

IHI

Realize your dreams



IHI技報

Journal of IHI Technologies

2015
Vol.55 No.2

ものづくり特集号

ISSN 1882-3041

IHI技報 第55巻第2号 平成27年

This document is provided by JAXA.

◆ 巻頭言 Opening Essay

ものづくり特集号の発刊にあたって 代表取締役会長 釜 和明 1
 Message for the Special Issue of Monozukuri

◆ 巻頭記事 Keynote Essay

IHI のものづくり系譜 編集事務局 2
 Overview of IHI's Monozukuri (Production Engineering)
 航空宇宙事業本部が目指すものづくり 航空宇宙事業本部 生産センター長 須貝 俊二 6
 Monozukuri which Aero-Engine & Space Operation Aspires for

◆ 見えない資産 Intangible Asset

世界最古の金属加工技術「 鋳造 」の DNA を世界に引き継ぐ 調達企画本部 安武 寛晴 12
 Hand on Our DNA of Casting to the World
 部品の製作精度を上げ、機械加工を国内に取り戻せ！ 技術開発本部 ものづくり推進部 畠山 利雄 14
 Retrieve the Machining Process to Japan by Still Higher Precision
 職場改善で工期を短縮し、大型受注を目指せ！ 航空宇宙事業本部 瑞穂工場 16
 The Aim of Mizuho Works for World's Best TAT

◆ 我が社の看板娘 Products

大型セグメントの計測も一人で楽々！ 株式会社 IHI 建材工業 20
 Easy One-Man Measurement of Large Shield Segments

◆ 我が社のいち押し技術 Technologies

電力エネルギーの基盤を担う至高の熱交換器 株式会社 IHI 22
 Prime Heat Exchanger for the Basis of Electric Power Supply
 未来型の溶接は金属を溶かさず火花も飛ばしません 株式会社 IHI 26
 Development of Friction Stir Welding Technology for IHI-SPB LNG Tank
 ICT で現場の実績を簡単記録「ものづくり力」を強くする！ 株式会社 IHI 30
 Speed Up "Kaizen" by Easy Visualization of Factory Status using ICT

◆ こんなビジネスが面白い Business

最新技術と匠の技を融合する 株式会社 IHI 34
 "Monozukuri" Innovation by Sand Mold Casting with 3D Printer
 金属 3D プリンターによるものづくりの技術革新 株式会社 IHI 36
 Metal 3D Printer Leads the Innovation in Design and Manufacturing

◆ 著休め Essay

生きている単結晶 技術開発本部 吉澤 廣喜 40
 Single Crystals of Ice and Superalloys

◆ 技術論文および解説 Technical Papers

IHI グループのものづくり改革の推進 宮田 仁奈 42
 Monozukuri Innovation Initiative of IHI Group
 東南アジアにおける「ものづくり支援」 二宮 和之, 兼本 充洋, Suchada PICHITPREECHA, Suthatip JOMPON, Chalida CHUNGJAPO 46
 Support for Monozukuri in Southeast Asia
 設計アイデアに及ぼすチームワークと機能本位思考の効果 牧野 公一, 澤口 学 52
 The Effect of Teamwork and Function-Oriented Thinking on Ideas Generated for Product Design
 液化アルゴンタンク (角型メンブレンタンク) の建設報告 降駒 導爵, 神谷 英司, 仲地 唯涉 58
 Construction Record of Liquid Argon Tank (Prismatic Membrane Tank)
 LM6000 ガスタービンパッケージ組立工期短縮活動 鳩 雄一郎, 渡邊 裕人, 安部 裕志 63
 Shortening the Work Period of LM6000 Gas Turbine Package Assembly
 道路インフラ老朽化の現状と今後の取組み 宮田 明 68
 — 首都高速八重洲線汐留高架橋の架替工事を踏まえて —
 Our Initiatives for the Future and Current State of Road Infrastructure Aging
 — Based on Shiodome Viaduct Reconstruction Project for the Yaesu Route of the Metropolitan Expressway —
 大径管全姿勢自動 TIG 溶接の開発と適用 横山 成就, 小林 亮, 金光 秀起, 佐々木 拓也, 小林 和行 75
 Development and Application of All Position Automatic TIG Welding to Boiler Piping

ものづくり特集号の発刊にあたって

代表取締役会長
釜 和 明

私は 2013 年から中央職業能力開発協会の会長を務めています。当協会は主要な役割として、ものづくり日本を支える技能の継承・発展および振興のために各種技能競技大会の支援を行っており、その一つに「技能五輪国際大会」への選手の派遣があります。

技能五輪は 2 年に 1 回開催され、2013 年のドイツのライプツィヒ大会には、私も名誉団長として参加しました。2015 年は 8 月にブラジルのサンパウロで開催されます。ここでは、世界 50 か国以上の 22 歳以下の若い技能者が溶接、旋盤から石工、建具、造園、西洋料理、美容、洋裁などまでの 50 職種で技を競います。日本選手団は国際大会の前年に開催される「技能五輪全国大会」金メダリストが選ばれます。

技能五輪の国際大会や国内大会を視察して感じるのには、若い技能者たちの競技に打ち込むひたむきさです。競技前までの「いわゆる今どきの若者の明るさ、くったくのなさ」から 180 度変わって競技に取り組む姿は感動的です。全力を尽くして競技終了した姿、うまくいかずに泣き崩れたり、沈み込んだりする姿には心に訴えるものがあります。

しかし競技の結果を見ると感傷に浸ってはいられません。ライプツィヒ大会での日本の金メダル数は 5 個で、韓国（12 個）、スイス（9 個）、台湾（6 個）に次いで第 4 位、金、銀、銅の総獲得メダル数でも第 4 位でした。

日本は総メダル数では 2007 年は第 1 位でしたが、2009 年以降第 1 位は韓国です。また、タイの日系企業の選手が日本の同社選手を抑えて金メダルということもありました。日本のものづくり技術の海外移転の成果ともいえますが、日本が誇ってきた現場の技能も相対的優位を維持することが難しくなっている事例かと思えます。

日本の GDP における製造業の比率は、2013 年は 18.5% となりこの 15 年間で 3 ポイント低下しています。製造業の就業者数も 2014 年は 1 040 万人と年々減少しています。マクロ経済のデータでは日本の製造業のプレゼンスは低下しています。



個別の産業を見ても、市場のグローバル化や急激な為替レートの円高への対応から、さらには安い人件費を求めて海外移転も進められてきました。日本が圧倒的な強さを誇っていたテレビなどの家電産業や、半導体産業も今では優位性が失われています。

こういう状況のなか、これからの日本は「ものづくり、輸出」に依存するのではなく、「海外向け資産からのリターン」を重視すべきとの意見がありますが、日本の GDP に占める輸出比率は約 15% で、同様の工業国ドイツ（40%以上）よりもずっと低いのです。製造業の輸出を増やして、国民の生活を豊かにしていくための財・サービスを輸入するというのが望ましい姿です。

また、医療介護やサービス産業に従事する人を増やすことが主張されることもありますが、製造業就業者の賃金に比べ、これらサービス産業の賃金は低いのが現実であり、製造業の復権こそ日本経済復活の大きな鍵となります。製造業の就業者を増やすことが国民の 1 人当たり賃金を増やすことにつながるのです。

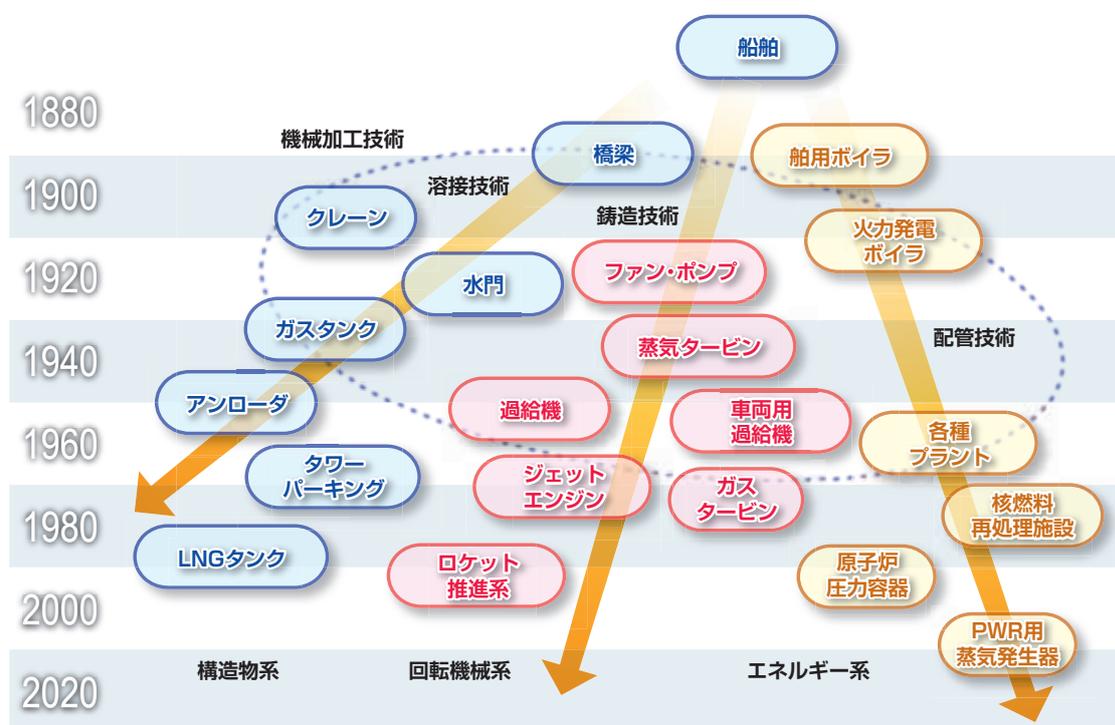
さて、IHI は 1853 年に造船所としてスタートして以来、製造業、つまりものづくりの会社として長い歴史を刻んできました。2009 年に制定した「IHI グループビジョン」においても、「IHI グループは（中略）諸問題を、ものづくり技術を中核とするエンジニアリング力によって解決し（後略）」と、引き続きものづくりの会社として発展し、社会に貢献していく決意を宣言しています。

本特集号では、そんな IHI グループのものづくりの現場をご紹介します。今も昔も変わらない職人の技から工場を挙げての改革まで、また世界最古の金属加工技術から最新の ICT (Information and Communication Technology) 利用や話題の 3D プリンタまで、私たちがものづくりにかける意気込み・執念と、その成果・展望をお読み取りいただければ幸いです。

IHI のものづくり系譜

IHI 流ものづくりが目指す 知恵と技能のオーケストラ

ものづくり技術を形成する要素の第一は匠の勘と経験のような明文化できない技能や知識である。第二は生産システムや共有情報のような明文化された知識である。これらの統合と調和が IHI のものづくりを特徴づけている。



IHI のものづくり系譜図

ものづくりとは？

「ものづくり」という言葉には「日本の」、「我が社の」、「伝統的な」などの形容詞がよく似合う。それはまた、伝統工芸品の制作のように歴史と匠の熱い思いが込められているニュアンスを伴う。「日本のものづくり」という表現には文化の薫りさえも感じられる。つまり日本人が指す「もの」は単なる物体ではなく心のこもった「品物」であり、「ものづくり」とは狭い意味の「生産（技術）」にとどまらない豊

かなイメージをもった言葉である。

生産技術は鑄造、機械加工、溶接をはじめ多岐にわたる。IHI 流ものづくりの本質は個々の技術とそれらを組み合わせた生産システムの調和にある。生産技術はリーダーである匠を中心に日々研鑽されているが、個々の技術単独では複雑な製品を完成できない。また、個々の技術を組み合わせた生産システムを構築して生産しようとしても、匠の技なくしてはシステムが機能しない。両者が調和し相まった品質・精度と工期を両立させた生産こそが IHI 流ものづくりといえる。

製品の系譜ともものづくり技術のマトリクス

IHI 製品の多くはその流れを遡^{さかのぼ}って源流を探ると造船にたどりつくといわれている。その生産技術もまた造船から生まれ引き継がれてきたものが多い。船舶建造の中心技術としてスタートした厚板溶接技術はその後のボイラ、原子炉压力容器、橋梁の製造の礎となった。現在では陸上でも活躍している回転機械も船用主機に源流があり、各種クレーンや運搬機械さえも元は船用クレーンなどの機器であり、機械加工技術が基本であった。当初、造船で使われていた配管技術は各種プラントで再び実を結んだ。

単一の生産技術によって製造されているものはほとんどないと言ってよい。幾つかの主要な生産工程が工場の生産ラインに並んでいることが多い。例えば回転機械の製造には casting、機械加工、溶接、熱処理、非破壊検査、組立などの技術が必要である。橋梁の建設では輸送や現地架設など工場外での技術も重要である。幾つかの製品とそれぞれの製造に必要な技術をマトリクスとして捉えると、多くに共通する技術が浮かび上がる。casting、機械加工、孔あけ、仕上げ、溶接、熱処理、非破壊検査、組立（順不同）などは特に多くの製品に共通することが分かる。回転機械とその代表であるジェットエンジンやロケットエンジン用液水ターボポンプに共通点が多いのは当然ともいえるが、圧延機と回転機の生産技術が似ている点や LNG タンクとシー

ルド掘削機のプロダクション技術に類似点が多いことは興味深い。また、ジェットエンジン、LNG 船、回転機械、橋梁は特に多くの要素技術を駆使していることが分かる。

ものづくり技術

IHI グループでは計画的に技能伝承を推進して技能レベルを向上させるため、2007 年に匠制度をスタートさせた。IHI 版マイスターとして 2014 年度現在、48 人の匠が全国の工場で活躍している。認定された技能は 26 種にわたっている。以下にものづくりの構成要素を概観する。

(1) 要素技術

ものづくりの中核は個々の技術であり多岐にわたる。多くの技術を保有していることは多様な製品を生み出せる強みの源泉となっている。

鑄造

金属加工の原点ともいわれ、古くは銅製の仏像製作に遡る。IHI における鑄造の原点は船用蒸気機関の部品製造にある。鑄造は機械加工よりも部品の形状を自由に製作できる利点を活かして、その後過給機の翼車に適用範囲を拡大して成長した。ディーゼルエンジンのシリンダーカバーやクランクシャフト製造も独壇場である。また、ジェットエンジンやガスタービンの翼の精密鑄造は高度な鑄造技術である。

機械加工

機械加工も多くのものづくりに不可欠であり、工



SPB LNG 船

作機械と加工機械によるものに大別される。前者は旋盤やフライス盤のように切削加工する機械であり、旋盤では工作物が回転して刃物は静止しているが、そのほかの工作機械では逆に刃物が回転する。加工機械はプレス機械や圧延機のように工作物を変形させて成形する機械である。機械加工の代表製品である歯車は回転機械の主要な機械要素であり、ホブ盤と呼ばれる特殊な切削機械で作られる。歯車は古くは船用エンジンの減速機用に生産され、現在でもさまざまな回転機械の減速機に供給され続けている。ジェットエンジンの製作におけるシャフトの中心軸を貫く細長い孔の内径加工（例えば長さの5%程度の径）、タービン翼をディスクに固定するために設けられた根元のクリスマスツリー構造のブローチ加工は IHI が自慢できる技術である。さらに、巨大な長大橋の建造においても主塔の鉛直精度（1/10 000）を保証しているのは大型横中ぐり盤という工作機械によるブロック端面切削の精度である。

溶接

溶接もまた IHI の金属加工に欠かせない。船殻の製造がその源流であることは言うまでもないが、原子炉圧力容器、球形タンク、LNG タンク、ボイラなどの缶、橋梁、PWR（Pressurized Water Reactor）用蒸気発生器など、溶接が主役の製品は枚挙にいとまがない。溶接対象の材質、溶接速度・品質の向上、熱処理、自動化、検査法、溶接対象（厚板／薄板）など国内外の溶接技術開発に IHI は寄与してきた。

試みに 1938 年以降 75 年間の技報に占める溶接関連の論文数を概算すると、生産技術に関わる 725 件中 146 件（20%）を占める。この点からも「ものづくり」における溶接の重要性と貢献が理解できる。

鍛造

伝統的な刀剣の製造方法として知られる鍛造は鋳造と同様に複雑な形状の部品を作りやすく、鋳造よりも欠陥が少なく損傷リスクが低い。シャフト、ローラ、カムシャフト、クランクシャフト、加工機の管板や圧力容器の鏡板、宇宙ロケット用液水ターボポンプのローターなど適用対象は大小多岐にわたる。製品によって、① 鍛造で形を作り出す場合と、② 鍛造で作った材料を機械加工して部品を作る場合がある。

熱処理

加熱・冷却により素材の硬度や強度などの性質を変化させるのが熱処理技術であり、焼き入れ、焼き戻し、焼きなまし、焼きならしなどの種類がある。鋳造や溶接においては凝固時の収縮や加熱・冷却に伴う熱膨張・収縮に起因する残留応力が発生し、ひずみの原因となる。金属組織レベルでの改善から目に見えるスケールのゆがみの修整までさまざまなひずみを解消するためにも熱処理が施される。

塗装

船舶と橋梁に耐環境性を付与して寿命を保証するために塗装は最後の砦^{とりで}であり特に重要である。ジェットエンジンのローター・シャフトの場合は防



第二音戸大橋の一括架設

せい
 鑄と耐熱性向上のための塗装が施されるが、シャフトを貫通する細くて長い孔の内面に均一に塗布する技術は最近まで匠にしかできない技術であった。

組立

組立工程がないものはないほど組立は「当たり前」に重要な工程である。一口に組立と言っても、工場で組み立てたものをいったん分解して現地に輸送して再度組み立てるといった面倒な場合や、大きな工作物を機械加工しやすいように反転（通称：トンボ）する方法など工夫も多く、匠 48 名中 7 名が組立の匠であるほど重要である。

(2) 生産システム

個々の生産技術を有機的に結びつけるいわゆるインテグレーションの役割を担っており、ものづくりにおけるソフトウェアのウェイトが高まっているといわれている近年は生産システムあるいは生産管理の重要性が増している。特に ICT (Information and Communications Technology) を利用したプロセス管理には注目が集まり利用実績も増えつつある。

(3) 検査・計測技術

前述のマトリクスでも明らかのように、ものづくりにおいて検査・計測は品質を保証するために極めて重要である。特に非破壊検査技術は共通性が高く、多くの製品の品質保証に貢献している。

(4) 部材調達

ものづくりに素材は絶対不可欠である。素材や部品の調達は品質やコストを決定づける。日頃から供給メーカーの技量を見定め適切に調達することで製造プロセスの最上流を守る役割を担う。

知識創造プロセスとしてのものづくり

ものづくりの根本は個々の生産技術である。生産に関する知識や技術はまず作業員個人の頭の中や身体に感覚として定着する。経験や勘に基づいたこのような知識や技術は言語・数式・図形など目に見える形で表現することが難しい。したがって、旧来の徒弟制度のような形で伝承されることが多い。チームで共有された経験則や勘による判断方法はいずれ作業手順書などに明文化される。作業中の計測データがグラフや数式にまとめられる場合もある。明文化された複数の知識はやがて大きな知識体系としてまとめられる。多くの作



©JAXA
 H-IIA ロケット 4 号機

業手順書がまとめられたマニュアルのイメージである。

知識の一部は匠によってさらに解釈が深められ、個人に属していた知識と融合・統合してさらに高度で実用性のある知識として昇華する。この知識の高度化の過程を繰り返すたびに知識体系は高度なものになってゆく。匠は技能の高度化のみにとどまらず、体系化された専門知識をも身に付けてさらなる高みを目指す「進化を続ける匠」である。上のプロセスを繰り返すたびに匠はもちろんものづくりもスパイラル・アップ（昇華・進化）してゆくのである。

多くの製品は前述のように複数の要素技術を必要とするので、知識体系全体のイメージは複数のスパイラルが束ねられた形と捉えることができる。ものづくりは匠（個）とチーム（全体）の調和すなわちオーケストラのような形で成長を続けている。

今後個々の要素生産技術のさらなる高度化とともに生産システムの ICT 化やプロセスの最適化を図って、お客さまに満足いただける製品を作り続けてゆく所存である。

（文責：編集事務局）

航空宇宙事業本部が 目指すものづくり

伝統が鍛えた現場力に最新の ICT を加え、 独自の Smart Factory へ

1957年に田無工場を開設してから半世紀あまり、空本部のものづくりは新しい工場、新しい生産方式、そして現場の力によって絶え間なく進化を続けてきた。さらなる変革によって拡大し続ける航空需要に応える。

航空宇宙事業本部
生産センター長

須貝 俊二

はじめに

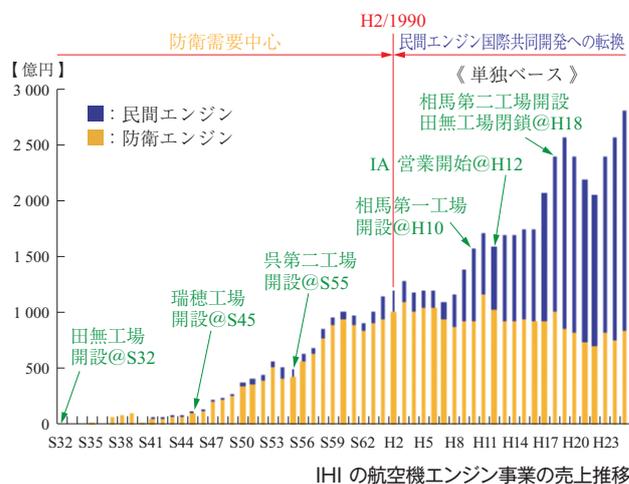
航空宇宙事業本部（以下、空本部）は市場の成長を取り込み、田無工場から瑞穂、呉第二、相馬第一、相馬第二の各工場へと生産拠点を拡げながら、ものづくり競争力の向上を目指し、IHI独自の生産システム（IHI Production System）を追求してきた。ここでは、流れ化／見える化をベースに人の知恵を最大に活かし、独自技術を開発導入しながら自律的・継続的に進化し続ける、空本部生産センターの目指すものづくりを紹介する。さらに、現在注目されている Smart Factory に関する検討を加え、次世代に向けた生産システム先進化への方向性を探る。

空本部の生産拠点

空本部では、1957年に旧田無市（現在の東京都西東京市）に田無工場の操業を開始して以来、General Electric社（アメリカ）、Rolls-Royce社（イギリス）、Pratt & Whitney社（アメリカ）とのライセンス生産を通じて、防衛エンジンの製造技術を修得し、防衛省ならびに通商産業省（現経済産業省）のご指導のもと、純国産や国際共同エンジン開発に参画し成長を続けてきた。1990年代までは防衛エンジンが生産機種・

量ともに右肩上がりに増加してきたが、それ以降は民間エンジン需要が拡大基調となり、従来の熟練工に頼る多品種少量生産体制から、より合理的な少品種多量生産体制への変革が求められるようになった。これらの市場の変化と成長に柔軟に対応するため田無工場から瑞穂工場、呉第二工場、相馬第一工場、相馬第二工場へと生産拠点を拡げながら、ものづくり競争力の向上を目指してきた。

組立、整備、試運転の工程を集約した瑞穂工場（1970年完成）、ロングシャフト、ディスク、フレームケーシングなどの大物部品を集約し、セル生産を採用した呉第二工場（1980年編入）、エンジンのなかでは一番数量の多い翼部品に特化し、フローライン化



工場名	開設年	特徴	備考
田無工場	1957年(昭32)	・多品種少量生産：定置 ・熟練工による品質性能の作り込み	2006年相馬第二工場開設により閉鎖
瑞穂工場	1970年(昭45)	・組立・運転・部品修理・試運転工場 ・ジョブ・ショップ生産方式	
呉第二工場	1980年(昭55)	・大型部品の板金・切削加工 ・大型部品のフローライン(セル)	ロングシャフト、ディスク、フレーム ケーシング
相馬第一工場	1998年(平10)	・翼部品に特化 ・フローライン生産：1個流しの追求 ・たゆまぬ改善と生産性向上	
相馬第二工場	2006年(平18)	・国産のフルエンジンをまとめられる工場 ・差別化技術のものづくり開発拠点 ・多品種少量に対応したフレキシブル生産 ・大部屋化/流れ化/2S	取扱品目約3500点の需要変動に柔軟 に対応できるワンフロア化 8割以上が国家技能検定保有者
IA	2000年(平12)	・FRP製品に強み	旧日産自動車株式会社宇宙航空部門

航空宇宙事業本部の生産拠点

による1個流し生産を追求した相馬第一工場(1998年開設)、そして、2006年には空本部のものづくりの総本山である田無工場の資産を継承した、「エンジンを丸ごと生産できる」工場として相馬第二工場を開設し、現在の生産体制が整った。また、2000年には日産自動車株式会社から繊維強化複合材(FRP: Fiber Reinforced Plastics)製造に強みのある宇宙航空部門が株式会社IHIエアロスペース(IA)富岡事業所として編入された。

IPS (IHI Production System)

初期のライセンス生産機種では熟練工が製品の品質と性能を作り込み、エンジン性能の高度化に伴い、高温・高圧・高強度に対応する生産技術・要素技術を導入してきた。新たなものづくりへの挑戦として1993年にトヨタ生産方式(JIT: Just In Timeと「自働」化)を導入し、現在ではIHI独自の生産方式であるIPSとして空本部の全ての工場で展開されている。IPSは、見える化、工程連結、1個流し、品質の工程内作り込みといったコンセプトをトップダウンで導入し、世界と戦う競争力をつけていく生産方式である。

田無から相馬への移管では、コスト1/2、リードタイム1/3を目標とする、革新的なものづくりへの挑戦を開始し、スピードを追求する自律的な取り組みを推進するため、逆三角形でフラットな組織を導入し、“相馬の初心”として以下の基本理念が受け継がれている。

① お客さまの安全とニーズを第一に

常に、空飛ぶ製品を作っているという責任を忘れずに、一人ひとりがプロとして妥協のない品質を保

証する。また、常時変化するニーズを的確に捉え、お客さまの身になって機敏に対応する。

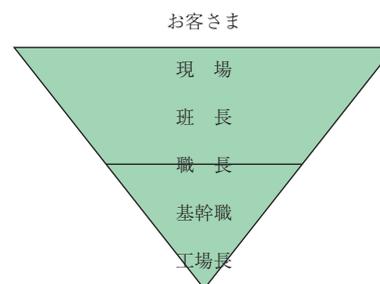
② 人と地域にやさしいものづくりを

工場の安全と環境保全に積極的に取り組み、地域の一員としての自覚をもち、地域社会の発展に貢献する。そして、他人の人格と技量の成長を喜びとし、やりがいのある会社づくりに全員で努力する。

③ 世界のマーケットリーダーを目指す

マーケットプライス以下で戦い、受注を拡大する。時代と製品が変化しても、常に、最高効率の生産を実行するため、技術の差別化に積極的に取り組み常に世界をリードする。

田無工場で始まった改善活動は時代時代の課題に対し真剣に向き合い、意識改革、風土改革、構造改革のサイクルを回しながら、時代の要請に応えられるよう組織改革が行われてきた。2011年3月11日の東日本大震災で相馬事業所は甚大な被害を受けたが、3月28日には倒れた機械をすべて立て直し、一部の職場ではあるが生産を開始し、5月の中旬には一部の工場が完全復旧、8月には事業所としての完全復旧が果たせたのも、現場主導のIPSが浸透していた成果である。



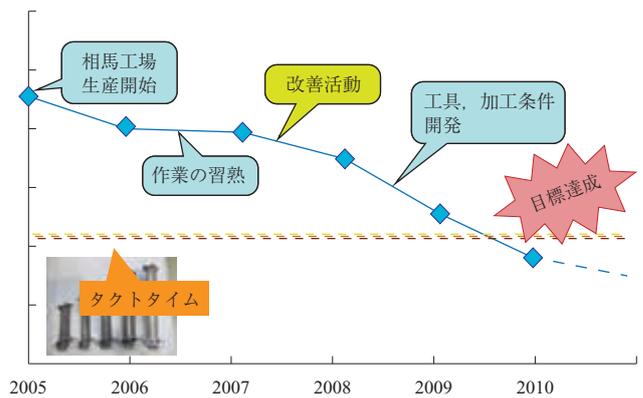
お客さまを第一に考える逆三角形組織



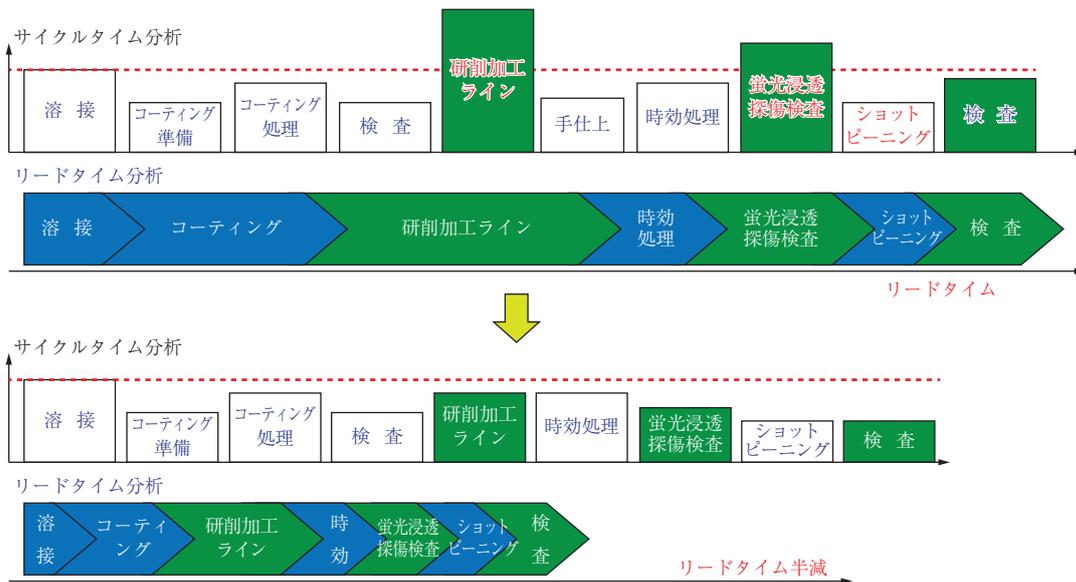
相馬工場における「ものづくり」改善活動の歴史

IPS 生産活動は需要変動に迅速に対応できるようフローライン化による JIT 生産が基本である。生産技術による独自の工程・設備開発を進めて工程の改善を絶えず行うとともに、ボトルネック工程への継続した改善活動と段階的継続的な設備投資により、リードタイムを極限まで削減する活動を行っている。また、需要変化に伴う頻繁なレイアウト変更、機械設備のダウンサイジング化、手離れ化による最適な生産ラインへの変更が絶えず行われている。

下図は、工程ごとのサイクルタイムを見える化し、タクトタイムを満足していないボトルネック工程で



継続した改善活動によるサイクルタイムの削減

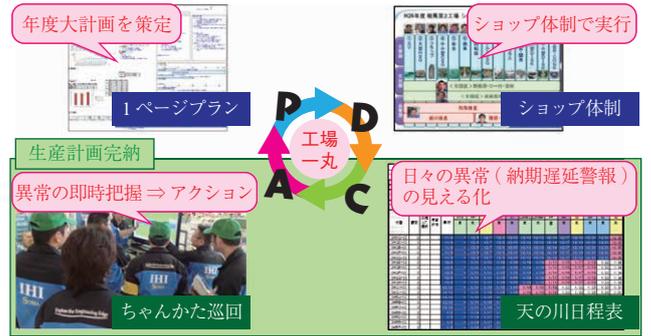


あった研磨工程と蛍光浸透探傷検査工程に対して、継続的な改善活動を行ってリードタイムを半減した事例であり、同活動は空本部各工場で開催されている。

多品種少量生産への対応

相馬第二工場では 3 500 種類以上の部品を取り扱うことが可能で、延べ 10 万工程以上が 400 台を超える機械設備を通過する多品種少量生産が特徴であり、通常の方法では生産管理が困難である。そこで、各部品の生産計画と実行上の差をリアルタイムに把握できる IHI 独自の MES (Manufacturing Execute System) / “ 天の川日程表 ” を工場一丸となって作り上げた。この日程表を基にボトルネック工程に対して、日々の PDCA (Plan-Do-Check-Act) を小さく回し続けることで工程間の部品滞留解消に取り組み、大幅な棚卸し削減を実現した。このシステムは “ 天の川システム ” として工場に定着しており、ICT (情報通信技術) とも結びついてさらなる成果が期待される。

さらに、事業部との連携強化による平準化と総費用削減を狙い、ショップの付加価値と生産性に関する重要管理項目のバランスをとり、真に利益を創出するプロジェクトショップ直結型経営を導入し推進している。

