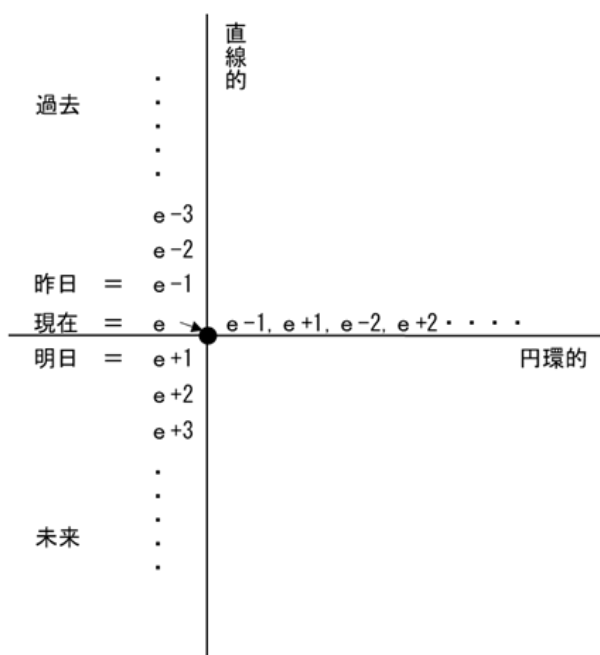


図13 現実の世界の理論的構造
出典: 田中(2020), 176頁を著者加筆

7 結言

製造業のサービス化の実践において直面するサービス・パラドックスを乗り越える為には、企業の非公式組織にエフェクチュエーションの行動原則を取入れ、公式組織の知識や技能の移転を促進することでソリューション・サービスを創出する事が出来る。また、製造業のサービス化で十分議論されて来なかった5段階においても、デジタル技術を有効活用する事と、既存のバ

リューチェーンを代替する事で、資源消費を低減しつつサービス空間を拡張する事ができる。

8 限界

本稿で取り上げたエフェクチュエーションは、起業家の経験則であり、製造業のサービス全体について一般化する為には、さらなる事例の積み上げが必要となる。また、企業組織においてエフェクチュエーションを有効に働かせるためには、コーゼーションとエフェクチュエーションを適切に機能させる組織のマネジメントが重要となる。

9 注記

- (1) Oliver and Kallenberg (2003)は、製造業のサービス化を1,2,3a,3b,4と分類している。この論文を翻訳した近藤(2012)は、1,2,3,4,5,と分類している。両者とも5段階であるが、本稿では、理解し易い近藤の分類に基づいて議論を進める。
- (2) 2022年3月13日京都大学経営管理大学院主催Sarasvathy教授の「エフェクチュエーション都市と言う未来」講義資料からの抜粋。
<https://www.gsm.kyoto-u.ac.jp/event/47834/>
- (3) 記載内容は、2023年3月9日京都大学で行われた第11回国内大会OSの発表に基づいている。発表に当たり、発表概要並びに発表資料について社内関連部門の第三者レビューを受けており、体験と言う記載形式ではあるが信頼性を保っている。
- (4) Best Practice Award: THE BUSINESS TIMES OCT 12,2021.
<https://www.businesstimes.com.sg/companies-markets/senoko-energy-gets-nod-upgrade-gas-turbines>
- (5) EMS(Energy Management System)は、三菱重工業(株)相模原・本牧工場の実績を基に計画している。詳細は、安形ら(2022)重要インフラの高度保守運用を実現するインテリジェント・ソリューションTOMONI.三菱重工業(株)技報,59(3),1-10.参照。
- (6) 三菱重工業(株)HP:2022年3月18日カーボンニュートラル説明会資料@伊藤栄作CTO.
https://www.mhi.com/jp/finance/library/business/pdf/2021_cn.pdf
- (7) 三菱重工業(株)HP:2023年9月20日高砂水素パーク全景。
<https://www.mhi.com/jp/news/23092003.html>
- (8) ターコイズ水素とは、ブルー水素とグリーン水素の中間の意味で、天然ガスの主成分であるメタンを用いて、熱分解して生成された水素のことである。製造工程でCO₂を排出せず、グリーン水素やブルー水素と比べても、水素生産コストが非常に安価な点が特長となる。
<https://pps-net.org/glossary/106771>

10 参考文献

- Barnard,C.I.(1938).The Function of the Executive.(山本安次郎・田杉競・飯野春樹(訳)(2021).『経営者の役割』ダイヤモンド社)
- Bourdieu, P.(1990).The logic of practice. Stanford University Press, California.
- Cui,L.,Su,S.-I.I.,Feng,Y. and Hertz,S.(2019).Causal or effectual? Dynamics of decision making logics in servitization. Industrial Marketing Management,82,15-26.
- Gebauer, H., Fleischman Friedli,T.(2005).Overcoming the Service Paradox in Manufacturing Companies. European Management Journal,23(1),14-26.
- Goedkoop,M.,Van Halen,C.,Te Riele,H. and Rommens,P.(1999).Product service-system,ecological and economical basics.Report for Dutch Ministers of Environment(VROM) and Economic Affairs(EZ).Pre Consultants, Amersfoort.

- Johnstone, S. Wilkinson, A. and Dainty, A.(2014).Reconceptualizing the Service Paradox in Engineering Companies:Is HR a Missing Link?. *Engineering Management.IEEE*,61(2),275-284.
- Kohtamäki,M., Einola,S. and Rabetino,R. (2020). Exploring servitization through the paradox lens: Coping practices in servitization.*International Journal of Production Economics*,226,1–15.
- Kjær, L. L., Pigosso, D. C. A., Niero, M., Bech, N. M., and McAloone, T. C. (2019).Product/Service-Systems for a Circular Economy: The Route to Decoupling Economic Growth from Resource Consumption? *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 22-35.
- Neely,A.(2008),Exploring the financial consequences of the servitization of manufacturing,*Operations Management Research*,1,103-118.
- Oliver,R. and Kallenberg,R.(2003).Managing the transition from products to services. *International Journal of Service Industry Management*,14(2),160-172.
- Sarasvathy,S.D.(2008).Effectuation: Elements of Entrepreneurial Expertise,UK: Edward Elgar Publishing.(加護野忠男(監訳)・高瀬進・吉田満梨(訳)(2015).『エフェクチュエーション～市場創造の実効理論』碩学舎)
- Tukker,A.(2004). Eight types of product–service system : Eight Ways to sustainability? Experiences from suspronet. *Business Strategy and the Environment*.13,246-260.
- Vargo,S.L.and Lusch,R.F.(2004).Evolving to a New Dominant Logic for Marketing. *Journal of Marketing*,68,1-17.
- Wandermervé,S. and Rada ,J.F. (1988).Servitization of Business: Adding Value by Adding Services. *European Management Journal*.6(4),314-324.
- 今北浩司(2022).ガスタービンの運用保守とサービスの高度化.*火力原子力発電技術協会*,73(787),386-392.
- 近藤隆雄(2012).サービス・イノベーションの理論と方法.*生産性出版*,240.
- 田中裕(2020).西田幾太郎講演集.岩波文庫.
- 正田淳一郎,寺内方志,由里雅則,北川雄一郎,小阪健一郎,堂本和宏(2022).水素社会の実現に向けた“高砂水素パーク”の取組み.*三菱重工技報*,59(4),1-10.
- 神崎寛,西谷順一,北川敬明(2022).カーボンニュートラル達成に向けた原子力事業の取組み.*三菱重工技報*,59(4),1-7.