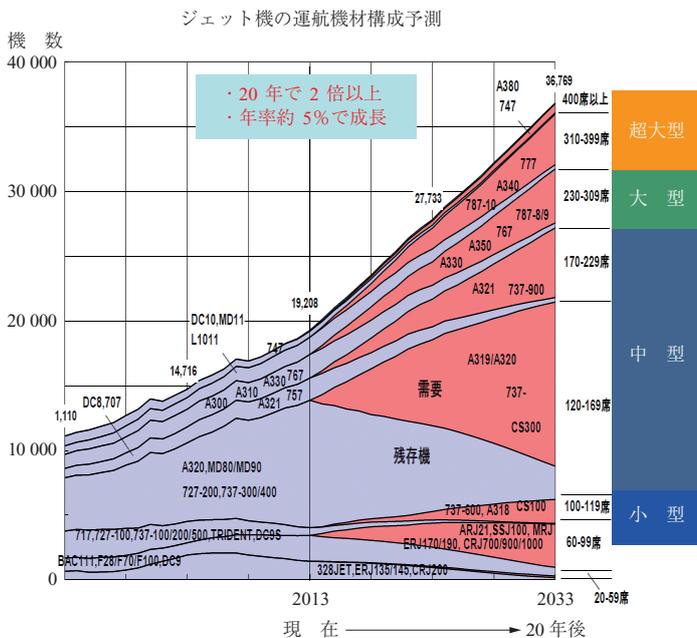


工場一丸となった改善活動

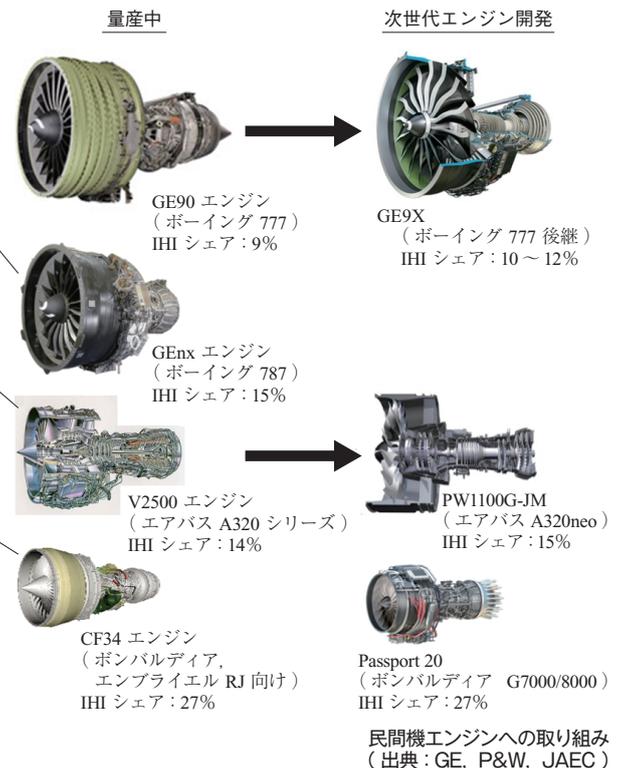
新しいものづくりへの挑戦

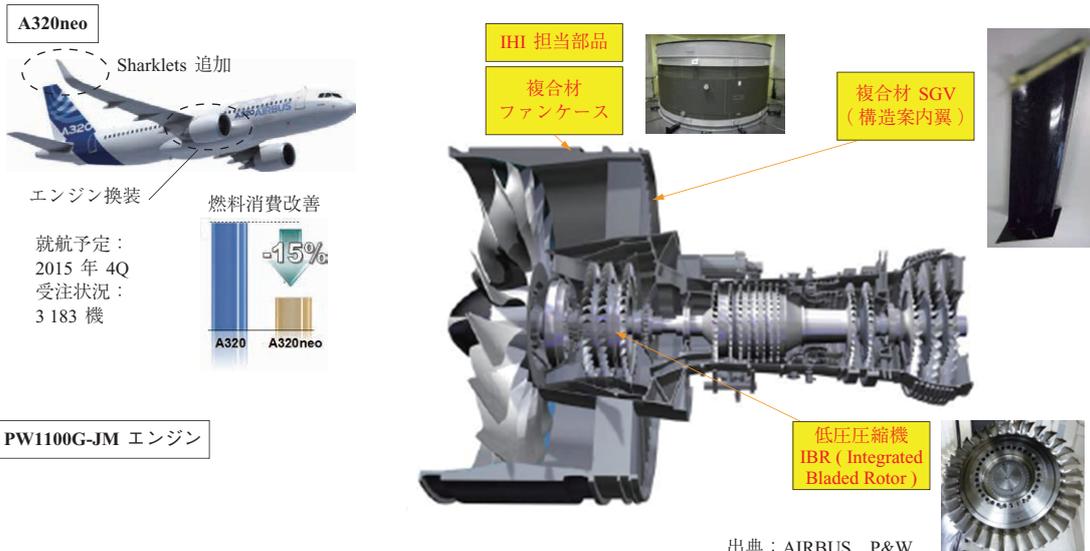
世界の民間航空機需要は今後 20 年間にわたって年率約 5% で確実に伸びると予想されている。IHI は小型～大型・超大型まで全てのクラスのエンジン開発、量産事業に参画しており、2013 年には新たにエアバス A320neo 用 PW1100G-JM エンジンの開発に参画した。

PW1100G-JM エンジンの搭載機である A320neo は従来機に対し 15% の燃料消費改善が要求されており、軽量化や性能向上のため複合材のファンケース、ファン構造案内翼 (SGV: Structural Guide Vane) や、ブ



(出典: (一財) 日本航空機開発協会)

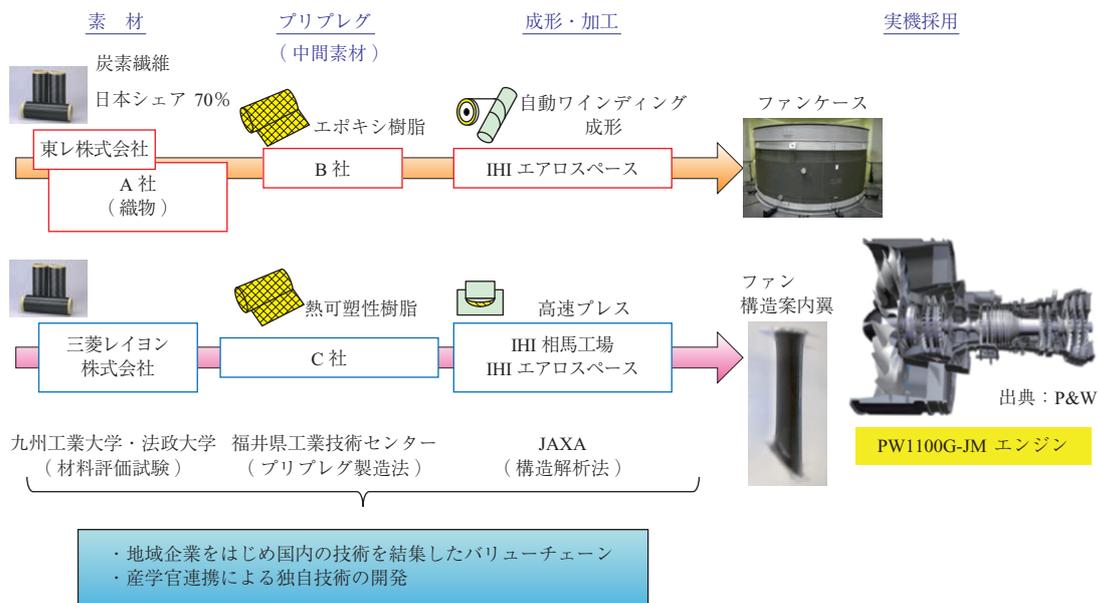




出典：AIRBUS, P&W

- ・2014年12月にFAAよりエンジン型式承認を取得
- ・最大離陸推力：35 000 lbf / ファン直径：2.06 m
- ・燃料消費率：現行 V2500 エンジンに比して16%改善 ⇒ 複合材部品採用によるエンジンの軽量化
- ・平成23年9月に、P&W, MTU, JAECの3社でMOUを締結、日本シェア23%
- ・複合材部品は、IHI独自規準で設計。製造は福井県中小企業などの技術の活用をはじめ、日本の複合材技術を結集

次世代民間機エンジン (PW1100G-JM) の開発



先進複合材 (FRP 材料) での国内連携

レードとディスクが一体で機械加工される IBR (Integrated Bladed Rotor) が採用されている。

IHI では先進複合材 (FRP 材料) の独自技術開発を産学官連携によって進め、複合材に強みをもつ地域企業とともに国内技術の結集を図り、素材から実機までの国内バリューチェーンによる新しいものづくりを展開している。

先進複合材を使用したファンケースならびに SGV

は、ロケット固体燃料ブースターなどで複合材製品の経験が豊富な IA 富岡事業所にて製品開発を行い、量産ラインは、ファンケースは IA 富岡事業所、数量の多い SGV はライン化生産を得意とする相馬第一工場それぞれ構築されている。いずれも一貫製造ライン方式とし、SGV には短時間成形が可能な炭素繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics) を採用してサイクルタイム 10 分での製造を可能とした。

相馬第二工場
IBR 部品の生産ライン（*①）

< 特殊工程を一体化した高生産性の一貫製造ライン >



IBR 部品
(Integrated Bladed Rotor)

IA 富岡事業所
複合材ファンケースの生産ライン（第 3 工場）（*②）

< プリプレグから部品完成まで自動化した一貫製造ライン >



複合材ファンケース部品

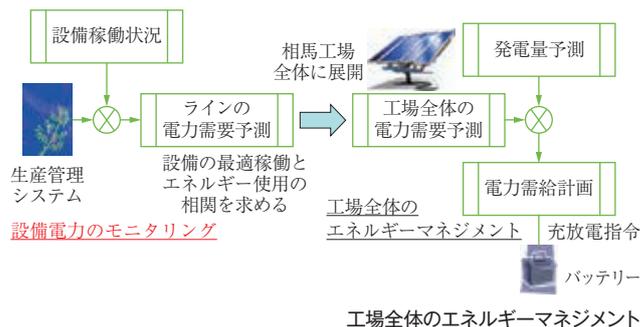
また、IBR については、従来は製造ライン内への取り込みが困難であった蛍光浸透探傷検査やエッチング検査などの特殊工程もインライン化し、リードタイム短縮を狙った一貫製造ラインを構築している。

各ラインは以下のご支援をいただいている。*① がんばろうふくしま産業復興企業立地支援事業、*② 先端技術実証・評価設備整備費等補助金（イノベーション拠点立地支援事業）

これからのものづくり

海外依存度の高い素材について、国内素材産業と連携して IHI 独自規格の高温高強度ディスク材および高強度シャフト材を開発し、国内に新設されている世界最大級 5 万 t 鍛造プレス（日本エアロフォージ株式会社）も活用して鍛造工程開発を行い、スクラップ再生利用まで含めた国内バリューチェーンの強化を図っていく。

また、エンジンのさらなる燃料消費率低減効果が期待されているセラミック基複合材（CMC：Ceramic Matrix Composites）についても日本の知恵を結集して、産官学連携による研究開発を推進している。



Smart Factory への取り組み

設備劣化による故障、加工条件の変化や人的変動からの異常に対して、プロセスモニターを通じて迅速的確に対応可能な Smart Factory の導入を試行していく。日本のものづくりの強みは、生産現場力にあり、現場の気づきを重視した現場のための見える化に重点を置く。各種センサーで計測した数値によるリアルタイム情報に基づき、設計、品質保証、経営層とのフラットなコミュニケーションが可能となる環境を整備する。お客さまとのコミュニケーションはもちろんのこと、自工場内のみならず空本部他工場、関係会社ならびに協力会社との情報共有が可能で、市場変化に柔軟に対応できるよりスピーディーな工場を目指す。

さらに、設備電力モニタリングと生産管理システム情報とを連携させ、相馬事業所に設置済の太陽光発電、リチウムイオン電池により、事業所で使用するエネルギーを最適化するマネジメントシステム構築にも取り組んでいく。

日本のものづくりの強さは現場力にある。各現場から発信される情報が、スピーディーに共有され、今やるべきことが各部門で認識され、行動に移せ、お客さまの要求にどこよりも早く対応できる現場力を活かせる独自の Smart Factory を目指していく。

ミニ解説

リードタイム
製品 1 個を作るのに要する期間。

サイクルタイム
各工程の作業の始めから終わりまでの時間。機械加工○分、検査○分など。

タクトタイム
売れる数に合わせて製品 1 個 1 個が作られていくべき時間間隔。1 か月に 320 台出荷、工場の稼働時間が 8 時間 × 20 日 = 160 時間だとすれば、タクトタイムは 30 分。

世界最古の金属加工技術「 鑄造 」の DNA を世界に引き継ぐ

造船に欠かせない技術として石川島造船所で発達した鑄造技術は、タービン、エンジン、過給機、圧縮機などの根幹を支えている。しかしコストの問題から多くの生産工場が海外へ移転し、日本の重工業の中で自前の鑄造工場をもつ企業はごくわずかとなった。その鑄造について、この道 45 年を極めたベテランが熱く語る。

日本の鑄造技術の元祖として、供給責任を全うする

「鑄物は世界最古の金属加工技術です。金属を溶かして湯（液体状）にし、砂で作った型に流し込んで成型する。鑄物ができたからそれを叩き鍛造して刃物ができた。刃物ができたらそれを使って削ることで機械加工が発展した。つまり、鑄造はすべての始まり。天皇の三種の神器、草薙の劍や八咫鏡も鉄を溶かす鑄物の技術が始まりですし、また古代から仏像も金属製のものは鑄物で作られました」

“鑄物のヤスさん”こと、調達企画本部の安武寛晴がひとたび口を開けば、鑄物に対する熱い思いがほとばしり、とどまることがない。

ペリーの来航、開国以来、近代日本は造船により産

業が隆興した。IHI の前身の石川島平野造船所は、日本で最初の民間造船所として蒸気船「通運丸」（明治 10 年 = 1877 年、34t）を建造、船用エンジンに欠かせない鑄造技術が発達した。そこから発展して現在の車両用過給機などの製造技術も生まれた。

しかしながら、鑄造技術は長いこと岐路に立たされている。国内重工業大手を見渡してみると、企業本体に鑄物の製造工場を残しているのは、IHI を含めてごくわずか。理由は一つ。採算がとれないからだ。それでも、安武は企業には供給責任があると言う。

「鑄物はどこでも（海外でも）同じものが作れると思うでしょうが、そうではない。海外では大量生産品なら作る。でも、少量で技術的に難しいものは引き受けるところがない。でも作る責任はあります」

世界の鑄造技術の発展に貢献

IHI は、早くから鑄物の海外調達に乗り出していた。安武がタイの鑄物工場に技術指導のために派遣されたのは昭和 54 年、入社から 10 年も経たない 29 歳のとき。鑄造には、溶解、熱処理、造型、砂、仕上げなどさまざまな分野があり、職人はそれぞれがスペシャリストとして経験を積むのが常であった。安武は入社以来「砂」一筋。しかし突然、鑄物全般について教える立場になった。現在のように通信環境が整っていない時代、電話で日本に問い合わせようにも、バンコクまで 2 時間掛けて出向き、電話会社のフロントで待ってもつながらないこともしばしば。物資も常に不足していた。型を作るにも砂がなく、人を雇って一度使った砂をふるいに掛けて再利用したり、離型剤



調達企画本部（兼）回転機械セクター（兼）技術開発本部
技師長 安武 寛晴



が不足して、市場であらゆる油を購入し適合するものを探したりもした。そんな試行錯誤のなかで、言葉は通じなくとも現場の作業を自ら熱心に行い、図を描いて伝えるといつのまにか周囲に人垣ができていた。

その後、国内のパートナー企業をはじめ、中国、韓国の工場でも何度となく技術指導を担当した安武には強い信念がある。それは、「IHI の、つまり自分のもっている鑄造技術をすべて伝える」ということだ。特に海外工場に対しては、上部からの理解が得られず、ずいぶんと反抗、反発した。

「よくクビにならなかったと思います。でも、もしも教えなかったらどうなるか。世界中に低品質の鑄物が流通する。その部品を使うお客さまも『鑄物はやっぱりダメだ』と、結局、鑄物そのものが使われなくなるのです。だから、技術指導では出し惜しみは決してしません」

技術向上のセオリーは“つながり”

国内外に鑄物技術を伝える秘訣^{けつ}を、安武は現場、現物、現実の三現主義だと断言する。もちろん製造業にはマニュアルが必須だが、マニュアルだけに頼っては現場で起こっている“真実”を見逃すと言う。

「例えば温度一つとっても、マニュアルに鑄込温度は 1 330℃だと書いてある。でも大抵は計るのは表面の温度だけ。下の方はどうか。また、その工場の温度計の精度はどうか。温度は適正でも、季節による温度や湿度の影響を受けることもある。僕は指導に行くときは、ゴルフのクラブぐらいの長い温度計を持っていきますよ。大抵空港で怪しまれて止められるけどね（笑）」

教えたことで自分が困るようなノウハウは、ノウハウではないというのが安武の持論だ。鑄物の出来は一つ一つ異なり、細かいノウハウは確かにある。しかし安武に言わせれば、技術を向上させる大きなセオリーがある。それは“つなぐこと”。前述の溶解、熱処理、成型、砂など鑄造技術の専門分野をつなぐこと、また、鑄造の材料を供給

する外部業者との横の連携も重要だ。さらには、ものづくりの心、出来上がる製品に対する思いを、後輩へ次の世代へと伝えていくこと。

「この“つながり”がある限り海外には負けたいと思います。中国、韓国では技術は個人のもの。会社に貢献しよう、職場に誠意を尽くそうという考え方はあまり感じません。しかし逆に、自分の技術にしようとするから、日本人の比ではなく貪欲に学びます。その彼らが団結し、職場や会社への貢献を意識して働くようになったら手ごわいと思いますよ」

鑄造の DNA を継承するには

コスト競争を考えればアウトソーシングやむなしの現実^{じじ}は認めざるを得ない。しかし、試作センターのような形で技術を継承し、調達も含めて担当することはできないか。これが安武が思う、IHI の鑄造 DNA を継承するための構想だ。

今、鑄造一筋の会社人生を振り返りこう語る。

「大口の失敗も何度か経験しました。でも、そこから工夫して取り戻しました。新しい材質を開発したり、単価を大幅に下げること成功したりね。工夫して、改善して、よりよいものを作る。この面白さはないね」

そんな安武でも 100% 満足した自信作はないと言う。「満足は、お客さまのもの。品質、形状、価格、いろんな価値観がある」。しかしながら、そこに鑄物の未来があるとも言う。生産技術として、相手の求めるものを作ることができれば、再び鑄造が注目を浴びる日が来ると信じている。

部品の製作精度を上げ、 機械加工を国内に取り戻せ！

厳しいコスト競争のなか、製造業大手では内製部品の比率を下げ、外部調達でコストを下げる流れがますます加速している。しかし、機械加工の現場からたたき上げてきた熱き職人魂の持ち主は「コスト以上に大切なものを失っていないか」と疑問を呈する。「ものづくりの技術と精神を社内で維持・伝承しなければ」と、今も人材育成に全国を飛び回っている。

人に属する技術は失われたら取り戻せない

ものの形を作る機械は、大きく加工機械と工作機械に分けられる。刃物を使わず、圧延、曲げなどで塑性変形させるのが加工機械で、刃物と製品どちらか一方を固定して他方を回転させて刃物で削るのが工作機械だ。代表的な工作機械といえば、旋盤とフライス盤。旋盤は製品が回転して例えば、軸、ねじ、ねじ穴などを作る。フライス盤は、エンドミルと呼ばれる回転工具を用いて平面や溝などの切削加工を担当する。大きささまざまで、多種多様な工作機械があるが、本を正せば基本的にはこの二つの合体か、もしくはその応用である。工作機械は、工具の位置を手作業で調整するものから自動制御する NC (Numerical Control) 機械へ、そして数種類の切削工具を内蔵して種々の加工を 1 台で行える“マシニングセンター”へと進化してきた。

「手動による機械加工はシンプルだからこそ奥が深い。」と言うのは、現在ものづくり推進部で全国の IHI およびグループ会社の工場を回り、現場の技術者育成を手がけている畠山利雄だ。

畠山に言わせれば、「ものづくり」を掲げる IHI でさえも、機械加工技術の人から人への伝承は“風前のともしび”だ。なかでも、回転機械のインペラー（羽根車）製作過程の技術の変遷は、苦い記憶として畠山の脳裏に刻まれている。

インペラーには、翼がふたに覆われた「クローズドインペラー」と、開放型の「オープンインペラー」がある。クローズドの方が複雑な構造で製造が難しく、部品コストは高くなるものの、圧縮や送風の効率が高いという利点がある。IHI では、クローズドイン

ペラーの翼の固定方法として、① かしめ（翼についた爪をつぶして円板に接合）、② ろう付け（溶かした金属（ろう）を接着剤のように使って翼と円板を接合）、③ 溶接（翼と円板双方をアーク放電で溶かして接合）という三つの技術を保有していた。これらの技術は従来マンツーマンで伝承されてきたが、仕事量が減り、日程管理や人員不足などの問題で伝承がきわめて難しい状態となり、技術がなくても機械（マシニングセンターなど）があれば部品が作れる「オープンインペラー」に生産がシフトしていった。

社内に技術を保持して、QCD を手放すな！

このような技術の変遷の記憶は、「もっていた技術を失うということは、他社との差別化が困難になることです。『QCD（品質 Quality, 価格 Cost, 納期 Delivery）』を手放してはいけません！」との警告へと続く。



技術開発本部 ものづくり推進部
(兼) 調達企画本部 グループ調達企画部
主任調査役 畠山 利雄

昭和の時代からコストダウンを求めて、まずは国内の下請け工場へ部品の外注化が始まり、平成に入るころには一気に海外調達が進んだ。一時は人件費の安価な海外では高品質な部品は作れないと国内の技術が見直された時期もあったが、工作機械の高度化やコスト重視の波にはあがえず、平成 20 年代に入るとキーパーツまでもが外注化、海外調達されることが多くなった。畠山がこの流れにあらがおうとしても、人件費の面からも自社工場での内製は無理だという声上がる。が、「コストパフォーマンスを上げる方法があります。」と畠山は持論を展開する。

「まずは、それぞれの部品の製作精度を上げればいいのです。精度の高い部品を作れば、組み合わせるときに、余計な補正作業をしなくて済む。また、不適合もなくなるため、すでに組み上がったものをバラして修正することもなく、結局は労力、コストを削減できる。そのための根本は、基本的な機械加工の技術を大切にすることです。」

社内に生産技術を保持し部品の作り方を把握していれば、厳密なコスト計算ができる。品質の良しあしの判断もできる。そうすれば、たとえ外注したとしても対等以上の立場で取引を進められる。

仕事を自分のものにする

「作り続けることで、機械加工の技術は上がります。止めたらそこまで。今は多くの機械が自動化され、プログラムを入力すれば 1 ミクロンの単位まで正確に削ってくれる。しかし、1 ミクロン違うと何がどう変わるのかを技術者が自らの技術力と感覚で体得していることが大事。それでなければミクロン単位の仕様は設計できません。」

技術力向上のための一つの方策として、畠山は産業技術を競う、「技能オリンピック」や「技能グランプリ」への参加を提案している。自社の技術者を育てるだけでなく、競合他社にどんな技術者がいるのか、またどんな工具をどのように使って効率をアップさせているのかなどを学ぶことができるからだ。

同時に技術者の誇りを育てることに心を砕いている。IHI の工場を回って技術者育成をするとき、畠山が必ず語るのは「勤め人になるな。働き人になれ」ということ。8 時から 5 時まで漫然と言われた“作



1972 年蒸気タービンロータ加工時の畠山

業”をこなすのが「勤め人」であるとすれば、「働き人」とは、自分を高めるために常に工夫を欠かさず、責任をもって“仕事”をする人だという。昨日やっていたことを今日同じようにはやらない。常に改善し、効率、品質、安全、あらゆる面での向上を目指すことが“仕事”なのだ畠山は言う。機械加工は、進歩がなければ負けを意味する厳しい世界だ。だが、努力すれば自身の成長が実感できる分野でもある。

「『会社にやらされるのではない。仕事を自分のものにしろ』と私は常に言っています。」昨日よりも進歩したという喜びを糧に、自ら技術力とコストパフォーマンスを上げる。機械加工で扱うもの、作るものは千差万別だが、このことは、昔も今も共通する機械加工の“勘所”であり技術向上の“真理”だと畠山は熱く語った。

職場改善で工期を短縮し、 大型受注を目指せ！

～ 現場が変わればここまでできる. IHI 瑞穂の挑戦 トータル TAT 改革 ～

とどまるところを知らないグローバル化、LCC の台頭などを背景に航空運輸需要は、今後 20 年以上右肩上がりが見込まれている。このため、航空機製造はもちろん、航空機の整備事業も世界的に需要が高まっている花形産業だ。現在、V2500 エンジンのオーバーホールを行う工場は、世界で 6 社のみ。そのなかの 1 社、IHI 瑞穂工場は、TAT (Turn Around Time : お客さまからエンジンを受け取って整備し返却するまでの時間) において整備業界のなかで長年苦しんでいたが、3 年間の改善活動を経て、2014 年上半期、世界一に躍り出た。その取り組みを紹介する。

エンジンオーバーホールの工期 (TAT) を短縮せよ！

IHI 瑞穂工場では、防衛省関係のエンジンおよび民間航空機エンジンのオーバーホールを請け負っている。自衛隊機はモジュールという部分的なオーバーホールも含めると年間数百台のオーバーホールを請け負っており、常に優先して対応している。

民間機は主にエアバス A-320 シリーズに搭載される V2500 エンジンを年間 100 台余り手掛けている。航空会社側の希望する TAT は 2 か月未満。お客さまのなかには東南アジアの LCC (Low Cost Carrier) もあり、より短い納期を望むのは当然だ。しかし、瑞穂工場では以前は 70 ～ 75 日間掛かっていた。

しかも、数年前まで世界のオーバーホール会社は 7 社あり、TAT を競っていたが最下位だった会社がオーバーホール事業から撤退したため、IHI は苦しい立場になってしまった。オーバーホールの需要は十分にある。しかし、TAT が短縮できなければビジネスチャンスを逸することになり、これは避けがたい状況だった。

3 年ほど前、「TAT を短縮せよ！」との至上命令を受けたのが伊豫部 亨 (瑞穂工場改善推進グループ部長 : 取材時) だ。民間エンジンのオーバーホールでは、工程ではあちこちでボトルネックが起り、部品修理は海外に出さなければならぬ制約があり、なか

なかそろわず組み立てがスタートできない。またお客さまも海外なので関係部署も多く連絡や上下のコミュニケーションにも苦労していた。

毎年行われている職場アンケートを分析すると、瑞穂工場では「やりがい」や「達成感」を高めるのが大変で、上長や他部門との意思疎通やつながりをもっともっと高めないと、協力関係を強化するうえで不安があることが分かった。見方を変えれば、現場の問題意識はかなり高かったということになる。



瑞穂工場 改善推進グループ
部長 (= 取材時)
伊豫部 亨

瑞穂工場 製造グループ
相澤 千恵

これらを改善すれば、納期短縮にもつなげることができる。改善グループと職長・班長を中心とした現場とで意見がまとまり、早速3か年の職場改善計画が立てられた。1年目の2012年度は一人ひとりが「仕事をやり切った」という達成感を得られる意識改革、2年目の2013年度は風土改革で、横のつながりと職場の一体感を醸成し、そして3年目の2014年度は仕事の枠組みや協力関係を変える構造改革を行うというものだ。

オーバーホール作業はオーケストラ 合言葉は「部品結集率の向上」

オーバーホールの現場では、お客さまから届いたエンジンを、投入（現場に運び込む）→分解→洗浄→検査→修理→編成（部品をそろえる）→組み立て・試運転という順番で作業を行う。例えば、投入が相次ぐと、いきなり最初の分解部門で作業が滞る。また、検査や修理工程では、海外の修理メーカーに依頼せねばならず、その納品待ちになることが多い。そうすると、編成、組み立て作業をしたくても部品がそろわないという事態が生じるのだ。しかしながら、前工程が滞ることで後工程が困るのは数か月先である。全体が見えないため責任を感じ難いことも問題だった。そのため、部品が集まると組み立て部門は連日深夜までの作業、休日出勤を繰り返すというのが年中行事ようになっていた。これでは、作業の精度も上がらなければ、従業員の健康にも問題が出かねない。

改善グループの方針は、オーバーホールの作業現場を「オーケストラ」に例える。分解、洗浄などの各部門が楽器だとすると、それぞれがきちんと指揮者のもとに責任を果たして、タイミング良く仕事をするのが大切だ。部門ごとに勝手な音を出して、全体の流れやハーモニーを聞いていない状態ではだめなのだ。

特に、ネックとなっていたのが、修理が必要な部品の集結率の低さだった。例えば来月には10台のエンジンを組むという予定でも、その段階で部品が2割ほどしか集まっていないというのが通常の状態だった。

これを動かす原動力は、先の職場アンケート結果に隠されていた。実は瑞穂工場が全社でいちばん高スコアだったのは、お客さまのために作業をするという「客先意識」だ。

夕方 4 時からボード前で侃々諤々^{かんかんがくがく}

「お客さまのために何ができるか？」そう問いかけたとき、職長・班長を中心とした現場が動き出した。どのエンジンの号機が今どの段階にあるのかはデータ化されていたが、それをボードに張り出して、毎日午後4時から、部門ごとに職長が集まり、確認して情報交換することになったのだ。投入から組み立てまで、各工程を今週の予定と今日の視点で進捗を確認し、遅延をフォローし合う通称「拡大予定通会」だ。始まった当初は、「今日組み立てるはずなのに部品がない」というものが何十部品もあった。「これはどうなっている」「明日までにはもってこい」「無理だ」「いつならできるんだ」という侃々諤々で1時間の予定が1時間半になることも多かった。しかししばらく続けると横のつながりができ、他部門の進捗を意識するようになったせいか、ボトルネックが徐々に解消し始めた。

現在も「拡大予定通会」は継続している。今は、特例を除いて、部品がそろわないということはほとんどない。部品集結率は大幅にアップし、毎日集まっては2週間先の予定を確認し合う、余裕と笑顔のある会になっている。しかしながら、ボトルネックが解消され作業の不均衡がなくなったため、現場の達成感は増し、負担感はほとんどない。

お客さまとの密な連絡で受注量を平準化

もう一つの工夫が、お客さまとの連携だ。オーバーホールラインに投入されるエンジンの数には増減があ



拡大予定通会場

見えない資産

る。例えば年度初めの4月にはさほど数が多くないが、7月8月に急に増えるということがある。特にある時期に集中すると、10人の職場に20人分の仕事が増えてもこなせず、作業が滞る可能性が高い。理想は、できるだけ平均的に作業ラインに投入することだ。

ここで事業部と生産管理部が活躍した。お客さまのもとに足しげく通い意思疎通を図り、例えば「6月にエンジンが10台オーバーホールに入る予定ですが、そのうち一部でも前倒しできませんか？」などと具体的にお願いした。オーバーホールに早めに回せるエンジンはないかどうか確認していただいた。その場では、投入数が調整できればそれだけスムーズにお返しできる可能性が高まることをお伝えし、できる範囲でのお願いを重ねたことで、少しずつ受注頻度が平準化してきた。こうした動きが奏功し、昨年度は納期どおり収めることができ、お客さまから感謝の言葉をいただくこともできた。

一人ひとりの技能を上げよう！

これは班長を主体とした現場での工夫の話である。横のつながりができ、上下の関係が改善されると、モチベーションも上がり、いつ仕事が増えてもできるように自分たちの技術、能力を上げようという機運が高まった。例えば、検査部門にはたくさんの作業者がい

るが、エンジンの種類ごとに担当が分かれていた。それを、誰もがどのエンジンでも検査できるように学びあった。修理部門では、どの部品の修理にどの程度時間が掛かっているのかを調べたところ、ほとんどの部品が納期どおりに納入されており、納期から大幅に遅れていた修理品はほんの一部であることが分かった。その部品はあらかじめ修理の準備をしておくことができるようになった。内製品では、修理に使う工作機械が古くて使いにくかったり、治具がなくて正確な作業をするのに時間が掛かっていたりしているのが見えてきた。そこで機械を新しく購入してもらったり、治具や段取りを改善したりすることで効率のアップに成功した。このほかにも、機械のレイアウト変更や、重たいものを支える治具を作って女性でも作業できるようにしたり、片手でできるようにしたりと、ありとあらゆる工夫をした。

これらを積み重ねることで、民間機はTATを15日短縮し60日となり、納期どおりに納品を成し遂げたのだ。

同時に人材育成と5Sも実施

これらを達成した背景には、人材育成と全工場を挙げて実施している5S活動（整理、整頓、清掃、清潔、しつけ）も大きく関わっている。人材育成では、



オーバーホール作業

2012年度の意識改革の段階では、職長・班長を10人ぐらいずつ相馬工場に派遣し、「やりきり」を宣言してどのように動いて達成感を得ているかを見学させた。また、5Sを徹底することで工場閉鎖の危機からよみがえったことで有名な工具会社S社も見学した。さらに、職長は2人組で世界中の40か所ぐらいにある競合他社を訪問し、「自分たちに足りないものは何か?」というベンチマークの確認をした。さらには、トヨタ自動車株式会社のTPS推進室の方とつながりそのご厚意で研修を受け、さらにそれを工場内で広めることも行っている。海外の企業との交流は続いていて、今度は逆に、向こうから、瑞穂工場の職長会・班長会の情報交換などを見学に来るようになった。

また、金曜日午後1時から2時は全職場で5S活動の時間と決めて、徹底した整理整頓が行われている。工場では壁際にあった収納棚などはすべて片付けて、壁や通路を明るい色で塗り直した。部品や工具を置く台やワゴンも、現場で工夫して使いやすいものを自作。とある女性は、家庭でも実施している「見せる収納」で工具を使いやすく収納した。作業場がどんどん明るく清潔で働きやすくなり意欲も上がり、最近新しい機械作業を覚えたと言った。

事務所の5Sを率いるのは、瑞穂工場製造グループの相澤千恵。

「最初は5S活動といっても、何をしたらよいか分かりませんでした。取りあえず汚いところをきれいにすることを地道に行っていたら、徐々に仲間が増えてきました。ものが片付くと気持ちがいいですね。」と笑う。

同じスペースに10人のメンバーが増えるということが分かったときは、皆を説得して全員の袖机をなくしてスペースを確保。たまっていた書類を整理し、本当に必要なものだけを残して、共通の書類ロッカーに収納した。そのロッカーも中身が見えるように扉を切りぬいてアクリル板を貼るという徹底ぶりだ。

5Sの成果について、相澤はこうも言う。「職場が片付くと、人の雰囲気も変わりました。皆さん背筋が伸びたというかモチベーションが上がり、これが瑞穂工場の風土になってきていると思います。」

「オーバーホールは、かなり“人間技”が必要な作業です。ですからこの工場では人間の力が落ちるとパフォーマンスが落ちる。3年間掛けてそうならない仕



瑞穂工場内

組みができました。」と現場改善をカタチにしてきた職長・班長達は語る。

実は、大手航空会社が久しぶりに工場を見学に訪れ、この改善・改革によるTAT世界一を評価して下さった。そして、2015年度には改善活動がこのエアラインとの関係を取り戻すきっかけとなり今後の受注にも大きく影響しそうである。ものづくり現場の改善は、やはり成果に直結する。この成功はほかのどんな職場にも応用できると、瑞穂工場は自信を深めている。

大型セグメントの計測も 一人で楽々！

大口徑トンネル用セグメントの計測も、 一人で短時間で行える三次元寸法計測システム

これまで、コンクリートセグメントの寸法計測は手作業が主体であった。株式会社 IHI 建材工業は、計測作業の作業者負担の大幅な軽減と、コストダウンを目的に、多関節アームを活用した三次元寸法計測システムを世界で初めて開発した。



三次元寸法計測システム（左下：全景，右上：計測状況）

トンネルの内壁セグメント

トンネルを掘る方法の一つとして、トンネルの直径と同じ円筒の先端に取り付けた回転する刃で土や岩を削りながら進むシールド工法が挙げられる。この方法でトンネルを掘り進めた後から、セグメントと呼ぶ円弧状のブロックをトンネルの内径に沿ってリング状に組み立ててトンネルの壁を作っていく。

セグメントには、コンクリート製、鋼製、それらを合わせた合成系などがある。トンネルの本体構造物であると同時に施工時のシールドマシンを支持する役割も担っており、品質や工程を確保するため、あらかじめ工場で製造するプレキャスト製品を用いることが一般的である。

計測技術の現状

しかしながら、プレキャスト製品の品質検査の一つである寸法計測は、いまだに手作業で行っているのが実態である。幅・厚さなどの直線形状部はスチールテープやノギスなどの直尺を用い、弧長やリング間のボルトピッチ部分の円弧形状部は、ゲージ板を用いてゲージ形状との誤差を計測している。

当初は下水道や共同溝などで用いられる中小口径（外径 6 m 程度まで）のトンネル用のセグメントが主体であり、1 ピースの大きさは、長さ 2～3 m×幅 1～1.2 m 程度と小さく、計測員 1, 2 名で計測器・ゲージ板の取り回しが行えた。ところが近年、地下鉄



ゲージ板着脱状況

や道路用など 12 m を超える大口径トンネルへの適用とともにセグメントの 1 ピースの大きさは長さ 4 ~ 5 m × 幅 2 m と大型化した。これに伴いノギス、ゲージ板のサイズ・質量もアップした結果、従来の寸法検査法ではゲージ板の取り回しのためだけに人員が 3 名も必要になった。

コストダウンのためには計測人員を減らす必要があり、そのため初めに考えたのが人に代わって門型治具で検査ゲージ板を支持させるというものであった。実際に使用してみると、ピース間での門型治具の移動に時間が掛かり、人員削減にはなるが計測時間増となりコストダウンにならないという結果であった。また、ゲージ板の材質や形状を変えることによる軽量化も検討していたが、強度も弱くなり、少ない人員で大きな治具を扱うと回りにいるほかの作業員との接触事故の原因になることも懸念された。このため、従来の計測方法の延長線上ではない、新たな計測手法を考えることが必要になった。

新たな計測手法の導入と効果

そこで導入を検討したのが三次元計測器を用いた計測システムであり、以下に計測器の選定から導入までの流れを紹介する。

(1) 三次元計測器の選定とシステム構成

各種の三次元計測手法に対して計測精度・時間、開発期間・設備投資額などを総合的に評価し、多関節アーム型計測器を 3 台用いた計測システムを採用することにした。この計測器では、計測員が保持したアーム先端の探触子を計測点に接触させることで三次元座標値を取得でき、操作が非常に簡便である。さらに、非接触光学式に比べて、外乱光や振動

の影響を受けにくい計測安定性にも優れている。

(2) 複数台の計測器を用いたデータ処理

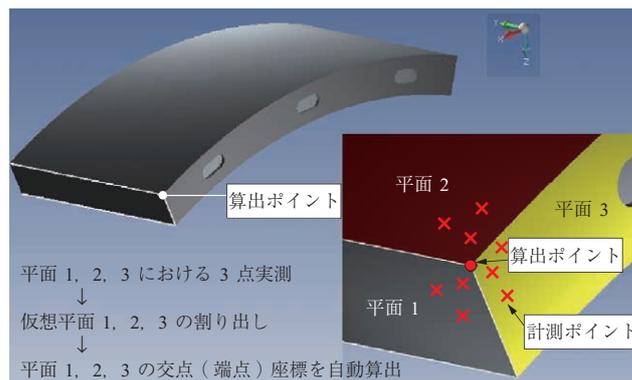
計測器 1 台の動作範囲の制約上、3 台設置する方式を採用した。そのため、各計測器による計測結果を合成しないと必要な寸法が算出されない。そこで、各計測器の相対位置関係を校正するための簡便で要求精度を満足する手法を検討し、計測器共通の校正基準点を設置する方法を採用した。

(3) 計測アルゴリズムの構築

指定した順序で計測を行うことで、採取された座標値から必要な寸法を自動算出するアルゴリズムを構築した。例えば、幅や長さの計測に必要な端点の座標値は、交差する 3 平面の各面上の任意 3 点の計測を実施することで、システム上で仮想平面が作成され、その交点として算出される。

(4) 効果

従来の計測方法の場合 3 名必要な計測が、計測員 1 名で要求精度を満たす寸法計測を目標時間内で実現できた。また、計測データの活用においても、データベース化や検査記録作成などが容易となった。さらに、これまで困難だった端面の平坦度やセグメントのねじれを簡単に評価することが可能となり、コンクリートセグメントの型枠形状の最適化につなげることで、一層の品質向上が期待できる。



端点算出

問い合わせ先

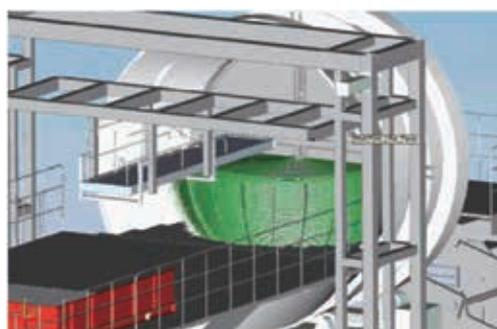
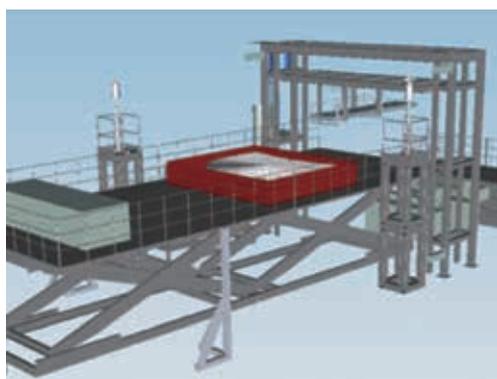
株式会社 IHI 建材工業
技術部
電話 (03) 6271 - 7237
URL : www.ikk.co.jp/

電力エネルギーの基盤を担う 至高の熱交換器

徹底した自動化により蒸気発生器の 高品質・短納期を実現

原子炉圧力容器の製造で世界トップクラスの納入実績を誇る IHI が、新たに加圧水型原子力発電所の主要機器「蒸気発生器 (SG : Steam Generator)」の製造にチャレンジしている。最高の信頼性が求められる SG への取り組みについて紹介する。

株式会社 IHI 原子力セクター



蒸気発生器 管束組立



蒸気発生器

拡大する世界のエネルギー需要

世界のエネルギー需要は増加を続け、エネルギー源は多様化してきている。例えば、シェールガスやシェールオイルなどの非在来型化石燃料の実用化、再生可能エネルギーの利用促進など、我々の生活のなか

でエネルギーの話題には事欠かない。一方、東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故以降、世界各国で原子力エネルギーの活用に関してさまざまな議論がされてきているが、エネルギー安全保障の観点から、原子力発電は安定したエネルギー供給のために依然として重要な選択肢である。また、地球温暖化対策

である低炭素社会の実現への施策としても、原子力発電は重要な選択肢である。今後、再生可能エネルギーと原子力の双方が持続可能な社会を実現するために重要なエネルギー供給源となるであろう。

世界の原子力発電所の主要炉型は沸騰水型軽水炉（BWR：Boiling Water Reactor）と加圧水型軽水炉（PWR：Pressurized Water Reactor）である。これまで IHI は主に国内向け BWR の原子炉圧力容器を 40 年以上にわたって製造してきた実績がある。一方で世界に目を向けると、今後新規に建設が計画されている原子力発電所の多くは PWR であり、IHI の事業領域を世界市場へ拡大することを念頭に、原子力セクターでは、PWR の主要機器である SG の製造技術開発を進めてきた。

過酷な条件で働く巨大で精緻な装置

PWR・BWR どちらも原子力エネルギーで発生した熱を利用して得られた水蒸気によってタービンを回して発電する。PWR の場合は一次冷却水をいったん 300℃ 以上の高温・高圧水として炉心から取り出し、SG で二次冷却水に熱を伝えて蒸気を作る。BWR の場合は炉心で直接蒸気を発生してタービンに導く。つまり SG が PWR を特徴づけるキーハードであり、製造には高度な生産技術を要する。

通常、1 プラントに対して 2～4 基の SG が設置さ

れる。SG は直径約 5 m、高さ約 20 m という巨大な熱交換器と言える。SG 内には原子炉で加熱された一次冷却水が中を流れる伝熱管と呼ばれる直径 10 数 mm の細管が多数配置され、大型の SG では 1 万本以上設置されるものもある。この構造の精緻さは 100 分の 1 ほどに縮小して想像すると理解しやすいかもしれない。SG 全体の形は 500 ml のペットボトルを立てた形に似ている。この中に髪の毛ほどの太さの細管を U 字形に曲げたものを 1 万本以上設置する。つまり円筒断面内には 2 万本以上の管が精確な間隔でぎっしり詰められた形となる。各管の設置位置は、熱交換効率に影響を及ぼすだけでなく、流体の流れによる振動を防止する目的から、三次元的に緻密な精度を要求される。このため、その組み立てにおいては、厳格な精度管理が要求される。まさに完成した構造物が芸術品と呼ばれるゆえんである。

細管の肉厚は薄いほうが熱抵抗が小さく伝熱上有利であるが、伝熱管は一次系と二次系を隔離する障壁（バウンダリー）としての役割ももっているため、プラントの運転などを考慮して注意深く設計を行い、必要な肉厚が決められている。また、伝熱管に万一破損などが生じると、一次系で生じる放射性物質が二次系を汚染するなどの重大事故につながる恐れがあるため、伝熱管の設計に注意を払うとともに、SG の製造途中では伝熱管を非常にデリケートに取り扱う。



管板 BTA (Boring and Trepanning Association) 深孔加工機

量産レベルの高品質・低コストを実現

一般的に原子力発電所はサイトごとに詳細仕様が異なるのが実情であるので、使用される主要機器の基本設計は存在するものの、実際にはインデント製品の性格をもつ。そのため、高い安全性と信頼性を実現するために、各製造工程でさまざまな検査が行われるが、時としてそれがほかの量産機器に比べて長い製造期間が必要となる宿命があった。そこで、SG 製造に取り組むに当たり三つのコンセプトを掲げた。

- (1) 人為的ミスを極力排除（自動化の推進）
- (2) 迅速な検査・計測と製造プロセスのリアルタイム把握およびデータの活用（トレーサビリティの確保）

(3) 工程の標準化の徹底

(1) は加工や溶接などの作業の自動化によりヒューマンエラーを極限まで低減する。均一な品質を確保するためにも自動化は有効な手段である。(2) は作業と計測のタイムラグを削減し、リアルタイムで計測結果を把握して製造プロセスにフィードバックする。(3) はインデント製品であっても共通する作業を標準化し、作業者が担当する業務範囲を狭める工程設計や生産方式を採用することによって、技術の熟練と確実な工程管理を実現する。

これに加えて製造上の大きな課題が四つあった。① 管板孔あけ（深孔加工）、② 支持板孔あけ（ブローチ加工）、③ 伝熱管溶接、④ 伝熱管組立、であり、どれも難関であった。これらを解決するために新たな製造設備や作業手順を開発する必要があった。こういった製造技術の基礎には BWR 型原子炉圧力容

器の製造技術とともに多管式熱交換器やリアクター（反応器）の製造技術、ジェットエンジン製造における加工技術、さらには検査・計測・溶接などの基盤技術があったことを忘れてはならない。

自動化によりヒューマンエラーを排除

大型の PWR 用 SG の管板には 1 万本以上の伝熱管を貫通させ、端部を溶接する。伝熱管をサポートする管支持板にあける孔は特殊な形状に加工する必要がある。

一次系と二次系のもう一つのバウンダリーとなる管板の厚さは約 800 mm、これに 1 万本以上の伝熱管が通る貫通孔をまるで蜂の巣のようにあける必要がある。伝熱管は SG の中で U 字に曲がり、二次冷却水に熱を伝えて冷やした一次冷却水は再び炉心に戻る。このため、実際には管板に合計 2 万個以上の貫通孔が必要になる。寸法はもちろん、位置や角度についても一つ残らず設計精度内に収めることができなければ伝熱管を取り付けることはできない。

また、管支持板には三つ葉型や四つ葉型の孔をあける必要がある。二次冷却水や気泡は三つ葉型や四つ葉型の孔と伝熱管との間にできる葉の部分の間隙を通過して SG 内を通過する。これらの加工を精度良く行うために今回、加工機メーカーや工具メーカーと協力して、深孔加工やブローチ加工の専用加工機、工具を開発した。

さらに、管支持板の孔が滑らかでないと、伝熱管を挿入する際に伝熱管を傷つけてしまい、破損の原因になる。そのため、管支持板は加工後に表面を滑らかに



自動化技術

研磨される。いわゆる「バリ取り」である。バリ取りを手で行う場合には、押付圧力が一定ではなかったり、研磨時間にばらつきが出たりする可能性がある。そのため、この工程でも自動化が行われた。そのほか、管板と伝熱管の2万か所以上の溶接やヘリウム漏えい試験にも自動化装置が開発され、安定した品質のものづくりが実現した。

最新の計測技術と作業の標準化

すべての伝熱管は複数枚の管支持板を貫通して保持されている。挿入時に伝熱管を傷つけて稼働中のトラブルの原因とならないように、2万を超えるすべての管貫通孔を高い精度で一直線に並べる必要がある。そのため、管支持板をSG本体に取り付ける際には、3Dレーザー計測による取り付け位置の確認と、新たに開発した専用の取り付け装置を使用することによって、要求精度での取り付け作業を実現している。これらは、高精度の計測技術とリアルタイムの制御技術の統合によって可能になった。

また、インデント製品の特徴として製造工程の標準化が難しい点が挙げられるが、この点の解決にも積極的に取り組んだ。例えば、伝熱管を挿入する作業では、作業者の作業姿勢や作業内容を分析し、作業者と製品にやさしい標準作業プロセスを構築した。組立過程の妥当性を最終確認する段階では、工場作業の経験がない一般の人に実際に挿入作業を経験してもらい、問題なく挿入できることを確認した。現在はそこで得られた情報を基に作業の自動化を進めさらに安定した挿入作業を実現している。これによって、品質を保ちながら製造期間の短縮化を実現できた。

SGの製造に当たっては、標準化や自動化だけではなく、IHIならではの熟練した職人の技も不可欠であった。その好例が、伝熱管の振れ止め金具(AVB: Anti-Vibration Bar)の溶接である。AVBは伝熱管のU字管部分をすり抜けて上昇する二次冷却水が、細管を揺らして発生する伝熱管の振動を抑えるための部材であり、長時間の振動に起因する伝熱管の疲労・摩耗を防いで、原子力発電所の安定した運転を維持するための極めて重要な役割を担っている。微妙な感覚と長年の経験が要求される難しい溶接は、熟練した作業者にしかできなかった。



3Dレーザー計測

おわりに

ここで紹介したさまざまな取り組みの成果は、フルスケールモックアップ(実物大の試作品)の製造によって実証されている。SGの信頼性向上は、原子力発電所の安全性向上を実現するだけでなく、安定したベースロード電源として電力会社や電力ユーザーの期待にも応えていくものである。

IHIのSGはPWRプラントの供給メーカーであるウエスチングハウス社(アメリカ)にも認められ、また、SG製造専用の新工場も完成し、新たなSG製造者としての第一歩を踏み出す準備が整った。我々は原子力エネルギーによって「世界を豊かに」、「人々を幸せに」をモットーに、より安全で、より安心していただける「ものづくり」を今後も進めていく所存である。

問い合わせ先

株式会社 IHI

原子力セクター

電話(045)759-2503

URL: www.ihico.jp/

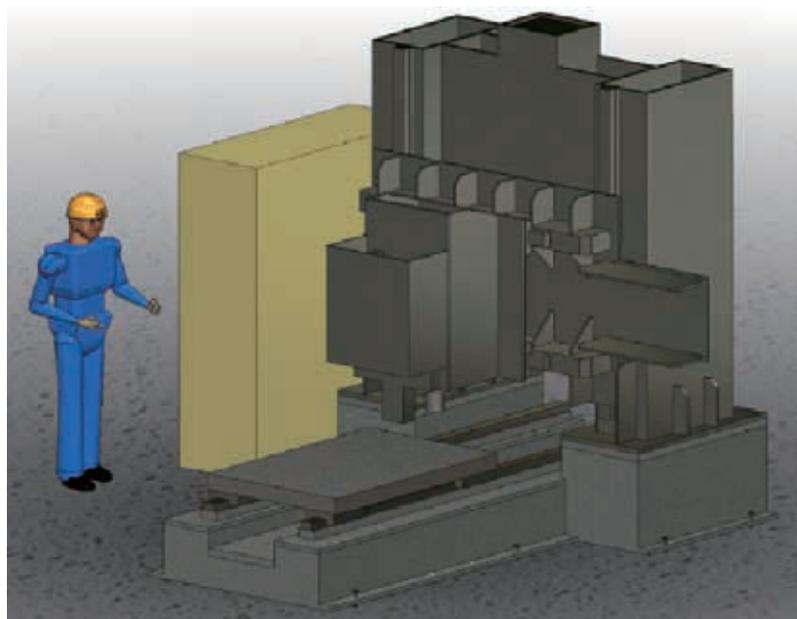
未来型の溶接は金属を溶かさず 火花も飛ばしません

摩擦攪拌接合が LNG アルミタンク製造に もたらしたイノベーション

LNG アルミニウム製タンクの新しい製造法として摩擦攪拌接合（FSW）が注目されている。摩擦熱によって部材を軟化させて接合するので、従来のアーク溶接と異なり溶接材料やシールドガスが不要で溶接ひずみが非常に小さい。これは従来の溶接の概念を覆す接合技術である。

株式会社 IHI
技術開発本部 生産技術センター
溶接技術部

真崎 邦崇

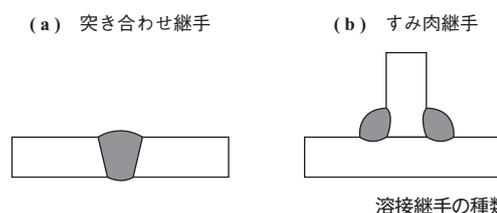


開発中の FSW 装置

ものづくりに不可欠な接合技術

接合技術はものづくりの基盤となる技術の一つである。材料（金属）の接合方法は機械的接合、材質的接合、化学的接合の3種類に大別できる。機械的接合とはボルトやリベットなどを利用する方法であり、化学的接合は接着剤などによる接合方法である。これに対して材質的接合方法は、母材同士を熔融させて接合する溶接や、母材を熔融させずに接合する拡散接合

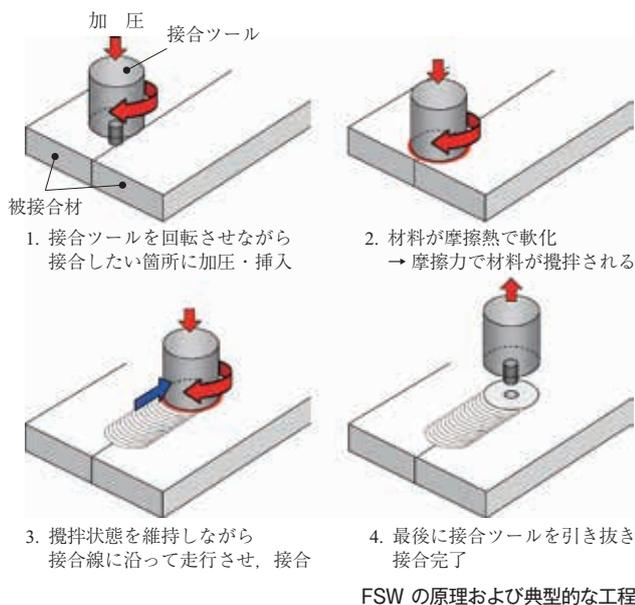
など、いわゆる「溶接・接合」技術がこれにあたる。溶接・接合では突き合わせやすみ肉などさまざまな継手形状があり、それぞれに合った技術が必要である。



革新的な接合技術「FSW」

母材を溶融させずに強固な接合を実現するのが、現在実用化に取り組んでいる摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) である。FSW は 1991 年に TWI (英国溶接研究所) が発明した接合技術である。まず被接合材の端面を密着させ、先端に突起 (プローブ) のある接合ツールを回転させながら、被接合材間の境界面に押し付ける。ツール先端に接した被接合材料は摩擦熱により軟化し、ツール先端は被接合材料境界に潜り込み、周囲の材料を溶融させることなく攪拌していく。攪拌を促進するためにプローブにはねじを切るなどの加工が施されている。そして、回転させたままツールを境界面に沿って移動させて接合部分を広げていく。

FSW は固相での塑性流動を用いて接合を行うので



溶接のような凝固収縮がない。また低入熱のために熱収縮も少ないため、接合による変形が非常に少ないという特長がある。また、アルミニウム合金やマグネシウム合金のように溶融溶接が難しい材料でも高品質の接合が可能である。

施工面では完全自動施工による省力化が可能であり、アーク溶接のような熟練した技術者を必要とせず、高い品質が安定して得られる。また消費電力が小さく、アーク溶接のような有害光線やヒューム (金属蒸気) が発生しないため、作業環境を良好に保つことができ作業への負担も少ない。FSW は施工の高品質化や脱技能化、省エネルギーの面からも鉄道車両や自動車を中心として近年適用が進められている。現在 IHI ではさまざまな特長をもつ FSW を洋上液化天然ガス (LNG) タンクのアルミニウム厚板への適用を進めている。

需要の高まる IHI-SPB LNG タンク

世界的なエネルギー需要の高まりから、シェールガスなどの「非在来型」と呼ばれるエネルギーの開発が進められている。また、従来は採掘が困難であった深海底での大深度油田・ガス田の開発が行われている。特に天然ガスはクリーンなエネルギーとして大きな需要の伸びが予想され、大深度ガス田の開発が進められている。沿岸近くの海底ガス田と異なり、大深度ガス田では洋上で天然ガスを精製・貯蔵・出荷するための設備が必要になる。この浮体式天然ガス生産貯蔵積出設備、通称 FLNG (Floating LNG) においては -162°C の LNG を貯蔵するタンクが主要設備である。

陸上タンクと異なり、FLNG に用いられるタンクには、海洋上で使用するためにさまざまな条件をクリアする必要がある。中でも重要なものがスロッシング対策である。スロッシングとはタンク内の LNG (液体) の運動と、船体の運動が同期して LNG がタンク構造に大きな衝撃を加える現象で、タンク破損の原因にもなる。FLNG のタンクに蓄積される LNG の量は生産・出荷により常に変動しているため、満載か空のいずれかの状態しかない LNG タンカーのタンクよりも高い耐スロッシング性能が必要になる。



IHI-SPB LNG タンク

IHI が開発した IHI-SPB (Self-supporting Prismatic shape IMO type B) LNG タンクでは、タンク内に隔壁を設けることによって、タンク内 LNG の運動の周期を短くして、構造物の固有振動との共振すなわちスロッシングの発生を防止している。

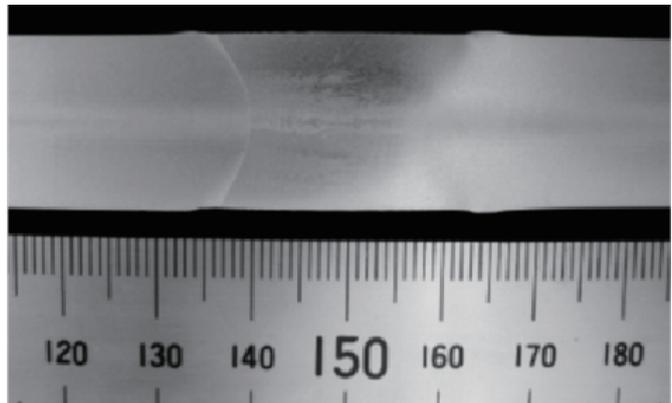
FSW を IHI-SPB LNG タンクに適用する

極低温の LNG タンクにはアルミニウム合金の厚肉材が使用されている。その溶接にはアーク溶接が採用されてきたが、溶接欠陥のないアーク溶接を行うには熟練した技術が必要である。また、アーク溶接では溶接部に材料の溶融・凝固や熱膨張・熱収縮が発生し、溶接された部材のひずみの原因になる。発生したひずみを残したままで組み立てることはできないため、溶接完了後にひずみの矯正工程が必要である。

ところが FSW の場合は溶融・凝固が生じず入熱量

も少ない。このため接合工程でのひずみはほとんど発生せず、矯正工程が不要になりコストダウンに結びつく。これが IHI-SPB LNG タンクへの FSW 採用を目指した理由の一つである。また FSW 採用のもう一つの理由は、作業者の技能に依存しない完全自動施工であり、安定して高い継手品質が得られることである。さらに FSW では接合部の金属組織が微細化するため、優れた機械的特性を得ることができる。

このように FSW はさまざまな問題を一気に解決できると期待されており、IHI ではまず突き合わせ継手に対して開発を進めてきた。その一方で、IHI-SPB LNG タンクには突き合わせ溶接だけでなく、内部構造や内部の補強構造部材などにすみ肉溶接が多用されている。しかしすみ肉溶接への FSW の適用はこれまでにほとんど例がなく、新たな技術開発が必要であった。



突き合わせ FSW 継手の外観と断面組織

すみ肉 FSW の実用化に向けて

IHI では、2010 年から開始された TWI 主催のすみ肉 FSW に関する共同プロジェクトに参画し、さらに独自のノウハウを加えることにより、すみ肉 FSW の実用化に向けた取り組みを行っている。

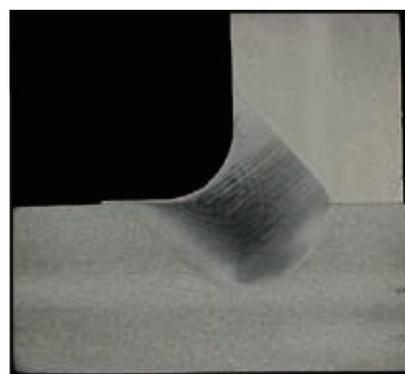
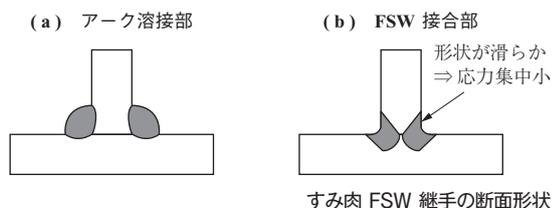
すみ肉 FSW の実用化には幾つかの課題があるが、その一つは溶接材の供給である。この点については共同研究プロジェクトでの研究の結果、ツールの形状を工夫することによって、溶接材を供給しながらツールを移動させることが可能になった。

また、通常の突き合わせ接合部での FSW と異なり、すみ肉 FSW では回転するツールを接合境界に斜めに安定して接触させる必要がある。押し付け力は数 kN から、ときは数 10 kN に及ぶ場合がある。固定ショルダと呼ばれる回転しない支持部材でプローブを支えることにより、斜めに押し付ける場合でも、プローブを安定して支持することが可能になった。大きな負荷を掛けながら精密にツールを操作するには自社の開発技術が大いに活かされた。

これらの技術開発によって溶接ひずみが小さく矯正工程が不要なすみ肉 FSW を実現することができた。さらに、接合部は固定ショルダによって成形されるた

め、接合部の形状が滑らかで応力集中が小さい理想的な形状になっている。これにより継手の長寿命化や信頼性向上が同時に実現できた。

ツールや装置の改善によるさらなるコストダウンや品質の向上・長距離施工の安定化、応用性の向上などが今後の課題である。また FSW はアルミニウムのほかにも、チタンやニッケル合金など溶融溶接が難しい材料に対しても有効な接合方法として期待されており、すみ肉 FSW の実用化に加えてさまざまな材料や部位への FSW 適用範囲拡大にも注力していく。



10 mm

すみ肉 FSW 継手の外観と断面組織

問い合わせ先

株式会社 IHI

技術開発本部 生産技術センター

溶接技術部

電話 (045) 759-2812

URL : www.ihico.jp/

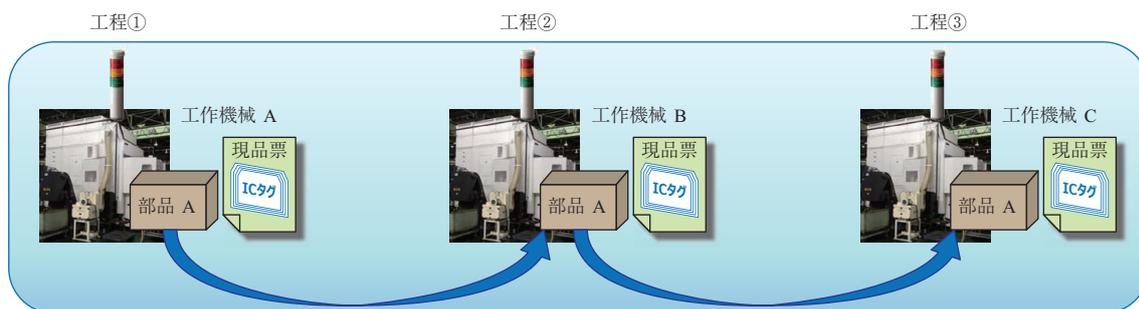
ICT で現場の実績を簡単記録 「ものづくり力」を強くする！

工作機械の稼働実績を自動記録 現場改善の PDCA をスピードアップ

IoT や M2M など、新しい ICT (Information and Communication Technology) をものづくりの現場に適用する動きが広がっている。IHI グループでも ICT を活用して、工作機械の稼働実績や加工対象の把握を行い、現場改善のスピードアップを実現している。

株式会社 IHI
情報システム部

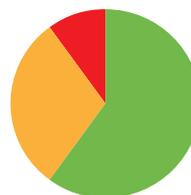
金子 淳



現場の実績把握

工作機械	項目	8時	9時	10時	11時	12時
A	部品	部品 A	[Bar]			
		部品 B				[Bar]
	稼働	[Bar]				[Bar]
状態	待機			[Bar]	[Bar]	
	異常				[Bar]	

稼働状態ガントチャート



稼働率グラフ

工作機械稼働実績の見える化

生産現場における ICT 活用

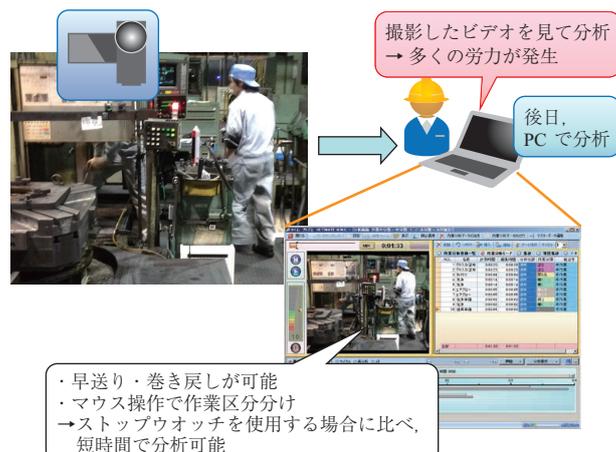
近年、無線通信の普及や制御機器・センサ類の小型化・低価格化が急速に進んでいる。その結果、従来のパソコンやサーバー、プリンターなどに限らず、さまざまな機械が容易かつ安価にネットワークへ接続でき

るようになり (Internet of Things : IoT) , また、接続された機械同士で付加価値を生み出すための通信 (Machine to Machine : M2M) が行われるようになってきた。ものづくりの現場も例外ではなく、これらの技術を活用したさまざまな取り組みが行われてきている。

観察者が作業者や工作機械の横に立って計測
→ 拘束時間が長く、多くの労力が必要



ストップウォッチを用いた作業分析



ビデオを用いた作業分析

従来の現場改善

IHI グループでは、「ものづくり力」の強化に向けて、生産現場のボトルネックとなっている工程を突き止め、作業の無駄を見つけ出し、改善を加え、工場に流れを作り出す現場改善を行ってきた。

現場における改善には、作業や機械稼働の実績時間を計測／記録することが必要である。従来は、組立作業者や工作機械の横に人が立ち、ストップウォッチで作業の実績時間を計測し、手書きで記録していくことが一般的だった。この方法は、IHI グループの多くの製品のように工期が長く、多くの工程を要する場合や多品種少量生産のために計測対象製品が多い場合には、多くの労力が必要であり、作業実績の記録の効率化が大きな課題であった。

近年はビデオ撮影による現場作業の分析も行われるようになってきているが、撮影したビデオを人が見てデータ化する必要があるため、従来に比べれば作業効率は上がるものの、依然として観察者に多くの労力が必要となることに変わりはなく、作業者自身による簡単な作業の記録が望まれていた。

ICT による現場の実績把握

そこで、機械加工の現場を対象として、現状把握 → 無駄の発見と改善案の検討・実施 → 改善効果の確認を行っていくために、ワーク（加工対象）の識別と工作機械の稼働実績の把握を行う仕組みを開発することとした。

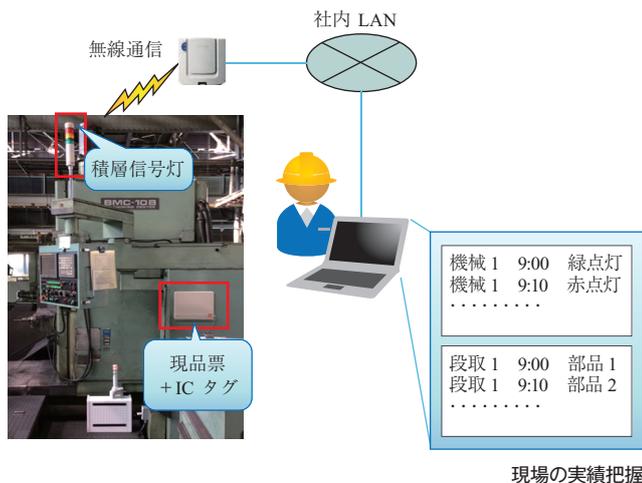
(1) 機械稼働実績の取得

現場における工作機械の稼働実績を自動的かつリアルタイムに把握するために、工作機械の種類に応じて、2種類の方法を使い分けることとした。

- ① CNC（Computerized Numerical Control：コンピュータ数値制御）機械からの直接情報取得：最近のコンピュータ制御の工作機械は、ネットワークに直接接続することができ、外部から工作機械の状態を取得することができる。機械の稼働／停止状態を取得できるだけでなく、プログラムの実行時間や工具の座標値なども取得することができる。しかしながら細かな情報取得ができる反面、CNC メーカーごとに取得方法や取得できる情報が異なり、個別の対応が必要となる。
- ② 積層信号灯（株式会社パトライト製品）からの情報取得：古い工作機械の場合、ネットワーク接続ができないため、積層信号灯の点灯状態を自動取得する機械を導入することで、機械の稼働／停止状態を記録する。この方法は、積層信号灯さえ取り付けられれば機械の種類によらないため汎用性が高く、古い機械でも対応できる。

(2) 人／ワークの状態把握

人の作業記録やワークの所在を把握するために IC タグを活用し、人の作業内容／開始／終了時間や加工中のワークを把握する仕組みを開発した。作業者がもつ「名札」、ワークを示す「現品票（荷札）」、人の作業内容を示す「作業札」に IC タグを組み込み、作業場所や工作機械ごとに設置された読取装置に札を置くだけで、「だれが」「どのワー



クに対して」「何をしたか」を作業員自身が記録できる。これらのデータ収集には従来は作業員とは別に観察者が必要だったが、この仕組みを活用することで、作業員自身により必要な情報を手間なく記録することができるようになった。

得られたデータを活用した現場改善

このような仕組みを活用することで、現場の実績を簡単にかつリアルタイムに「見える化」することが可能となった。得られたデータを分析し、改善へと結びつけることができる。

(1) ボトルネックとなる工程・作業の特定

工程ごとの機械稼働時間とそのワークを記録していくことで、どの工程・作業に最も時間が掛かっている（ボトルネック）のかを定量的に把握することが可能となる。これにより、優先的に改善すべき工程が明確になる。

(2) 工程内で発生している無駄の特定

機械が一時停止して人（オペレータ）の作業を待っている時間や異常停止している時間などを定量的に把握し、機械の稼働率（実際に機械が加工している時間）を明らかにすることで、各工程における無駄時間や改善余地が把握できる。

(3) 作業原単位の精度向上

工程ごとの詳細な時間を把握できるようになることで、現時点での原単位の実力値を精度良く把握することができる。これにより、必要な生産量に対して、改善目標を定量的に設定することが可能とな

る。

(4) 無駄のない最適な投入、作業順序の実現

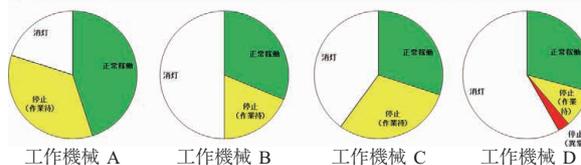
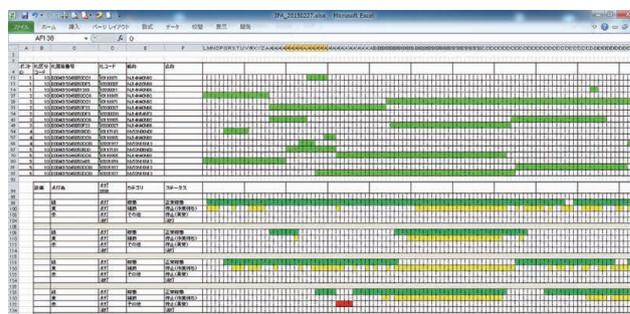
IHI グループの工場は、同一ラインに複数の異なる製品・機種を流すことが多く、製品・機種に応じて工程ごとの時間バランスが変化する。(1)～(3)で得られた情報を活用することで、個別工程の無駄削減のみならず、ライン全体としての無駄を最小にするような投入、作業順序を検討し、ルール化していくことが可能となる。

適用事例

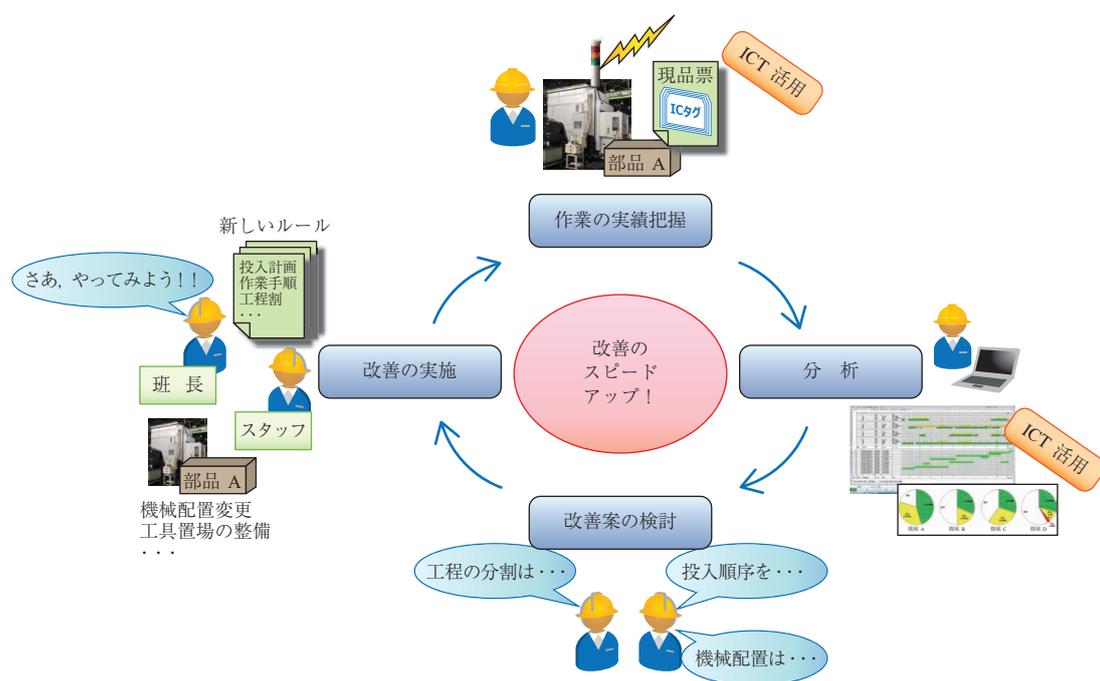
船用過給機のケーシング加工ラインに本システムを適用した事例を紹介する。このラインでは、多くの種類のケーシングが流れ、日々の生産量は計画していたが、各機種に対して着手から完了までどれくらいの時間が掛かっているのか正確に把握できておらず、細かな生産計画は立てていなかった。そのため、生産計画の精度を上げることができなかったことに加え、現場改善を進めるに当たり、どの工程をターゲットとして取り組めばよいのか、改善のためにどのような方法が効果的かがはっきりしていなかった。

今回、実績把握の仕組みを導入し、各工作機械の稼働実績や人の段取作業実績を収集することで、以下の点が明らかとなった。

- 特定の工作機械が、そのほかの機械に比べて1日当たり2倍の稼働時間となっており、ボトルネック機械が定量的に把握できた。



収集したデータの可視化と分析



現場改善の PDCA サイクル

●加えて、機械が人の作業（部品の脱着や計測作業）を待っている時間が、稼働時間とほぼ同じだけある。これは、ボトルネックとなっている工作機械は「人の作業」を待っている時間が最も長いことを意味する。

これらのことから、以下の取り組みが生産性向上に対して効果的であることが予想される。

●作業の優先順位として、ボトルネックとなる工作機械の稼働を最優先とするよう、作業への指示を徹底する。

●ボトルネックとなる工作機械が停止していることをいち早く作業者に知らせるため、従来の積層信号灯だけでなく、ブザー音などを出すようにする。

こうした取り組みを実施することで、ラインとしての無駄の削減、生産性の向上が期待できる。従来であれば、改善の効果を確認するためには、再び観察者が入り、作業の計測を行うことが必要であった。今回のように ICT を活用し、機械稼働実績を自動的かつリアルタイムに取得できるようにしたことで、直ちに効果を計測することができるようになり、改善の PDCA (Plan-Do-Check-Act) サイクルを迅速に回すことができる。

今後の取り組みと課題

今後、得られたデータをさらに活用し、製品・機種別の投入順序や工程の分割の見直しを行い、必要に応じて機械配置の見直し検討を進め、より生産性の高いラインの実現を目指して改善 PDCA サイクルをスピードアップしていく。また、今回開発した仕組みは、ほかの機械製品・鉄鋼構造物の生産工程についても適用を進めている。より一層の横展開・効果創出を目指し、IHI グループ内で共通に使えるようプラットフォーム化を進めた。

このプラットフォーム上では、今回紹介した仕組みだけでなく、現場帳票の電子化や作業手順書表示など、製品、工場によらず共通的に使用できる機能とサービスを提供している。今後は、建設現場での適用も視野に入れ、新たに提供する機能を増やしていくとともに、適用生産拠点を増やし、より一層のものづくり力向上を目指していく。

問い合わせ先

株式会社 IHI

情報システム部 ものづくり ICT グループ

電話 (03) 6204 - 7070

URL : www.ihico.jp/

最新技術と匠の技を融合する

3D プリンター砂型造形によるものづくりの技術革新

「3D プリンター革命」と呼ばれるほど、ものづくりを変える技術として 3D プリンターが注目を集めている。しかし、データをプリンターに送るだけでは、「ものづくり」は完成しない。設計や製造のさまざまなノウハウと融合することによって、はじめて新しいものづくりのツールとして活用することが可能になる。これまでに蓄積した鑄造技術を最新の 3D プリンター砂型造形に活かす、IHI の取り組みを紹介する。

古くて新しい技術「鑄造」

「鑄造」は人類が最も早く手に入れたものづくりの技術といわれている。そして現代においても、鑄造技術はものづくりで重要な役割を担っている。

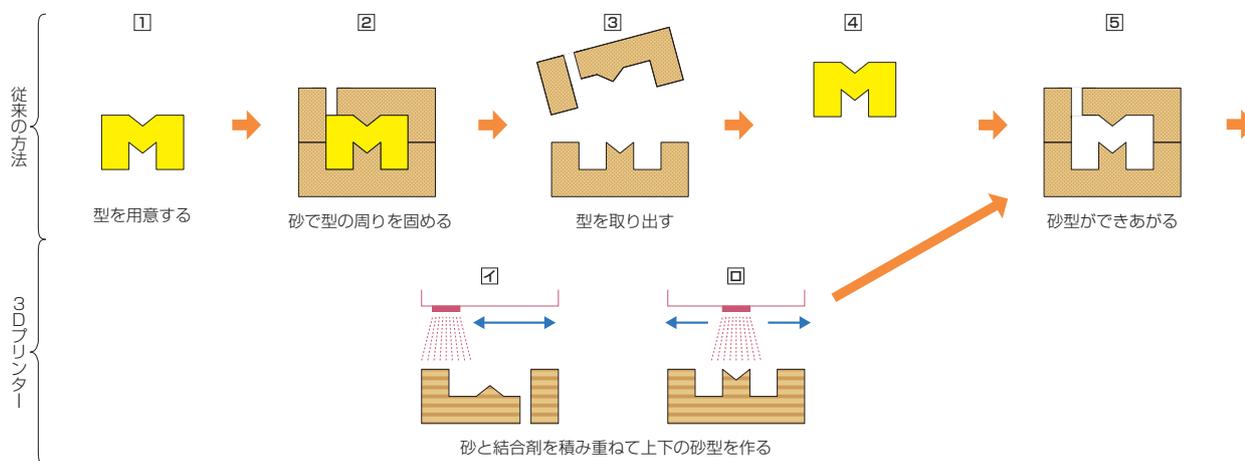
鑄造とは、砂型などに溶融した金属を流し込み、凝固させることで、望みの形状を作り出す技術である。

一般的に鑄造によるものづくりでは、まず目的の形状の金型（または木型）が作られる。この工程は、金型の設計や加工で長い期間と大きなコストが掛かる。これに結合剤（バインダー）を加えた鑄砂を押し付け、成形することで砂型（鑄型）を作る。また、中空構造の場合は内部の空間を形成する「中子（なかご）」と呼ばれる鑄型も用いる。

組み合わせられた鑄型には、「湯（ゆ）」と呼ばれる

溶融した金属を流し込むための「湯口（ゆぐち）」、鑄型内で湯が流れる「湯道（ゆみち）」などが設けられている。金属は凝固する際に収縮するため、湯の量が十分でない場合には製品に「巣（す）」と呼ばれる空洞が発生するなどの鑄造欠陥が生じてしまう。十分な湯を供給するためには、湯口のほかに多めの湯をためておく「押湯（おしゆ）」という部分が適宜設けられる。さらに、バインダーが熱分解して発生するガスを鑄型内から排出するための「ガス抜き穴」が必要になる場合もある。

意外に思われるかもしれないが、通常、製品の設計者は鑄造方法や金型、鑄型については指示しない。鑄造欠陥の発生を抑え、作業効率のよい金型を設計・製作するには生産現場での熟練した技術が必要であり、それは現在でも変わっていない。



「試作」を変える 3D プリンター

ものづくりにおいて、狙った品質の製品を低コストで作るためには、まず十分な「試作」が欠かせない。鋳造で作られる製品は鋳造で試作する必要がある。したがって多数の鋳造試作品を手間暇掛けずに作ることが求められる。現在 3D プリンターが特に注目されている理由の一つが、まさに試作工程の低コスト化・短納期化である。

IHI では、金型を作ることなく、3D プリンターで直接、砂型（鋳型）を作る技術の実用化に向けて取り組みを行っている。3D プリンターにはさまざまな種類があるが、砂型造形には結合剤噴射型と呼ばれるタイプを用いる。市販の安価なものでは樹脂の粒などを噴射して積層していくが、鋳造用 3D プリンターでは、敷き詰めた鋳砂の上にバインダーを噴射して固めていくことで、砂型を形成する。

3D プリンターによる砂型造形では、金型を作る必要がないため、鋳造品の試作が格段に容易になる。また、多数の試作により量産前の検証を十分に行えるようになるので、製品の信頼性向上も実現できる。しかし、これだけでは、中国をはじめとした安価ですぐにキャッチアップしてくる新興国との厳しい競争を勝ち抜くことはできない。そこで重要になるのが、これまでに培ってきた IHI の鋳造技術なのである。

積層砂型では、これまでにない技術的な課題が明らかになっている。その一つが「ガス抜き」である。積層砂型では砂型の強度を確保するために従来の砂型よりも多量のバインダーが使用され、これがガス発生

の原因になる。鋳造欠陥の発生を抑えるためにガス抜き穴を的確に配置するためには、蓄積された「匠の技」が必要になる。

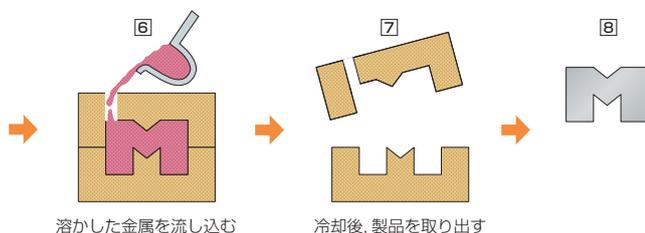
そのほかにも、鋳砂の粒径が小さいために「焼き付き」が起りやすいといった課題もあり、これまでに培ってきた IHI の鋳造技術がこれらの課題解決に活かされている。

日本のものづくりを変える

現在、IHI は国のプロジェクト「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム」に参画している。これは 2015 年から 5 年間の計画で、次世代型産業用 3D プリンター技術を開発するもので、IHI はユーザーの立場から積層砂型の実用化に取り組んでいる。

すでに海外メーカーの積層砂型造形装置を導入している国内鋳物メーカーも存在するが、海外製品は高価なうえ、消耗品である鋳砂も専用のものを使う必要があるなどの制約が多く、国際競争力を低下させる一因になっている。欧米と比較して日本の 3D プリンター分野は立ち遅れているとの指摘もあり、このプロジェクトが日本の 3D プリンター分野を大きく進展させる契機になると期待されている。IHI は、試作された積層砂型を使用して実際に鋳造を行い、鋳造品の問題点を発見し、その解決策を提案することで、このプロジェクトに貢献している。さらに、プロジェクト終了後は積層砂型を活用したものづくりで先駆的な役割を担うことも期待されている。

IHI は、最新の技術と培ってきた匠の技を融合させることで、これからも日本のものづくりに貢献していく。



砂型鋳造工程

問い合わせ先

株式会社 IHI

材料研究部

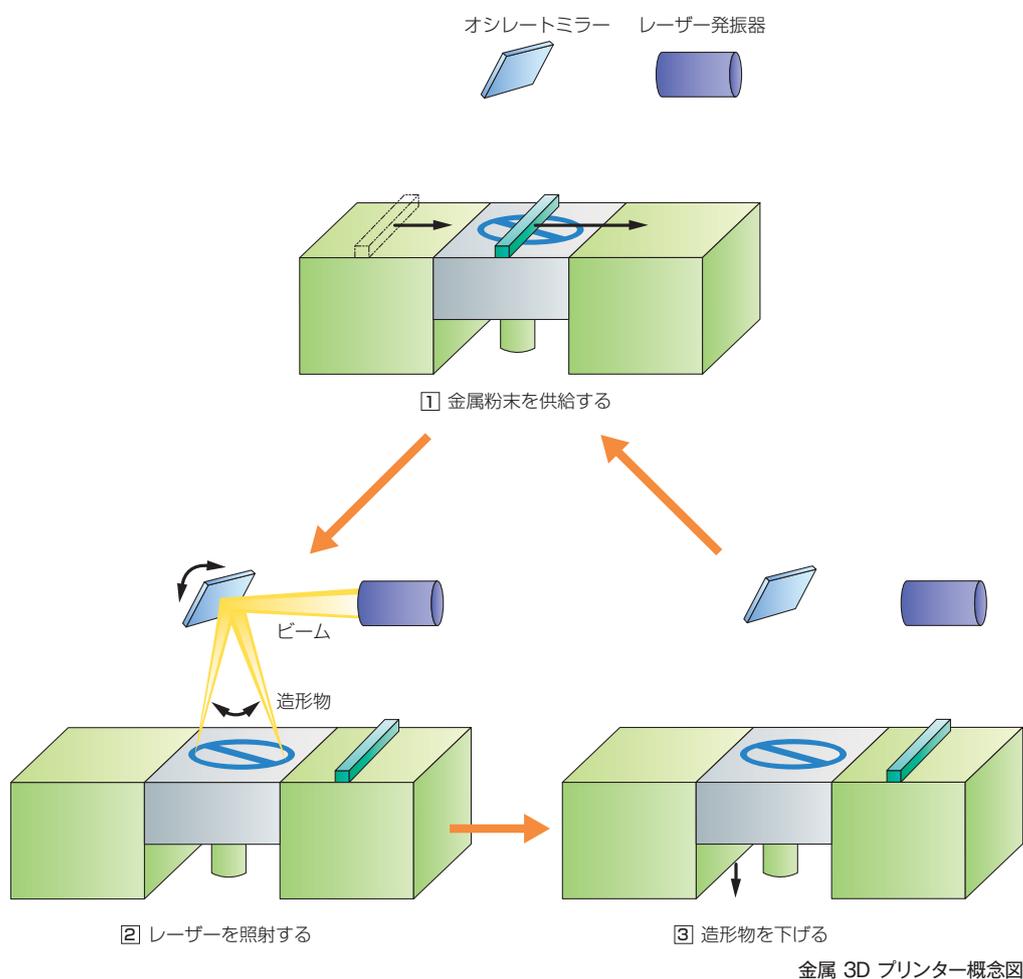
電話（045）759 - 2806

URL：www.ihico.jp/

金属 3D プリンターによる ものづくりの技術革新

金属 3D プリンターの夢と現実, そしてものづくりへの期待

エンドユース向けにも使用され始めた金属 3D プリンター。
その期待と課題は何か。
10 年後にもものづくりはどのように変わるだろうか。



金属 3D プリンターとは

物体の三次元 (3D) のモデルデータがあればそれを
実体として出力できる「3D プリンター」がブームと
なっている。樹脂のプリンターでは、使える材料の種

類が増え、強度・精度も向上してきたこと、一般消費
者でも手が届く 10 万円程度のプリンターが市販され
てきたことなどから、裾野が一気に広がった。

一方で、金属の 3D プリンターも造形品質が向上
し、強度も鋳物と同等レベルのものが得られるように

なるとともに、スピードの向上、コストの低下により、エンドユース・実部品の生産にも期待が高まっている。技術用語としても、かつては試作向けということから Rapid Prototyping（迅速試作）とも言われていたが、現在は Additive Manufacturing（付加製造）という生産を見据えた呼び方に変化してきている。

Wohlers Report 2014 によれば、製品・サービスを含めた 3D プリント産業全体としての市場成長は、2013 年に前年比 34.9% 増（約 31 億米ドル＝約 3 600 億円）であったのに対し、金属 3D プリンターは販売台数 75.8% 増（348 台）と大きく拡大してきている。

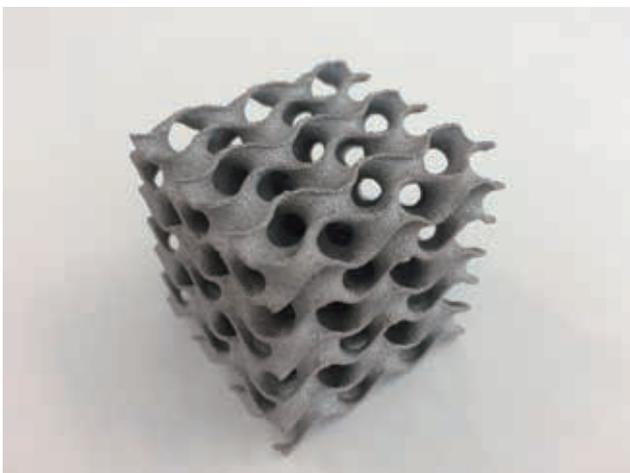
医療におけるカスタムメイドや、航空宇宙産業などの高付加価値品での金属 3D プリンターの活用が活発化してきている。

期待されるメリットと現在の課題

このように開発、生産、設計のものづくりにおいて金属 3D プリンターに対する期待は高い。だがここで夢と現実について一度整理しておきたい。

(1) 期待されている主なメリット

- ① 3D モデルデータから 1 プロセスで造形可能であり、部品入手に必要な時間が画期的に短縮できる。これにより開発・試作のスピードアップを図ることが可能となる。
- ② 金属粉末以外の素材が不要であり、加工や治工具、そして組み立てなども不要となる。小ロット・カスタムメイド生産を拡大できるとともに、サプライチェーンも短くなる方向に変化する。



ラティス（網状）

- ③ これまで加工上の制約などで実現できなかった複雑形状や軽量化、特異な強度を発現するなどの優れた機能部品の造形ができる。これにより設計自由度が拡大される。

(2) 現状での課題

- ① 一度に造形できるサイズには限界がある。市販装置では現時点で 500 mm 角程度が最大である。
- ② 寸法精度は公称 0.1 mm 程度とされているが、現実には熱収縮をいかに抑えるか造形物ごとの検討が必要である。
- ③ 表面粗さは Ra （算術平均粗さ）で公称数 μm レベルとされているが、形状や部位によって異なり、すべてで同じような表面が必ずしも得られない。
- ④ 造形速度はまだ遅く（ $100 \text{ cm}^3/\text{h}$ 以下）、装置価格も高い（1 億円レベル）ことから、コストメリットが出せるだけの価値ある部品がまだ少ない。
- ⑤ 造形物の配置やサポートの付け方など、ある程度自動で処理できるようになってはきたが、まだ人手やノウハウによるところもあり、造形前準備にも時間と手間が掛かる。
- ⑥ 上記メリットの③「特異な強度を発現する」の裏返しとなるが、材料データが未整備であり、製品に適用するに当たっては材料規格を適用できない場合もある。

金属 3D プリンターが変える 10 年後のものづくり

では、前述の課題の多くが解決されたとして、10 年後のものづくりはどう変わっていだろうか。筆者の理解するところと世の中で言われていることを合わせ、幾つか例を挙げて予想したい。

(1) コンカレントエンジニアリングの拡大

これまで CAE（Computer Aided Engineering）などシミュレーションがけん引してきたが、3D プリンターにより実体として造形物が手に入るようになり、開発や設計と生産現場、時として営業の間が真の意味でつながるようになる。現場の生産技術や準備工作での検討が大きく変革するであろう。

(2) 部品・製品の高機能化、差別化

- ① 単体特性の向上
トポロジー（開口の有無を含めた形態）の最

適化, ラティス(網状)構造の採用などにより部品軽量化開発はすでに進行中であるが, それに加え特殊な性質, 例えば異方性を活かした形状設計により, 部品単体の性能が向上する。

② インテグレート部品

三次元の流路を組み込むことができることから, 金型の性能が向上する事例が各所で取り上げられているが, 複雑な流路を利用したコンパクトなプロセスデバイスやセンサーが埋め込まれた部品などが開発されていくであろう。

③ 複雑部品, 組立レス, 設計自由度

3D プリンターで作られた燃焼器ノズルを General Electric 社(アメリカ)がジェットエンジンに搭載する予定であることはよく知られている。これまで数十点の部品を組み立てなければならなかったような複雑な構造を数点の部品で成立させることができるようになり, コストダウンにつながるとともに, 性能向上も期待できる。

④ 大型部品

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics : 炭素繊維強化プラスチック) の 3D プリンターで自動車のボディを造形するとか, 家そのものを造形するなどの新しい試みが始まっている。金属 3D プリンターでも技術革新により大型化が進めば, アイデアはさらに広がるであろう。

(3) 生産現場

3D プリンターの出現により最も大きな変革を受けるのは実は生産現場ではないかと筆者は予想して



複雑部品

いる。消費者ニーズの多様性によりマスマプロダクションからマス・カスタマイゼーションに変わっていくであろうという流れのなかで, ドイツの Industrie 4.0 や IoT (Internet of Things) での議論において, 3D プリンターの存在は大きなものになると映っている。

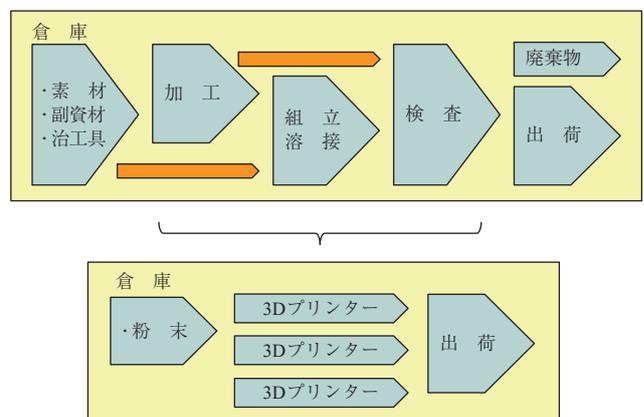
① マイクロファクトリー, 地産地消, 多様性

3D プリンターの大きな特長として, 粉末以外の材料は不要, その他の加工装置や治工具なども不要であることから, 非常に短い生産ライン, マイクロファクトリーと称される小規模生産設備が可能となる。

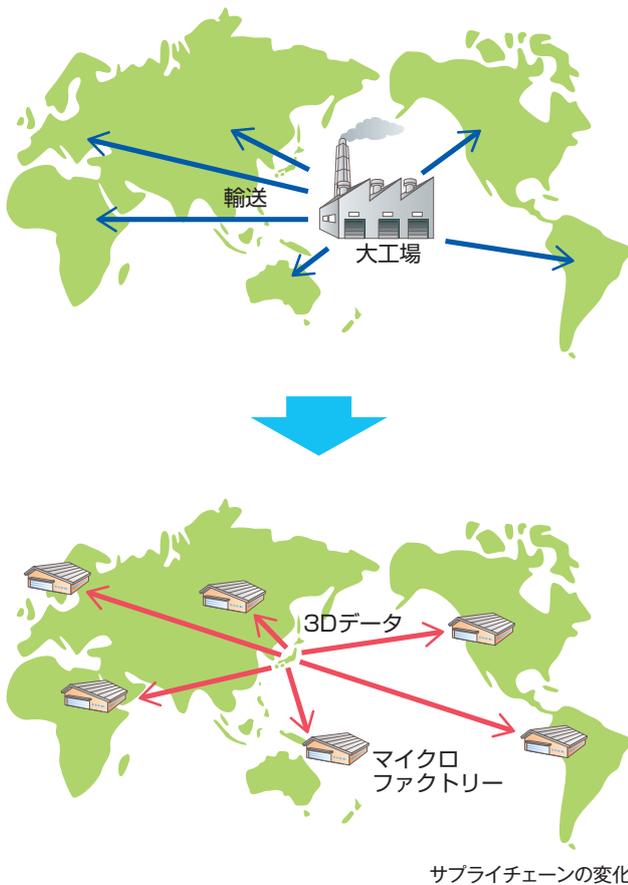
これに加え, 生産数量とコストの関係において, 一つ作るのも 1000 個作るのも 1 個当たりのコストは同じであることから, IoT に代表される情報技術の発展とともに, 受注から生産までのさまざまな情報と生産設備との連携が便利になれば, 輸送コスト削減, 短い製作期間, 倉庫費や在庫の観点から, 地産地消の小さな生産拠点が増えていくであろう。さらには消費者ニーズの多様性をより満足するサービスも可能となっているであろう。

② インプロセス品質保証, すり合わせレス

3D プリンター装置各社の動向をみると, 造形中のモニタリングに開発を注力している。これは造形品の形状や寸法を見張っているだけでなく, 1 層ごとに造形していくという特徴から造形中に内部欠陥を検出することが期待されており, インプロセスで品質保証ができていくであろう。これまで検査, 計測などに掛かっていた時間が短縮さ



工場内工程の短縮 小ざくコンパクトな工場



れるとともに、すり合わせなどの高度な技能が不要になっていくことも予想される。

③ 工場内外サプライチェーンの変化

原材料や完成品、保管している治工具のための倉庫がまず小さくなるであろう。金属機械加工工場では、素材として購入していた圧延板や鋳物、鍛造素材が粉末に取って代わり、工場内物流も変わる。粉末は一般的にバルク材と比べると高価ではあるが、造形歩留まりが80%程度であることから、粉末が安くなっていけば適用拡大の追い風となる。機械工場が粉末製造設備をもつことも選択肢となろう。

まとめ

現時点、金属3Dプリンターが抱える課題は山積している。しかしながら、世界各国で莫大な資金が3Dプリンターの開発に投入されており、10年後には期待が現実のものとなっているかもしれない。このように夢を抱かせてくれる素晴らしい技術概念ではあるが、その一方で電子データがありさえすれば世界のどこでもものづくりができてしまうことをも意味している。セキュリティの保護も忘れてはならない。

問い合わせ先

株式会社 IHI

溶接技術部

電話 (045) 759 - 2812

URL : www.ihico.jp/

冬の crystal

英語の辞書で結晶を意味する crystal を引くと、水晶、水晶製品、クリスタルガラス、専門用語として“結晶”が出てきます。この crystal の語源は、ギリシャ語の“透きとおる氷”という意味の“クリスタロス”に由来しており、氷とは切れない関係にあります。氷の結晶である雪は、温度や湿度によって微妙に形を変えて、角柱や六角形の薄い板になって降ってきます。角の飛び出た六角形も単結晶 (single crystal) だそうです。そうでないものもあるそうですが、雪の形からも分かるように氷の結晶構造は六角形になっていて、条件によって優先的に成長する方向が変化して複雑な形になっています。厚さも場所によって変化していることもあって、光を当てると微妙な濃淡が加わり美しく見えます。また、冷たい洞窟などで見られる滴り落ちる水滴によって成長した氷の柱（氷筍^{ひょうじゆん}）も、単結晶のものがあります。氷筍を輪切りにした面では、摩擦係数がかなり小さくなることが知られています。長野冬季オリンピックの際、エムウェーブ（長野市オリンピック記念アリーナ）では氷筍量産装置によって製造された氷筍を薄く輪切りにしてリンクに貼りつけて、滑るリンクを整備したそうです。

姿を変える単結晶

単結晶と言われると、雪の結晶以外にも、ダイヤモンドをはじめとする宝石や、半導体で使用されるシリコンの単結晶を思い浮かべる方も多いと思います。単結晶の定義を調べてみました。単結晶の定義は、同じ方向を向いている結晶の部分を単結晶と言うとあります。また、原子・分子が空間的に規則正しい配列になっているということを付け加えている文献もあります。

ジェットエンジンの中でも、単結晶超合金と呼ばれる部品が使用されています。電子顕微鏡で観察すると凝固させた直後にはいわゆる単結晶ですが、強くするための熱処理後の単結晶超合金の組織は、正方形の第二相が同じ向きに配列している組織となっています。この第二相は半分以上を占めますが、主にニッケル (Ni) とアルミニウム (Al) が 3 : 1 に近い割合で規則的に配列した化合物から成っています。実際、成分や厳密に温度を管理した熱処理によってサイズや形状を制御しています。さらに、このサイコロ状の第二相は、使用中に形が変化します。同様に電子顕微鏡で観察すると帯状になった第二相が見えます。図中の模式図で示しましたが、立体的に見れば、第二相は板状になった第二相が積み上がっていることが分かります。サイ

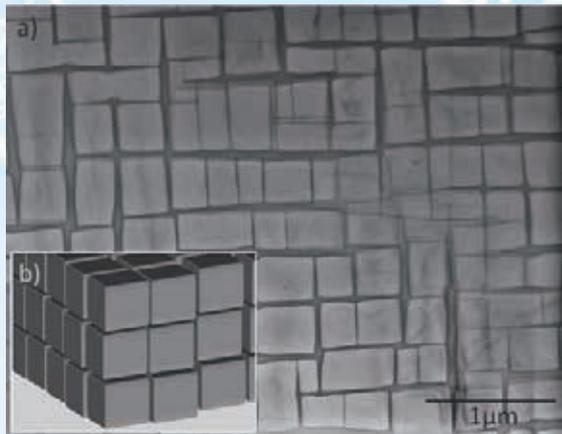
生きている単結晶

技術開発本部

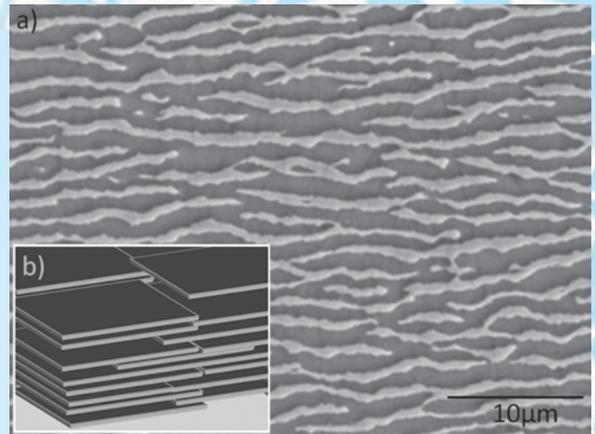
吉澤 廣喜



洞窟で成長した氷筍
(提供：内田博幸)



a) 正方形になって配列した第二相
b) 空間では、サイコロ状になっている
熱処理終了後の組織



a) いかだ状になった第二相
b) 実際には、板状になっている
使用中に変化した組織

コロが板に姿を変えるのです。板の向きは使用中にかかる力の方向で決まります。超合金屋の世界では、断面写真から“raft”（いかだ）構造と呼ばれています。高温環境に耐えつつ、いかだになり、生きているかのように形を変えながら強くなるのです。

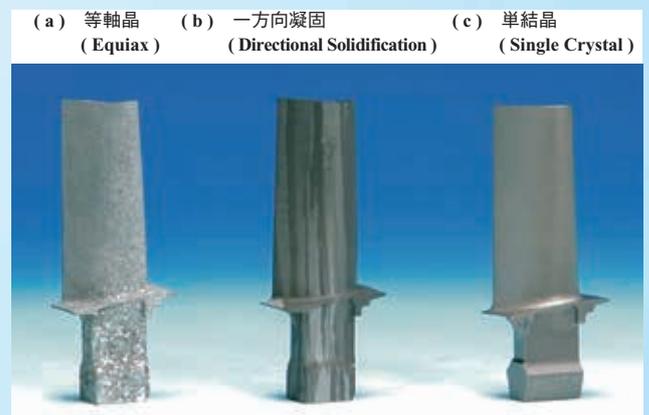
高性能な単結晶

燃料コストの増大や環境問題への対応に伴って、新型のジェットエンジンや発電用ガスタービンではガス温度の向上や軽量化が進められています。それに伴って単結晶合金の出番が増えています。現在単結晶合金は、戦闘機はもとより皆さんが快適に搭乗している大型ジェット機のエンジンで、燃料が燃える燃焼器の後ろ側の 1 000℃を超える高温雰囲気中でジェットエンジンの動力を作る翼（ブレード）として使用されています。

今から 30 年前、これからは単結晶ブレードの時代だと説明を受けたものです。一般に、金属の結晶はその方向によって材料強度が異なります。また、結晶同士の境目である粒界を強くすることを考慮する必要があります。単結晶になれば、高温強度の高い方向で結晶を並べて、粒界を考えずに強度だけを考えれば良いことになります。実際、超合金の単結晶ブレード中には、粒界は存在しません。金属の結晶は、その結晶方向によって腐食のされ方が異なるので、結晶を判別することができます。左側が多数の結晶できている等軸晶ブレードです。写真ではブレードの付け根の方が大きな結晶になっています。中央が一方向凝固ブレードと呼ばれ、下側の付け根から幾つかの結晶が長く伸

びているのが分かります。右側が単結晶ブレードで、等軸晶や一方向凝固ブレードとは異なり、一つの結晶になります。単結晶ブレードは高温に加熱したセラミックス型の中へ、こちらも高温で溶解した超合金を流し込み、下側から順に凝固させて作ります。結晶の成長方向によって成長速度が異なることを利用することで結晶を選んだり、あるいは種結晶をはじめに使用したりすることで希望の方向に結晶の向きをそろえます。

超合金の単結晶は主成分がニッケルなのですが、高温での強度向上や酸化防止のため、鼻薬となる添加元素を加えています。現在、クロム、アルミニウム、チタン等々 10 種類近い元素を加えています。それぞれの元素には役割があり、微妙なバランスを取って調合されています。空気による表面や内面の冷却や耐熱コーティングの進歩もあり、姿を変える単結晶は、環境にも優しい高性能な航空機エンジンの中で活躍しています。



等軸晶・一方向凝固・単結晶ブレードの一例

IHI グループのものづくり改革の推進

Monozukuri Innovation Initiative of IHI Group

宮田 仁 奈 技術開発本部ものづくり推進部

従来、IHI グループの改善活動は、製造・建設における生産のスピードアップが中心であり、優れた要素技術がこれを支えてきた。そして現在、お客さまの要求するニーズ・スピードに応える製品・サービスを提供するために、IHI グループの総合力を発揮した、従来とは異なる新しいものづくり改革を推進している。本稿では、この中核となる、ものづくり改革の3本柱（製品競争力の強化・Make or Buy の最適化・プロセスのスピードアップ）について説明する。

Until now, the core of improvement activities in IHI group has been speeding up production in the fabrication and construction stages, and excellent engineering technology has supported this. Now, in order to provide products and services that meet the needs of our customers and market with the speed they require, we are promoting a new monozukuri innovation by exerting the comprehensive strength of IHI group. In this article we present the three pillars at the core of this monozukuri innovation: strengthening of product competitiveness, optimal make or buy decisions, and speeding up of processes.

1. 緒 言

『IHI のものづくりの系譜』（2 ページ）に見られるように、IHI グループは造船業に端を発し、常に、技術をもって日本初・世界初のものづくりに挑戦し続けてきた。この過程でものづくりへの情熱と革新的技術とが培われ、鋳物・溶接・機械加工といった要素技術が現在のような確固たるものとして築かれてきたことは、『見えない資産』（12 ページ）で触れたとおりである。

同時に、IHI グループでは、幅広い分野の製品を国内外のさまざまな場所で設計・製造・販売し、製品や工場ごとに異なる問題・課題を個別に解決してきた。

しかしながら、グローバル展開や技術革新のスピードが求められる環境で競争力を強化するためには、IHI グループの総合力で解決するような、新しいものづくりの仕組みが必要になっている。

そこで、2009 年から全社組織としてもものづくり改革を推進する部門を設け、IHI グループ全体のものづくり改革に取り組んできている。本稿では、この改革活動の考え方、および、その事例について紹介する。

2. ものづくり改革の3本柱

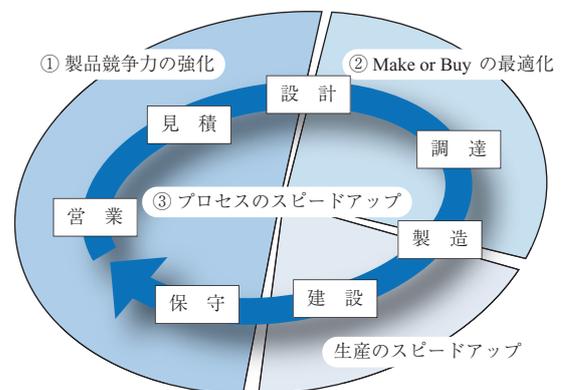
お客さまとともに成長し、コーポレートメッセージ“Realize your dreams”を具現化するために必要とされるのが、ものづくり力である。ここで言う「ものづくり力」

とは、「営業・見積・設計・調達・製造・建設・保守のそれぞれの段階で必要とされる能力を総合化することによって、提供する製品・サービスの競争力を向上させる力」である。

ものづくり力を強化するための中核となる考えとして、ものづくり改革の3本柱を第1図に示す。

1 本目の柱は「製品競争力の強化」である。営業・設計段階から製品の競争力を市場目線で評価し、その優位性を確保することを目指した活動である。

2 本目は「Make or Buy の最適化」である。調達・製造段階における製品の品質／機能・納期・コスト（QDC）に対する影響を評価し、Make or Buy - 何を社内で作り（Make）、何を社外から買うか（Buy）- を最適化することで、競争優位の源泉となるサプライチェーンを構築する



第1図 ものづくり改革の3本柱
Fig. 1 Three pillars of monozukuri innovation

ことである。

3本目は「プロセスのスピードアップ」である。一品受注品に、自動車のような量産品のタクトタイム生産の考えをバリューチェーン全体に適用することによって、お客さまが要求するタイミングで製品・サービスを提供することを目指すものである。

従来の改善活動は、主に製造・建設段階における生産のスピードアップに主眼が置かれ、お客さまの真の要求を満足することが困難であった。一方、ものづくり改革では、市場のニーズを探究し、バリューチェーン全体が市場の要求するスピードで活動することが必要になる。このため、上述の3本柱を主体とすることで、限られたリソースを集中でき、経営数値にまで反映されるような改革活動が実現できる。

以下では、3本柱を具体的に説明する。

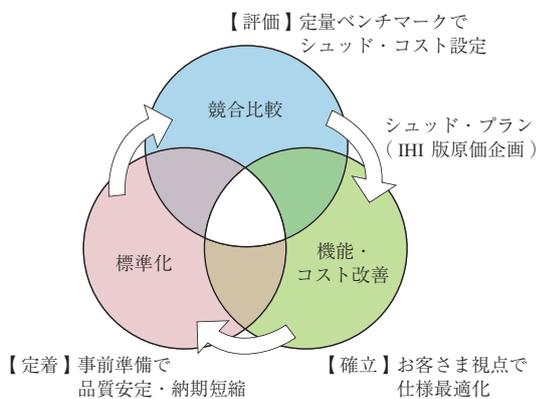
2.1 製品競争力の強化

第2図に製品競争力強化のサイクルを示す。お客さまの目線で製品の競争力を定量的に評価し、機能・コストの改善を確立、標準化による定着によって、お客さまに好まれる製品・サービスを提供することを目指すものである。

まず、自社の市場優位性の把握が不可欠である。そのために、競合他社とのベンチマーキングによって、機能・性能の目標とシュッド・コスト、つまり、コストの目標を明確にする。その際、お客さまの価値観をきちんと理解し、好まれる製品を明確にしなければならない。

次に、お客さまが求める価値に合わせて設計仕様を最適化し、その実現に向けて、製品の機能とコストを改善する。ここでは、IHI 版原価企画であるシュッド・プラン⁽¹⁾や、バリュー・エンジニアリング (VE) など、改善のためのさまざまな手法を活用する。

そして、この最適化された仕様を継続的な強みにするた



第2図 製品競争力強化のサイクル
Fig. 2 Cycle of strengthening product competitiveness

め、標準化を行う。特に、個別受注生産の多い IHI 製品では、都度変える部分が多く、これが調達・製造・建設段階での繰返し生産を妨げ、各工程の作業時間 (サイクルタイム) をばらつかせる原因となっている。このため、変える部分と固定する部分を分ける固変分離を徹底し、固定する部分を標準化することが重要になる。

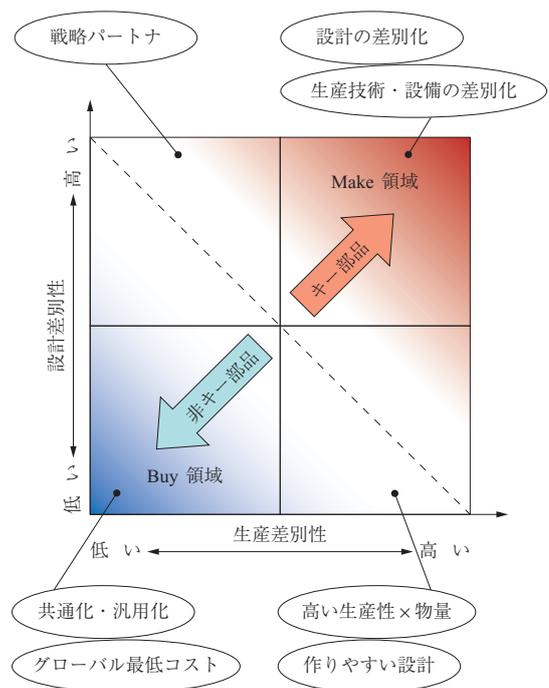
もちろん、市場は常に変化しているので、定常的に競合製品との比較を行い、適切なタイミングでモデルチェンジを行い、第2図に示す活動のサイクルを回していくことが重要になる。

2.2 Make or Buy の最適化

QDC の観点から、差別性の高いキー部品/技術を特定し、これらキー部品・技術を競争優位の源泉とするために、競合他社では作れない、買えないものにするのを狙ったものが Make or Buy の最適化である。

そこで、部品ごとに設計あるいは生産技術の差別性を第3図に示すような Make or Buy ポートフォリオによって評価し、Make or Buy の最適化を検討する。

例えば、第3図の右上の領域は縦軸の設計技術力の差別性、および横軸の生産技術力の差別性がともに高い部品であり、ここに位置するキー部品を Make する技術を押さえれば、競争力の源泉にできる。左下の領域は、共通化や汎用化を図り、調達先の選択肢を増やすことで、グローバル市場から最も安く Buy する。ただし、自社工場の生



第3図 Make or Buy ポートフォリオ
Fig. 3 Make or Buy portfolio

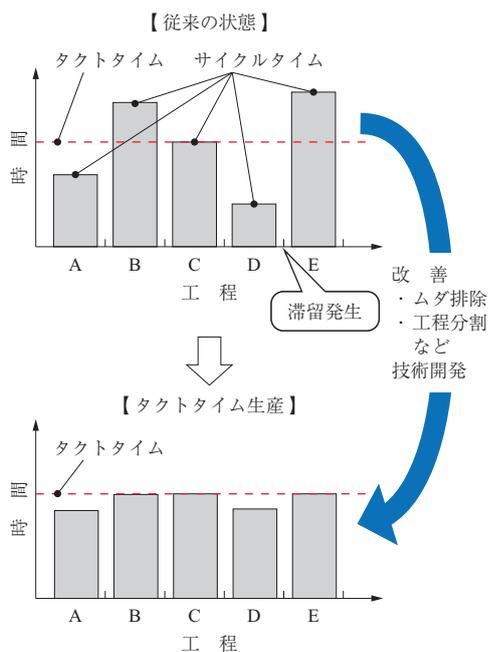
産能力に余裕がある場合には、限界利益の流出防止を考慮して Make も検討する。また、左上の領域は、高い設計技術力を要するが生産技術力は必要としない領域であり、秘密保持契約締結など、設計ノウハウの流出防止策を講じた調達先を戦略的パートナーと位置づけることも可能である。

このような分析に基づいた Make or Buy の最適化によって、単なるコスト比較だけの間違えた Make or Buy によって生じる製造技術の低下を防げるだけでなく、リードタイムの短縮や品質の安定化など製品競争力の強化につなげることができる。

2.3 プロセスのスピードアップ

ものづくりでは、営業から見積・設計・調達・製造・建設・保守にわたるプロセスに対して一貫通貫の流れをつくって、リードタイムを短縮するとともに、コストや棚卸資産のムダを減らすことが求められる。トヨタ生産方式のように、全プロセスを通してモノと情報を見える化し、全員が同じ方向に向かって、製品の売れるスピード（タクトタイム）で着々とプロセスを流していく活動を展開している。

これは、製造や建設段階に限定した場合も同様のことが当てはまる。各工程のサイクルタイムを製品のタクトタイムに同期化させ、ムダをなくすことでリードタイムを短縮する、すなわち、タクトタイム生産の実現を目指すことである（第4図）。



第4図 タクトタイム生産
Fig. 4 Takt time production

これにはまず、現状把握を行う。しかし、IHI グループの多くの製品の場合、各工程の作業時間は、通常、日・月単位となるため、現状を把握するのに多大な労力を要する。そこで、『ICT で現場の実績を簡単記録「ものづくり力」を強くする!』（30 ページ）で紹介したような、ICT (Information and Communication Technology) を活用した現状把握が有効になる。こうして得られたデータを有用な情報として見える化し、活動メンバ全員のベクトルを合わせる。

次に、得られた現状から問題を洗い出し、具体的な対策を立て、QDC での期待効果を試算する。この時点で目標とする効果が得られなければ、対策を増やす。そして、経営幹部は、改善が間違いなく経営数値に反映されることを確認し、現場が実施するよう、粘り強く働きかける。

以上のような改善活動と、それを支えた ICT の活用事例として、『職場改善で工期を短縮し、大型受注を目指せ!』（16 ページ）を参照されたい。

また、世界のお客さまに、より早く提供することを目的に、お客さまに近い拠点で調達・製造・建設が行われている。日本とは言語・習慣が異なる環境でも、日本と同様の改革活動が行われている。例えば、『東南アジアにおける「ものづくり支援」』（46 ページ）においては、日本とタイでの設計情報の共有や、東南アジアにおける「生産支援のシェアドサービス」といった新たな取組みを提案している。

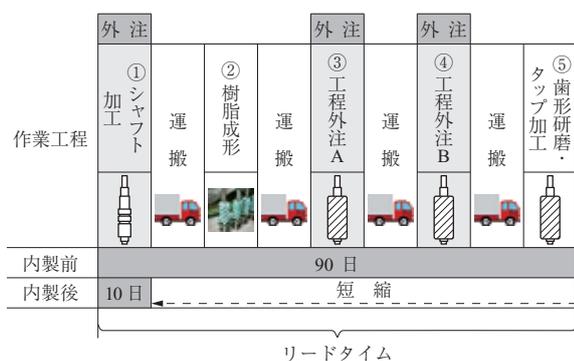
3. ものづくり改革の事例

すでに幾つかの製品において、ものづくり改革の成果が表れており、『LM6000 ガスタービンパッケージ組立工期短縮活動』（63 ページ）では、設計・生産管理/技術・製造が部門横断で改善を行い、限られたリソースで、リードタイム 1/2 を達成した。そのほかの例をここで紹介する。

3.1 スクリューコンプレッサ（GP 圧縮機）の事例

従来、GP 圧縮機のロータ製作は、工程外注が多く、リードタイム（製作開始から出荷までの期間）が 90 日掛かっていた（第5図）。加えて、外注の納期遅れによる欠品を防ぐため、工程間には多くの仕掛品を抱えていた。

Make or Buy 分析をした結果、ロータはキー部品であり、生産差別性の観点から内製化が必須であることが判明した。よって、設備投資をして全工程を内製化した。この



第 5 図 GP 圧縮機のロータ内製化事例

Fig. 5 In-house manufacturing of GP compressor rotor

結果、リードタイムは 10 日に短縮し、月産能力は 40 台から 80 台に倍増した。

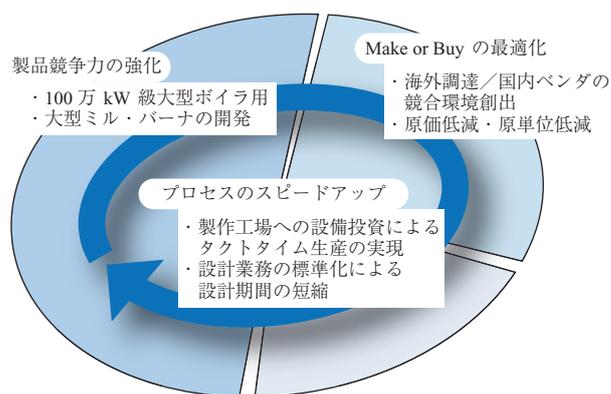
3.2 ボイラ事業の競争力強化の事例

第 6 図 に、SOVR (Stationary Once-through Variable pressure Reheat type boiler: 超々臨界圧貫流ボイラ) の競争力強化の概要を示す。お客さまの要望に応えるべく、2015 年度から 100 万 kW 級大型ボイラ用の大型ミル・バーナの開発に着手した。ここでは、購入品費・据付け費・輸送費の低減、および、加工外注品の原単位低減によるサプライチェーンの強化に取り組んでいる。特に、国内事業用ボイラでは、海外調達品の採用を増やし、国内ベンダとの競合環境を創出しつつ、両者の最適化を図っている。製造に関しては、タクトタイム生産実現のため、日本(相生)・インドネシアの両工場に設備投資を行った。これによって、工程間作業のムダ取り・作業量平準化による待ち時間の削減・工程の固定化による作業習熟が期待でき、相生工場は、ループ製造において QDC に S (安全) を加えた SQDC で世界一を目指す。

さらに、設計業務改革プロジェクトで設計業務そのものの標準化に取り組み、設計期間の短縮という、ものづくりプロセスでの改革も推進している。

4. 未来へ挑むものづくりの技術開発

ものづくりの新たな潮流として、IoT (Internet of Things) の始まりや、つながる工場をコンセプトとした Industrie 4.0 が提唱されている。これらは、これまでのもの



第 6 図 SOVR の競争力強化事例

Fig. 6 Strengthen SOVR competitiveness

のづくりの概念を変えるような大きなうねりとなる可能性がある。

こうした世界の大きなうねりを捉え、さらなるものづくり改革を成し遂げるためには、やはり、技術の革新が必要である。そのための技術開発の一例を本誌で紹介している。

5. 結 言

IHI グループにおけるものづくり改革の概要について紹介した。これらを以下にまとめる。

- (1) ものづくり改革の 3 本柱「製品競争力の強化」、「Make or Buy の最適化」、「プロセスのスピードアップ」を中核に、ものづくり改革を推進している。
- (2) ものづくりプロセス全体にわたって、お客さまを起点とした価値の創造を行っている。
- (3) 新たな技術開発によって、ものづくり改革の加速に取り組んでいる。

本稿では割愛したが、人材育成にも取り組み、IHI のコアとなる、ものづくりにこだわる風土の醸成も行っている。そして、将来にわたって、お客さまの夢を実現し続けるのが IHI グループのものづくり改革である。

参 考 文 献

- (1) 松澤郁夫, 服部 博: “シュッド・プラン”アプローチによるコスト改善戦略の策定 VE 論文集 2005 年 Vol. 36 pp. 3 - 15

東南アジアにおける「ものづくり支援」

Support for Monozukuri in Southeast Asia

二宮和之	IHI Asia Pacific (Thailand) Co., Ltd. General Manager
兼本充洋	IHI Machine Tech Asia Co., Ltd. Deputy General Manager
Suchada PICHITPREECHA	IHI Machine Tech Asia Co., Ltd. Purchasing Supervisor
Suthatip JOMPON	IHI Machine Tech Asia Co., Ltd. Purchasing
Chalida CHUNGJAPO	IHI Machine Tech Asia Co., Ltd. Accounting Supervisor

日本で行われる生産性向上の活動は、主に「より少ない人員で」、「より少ない工数で」を目的としている。これは製造原価に占める人件費の割合が相対的に高く、人員や工数の削減がコストに及ぼす影響が大きいためである。一方、東南アジアの人件費は日本の約 1/10⁽¹⁾ であり、製造原価に占める人件費の割合は相対的に低いことから、人員や工数の削減はあまりコストに影響を及ぼさない。東南アジアでは「問題ない品質で」「短い生産リードタイムで」がより重要となる。本稿では、日本とは異なるアプローチが求められる東南アジアでの活動の一端を紹介する。

In Japan, the main goals of productivity improvement activities are “Fewer workers” and “Fewer man-hours.” This is because the proportion of labor cost in the cost of manufacturing is relatively high, so the reduction of personnel and man-hours have a large effect on the cost. On the other hand, in Southeast Asia, the proportion of labor cost is lower at about 1/10 that of Japan. This means that the reduction of personnel and man-hours do not affect cost very much. Thus, in Southeast Asia, the more important goals are “Consistently good quality” and “Short production lead times.” In this report, I will introduce some activities in Southeast Asia that are different from those in Japan.

1. 緒言

東南アジア、特に ASEAN 5 各国（ベトナム、タイ、インドネシア、マレーシア、フィリピン）域内では日系企業の生産拠点は増加傾向にあり、東南アジアの安い労働力を活用しつつ急速に拡大する市場に対応するため、各社とも主に量産機種⁽²⁾の工場を設立している。いわゆる低価格の量産機種は東南アジアで、高価格の少量生産機種は日本という構図である。

生産拠点の増加がもたらす課題の一つとして、現地作業者の確保が困難になることが挙げられる。なかでも優秀な管理者層の人材不足が顕著となっており、日系企業間での取り合いも発生している。また低い失業率（タイの場合、2011 年以降は約 0.7% で推移）に加えて、少しでも給料の高い会社を求めて仕事を変える傾向が日本に比べて強い。そのため、「従業員⁽³⁾の定着率が低い」、「技術の習熟度がなかなか上がらない」との声も聞こえてくる。

工場運営においては、日本のやり方をそのまま東南アジアにもってきても上手くいかないことが多く、現地の状況に合わせて以下のような取り組みも必要である。そして、

これらの達成度が生産性に大きな影響を与えるといえる。

- (1) 日本人が当たり前と考えることでも、ローカルの作業者が確実に理解できるように「明文化」する。
- (2) ある作業者が辞めてもすぐにほかの人が代わるように、可能な限り作業を「標準化（マニュアル化）」する。
- (3) 現場の状況を「見える化」して、管理者が正しく瞬時に判断できる環境を整える。

IHI Asia Pacific (Thailand) (IHIAPT) および IHI Asia Pacific (IHIAP) は、タイ国内では IHIAPT、東南アジア域内では IHIAP を統括会社として「生産支援のシェアードサービス」をコンセプトの一つとして掲げ、IHI グループ各社に対して上記の取り組みを含むさまざまな生産性向上の支援を行っている。

2. 東南アジア工場の立ち上げ支援

株式会社 IHI 機械システム (IMS) は、2013 年 7 月タイに新型真空洗浄機の生産拠点 (IHI Machine Tech Asia : IMTA) を立ち上げ、現在、月に数台のペースで生産をしている。この IMTA の立ち上げに際し、IHIAPT および

IHIAP は以下の整備を通じて支援を行った。

(1) 標準作業書

「ノウハウを人に依存しない」をコンセプトに、「O」リングのセットやボルトの締結に至るまですべての作業内容を詳細に規定し、必要に応じて「いつでも確認できる」辞書的な役割をもたせたもの

(2) 解説図

作業中に図面を確認すると作業が中断してしまい、生産リードタイムの増大につながる。「図面を確認すること」と「図面を理解できること」は異なる。別途、図面を理解できるように教育しつつも、作業中は図面を確認しないで組立に専念させることで生産リードタイムの短縮を目指している。そこで、「組立作業中は、作業者に図面を確認させない」をコンセプトに、作業者のレファレンスとして、図面のなかで守らなければならない組立寸法だけを抽出し、写真やスケッチで分かりやすく示したもの

(3) デジタルモックアップ

解説図では断片的となってしまう「作業の流れ」（各作業のつながり）を、3D-CAD を用いたアニメーションで確認するもの

(4) 部品リスト

「部品集め」の労力を削減するため、工程別を使用するすべての部品名称、図面番号、個数をリスト化したもの

(5) 部品アルバム

採用直後の作業員でも容易に「部品集め」ができるようにするため、すべての部品を、一品ごとに図面番号とともに写真撮影しアルバム化したもの

一方、前述 1 章の (3) 項に関して、日本と比較して高い頻度で発生しうるトラブルを極力抑えるために、現場で起こっていること（作業の進捗、工数の発生状況、調達の実績など）を迅速に把握して、次のアクションにつなげていくことが求められる。日本では市販の IT (Information Technology) ソフトウェアを導入して「見える化」する例も見られるが、新たに東南アジアに進出する事業者にとっては、このようなソフトウェアを導入すると生産開始前から多大な固定費を負担することになる。そこで IHIAPT および IHIAP では、「生産支援のシェアドサービス」の一環として IMTA で管理上必要な機能を洗い出し、これらの機能を備えた「生産・調達情報管理システム」を開発した。本システムは、ほかの事業者でも利用

できるように、可能な限り汎用性をもたせており、生産管理として「号機ごとの生産日程自動スケジューリング」、「工程ごとの生産リードタイム集計」、「直接・間接工数集計」といったさまざまな機能をもっているが、ここでは日本と東南アジア生産拠点との連携という視点から、「図面管理」と「調達費の見える化」の二つの機能を紹介する。

3. 東南アジア工場での図面管理は日本よりも重要

最初に、日本 (IMS) とタイ (IMTA) との間で構築した図面管理の仕組みについて紹介する。

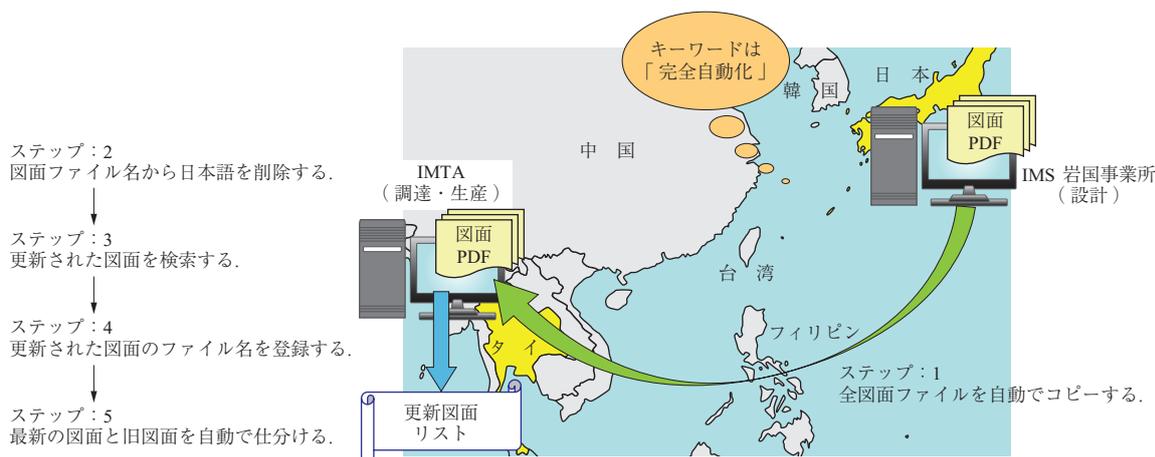
設計部門と調達・生産部門の物理的な距離も近く、言葉の違いや時差もない日本国内であっても、図面管理におけるトラブルが発生する。例えば、

- (1) 設計部門は、図面を新規作成・変更したら所定のフォルダへコピーする。
- (2) 調達・生産部門は、定期的に所定のフォルダを確認する。

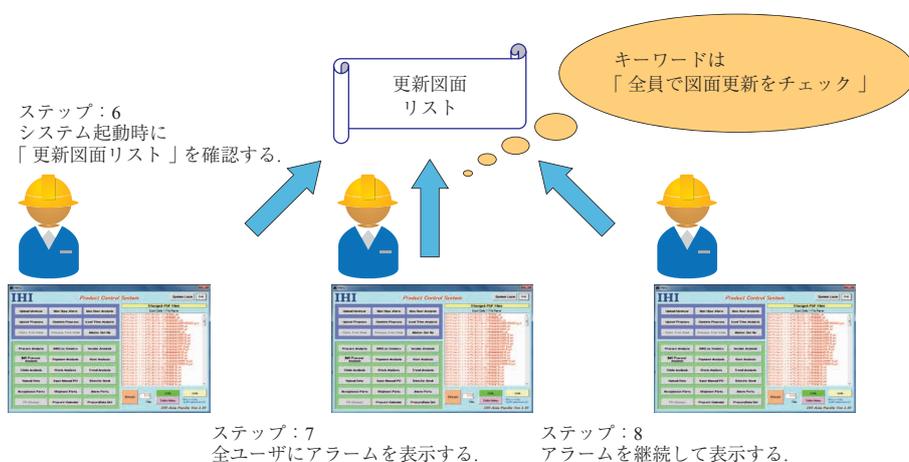
と決めているだけでは、図面更新を知らせる仕組みがあるとはいえない。仮に「設計部門は、図面のコピー後に関係者にメールで連絡する」というルールを付加しても、① 設計部門の担当者がメール送信を忘れる ② メールを受信したにも関わらず調達・生産部門の担当者が確認を忘れる、という事態が起こり、結果として調達部門が旧図面で発注したり生産部門が誤組立したりするトラブルが発生する。

設計部門と調達・生産部門の物理的な距離が遠く、言葉の違いや時差もあり、かつ機能分担型（設計は日本、生産は海外拠点が請け負うという形態）であれば、上記のトラブルが発生するリスクは、さらに大きくなる。量産品は同じ図面を繰り返し使う薄利多売のビジネスモデルである。このビジネスモデルのもとで利益を出すためには、図面の管理は日本よりも重要である（＝図面間違いが利益に及ぼすインパクトは、相対的に日本よりも大きい）といえる。

先のトラブルは「忘れやすい人間に処理を依存している」、「図面更新の情報の受取先が限られている」ことが原因である。そこで、これを防止するために「その 1：完全自動化」、「その 2：全員で図面更新をチェック」の二つをキーワードとして、IMS 岩国事業所（設計部門）と IMTA（調達・生産部門）との間で以下のようなステップをもつ仕組みを構築し、運用を開始した（第 1 図および第 2 図）。



第1図 構築した図面管理の仕組み 1
Fig. 1 Framework of new drawing control system 1



第2図 構築した図面管理の仕組み 2
Fig. 2 Framework of new drawing control system 2

ステップ：1

IMS 岩国事業所の図面保管サーバから、新旧すべての図面ファイル（約 1 550 ファイル）を IMTA の図面保管サーバに定期的に自動でコピーする。現在は毎週日曜日の深夜に実施しており、また、コピーを行う間隔は任意に設定可能である。

ステップ：2

ローカル PC では、日本語が文字化けすることがあるため、コピーした図面のファイル名から、日本語を削除する。

ステップ：3

新たにコピーしたすべての図面ファイルの「ファイル名称」、「更新日時」と、前回コピーしたすべての図面ファイルの「ファイル名称」、「更新日時」を比較し、① 新たな名称のファイル ② ファイル名称は同一でも更新日時が新しくなったファイル、を検索する。

ステップ：4

該当するファイルが存在した場合は、データベース内の「更新図面リスト」にファイル名を登録する。

ステップ：5

「新たな名称」および「同一名称のなかで更新日時が最新」の図面ファイルが、現在使用している最新の図面ファイルと判断し、最新の図面とそれ以外（旧図面）を、別々のフォルダへ自動で仕分けをする。

ステップ：6

本システムの起動時に、ユーザ認証に続いて最初にステップ：4 で登録した「更新図面リスト」を確認（「新たな名称の図面」、「変更された図面」ファイルの有無をチェック）する。

ステップ：7

該当する更新図面ファイルが存在した場合は、限られた担当者だけではなく、本システムを起動した

すべてのユーザの OPEN 画面に同じアラームを表示する。

ステップ：8

担当者が対応を終了してアラームを消さない限り、翌日以降もアラームを継続して表示する。具体的には、「調達部門が新しい図面で発注したか」、「生産部門が現場の旧図面を新しい図面に差し替えたか」を確認した後にアラームを消すというルールにしている。

ステップ：1～5 がキーワード「その 1：完全自動化」を具体化した仕組みであり、ステップ：6～8 がキーワード「その 2：全員で図面更新をチェック」を具体化した仕組みである。第 3 図にアラームを表示した OPEN 画面例を示す。

この仕組みを導入したことで、1 回に数ファイル程度の小さな図面変更から数百ファイルに及ぶバージョンアップ時の図面更新まで、図面ファイルの授受におけるチェック漏れがなくなった。

4. 号機ごとの調達費の「見える化」を実現

製品によっても異なるが、一般に東南アジアで生産される量産品は、調達費が製造原価の 80～90% を占めるといわれている。そこで、この調達費の見える化に関する取り組み事例を紹介する。

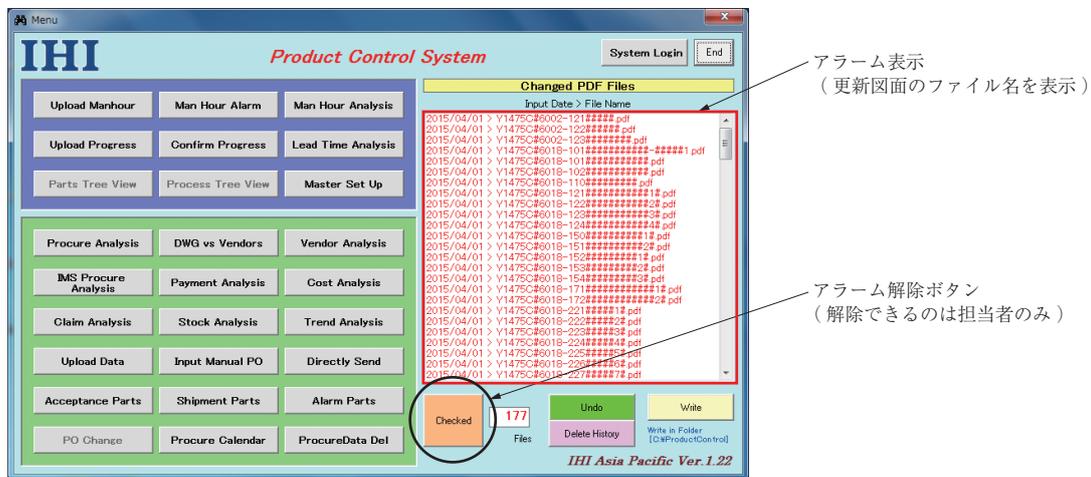
ある製品の号機ごとの調達費を集計する場合、1 回限りの「瞬間値」を求めるのであれば労力を掛けてでも対応することは可能である。しかし、調達費のデータは日々更新されるため、労力を掛けて集計した結果はすぐに「古新聞」と化してしまい指標として使えなくなってしまう。

一方、頻繁に集計を行うとなると労力が多大になるため、なかなか対応できない。さらに調達部門が日本国内・海外拠点と複数に分散している場合は、上記に加えて以下のような煩雑な追加作業も発生する。

- (1) 日本国内・海外拠点の調達費の合算に先立って、発注データのフォーマットを一致させる作業（一般に、調達費の管理は拠点ごとに別々のシステムを用いているため）
 - (2) 「まとめ発注」の号機ごとへの仕分け作業（一般に、拠点ごとに「何台分をまとめて発注するか」を決めており、「まとめ発注」の台数が異なるため）
 - (3) 異なる通貨を統一して合計する作業
- 特に (3) に関連して、次のような状況も発生する。

- ① あるタイミングで日本国内・海外拠点で調達している調達費を集計したところ、合計で 1 000 万円であった。社内の各部門には、この 1 000 万円という値のみが広く認知され独り歩きする。
- ② 1 年後には、換算レートは変化しているので、海外拠点の調達費を再計算しなければならないが、各部門は「1 000 万円のなかで海外拠点の調達費は幾らか」の情報をもっていないため、真の値とのかい離を把握しないまま「調達費は合計 1 000 万円」を使い続ける。加えて、現地調達化が進んで日本国内・海外拠点での調達品目も変化していると、このかい離はさらに大きくなる。

上述のように、一般に東南アジアの生産品は薄利多売のビジネスモデルであるため、利益確保に向けて常に正確な号機ごとの調達費を把握（＝利益を幾ら確保できるか）したうえで値決めを行うことが重要である。しかし、上記



第 3 図 アラームを表示した OPEN 画面
Fig. 3 Opening screen with alarm

のように過去の数字が独り歩きしているような状況では、それぞれ「年度末に締めてみないと、利益が出たかどうかも分からない」状態になってしまう。

まとめると、この「号機ごとの調達費の集計」には大きく次の二つの課題が存在している。

- ① 作業の労力の割に、得られた集計値の信頼度がすぐに低下してしまう。
- ② 日本国内と海外拠点の調達費を合算した合計のみを把握していると、換算レートの変化に伴った最新の金額を把握することができない。

上記①については、集計値の信頼度が低下してしまうことは避けられないため、1回当たりの集計作業の労力を大幅に低減させ、頻繁に集計作業を繰り返すことによって常に最新の値を把握するようにした。また②については、海外拠点の調達費は現地通貨のまま、日本国内の調達費とは別にデータベース内に保管しておき、集計の際にユーザが指定した換算レートを使って「その場で」再計算することにした。

本システムにおける、号機ごとの調達費の集計ステップは以下のとおりである。

ステップ：1

IMTA および IMS の調達担当者が、本システムを用いて定期的に（IMTA では2日に1回、IMS では週に1回）両社で使用している調達システムから、①新たな発注データ ②修正した発注データ、をIMTA サーバのデータベースに登録する。よって、タイ（IMTA）および日本（IMS）の新型真空洗浄機

に関するすべての発注データは、IMTA サーバのデータベースに蓄積されていく。なお、本システムはIMTA および IMS 用に、異なる発注データ取込みプログラムをもっており、登録時に両社の発注データのフォーマットを自動で統一する。また「まとめ発注」についても、自動で号機ごとの仕分け作業を行う。

ステップ：2

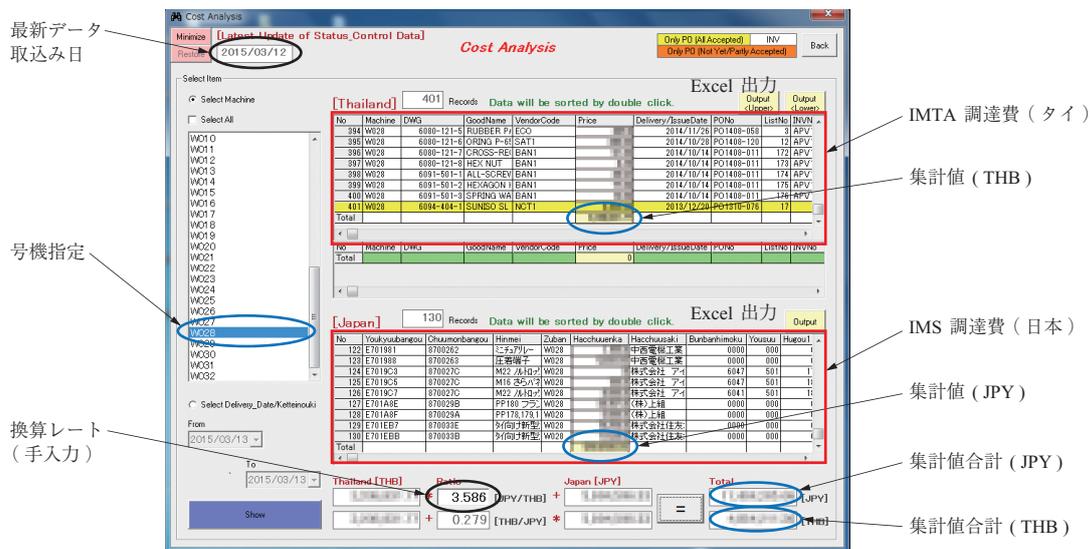
本システムで、確認したいときに確認したい号機を指定するだけで、瞬時に、IMTA および IMS 別に調達費の集計値を表示する。

なお IMTA のデータについては、発注データごとに「検取済み（白）」「完納（黄色）」「分納・未納（オレンジ色）」のステータスが分かるように色分け表示をする。

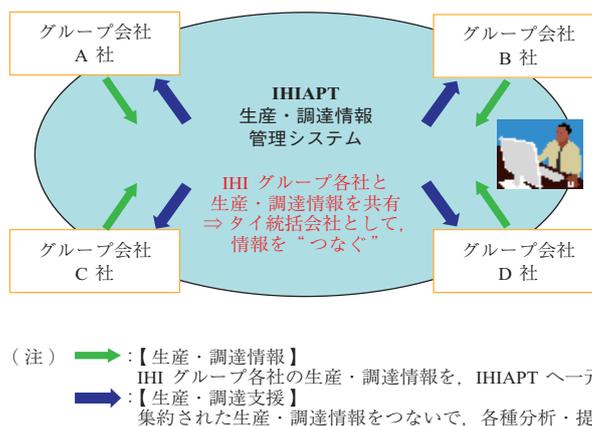
ステップ：3

換算レートを手入力すると、集計値の合計を日本円（JPY）およびタイバーツ（THB）で表示する。ここでは、例えば「過去の号機の調達費は、現在の換算レートでは幾らになるか」といったシミュレーションを可能にするため、あえて換算レートを手入力としている。

第4図に、号機ごとの調達費を「見える化」した画面例を示す。画面上段がIMTA（タイ）での調達費の一覧および集計値、画面下段がIMS（日本）での調達費の一覧および集計値である。また最下段は、手入力した換算レートを用いた日本円およびタイバーツでの集計値の合計



第4図 号機ごとの調達費の「見える化」画面
Fig. 4 Visualized data of the procurement cost of each machine



第5図 IHIAPTの目指す「生産支援のシェアドサービス」のイメージ
Fig. 5 Conceptual image of “Shared service for manufacturing support” that IHIAPT is aiming for

を示す。

この仕組みは、2015年の2月からIMTA、IMS（2拠点）の計3拠点で運用を開始した。

5. 結 言

最後に、IHIAPTの目指す「生産支援のシェアドサービス」のイメージについて説明する。

IHIAPTはタイ国内におけるIHIグループの統括会社として約1年前に設立した。「生産支援のシェアドサービス」の機能を考えた場合、個社別に支援を行うだけではIHIグループの強みを十分に発揮できない。中小規模のIHIグループ各社の個別事業が、タイおよび東南アジアに進出している強力な競合メーカーと戦っていくためには、統括会社としてIHIグループ各社を「つなぐ」ことで総合力を高める必要がある。そこで、この「つなぐ」を実現すべく第5図に示すような、本システムを中心と

した枠組みを考えている。

期待される効果として、①調達情報の活用では、IHIグループ各社を統合した「ボリューム」によるまとめ発注や転注によるコストダウン、②生産情報の活用では、IHIグループ各社の生産の進捗に応じた機材の応援・被援や、ベンダへの納入日早遅変更の依頼、およびトラブル・安全情報の共有、などが挙げられる。

IHIAPTおよびIHIAPは、タイおよび東南アジアにおけるIHIグループ各社の生産拠点の支援を通じてノウハウを蓄積していくとともに、横串をとおした提案・協働を通じて事業の拡大を支援していく。

参 考 文 献

- (1) 日本貿易振興機構（ジェトロ）海外調査部：第24回アジア・オセアニア主要都市・地域の投資関連コスト比較 2014年5月

設計アイデアに及ぼすチームワークと機能本位思考の効果

The Effect of Teamwork and Function-Oriented Thinking on Ideas Generated for Product Design

牧野 公一 技術開発本部ものづくり推進部 主査
澤口 学 早稲田大学 理工学術院創造理工学研究科経営デザイン専攻 客員教授 博士(工学)

製品の開発や改善時には機能、コスト両面を考慮した最適な設計が求められる。そのために幅広くアイデアを発想し、そのなかから質の高いアイデアを選択、価値の高い設計とする手段が必要である。こうした要求に応える管理技術の一つであるバリューエンジニアリングはチームデザインと機能本位思考によって、多様性が高く、かつ数多くのアイデアが得られるとされている。本研究では、発想されたアイデアの多様性を、情報エントロピーを活用して定量的に取り扱うことによって、チームデザインと機能本位思考の効果について当社内研修の実験データに基づいて検証するものである。

Optimal designs in terms of function and cost are required for the product development and improvement design processes. A methodology that results in high-value design is needed by designers, because they have to generate many different ideas and select the good ideas. Value Engineering is one management technique that attempts to fill this need and is good for a wide variety of ideas developed through teamwork and function-oriented thinking. In this study, through the effect of teamwork and function-oriented thinking on generated ideas will be verified from the data of a company seminar through quantitative handling of the variety of ideas generated through practical use of information entropy.

1. 緒言

企業経営にとって製造原価を可能な限り低く抑えることは必須の課題である。製品の開発や改善を行う場合、詳細設計段階で製造原価の約80%が決定してしまうといわれており^{(1),(2)}、設計は企業経営にとって重要な役割を担っている。

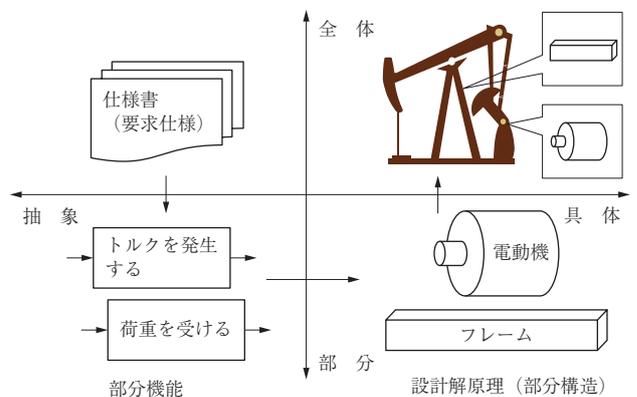
製品を設計する場合、市場からの要求や企業方針に則った要求機能概念から設計解を導きだす^{(3)~(5)}。その際、全体機能を構成する部分機能を達成する方法を複数探索し、最適な組合せを選択する⁽⁵⁾。その達成方法は多くのアイデアから作られ、アイデアを多く発想するにはチームワークや機能本位思考が有効とされている^{(6)~(8)}。バリューエンジニアリング(Value Engineering: 以降, VE)で用いられる機能本位思考はアイデアの創出に有効とされているが^{(6),(9)}、その効果は定量的には示されていない。一方、経営の視点では、人や時間などの経営資源の投資効率最大化を求められる。

以上の背景を受け、本研究は設計過程で設計解を広く検討する際に発想されるアイデアに対し、チームワークおよび機能本位思考が与える影響を定量的に明らかにし、アイデア発想などの創造的活動への人や時間の投資判断に役立つようとするものである。

2. 設計過程におけるアイデア発想と機能

2.1 設計方法論における機能

設計方法論の代表例として Pahl と Beitz の設計方法論⁽⁵⁾が有名であり、概念設計過程の構造を第1図に示す⁽³⁾。要求仕様から、要求を満たすために必要な部分機能を抽出し、次に部分機能を達成するための部分構造を検討し、この部分構造を統合して全体としての設計解を得る。言い換えれば、この概念設計の思考過程は、機能本位にアイデア発想することに他ならない。本研究でいう機能とは、このような設計方法論における機能を指すこととする。



第1図 概念設計過程の構造⁽³⁾
Fig. 1 Structure of conceptual design process⁽³⁾

2.2 アイデア発想が必要な局面

Pahl と Beitz の設計方法論は、設計者が行っている設計の思考過程を説明している。すなわち、分析、統合、評価が繰り返し行われ設計の最終案をまとめていくのが実際の設計作業の流れである。思考を拡大させて複数個の概念的な構想を立案し、評価によって一つが選ばれ、最終段階で構想を具体化、洗練化させ設計過程が収束する⁽¹⁰⁾。したがって、思考を拡大させる局面ではアイデアを多く出すことが重要になる。

2.3 VE における機能

VE は機能に着目した管理技術の一つである。VE では製品やサービスの機能とコストを明らかにする。これは顧客や使用者の要求を機能面から明確にし、機能を起点として思考を広げ既存製品やサービスに対する代替案を作成するためのアイデアを多く得ようとするものである⁽⁶⁾。第2図に使用者の要求と機能の関係を示す。使用者の要求は「明るさを得る」であるが、その達成度合いが制約条件となり、ここでは健康維持性として400ルクスが指定されている。

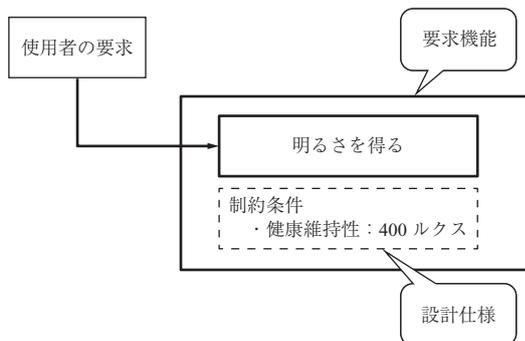
このようにVEでは使用者の必要とする機能を定義し、その機能を目的と手段の関係に整理した機能系統図を作成し、これをもとに「アイデア発想」と呼ばれる発散思考を行う。

以上のようなアイデア発想に対し、チームワークによる作業や機能本位の思考が与える影響を定量的に得ることが本研究の対象である。

3. 研究方法

3.1 実験内容

本研究では、社内VE研修の受講生（被験者）が研修の過程において発想するコスト削減のアイデアをデータと

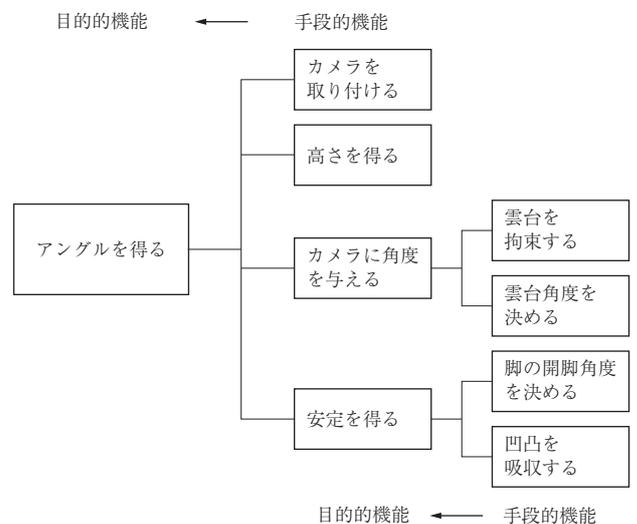


第2図 使用者の要求と機能の関係
Fig. 2 Relationship between users' requirements and functions

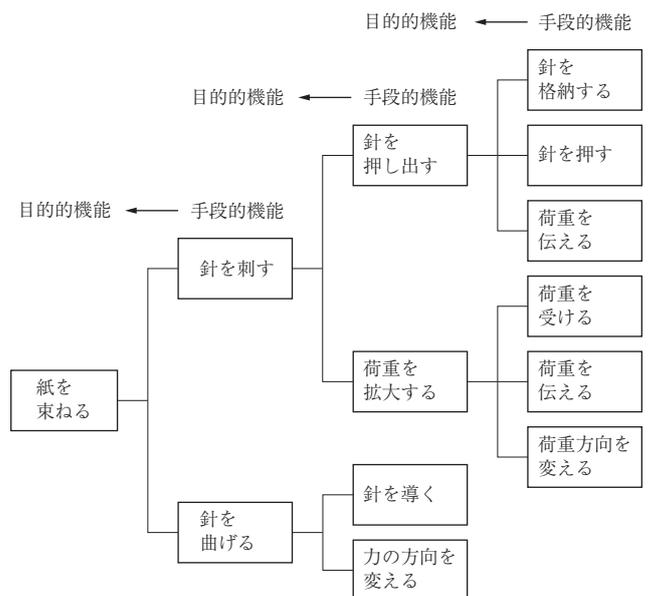
して収集した。被験者に三脚とステープラを対象としてコスト削減アイデアを発想してもらい、チームワークと機能本位思考が発想されたアイデアの多様性に与える影響を評価した。ここでチームワークとは、複数のメンバーが互いに協力しながら多くのアイデアを発想することを指す。アイデアの多様性とその評価方法については、3.4項で述べる。

3.2 アイデア出しの対象製品の複雑性

アイデア出しの対象製品とした三脚およびステープラの機能系統図例を第3図と第4図に示す。機能系統図とは製品全体の機能を達成するために構成されている部分機能を目的-手段の関係で整理した図表である。ただし、部品



第3図 三脚機能系統図例
Fig. 3 Example of functional diagram for a tripod



第4図 ステープラ機能系統図例
Fig. 4 Example of functional diagram for a stapler

のもつ機能の目的、手段は相対的なものである。目的手段の関係を整理した結果、機能系統図は最終的に左から右に向かって広がっていくツリー構造となる。VE ではこの機能系統図を用いて、製品を構成する部分機能の妥当性評価、価値の評価を行い、さらに発想の起点となる機能を明確にする。機能系統図は機能間の関係を記述するものであることから、今回は製品の複雑さを示すものとしてもこの機能系統図を応用する。

三脚とステープラを機能系統図で比較すると、三脚機能系統図は3階層となっている一方、ステープラの機能系統図は4階層となっている。機能の目的-手段の関係および機能の連動動作の観点から、ステープラは三脚よりも複雑である。

3.3 アイデア発想の実験ステップ

被験者は第1表に示す組合せによって、次のステップでアイデア発想を行った。なお、アイデアの発想時間はすべて3分間とした。

ステップ1：チーム分け

6～7名の被験者を3名もしくは4名のチームの二つに分ける。第1表はA～Fの6名、およびG～Lの6名の例である。実験1-1の場合、A～Fの6名をA～C、D～Fに分ける。

ステップ2：アイデア発想（実験1-1）

三脚およびステープラの最上位機能を提示せず、

個人とチームワークでアイデアを発想する。第1表に示す実験1-1の場合、A～Cは各自個人作業で三脚のコスト削減アイデアを発想する。D～Fは3名のチーム作業で相談しながらステープラのコスト削減アイデアを発想する。

ステップ3：アイデア発想（実験1-2）

ステープラの機能は「紙を束ねる」、三脚の機能は「アングルを得る」であることを提示し、対象製品と個人、チームワークを入れ替え、アイデアを発想する。第1表に示す実験1-2の場合、A～Cは3名のチーム作業で相談しながらステープラのコスト削減アイデアを発想する。D～Fは各自個人作業で三脚のコスト削減アイデアを発想する。実験1-1の場合と1-2の場合で対象製品を入れ替えるのは製品に対する学習効果が表れないようにするためである。

ステップ4：チーム分け（メンバの入替え）

ステップ5：アイデア発想（実験2-1）

ステップ6：アイデア発想（実験2-2）

ステップ4～6では、対象製品および被験者を入れ替えステップ1～3と同様の作業を行う。実験1-1、1-2と同様に実験2-1、2-2を行うが、対象製品と発想方法との関係が偏らないように対象製品を入れ替え、かつ、対象製品への学習効果が表れないように被験者もA～Fとは別のG～Lに入れ替える。

3.4 アイデア発想の定量評価方法

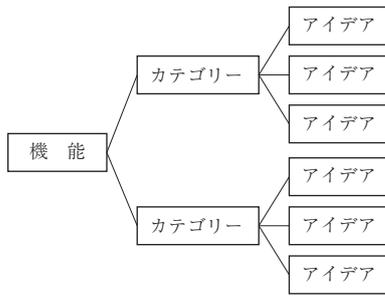
設計過程においては、最終的に機能とコストを両立させる代替案に収束させることになるが、途中の段階では多様性のある（広範囲にわたる）アイデアを数多く発想することが求められる。そこで本研究では得られたデータ（アイデア）の多様性と数を、次の要領で評価することにした。

第5図および第6図に発想されたアイデアの構造例を示す。発想されたアイデア数はそれぞれ6、そのアイデアを同様な性質と思われるカテゴリーに分類するとそれぞれのカテゴリー数は2であることを示している。アイデア数、カテゴリー数は同じであっても第5図と第6図では出されたアイデアの質が同一であるとはみなさないことにする。例えば瓶の「内容物を識別する」という機能を達成するためのアイデアを発想し、「瓶の色を変える」というカテゴリーで「赤」、「青」、「黄色」と三つのアイデアを得た場合と「色を変える」、「形状を変える」、「保

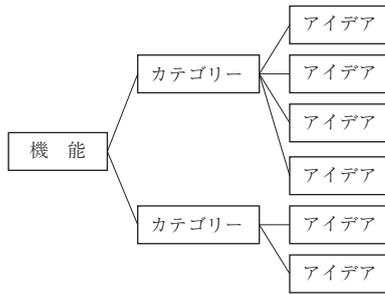
第1表 被験者に対する提示課題
Table 1 Cost reduction task for examinees

実験 1-1	個人作業 A B C 三脚 機能提示なし	チーム作業 D E F ステープラ 機能提示なし
実験 1-2	チーム作業 A B C ステープラ 機能提示あり	個人作業 D E F 三脚 機能提示あり
実験 2-1	個人作業 G H I ステープラ 機能提示なし	チーム作業 J K L 三脚 機能提示なし
実験 2-2	チーム作業 G H I 三脚 機能提示あり	個人作業 J K L ステープラ 機能提示あり

(注) 発想時間はすべて3分間



第 5 図 アイデアの構造例 1
Fig. 5 Example of generated idea structure 1



第 6 図 アイデアの構造例 2
Fig. 6 Example of generated idea structure 2

管場所を変える」の三つのアイデアを比較した場合、アイデア数は双方三つであるが、前者よりも後者の三つのアイデアの方の多様性が高いと判断できる。

したがって、多様性と数を同時に評価に含み入れる必要があるため、(1)式を作り、発想されたアイデアの評価に用いた。この式は情報エントロピー⁽¹¹⁾を応用してアイデアの多様性を表現するものであり、(Verhaegen ら)がアイデアの多様性評価に応用したものにアイデア数とカテゴリー数の評価を加味したものである⁽¹²⁾。(1)式ではカテゴリー内のアイデア数がカテゴリー間で同じ場合にエントロピーは最大となる。本研究ではカテゴリー内のアイデア数がカテゴリー間で異なる場合、アイデア数が少ないカテゴリーはさらに多くのアイデアを出せるものとみなし、エントロピーが最大でなくなり、アイデア数が均等な場合から割り引かれるため、多様性の高低を表現できる。

$$Q = -N_i N_c \sum_{j=1}^{N_i} p_j \log_{N_c} (p_j) \dots\dots\dots (1)$$

Q: アイデア量

N_i: 発想されたアイデア数

N_c: アイデアのカテゴリー数

p_j: N_i に対するカテゴリー内のアイデア数の割合

改善しようとする機能に対してアイデアを発想し N_i 個のアイデアを得る。そのアイデアは N_c 個のカテゴリーに

分類される。第 7 図に発想されたアイデアとカテゴリーを示す。機能₁ に対しアイデアを 3 個発想、2 個にカテゴリー分類した例である。カテゴリーに含まれるアイデア数に差があるとエントロピーが小さくなる。したがって、発想したアイデアの数やカテゴリーが多くなっているか、そしてそのカテゴリー間にアイデア数の差があるか、つまり視点に偏りがあるかどうかを (1) 式で表すことが可能になる。

3.5 発想されたアイデア量の評価

実験で得たアイデアから (1) 式によってアイデア量 Q を算出し、このアイデア量 Q の大小を評価対象とした。アイデア量 Q の算出は以下の手順で行った。

手順 1: 得られたアイデアをカテゴリー分類する。第 8 図に発想されたアイデアとカテゴリーの分類例 (三脚) を示す。

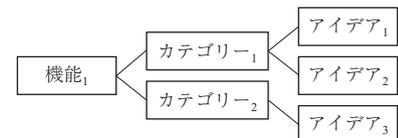
手順 2: カテゴリー数とアイデア数を (1) 式に代入する。

4. 実験結果

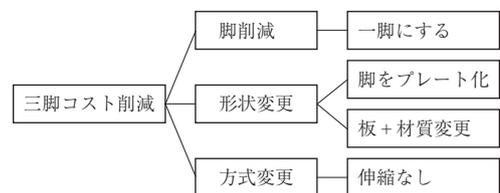
得られたデータを数量化 1 類 (ダミー変数を用いた回帰分析) で解析した結果、以下のアイデア量 Q の回帰式を得た。なお、(2) 式、(3) 式ともにダミー変数は第 2 表に示すとおりである。

ステーブラのアイデア量の回帰式 (寄与率 0.64)

$$Q_s = 23.97 + 3.45x_1 - 18.98x_2 \dots\dots\dots (2)$$



第 7 図 発想されたアイデアとカテゴリー
Fig. 7 Example of categories for generated ideas



第 8 図 発想されたアイデアとカテゴリーの分類例 (三脚)
Fig. 8 Example of categories for generated idea (tripod)

第 2 表 ダミー変数

Table 2 Dummy variables

x ₁ : 機能提示有無	x ₂ : チームワーク
有 = 1	Yes = 0
無 = 0	No = 1

三脚のアイデア量の回帰式（寄与率 0.27）

$$Q_i = 26.38 - 6.14x_1 - 13.77x_2 \dots\dots\dots (3)$$

寄与率は、ステープラの回帰式モデルで 0.64、三脚で 0.27 であり、特に三脚では精度が悪かった。したがって、三脚のアイデア推定量モデルは採用しないことにする。なお、このことについては次項で考察する。寄与率が三脚と比べて高かったステープラのアイデア量推定回帰式モデルから、機能提示の有無やチーム作業か個人作業の違いによるアイデア量を算出し、その結果を第 3 表に示す。これはチームワークで作業を行い、機能分析を行うことがアイデア量を多く得ることにつながることを示している。

5. 考 察

本研究では、二つのアイデア量推定モデルを得たが、寄与率はシステム構成が単純な三脚よりも複雑なステープラの方が高くなっている。

三脚は第 3 図の機能系統図例で示すように 3 階層であり、最上位機能の「アングルを得る」目的のために、手段機能として「カメラを取り付ける」、「高さを得る」、「カメラに角度を与える」、「安定を得る」があるが、さらにこれらの機能を達成するにはもう 1 階層下の階層の機能があるだけで、それぞれの機能が独立した動作をしても上位機能を達成できる。つまり、製品としての機能と部品が直接受けもつ機能が階層的に近いので、実際の製品や部品を見れば、機能を提示されるまでもなく、「アングルを得る」を思いつく、もしくは無意識に機能を考えてアイデアを出すことができたと考えられる。一方、ステープラは第 4 図の機能系統図例で示すように 4 階層であり、最上位機能の「紙を束ねる」を得るためには、「針を刺す」、「針を曲げる」機能が必要であり、「針を刺す」ためにはさらに 2 階層が必要となり、さらに一部の機能では、機能同士が協調して動作が求められる部品点数も多い。このことは三脚の場合と異なり、部品がもつ機能と製品全体としての機能は階層に隔たりがあり、目の前にある部品の改善が目が行ってしまうなど、システム全体の機能を示されないとシステム全体を抜本的に見直す視点につながり

第 3 表 回帰式から得たステープラのアイデア量推定
Table 3 Statistical inference of idea quantity Q by regression model

機能提示	作業者構成	アイデア量	順位
有	チームワーク	27.42	1
無	チームワーク	23.97	2
有	個人	8.44	3
無	個人	4.99	4

にくいと考えられる。つまり、複雑な構造をもつ製品の改善のアイデア発想には、チーム作業によって多様性が高くなり、機能本位思考によってさらに多様性が高まるということを意味している。

6. 今後の課題

本研究ではどのように機能を定義すべきか、どのようにアイデアを発想するかについては言及していない。特に機能を定義する作業は熟練を要するため、不慣れな場合には作業が停滞するという問題が生じる。今後は、設計作業において価値の高い製品を創出するための機能の定義方法や、アイデア発想の具体的手順について開発する予定である。

7. 結 言

三脚とステープラを対象にしたコスト削減アイデア出し実験によって、発想されるアイデアの多様性と数をアイデア量として定義し、定量的に分析評価する方法を考案した。その結果、アイデア量 Q の推定回帰式モデルを得るとともに、その値を高めるためには、以前から経験的には知られていたチームワークおよび機能本位思考の優位性を定量的に示した。

また、構造もしくは機能が複雑なシステムの設計におけるアイデア発想作業にはチーム作業に加えて機能定義（機能本位思考）を行うことが有効である。

参 考 文 献

- (1) 田中雅康, 田中 清, 大槻晴海, 井上善博: 日本の主要企業における原価企画の現状と課題 (第 7 回) 日本経営システム協会 2010 年
- (2) Fabrycky, W. J and Blanchard, B. S. : Life-Cycle Cost and Economic Analysis Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering (1991.1)
- (3) 日本機械学会編: 機械工学便覧デザイン編 β1 設計工学 日本機械学会 2007 年 6 月
- (4) 吉川弘之: 一般設計学序説 精密機械 45 巻 1979 年 8 月 pp. 20 - 26
- (5) Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J and Grote, K. H. : Engineering Design A Systematic Approach Third Edition Springer (2006.12)
- (6) 上野一郎 (監修), 土屋 裕 (編集), 中神芳夫

- (編集), 田中雅康(編集): VEハンドブック
日本バリューエンジニアリング協会 2008年1月
- (7) 澤口 学: 日本企業が抱えるモノづくりに関する
課題と今後の MOT 教育のあり方 日本 MOT 学会に
よる査読論文(2009-5) 技術と経済 No. 512
2009年5月 pp. 48 - 57
- (8) 藤田喜久雄, 松尾崇宏: 製品開発における手法や
ツールの活用状況の調査と分析 日本機械学会論文
集(C編) 72巻 713号 2006年1月 pp. 290
- 297
- (9) 牧野公一, 澤口 学: 機能の定義の適切用語選択
によるアイデア数向上に関する研究 VE 研究論文
集 Vol. 42 2011年10月 pp. 109 - 121
- (10) 工業デザイン全集編集委員: 設計方法 工業デザ
イン全集第3巻 日本出版サービス 1983年1
月
- (11) Shannon CE: A mathematical theory of
communication The Bell System Technical Journal
Vol. 27 (1948. 10) pp. 379 - 423 & 623 - 656
- (12) Paul-Armand Verhaegen, Dennis Vandevenne, Jef
Peeters and Joost R. Duflo: A variety metric
accounting for unbalanced idea space distributions
Proceedings of the TRIZ Future Conference
(2011. 11) pp. 205 - 214

液化アルゴンタンク（角型メンブレンタンク）の建設報告

Construction Record of Liquid Argon Tank (Prismatic Membrane Tank)

降 駒 導 爵 エネルギー・プラントセクター工務・生産センター建設部 主査
神 谷 英 司 エネルギー・プラントセクタープラントプロジェクトセンターエンジニアリング部
仲 地 唯 渉 エネルギー・プラントセクタープラントプロジェクトセンタープラントプロジェクト統括部 技師長

アメリカのフェルミ国立加速器研究所 (Fermilab) から「 LBNE 35 ton prototype project 」で使用する -189°C の液化アルゴンタンクの設計、調達および建設アドバイザを受注した。この角型液化アルゴンタンクの受注は LNG (液化天然ガス) メンブレンタンクで蓄積された当社のメンブレンシステムが高く評価された結果である。ただし、タンクが角型であること、防液堤なしのタンクに要求されているメンブレンからの万一の漏えい時にコンクリート外槽を常温に保つセカンダリバリアシステムを採用したことが従来の LNG 地下メンブレンタンクに比べて新規な点である。

IHI was awarded a contract to perform EP+SV works from Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) in USA for a prismatic liquid argon storage tank (-189°C), which is to be used as prototype for the LBNE Project. Fermilab decided this contract due to IHI's membrane cryostat technologies from its EPC (Engineering, Procurement, Construction) experience in underground LNG storage tanks. The structure for the prismatic liquid argon storage tanks, however, differs to that of underground membrane LNG storage tanks due to the shape of the argon storage tank being prismatic and the difference in the secondary barrier system used to maintain ambient temperature of the outer concrete tank in case of leakage from the membrane inner tank.

1. 緒 言

Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) プロジェクトは、ニュートリノの特性と、そのほかの高エネルギー素粒子物理現象を計測するための、巨大な液化アルゴン検出器 ($14\,000\text{ m}^3$ のタンク 4 基) にメンブレンタンク技術を使用することを考えている。LBNF プロジェクトは、ここで紹介する Long-Baseline Neutrino Experiment (LBNE) プロジェクトを基にアメリカ以外の国の参加を得て国際プロジェクトへと発展している。

当社はアメリカエネルギー省との契約下で Fermi Research Alliance, LLC によって運営されるフェルミ国立加速器研究所 (Fermi National Accelerator Laboratory : Fermilab) から「 LBNE 35 ton prototype project 」で使用する角型メンブレン式液化アルゴンタンクの業務のうち設計、調達および建設アドバイザの部分を受注した。

Fermilab の LBNE プロジェクトの目的は、① LNG (Liquefied Natural Gas) 用のメンブレンタンクが液化アルゴンタンクとして適用できることの確認 ② タンクからの不純物が除去でき、液化アルゴンの純度を十分に保つシステムの確立 ③ 純度の高い液化アルゴン中にニュートリ

ノを打ち込み発生する電離電子 (Drift electrons) の飛跡検出能力に優れている TPC (Time Projection Chamber) 検出器の試作実験である。なお、要求純度は酸素当量で 200 ppt (200×10^{-12}) 以下である。

設置場所はアメリカイリノイ州バタビア (Fermilab 構内) である (第 1 図) 。



(注) ★ : タンク設置場所イリノイ州バタビア

第 1 図 タンク設置場所
Fig. 1 Construction site

2. タンクの主仕様

タンクの主仕様は以下のとおりである。

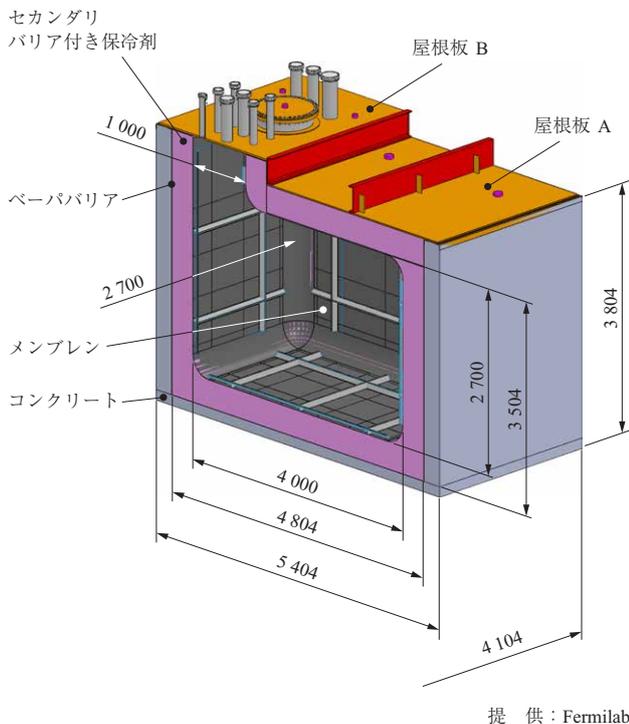
タンク形式	角型メンブレンタンク
内容物	液化アルゴン
容量	28 m ³
寸法	2.7 m (幅) × 2.7 m (高さ) × 4.0 m (長さ)
設計温度	-189℃
設計圧力	20.7 kPaG
液密度	1 393 kg/m ³
主要材料	
メンブレン	SUS304, 板厚 2 mm
保冷材	PUF (硬質ポリウレタンフォーム), 厚さ 400 mm (200 mm × 2 層)
セカンダリバリア	保冷材内の 2 層のガラスクロス樹脂
ペーパーバリア	軟鋼, 板厚 1.2 mm

タンクの概要図を第 2 図に示す。

3. 今回のタンクで新規に採用した技術

3.1 メンブレン

タンク内には液化アルゴンを貯蔵するためのシール材と



第 2 図 タンク概要図 (単位: mm)
Fig. 2 Liquid argon tank configuration (unit: mm)

してステンレス鋼 (SUS304) 製のメンブレン材を設置している。本プロジェクトでは角型タンクのため円筒形の LNG 地下タンクで経験のない直角コーナ部が存在し、その部分にもメンブレンを取り付ける必要があった。基本方針としてできる限り既製品を用いることで対応することにした。直角コーナ部に適した材料である既製品球体を 1/8 に切断し、コーナ部メンブレンを製作して直角コーナ部に採用した。

コーナ部メンブレンにはタンク内に液化アルゴンが入り、低温になった時の熱収縮中心点となるようにメンブレンアンカーをすべてのコーナ部メンブレンに設置した。第 3 図にコーナ部メンブレンを示す。

また、第 2 図に示すように屋根部は屋根板 A および屋根板 B の 2 段になっており、そこには段差があるため屋根板 A と屋根板 B のつなぎ目部分の両端には屋根部コーナメンブレン (通称: ラップコーナメンブレン) が存在することになった。直角コーナ部と同様に既製品の配管エルボの切断片とロール板を突合せ溶接で組み合わせた部材を採用した。第 4 図に屋根部コーナメンブレンを示す。

屋根部コーナメンブレン突合せ溶接継手部の全線には RT (放射線透過試験) および PT (浸透探傷試験) を実施して健全性を確認した。

3.2 保冷材 (PUF) 内のセカンダリバリアシステム

保冷材 (PUF) は厚さ 400 mm に対して工場で製作した PUF パネルを 200 mm × 2 層の構造とした。さらに層間の PUF パネル同士の隙間 (目地部) が上下の PUF パネルで貫通しないように PUF パネルの配置を工夫した。

メンブレンが万一破損した場合、外槽のコンクリートを

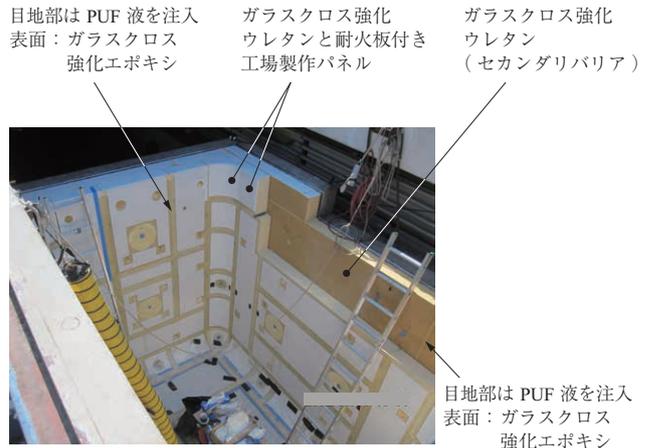
建設中の保護カバー メンブレンアンカー コーナ部メンブレン



第 3 図 コーナ部メンブレン
Fig. 3 Rectangular corner membrane



第4図 屋根部コーナメンブレン
Fig. 4 Corner membrane of roof part



第6図 保冷パネルとセカンダリバリア施工状況
Fig. 6 Insulation panels and secondary barrier work

常温に保ち強度が保持できるように保冷層の中に2層構造(表面と中間)から成るセカンダリバリアを設けている。第5図にセカンダリバリアの概念図を示す。PUFパネル間の目地部にはPUFを注入し、さらに液密構造を構成するために表面にガラスメッシュを貼りつける構造とする。セカンダリバリアの機能はPUFやメンブレンを固定するアンカー廻りにも適用して完全にシールができるようにした。施工状況を第6図に示す。セカンダリバリアが十分に機能することを確認するために、PUFパネルおよびアンカー部のPUF注入部は真空試験を実施して漏えいがないことを確認した。第7図にセカンダリバリアの真空試験状況を示す。

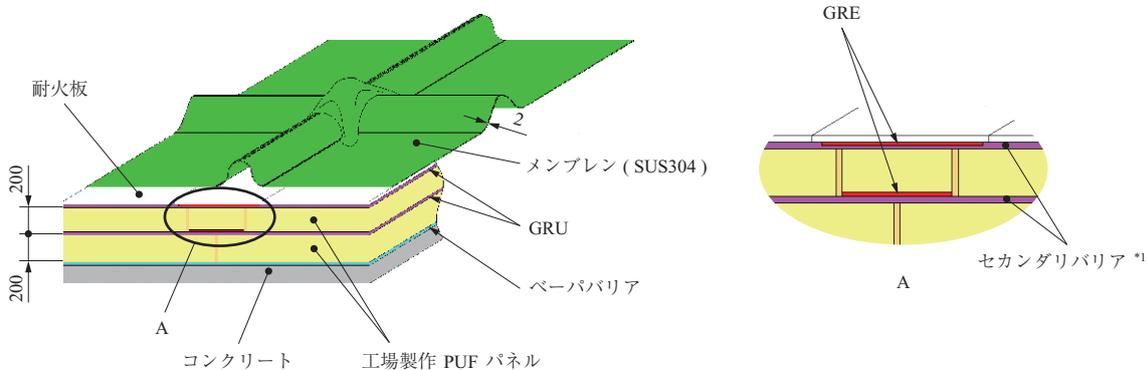
このIHIセカンダリバリアシステムは、ヨーロッパ規格EN14620で規定されている防液堤なしのプレストレストコンクリート(PC)地上LNGメンブレンタンクに使用される方式である。



第7図 セカンダリバリアの真空試験状況
Fig. 7 Vacuum box test applied to the secondary barrier system

3.3 ベーパバリア

外槽のコンクリートは気密性が確保されないため、外部からの湿分の侵入、メンブレン裏面からの外部への気体漏えいを防ぐために機械的にシールする必要があった。そのためコンクリート内面に鋼製のベーパバリア(板厚1.2mm)を全面に設置した。ベーパバリアにはメンブレ



第5図 セカンダリバリアの概念図(単位:mm)
Fig. 5 Concept of secondary barrier system (unit:mm)

(注) GRE: ガラスクロス強化エポキシ
GRU: ガラスクロス強化ウレタン
*1: GRU+GRE 表面および中間層の2層構造

ンと同様の気密性能が要求されているため、溶接継手にはヘリウムリーク試験を適用して気密性が満足できていることを確認した（第8図）。

3.4 モックアップテスト

本プロジェクトは試作用のタンクのため、IHI が現在扱っているタンクとしては非常に小さい容量（28 m³）であった。タンクが小さいため作業スペースが狭く、作業手順を工夫する必要があり事前に底部コーナ、屋根部コーナはメンブレンと PUF パネルに実物を使用したモックアップ試験を日本で実施した後輸出した。現地据付けおよび溶接は Fermilab の研究員によって行われる。その際、彼らにモックアップの実施状況を示すことができたことは非常に有効であった。その結果、無事にタンクを完成することができた（第9図）。



第8図 ヘリウムリーク試験（ベーパーバリア）
Fig. 8 Helium gas leak test of vapor barrier

建設中の保護カバー



第9図 タンク内部（メンブレン溶接後）
Fig. 9 Internal view of tank after welding of membrane

4. プロジェクトスケジュール

2011年にFermilabからLNGメンブレン式地下タンクの技術が液化アルゴンタンクに適用できるかの質問から始まり、2011年8月より本液化アルゴンタンクの具体的な設計を開始した。2012年10月にタンクの機械工事が終了しFermilabへ引き渡された。第10図にプロジェクトスケジュールを示す。

5. Fermilab による試運転および運転結果

2013年12月20～21日、28時間を掛けてタンクのクールダウンが行われ-183℃（-298°F）へ達した後、-184℃（-299°F）に保持された19 m³（5 000 gal（US））の液化アルゴンがタンクへ注入された。Fermilabのプ

項	目	年 月	2011					2012											
			8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	エンジニアリング	・ベーパーバリアモックアップテスト ・屋根部コーナメンブレン ・底部コーナメンブレン試作 ・底部コーナ保冷モックアップテスト	→																
			・図面および計算書	→															
			・建設要領書						→										
			・検査要領書						→										
2	調 達	・メンブレン																	
		・保冷材																	
3	梱 包 & 輸 送																		
4	現 地 工 事 担当：Fermilab IHI：監督指導	・外槽鉄筋コンクリート																	
		・溶接士訓練																	
		・ベーパーバリア																	
		・保 冷																	
	・メンブレン																		

第10図 プロジェクトスケジュール
Fig. 10 Project schedule

— 謝 辞 —

プロジェクトチームはこの一連の作業をとおして液化アルゴンの純度確保、循環および凝縮が順調にできることを確認した。

ついでアルゴン要求純度、酸素当量で 200 ppt (200×10^{-12}) 以下、および要求エレクトロン寿命 1.5 ms 以上に対して、計測純度は酸素当量で約半分の 100 ~ 120 ppt、計測エレクトロン寿命は約 2 倍の 2.5 ~ 3.0 ms となり、“SUCCESS” の e-mail が Fermilab から IHI にもたらされた。Phase 2 のテストプログラムは、宇宙線およびニュートリノの検出装置となる TPC をタンク内へ設置して 2015 年 5 月から始まる。

6. 結 言

将来的には本プロジェクトと同じメンブレン形式の大容量 (14 000 m³) タンク 4 基が計画されている。もし実現して当社が実施することになれば、今回の経験を活かしてさらに発展させていきたい。また、当社の低温タンクの技術が世界的な研究の一部に貢献できるように、今後も技術の向上に努めていきたい。

本タンクの建設に当たり、Fermilab の Mr. David Montanari, Mr. Bruce R. Baller, Mr. Barry L. Norris, Mr. Bob M. Kubinski を含む多くの方々に、また日本国内では明星工業株式会社、日本工業検査株式会社に多大なるご協力をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 丸山和純, 田中雅士: 液体アルゴン飛跡検出器開発研究の現状 高エネルギーニュース Vol. 30 No. 2 2011 年 8 月 pp. 73 - 82
- (2) 永野間淳二: 暗黒物質探索に向けた液体アルゴン TPC 検出器の研究・開発 早稲田大学理工学研究所 ASTE Vol. A18 2011 年
- (3) 平賀 宙, 若林雅樹, 仲地唯渉, 宮崎正治: The challenges with the world's largest 250 000 KL LNG tank LNG 第 16 回国際会議 2010 年 4 月

LM6000 ガスタービンパッケージ組立工期短縮活動

Shortening the Work Period of LM6000 Gas Turbine Package Assembly

鳩 雄一郎 航空宇宙事業本部生産センター呉第二工場 GT 製造グループ
渡 邊 裕 人 航空宇宙事業本部生産センター呉第二工場 GT 製造グループ
安 部 裕 志 エネルギー・プラントセクターエネルギーシステムセンター原動機プロジェクト統括部

LM6000 ガスタービンパッケージの販売拡大を受けて、従来 60 日掛かっていた組立工期を 30 日に短縮する目標を掲げ改善活動を実施した。すなわち、設計、生産管理、生産技術、製造が一体となって、四つの改善活動（部品配膳の仕組みづくり、部品納入のジャスト・イン・タイム、配管・機器の部分組立化、計装配管の事前曲げ）を推進した。この結果、呉第二工場のスペース、作業員、設備の拡充を行うことなく LM6000 ガスタービンパッケージの組立工期 30 日を達成できた。

In order to keep up with the increasing LM6000 gas turbine sales, it was necessary to shorten the fabrication period given the current facilities, workers and equipment in the Kure Aero-Engine & Turbo Machinery Works. As a solution, four methods: preparation manufacturing parts system, Just-In-Time parts delivery, sub-assembly piping and equipment, and pre-formed instrument tubes, were planned and carried out by the Design Dept., the Manufacturing Control/Manufacturing Engineering Dept. and the Manufacturing Dept. to shorten the fabrication period from sixty days to thirty days per LM6000 gas turbine unit. As a result of the four methods implemented in the Kure Aero-Engine & Turbo Machinery Works, the fabrication period was shortened and it became possible to manufacture a LM6000 gas turbine in thirty days.

1. 緒 言

LM6000 ガスタービンパッケージ（以下、GT PKG）の販売拡大を受けて、呉第二工場では生産能力の増強が求められていた（第 1 図）。このため、現状で 60 日を要している GT PKG 組立工期を限られたスペース、人員、設備のままで半分の 30 日にすることを目標に掲げた改善活動（GT30）を 2012 年から開始した。

主な改善活動として、① 部品配膳の仕組みづくり ② 部品納入のジャスト・イン・タイム ③ 配管・機器の部分組立化 ④ 計装配管の事前曲げ、の 4 項目を実施した。ま



第 1 図 LM6000 ガスタービンパッケージ
Fig. 1 LM6000 gas turbine package

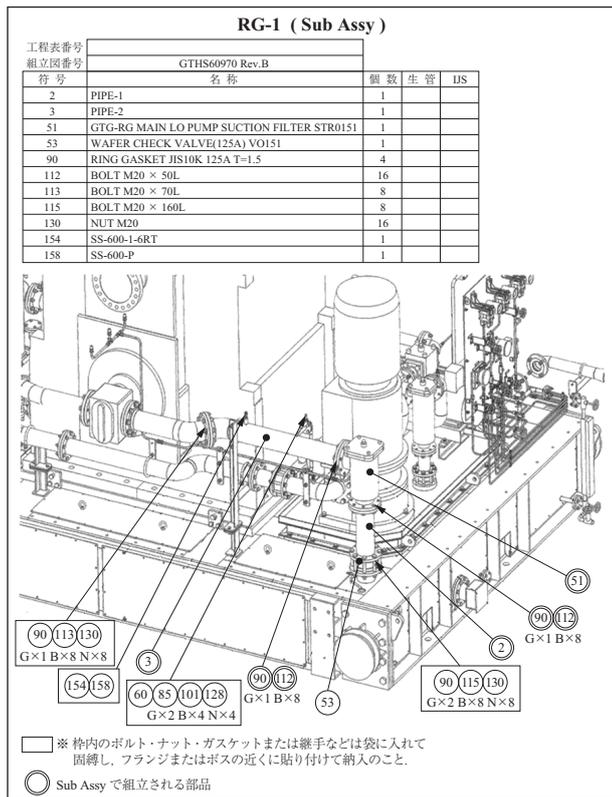
た、本改善活動は設計、生産管理、生産技術、製造、調達、品質保証の各部門が一体となって推進し、並行して工事ごとにおける改善提案フィードバック会議も継続的に行った。本稿では、その活動内容と成果について紹介する。

2. 活動内容

2.1 部品配膳の仕組みづくり

部品配膳とは、部品置き場において組立工程ごとに必要な部品を事前に仕分けおよび識別する段取りのことである。従来はそのような仕組みがなかったため、組立作業者が工程ごとに必要な部品を部品置き場から一つずつ探し出し、すべて揃えてから組立作業を行っていた。このため、部品探しおよび運搬のために多くの時間を費やしていた。そこで、工程ごとに配膳すべき部品のリストおよび組付け場所を図示した配膳リスト（第 2 図）を作成し、配膳する作業者が一目で必要な部品を分かるようにした。このように、組立工程ごとに必要な部品を配膳する仕組みを取り入れたことで、部品探しの時間を大幅に短縮できた。

一方、ボルト・ナット・ガスケットなどの小部品の部品配膳は、数が多くまとめて部品メーカーから納入されるため、仕分けに時間を要した。このため、設計部門が小部品



(注) RG: 減速機

第2図 配膳リスト
Fig. 2 Assembly order list

を手配する際に使用する部品集計表を配膳リストごとに細分化することで、部品供給メーカーが小分けして納入できる仕組みを確立した。これによって部品配膳の作業時間も短縮することができた。

以上の結果、部品探しおよび仕分けの時間が削減され、7日間の組立工期短縮につながった。

2.2 部品納入のジャスト・イン・タイム

従来は、組立開始からGT PKGが出荷されるまでの組立工程が大まかであり、組立開始1か月前にすべての部品を作業エリアへ納入していた。この結果、作業エリアに組立部品があふれ、必要な部品を作業エリア全体から探す必要があった。また、作業工程に必要な部品と不必要な部品が混在していたため、作業者が必要な部品を確認しながらの作業になり時間が多く掛かっていた。

このような状況を改善するため、組立に必要な部品を適切な時期に作業エリアへ納入する仕組みづくりを目指した。まず組立工程を可能な限り細分化し、作業者と十分に確認しながら日単位の組立日程表を作成した。次に1日の作業に必要な部品を洗い出し、配膳リストに反映することで1日分の部品一式を取りそろえること(キット化)を行った。

同時に、部品ごとに入荷してから段取り、作業エリアへの納入日などの情報を日程表に明記した(第1表)。このようにきめ細かく管理することで、組立工程が始まる1日前に必要な部品を確実に準備ができるようになり、部品のジャスト・イン・タイムの実現ができた。

この結果、組立作業者が日程表を参考することで組立工程ごとに必要な工具などを事前準備ができるようになった。このことで3日間の短縮につながった。

第1表 日程表
Table 1 A schedule

工程	内 容	配膳リスト番号	配膳リスト名	日																					
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
				金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金
010	GT マウント事前準備																								
		HL-011	フロントマウント																						
		HL-012	リアマウント																						
020	排気ディフューザ保温工事前準備																								
		HL-021	排気ディフューザ																						
030	吸気スクロール保温工事前準備																								
		HL-031	吸気スクロール																						
	架 台 納 入																								
040	RG 架台タンク内部点検																								
050	吸気スクロール保温工事																								
060	排気ディフューザ保温工事																								
070	架台レベル出し																								
290	GT グレーチング仮搭載																								

(注) ■ : 素材倉庫へ納入
 ■ : 受入検査
 ■ : 部品配膳
 ■ : 現場 Sub Assy

2.3 配管・機器の部分組立化

従来の配管や機器の組立方法は、部品一つずつを本体の機上で組み立てていた。したがって、組み立てる物量の多さから組立時間は全体の6割を占める工程になっていた。そこで、この工程の組立時間を短縮するために、ある範囲の機器・配管類の一部を工場納入前にあらかじめ組み立て（以下、Sub Assy）、工場では Sub Assy として搬入される機器類と本体との取合い配管のみを施工するという組立方法に変更した。第3図に Sub Assy 中の配管の様子を示す。この Sub Assy によって組み付けの時間が短縮され、全体工期を短縮することができた。

この Sub Assy の推進において課題となったのが、組立精度の確認方法と Sub Assy を吊り上げる際に必要な重心位置の算出であった。Sub Assy の寸法確認は、主要寸法の精度を簡単に確認できる寸法ゲージを製作し、これを使用することにした。また、重心位置の算出に関しては、設計部門と協力した。すなわち、GT PKG は三次元 CAD によってフルモデル化されており、Sub Assy の範囲やゲージの形状および基準点となるデータを用いることで、迅速にかつ精度良く自動的に算出が可能になった。

現在、Sub Assy 化は全体の80%まで適用が進んでいる。この結果、本体の機上で一つずつ配管の組み付けを行っていた従来方法よりも、10日間の工期短縮につながった。

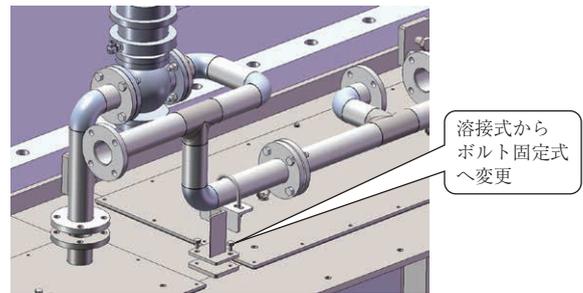
なお、今後は Sub Assy に組み込まれた機器据付けの支持部品（以下、サポート）を溶接式から取付座にボルトなどで固定する分割構造に設計変更することで、サポートごとの Sub Assy を可能にし、組立時間のさらなる削減を図る予定である（第4図）。

2.4 計装配管の事前曲げ

従来の GT PKG 内の計装配管施工では、大まかなルートのみが示された図面を基にして、作業員自身が実際の



第3図 配管 Sub Assy
Fig. 3 Piping subassembly



第4図 ボルト固定式サポート
Fig. 4 Bolted support

ルートを考えて長さや曲げ半径などを実測し、その実測データに合わせて作業エリアで計装配管の曲げ加工をして組み付けていた。また、計装配管と取り合う機器などの製作公差によって、取合位置を現物に合わせて調整する必要があり、時間を要する作業になっていた。さらに、作業員によって施工方法に差があり品質のばらつく課題があった。

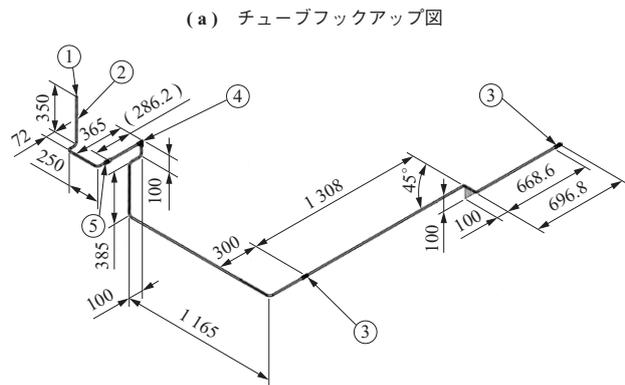
この作業時間の短縮や品質向上のため、計装配管の事前曲げに取り組んだ。すなわち、すべての計装配管を図面展開し、事前に曲げた計装配管を工場へ搬入することで、作業員は取合部分の微調整をするだけで組み付けができるようになった。

ここでも Sub Assy 化の取組みと同様に三次元 CAD モデルが有効となった。二次元図面では、計装配管のような複雑な形状の設計検討に時間を要していた。また、類似形状の計装配管も多く、取付位置を分かりやすく図面化することも困難であった。一方、三次元 CAD モデルを用いた場合、容易かつ短時間に設計が可能であり、干渉チェックも容易である。また、取付位置も一目瞭然となり、必要な継手類の個数の管理も容易になった。第5図に計装配管の三次元モデルを示す。

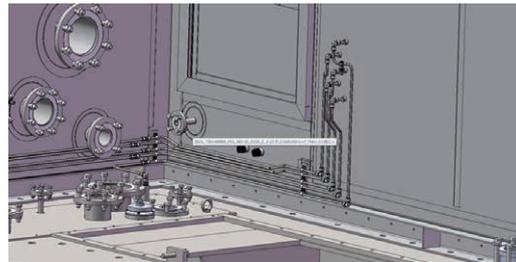
これらの活動の結果、計装配管の品質問題を解決することができ、かつ実際の機器と製作物に合わせて一本一本曲げ加工した方法よりも6日間の工期短縮につながった。

2.5 改善提案フィードバック会議

数々の工事案件を計画どおりに進めていくうえで問題となっていたのが、工場に搬入される配管や機器の品質不適合である。不適合が発生すると状況の伝達、対応の決定、改造指示および追加購入といった複雑なプロセスを踏む必要があり、工程の遅れの要因となる。この不適合を低減させるため、再発防止に向けて、組立終了後に工事案件ごとに不適合状況と改善提案をまとめた写真付リストを回覧していた。第6図に改善リストを示す。



(b) 三次元モデル図



第 5 図 三次元モデルの計装配管 (単位: mm)
Fig. 5 3D model of an instrumentation tube (unit: mm)

改-1 減速機吊部の幅を広くしてほしい。

ワイヤが入ったものの、取り外す際に困難であった。

ワイヤ掛け部分は返しは必要ないため、最初からなくて問題ない。

写真と事象を合わせて記載

改-2 溶接ノック部分の塗装はしないで納入してほしい。

溶接ノック部分は、塗装を削って溶接するため、塗装をはがす時間を削減するため最初から溶接ノック部分は塗装なしが良い。

第 6 図 改善リスト
Fig. 6 Kaizen list

しかし、リストで伝える情報には限度があり、読み手の解釈によって誤解が生じるなど、なかなか不適合を減らせずにいた。

そこで、GT PKG の出荷後まず工場生産管理、生産技術、製造、品質管理、関係会社が集まり、組立中に発生した不適合の分析と改善提案の意見交換を行い、それを踏まえたうえで上流部門である設計、調達、品質管理の部門とフィードバック会議を行い、不適合発生の原因と工場の要望を詳細に伝えることにした。

この会議によって、各部門が活動の詳細を理解してアクションを明確にすることができた。

また、工場からの改善提案を設計が積極的に検討し、標準図面に反映するなどの改善の PDCA (Plan・Do・Check・Action) サイクルが早く回るようになり、さらなる不適合低減のブラッシュアップができた。

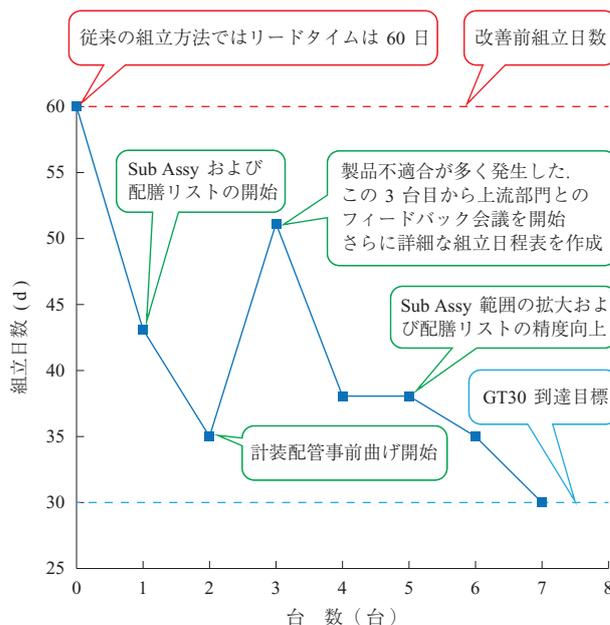
これらの取組みによって、組立現場での不適合対応件数が 55% 削減され、不適合発生による工事の作業待ち期間を 4 日間削減できた。

3. 結 果

前項の改善を順次進めることによって、改善前は 60 日要していた GT PKG の組立工期を 7 台目で、目標の 30 日まで短縮することに成功した (第 7 図) 。

目標を達成できた要因を、以下にまとめる。

(1) 目標達成のためには、どこに手をあてなければい



第 7 図 LM6000 ガスタービンパッケージ組立工期を 60 日から 30 日に短縮

Fig. 7 Shortening the LM6000 gas turbine package fabrication period from sixty days to thirty days

けないか明確にし、その実現のための PDCA を回し続けた継続的な改善活動にしたこと。

- (2) 製造現場だけでなく、設計、調達、品質保証などが一体となって改善活動を実施したこと。
- (3) それぞれの改善活動に上流部門である設計部門も参加することで、組立から出荷までの一連の流れを効率的にする視点での工期短縮に有効な改善ができたこと。

4. 今後の課題

本改善活動 (GT30) によって、組立工期 30 日を達成することができたが、改善活動に終わりはなく、さらなる工期短縮に向けて引き続き活動に取り組んでいる。今後の課題としては、事前準備も含め 3 日から 7 日の日数を要している下記の課題に対して工程短縮に注力する所存である。

(1) 現合配管

大型構造物同士に配管を組み付ける際、公差の影響で取合いにずれが生じる。そのような部分の配管

にはすでに点溶接がされており調整が終わった後、本溶接に出される。本溶接とその後の工程 (酸洗い、検査など) で多くの時間を要している。

(2) 機器類の芯出し

芯出しには構造物のレベル出しから始まり、仮芯出し、本芯出しと続いていく。いずれも機器を組み立てる際の重要な作業であるが、事前準備、作業に多くの時間を要している。

(3) フラッシング

フラッシングは、配管などを組み付けた後、配管内を洗浄する作業である。この作業を実施するのに潤滑油の補充からジグの取り付けと、段取りに多くの時間を要している。

— 謝 辞 —

本活動に当たっては、ご協力いただいた LM6000 新規製作工事関係者ならびに GT30 を達成するために意見や知恵を出していただいた関係各位に対して、ここに記し、深く感謝の意を表します。

道路インフラ老朽化の現状と今後の取組み

— 首都高速八重洲線汐留高架橋の架替工事を踏まえて —

Our Initiatives for the Future and Current State of Road Infrastructure Aging

— Based on Shiodome Viaduct Reconstruction Project for the Yaesu Route of the Metropolitan Expressway —

宮 田 明 株式会社 IHI インフラシステム 都市高速部 部長

道路は、生活や経済活動に不可欠で基本的な社会インフラとして大きな役割を果たしている。そのうち、高度成長期に大量建設された道路橋は、現在、平均経過年数が44年と高齢化を迎えており、対策として予防保全が重要であることは言われて久しい。加えて、2013年12月に起こった笹子トンネルの天井板崩落事故は、老朽化インフラに対する取組み方に大きな課題を提起し、社会的な関心も急速に高まっている。本稿では、道路インフラの現状と動向、高速道路の更新計画、そして当社が施工した首都高速八重洲線汐留高架橋の架替工事を紹介しつつ、今後のメンテナンス事業に対する当社の取組みについて述べる。

Roads play a major role as a basic, indispensable social infrastructure for daily life and economic activities. Many of the large number of highway bridges that were constructed during the high economic growth period are over 44 years old on average, and for many years now it has been said that preventive maintenance is important as a countermeasure against this aging. Furthermore, the ceiling collapse accident in Sasago tunnel that occurred in December 2013 posed significant challenges terms of how to handle superannuated infrastructure, and social interest is also growing rapidly. In this article, we describe the current state and trends in road infrastructure, renewal plans for highways, and then introduce the Shiodome Viaduct reconstruction project for the Yaesu Route of the Metropolitan Expressway, and finally describe our approach to the future of maintenance business.

1. 道路インフラの現状と動向

2013年「メンテナンス元年」に続き、2014年には「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」が発表された。その内容は「最後の警告 - 今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れ - 」と題し、笹子トンネル（山梨県）事故を教訓とし、“荒廃するニッポン”が始まる前に、一刻も早く本格的なメンテナンス体制を構築しなければならないと警告している⁽¹⁾。

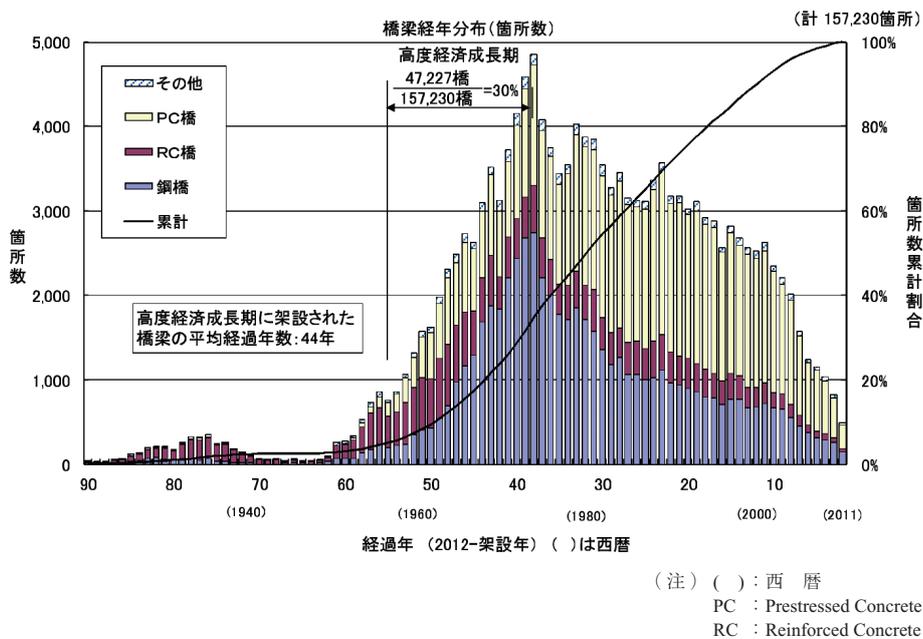
現在、道路橋は全国に約70万橋（橋長2m以上）存在し、そのうち約7割（約50万橋）が市町村道であり、その大部分は地方公共団体が管理している。この地方公共団体が管理する橋梁では、老朽化の進行などによって通行止めや通行規制をしている橋梁数（約2100か所）が近年急増している。また、橋長15m以上の約16万橋のうち、建設後40年以上が約30%、30年以上が約60%と、急速に高齢化が進んでいる。第1図に道路橋ストックの現状を示す⁽²⁾。

これを受けて、メンテナンスサイクルの確定（道路管理者の義務の明確化）とそれを回す仕組みの構築に向けた取組みが進められている。2014年7月には、定期点検

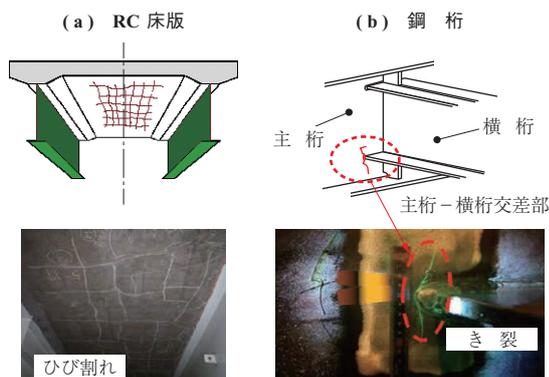
に関する省令・告示が施行され、すべての橋梁に対して5年に1度の近接目視による点検、その診断結果を4段階区分に分類することが義務化された。地方公共団体における予算・人・技術力の不足が大きな課題で、「道路メンテナンス会議」の設置がその取組みの一つである。

2. 高速道路の更新計画

道路橋70万橋の約2%は、高速道路会社が管理する橋である。特に、2012年に開通50周年を迎えた首都高速道路は、重交通や維持管理上の課題をもつ構造の存在など過酷な使用環境のもと、老朽化が進んでいる。総延長約300kmのうち、経過年数50年以上が全体の約4%、10年後には約30%まで増大する。1日当たり平均利用交通量は約100万台、大型車交通量は東京23区一般道の約5倍と、構造物（全路線の高架橋が占める割合は約80%）にとって過酷な使用環境にさらされている。その結果、RC（Reinforced Concrete）床版のひび割れ、鋼床版や鋼桁の疲労損傷が増加の一途をたどっており、現在も点検・補修を継続しているが、今後さらによりきめ細かな維持管理が必要となっている。第2図にRC床版と鋼桁の損傷例を示す。



第 1 図 道路橋ストックの現状⁽²⁾
Fig. 1 Current state of highway bridge stock⁽²⁾



第 2 図 RC 床版と鋼桁の損傷例
Fig. 2 Damage of RC slab & steel girder

この状況を踏まえ、高速道路各社（首都高速道路、阪神高速道路、東・中・西日本高速道路）は、今後の更新計画（大規模更新・大規模修繕）を発表している。首都高速道路においては、維持管理が困難かつ更新が効率的・効果的な箇所を大規模更新（橋桁の架け替え、床版の取り替えなど）とし延長約 8 km、事業費約 3 800 億円を、それ以外は大規模修繕（構造物全体の大規模な補修）とし対象延長約 55 km、事業費約 2 500 億円を見込み、東品川栈橋・鮫洲埋立部の大規模更新を皮切りに 2014 年度から事業に着手している⁽³⁾。

東京では、5 年後の 2020 年の東京五輪に向けて、この首都高速道路の更新計画や東京都の長寿命化工事、五輪関連の建設工事など、今後急ピッチで進められることからその対応が急務である。

3. 首都高速八重洲線汐留高架橋の架替工事

当社で施工した汐留高架橋は、首都高速道路では初となる、高速道路本線の一部を架け替える大規模な改築工事である。今後の大規模更新の先駆けとなる本工事の概要を以下に報告する。

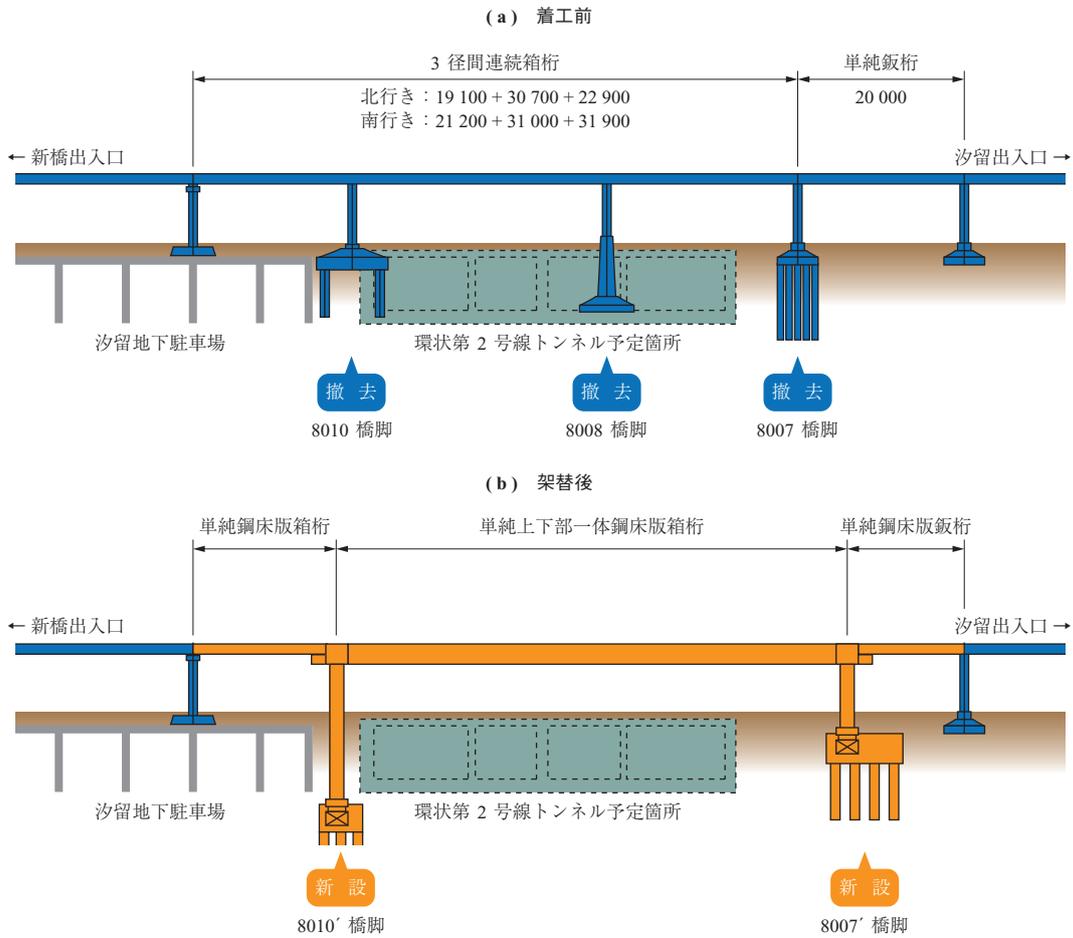
3.1 工事概要

第 3 図に工事概要を示す。首都高速八重洲線（以下、八重洲線）は、東京都の東京都市計画事業である東京都市計画道路環状第 2 号線（以下、環状 2 号）の整備に伴い、地下トンネル形式で計画された環状 2 号と干渉する一部区間（汐留高架橋）の架け替えが必要となった。第 4 図に工事位置を示し、工事概要を以下に示す。

工事名	(負) 高速八重洲線架替上部・橋脚工事
発注者	首都高速道路株式会社
工事場所	東京都中央区銀座八丁目ほか
工期	2011 年 3 月 29 日～2014 年 3 月 22 日

3.2 設計概要

汐留高架橋の架替方針を検討するに当たり、既設上部工利用案（新設橋脚と基礎はトンネルと一体化）と架け替え案の比較を行った結果、周辺街路への影響（交通規制期間）、経済性などの観点から架け替え案を採用した。新設する橋脚は、環状 2 号トンネルに影響を与えないようトンネルと完全分離し、既設構造物（汐留トンネル、汐留駐車場、雨水渠）と位置関係に留意して位置を決定し



第3図 工事概要 (単位: mm)

Fig. 3 Outline of reconstruction project (unit: mm)



第4図 工事位置

Fig. 4 Location of reconstruction project

た。その結果、新設橋梁は交差点をまたぐセンタースパンが長い径間割りとなった。その不等径間割りおよび下部工への負担を考慮し、新設橋梁は中央に上下部一体の単純鋼

床版箱桁、その両側は上下部分離の単純鋼床版桁（新橋側：箱桁、汐留側：鈑桁）とする構造形式とした（第3図-(b)）。

本橋は交通量の多い汐先橋交差点上に位置するため、供用後の維持管理と景観性に配慮し、主桁間および橋脚部（支承周辺）に常設の点検用歩廊を設置した。

また、耐久性向上の観点から、鋼床版の疲労損傷が発生しやすい部位には溶接の仕上げを、腐食環境の悪い桁端部に塗装の増し塗りや防じんカバー・ボルトキャップの設置などを実施している。

3.3 現場施工の概要と特徴

本工事の現場施工では、限られた施工スペースと時間の制約のなかで、要求性能と品質、安全を確保したうえで、八重洲線の通行止め期間を短くするための工期短縮、そして交通量の多い汐先橋交差点の通行止め回数削減が大きな課題であった。この課題を踏まえて、以下に施工概要を述べる。

3.3.1 既設橋桁の撤去

汐先橋交差点上に位置する3径間連続箱桁の中央径間は、通行止め回数削減、施工スペースと通行止め時間（5時間）の制約、安全性と周辺への影響を考慮し、多軸台車を用いた一夜間一括撤去を採用した。第5図に既設桁の撤去方法を示す。

中央径間の撤去桁（質量約250t、部材長26m）は、事前にセッティングビームで仮受けし、ガス切断しながら仮設添接板で結合した。仮設添接板は万一のセッティングビーム脱落に対する安全対策と、ガス切断時における急激な桁の内部応力の解放を抑える役割を果たした。施工当夜

は、事前のシミュレーションとリスク対策、当夜の確実な施工によって、通行止め時間内に施工を完了させた。

3.3.2 新設橋桁の架設

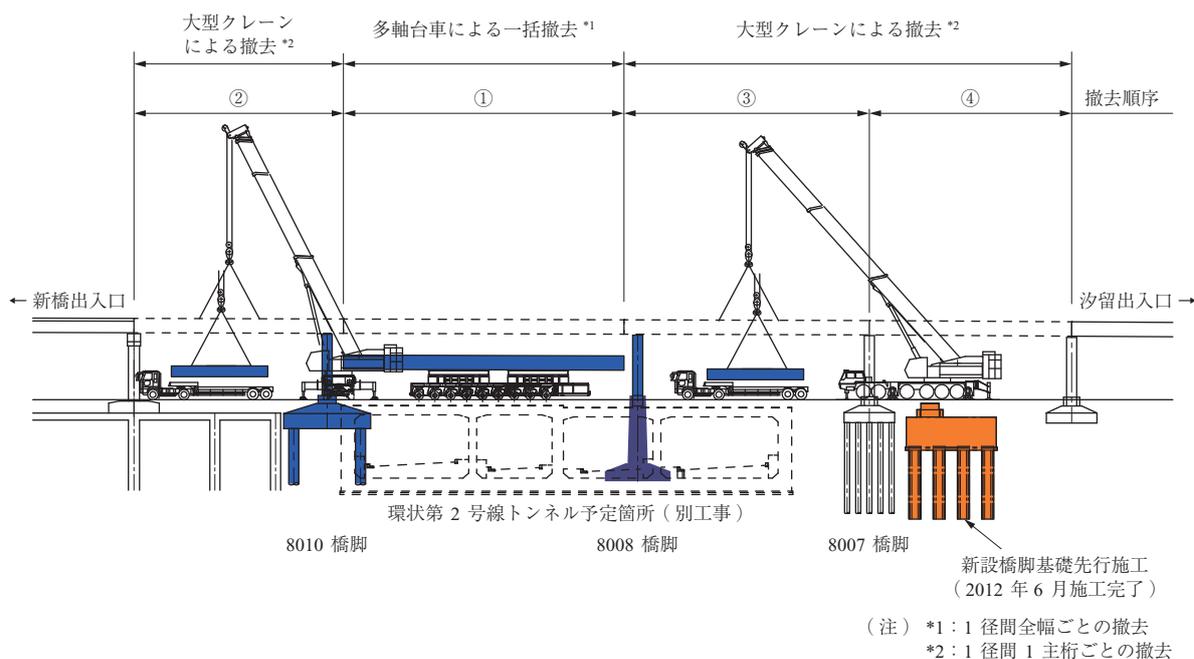
既設桁の撤去と同様に、工期短縮と通行止め回数削減を目的に交差点上の中央径間は、多軸台車と吊上げ設備による大ブロック一括架設を採用した。第6図に架設概要を、第7図に多軸台車による桁受替え状況を示す。

北行・南行ブロックを現場ヤード内で同時地組立を実施することによって、地組立・溶接・塗装作業を並行して工程短縮を図った。この際、多軸台車を地組架台とすることで、限られたヤード内での同時地組立を実現し、かつ地組立後の多軸台車への盛替え作業時間も削減した。第8図に桁地組立を示す。

第6図に示すステップ1の大ブロック架設では、地組立ブロックを多軸台車で架設地点まで運搬し、門型吊上げ式ベントによって吊り上げる工法を選定した。第9図に門型吊上げ式ベントによる架設状況を示す。

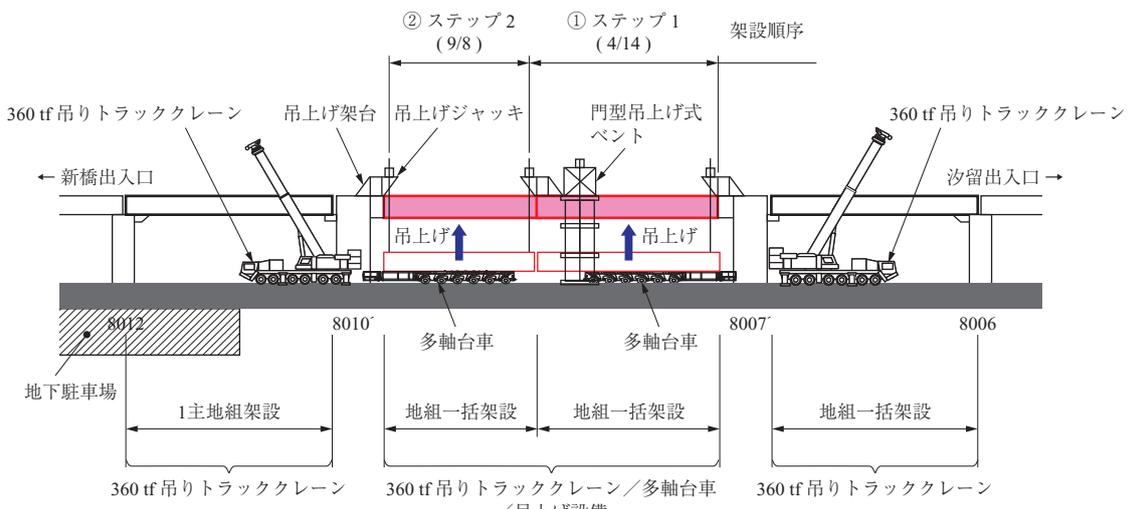
桁の吊上げには連続的に吊上げ可能なダブルツイングジャッキを用いることによって、スピーディーな架設を実現した。

また、桁を橋脚横梁や門型吊上げ式ベントから吊ることによって、桁下空間に仮設備が不要で、高架下道路の建築限界を確保した。門型吊上げ式ベント（第10図）には、剛性が高い汎用型組立橋梁（トライアス）を用いることで吊上げ時の変形を抑えて架設精度の向上を図った。次の



第5図 既設桁の撤去方法
Fig.5 Girder removal method

(注) *1: 1径間全幅ごとの撤去
*2: 1径間1主桁ごとの撤去



第 6 図 架設概要
Fig. 6 Outline of girder erection



第 7 図 多軸台車による桁受替え状況
Fig. 7 Girder replacement by transporter



第 9 図 門型吊上げ式ベントによる架設状況
Fig. 9 Erection by portal lifting support

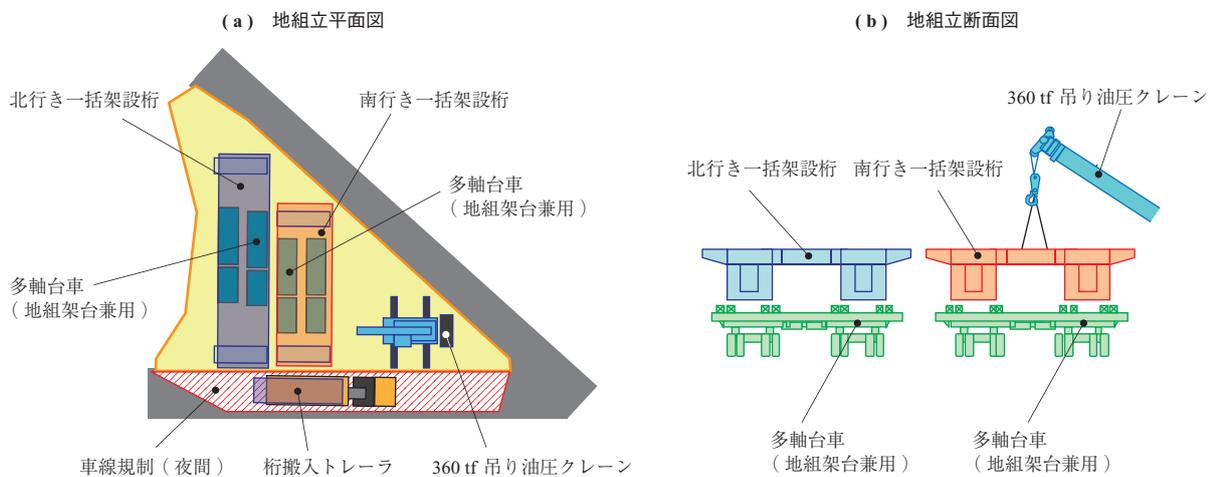
ステップ 2 (第 6 図参照) の架設を行うまでの約 5 か月間、この門型吊上げ式ベントで鋼桁を支持した。

ステップ 2 でもステップ 1 と同様の工法を採用し、架設済みの橋脚と桁の間に大ブロックを吊り上げ (第 11

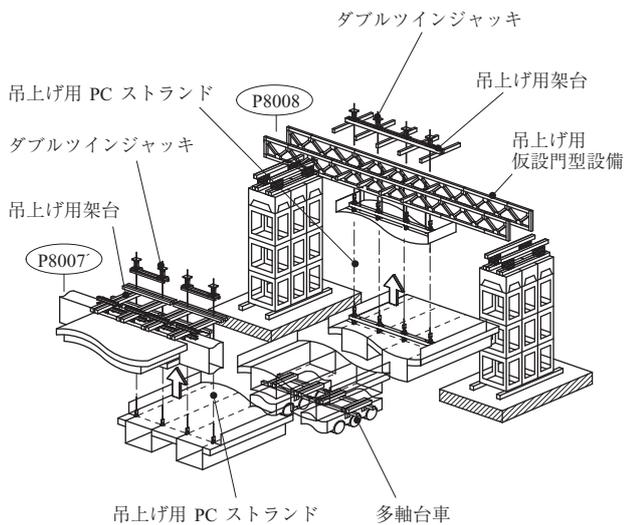
図), 事前に設置しておいた調整ジグを用いて、無事、規制時間内に閉合を終えた。

3.4 本工事の成果

汐留高架橋の架替工事について紹介した。本工事は、大動脈である八重洲線を 20 か月間 (当初) という長期に



第 8 図 桁地組立
Fig. 8 Yard assembly of girder



第 10 図 門型吊上げ式ベント
Fig. 10 Portal lifting support

わたり通行止めを行い、施工するため、その期間を短縮することが最重要課題であった。今回、大ブロックによる一括撤去・架設の採用や、発注者および関係協議先のご協力、上部工・下部工間の緻密な連携などによって、当初に対して 2.5 か月短縮し、八重洲線通行止め期間を 17.5 か月間で解除することができた。架替後の全景を第 12 図に示す。

上述した工事の業績が評価され、この汐留高架橋は、2014 年度の土木学会田中賞作品部門を受賞した。2013 年を「メンテナンス元年」とした社会情勢の機運を受け、改築工事として初めての受賞となった。

なお、田中賞とは、1966 年に社団法人（現、公益社団法人）土木学会に発足した、橋梁・鋼構造工学で優秀な業績に対して授与される極めて名誉ある賞で、研究業績部門、論文部門、作品部門の三つの部門がある。その由来は、帝都復興院初代橋梁課長として、隅田川に架かる「永代橋」や「清洲橋」といった数々の名橋を生み出した、



第 12 図 架替後の全景
Fig. 12 General view after reconstruction

田中豊博士にちなむ。

4. 今後の取組み

道路インフラの高齢化が急速に進んでいるなか、この老朽化対策の早期対応が望まれている。その対応には費用（ライフサイクルコストの低減、予算の圧縮）、人（技術者、技能者）、技術力（技術開発）と、三つの大きな課題がある。限りある予算、限られた人材で効率・効果的に対応していくには、技術力が必要不可欠である。

ここで紹介した汐留高架橋の架替工事では、八重洲線通行止めの早期解除のため、施工法などの工夫によって工期短縮を実現した。既設橋梁の点検や修繕を行う場合、関連道路を通行止めや交通規制しながらの施工となるため、この期間が長くなると、交通渋滞や騒音・振動など建設公害の発生など、周辺環境や経済活動への影響が増大する。また、早期に点検し早期に補修・補強することは、利用者や周辺住民にとっての早期安全・安心につながる。したがって、この老朽化対策にはスピードが求められており、工期短縮が可能な製品や工法などの技術開発が必要不可欠である。

これらの技術開発や修繕工事を遂行できる人材もまた必



第 11 図 閉合ブロックの一括吊上げ架設
Fig. 11 Lifting erection of closing large block

要である。修繕工事は、既設構造物の建設時の状況、使用材料や環境を把握し、そのうえで厳しい制約条件下で対応しなければならないことから、工学的見地に基づく高度な知恵や工夫を必要とし、高い技術力とマネジメント力をもった人材が欠かせない。

また、既設構造物の補強や改造、拡張などは、既設構造物の形状・寸法を適切に新設部材に反映して製作し、限られた時間・施工スペースのなかで、狭い空間を運搬し昼夜問わず施工していかなければならないため、より現場に密着したものづくりが求められる。

当社は今日までの豊富な実績と経験に裏付けされた高い技術力を結集し、今後さらなる技術開発と人材育成などの研鑽^{さん}に努め、IHI グループを挙げてインフラ老朽化に対する取組みを強化し、技術力と総合力をもって社会の安全・安心に貢献していきたい。

— 謝 辞 —

首都高速八重洲線汐留高架橋の架替工事の設計・施工に当たり、ご指導およびご協力をいただいた首都高速道路株式会社をはじめとする関係各所に深く感謝の意を表しま

す。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言 社会資本整備審議会道路分科会 2014年4月 pp.1 - 12
- (2) 国土交通省：平成23年度道路構造物に関する基本データ集 国土技術政策総合研究所資料 第693号 2012年9月
- (3) 首都高速道路株式会社：首都高速道路の更新計画について 国土幹線道路部会資料 2014年6月 pp.1 - 15
- (4) 岡崎健一，柿沼康浩：門形吊上げ式ベントを用いた大ブロッカー一括架設による架替え工事が完了 — 首都高速八重洲線架替え工事 — 橋梁と基礎 2014年2月 pp.62 - 63
- (5) 岡崎健一，新津武史，柿沼康浩：大都市街路交差点上の橋梁架替工事における工期短縮のための工夫 第69回土木学会年次学術講演会 2014年9月 pp.511 - 512

大径管全姿勢自動 TIG 溶接の開発と適用

Development and Application of All Position Automatic TIG Welding to Boiler Piping

横山 成就	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部
小林 亮	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部
金光 秀起	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部
佐々木 拓也	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部 課長
小林 和行	技術開発本部生産技術センター溶接技術部

発電用火力ボイラ大径管の溶接施工は、近年の蒸気条件の高温・高圧化を背景に素材の厚肉化・高級化が進んでおり、従来と同様に製作納期短縮のニーズがある。このような情勢に伴い、溶接施工にはより高い品質・効率が求められる傾向にある。しかし、熟練した被覆アーク溶接士の確保が世代交代によって難しくなっており、その育成には長期間にわたる訓練と経験が必要である。そこで、自動溶接施工技術を開発することによって、安定した品質と工期短縮を実現するとともに熟練工依存からの脱却を図る。本稿ではその開発経緯と実機への適用状況について述べる。

Boiler piping materials have to be thicker and of higher grades because of the increasingly intense steam conditions. And as is often the case, short delivery times are required. This means that welding procedures must be of higher quality and efficiency than ever before. However, it is becoming hard to keep a workforce of skilled shielded metal arc welders as the current generation ages and the next generation yet lacks the necessary skills because long term training and experience is needed to cultivate skilled welders. Therefore, to achieve stable quality and shorter delivery times as well as break away from this dependence on skilled welders, IHI is developing automatic welding technology. This paper describes the development trends and applications to real plant piping.

1. 緒 言

発電用火力ボイラにおける大径管は、近年のプラント蒸気条件の高温・高圧化によって素材の厚肉化・高級化の傾向にある。このような素材を用いた溶接施工では基本ニーズである納期短縮という命題とともに、高い品質が求められる。

大径管の溶接施工は、管を回転させて下向きで施工するサブマージアーク溶接 (SAW) が主に適用されている。この溶接方法は高電流による効率的な施工が可能であるが、フラックスを用いるため溶接姿勢は下向きに限定される。一方、ブロック化に伴い管の回転が不可能な場合は被覆アーク溶接 (SMAW) による全姿勢溶接を実施している。なお、この溶接方法において高品質の溶接継手製作を実現するためには、熟練工による施工が求められる。しかし、近年の世代交代によってその確保が難しくなっており、育成に当たっては長期間の施工訓練と継続的な施工実績が必要である。

この熟練工依存からの脱却を図り、高品質な溶接製品を安定供給し、かつ効率化を図るために自動溶接施工技術の

開発を進めた。自動溶接施工技術の開発に当たっての溶接方式の選定としては、先述の SAW のほかにガスメタルアーク溶接 (GMAW) も選択肢として挙げられるが、溶接スパッタやスラグの処理が発生する。開発の方針として連続溶接・自動化を目指すため、溶接方式は TIG 溶接を採用した。本稿ではその開発経緯と実機への適用状況について述べる。

2. 開発課題

全姿勢自動 TIG 溶接は当社相生工場における自動溶接継手 (初層自動 TIG 溶接 + 残層 SAW 溶接) において多数の施工実績をもっているが、全層での自動 TIG 溶接を実現するに当たり、課題である項目を以下に示す。

2.1 開発コンセプト

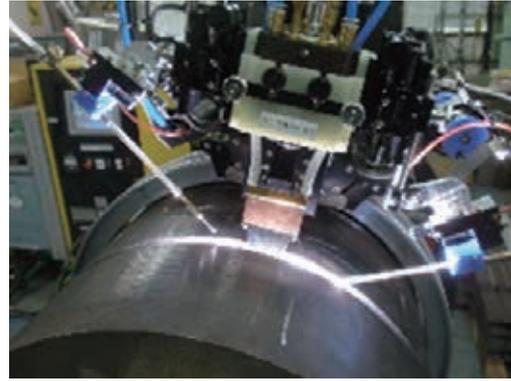
(1) 装置開発

素材の厚肉化・狭開先化に対応するため、トーチの小型化、シールド性を確保するためのノズル形状とする装置を開発した。全姿勢自動 TIG 溶接機の開発前後の外観を第 1 図 - (a) および - (b) に示す。

(a) 従来の装置



(b) 新規開発の装置



第 1 図 全姿勢自動 TIG 溶接機
Fig. 1 All position automatic TIG welding machine

(2) 電極回転方式の採用

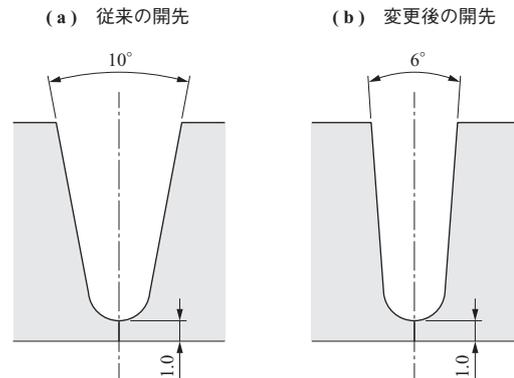
狭開先の溶接を実現するために電極先端を斜めに切り落とした形状の斜切電極を採用した。斜切電極は電極中心軸からのアーク偏芯を可能にし、先端を壁面に向けることで狭開先に対する安定した壁面溶融が容易になり、融合不良を低減できる。また、電極回転方式にオシレーション（溶接トーチを溶接の進行方向に対してほぼ直角に交互に動かす手溶接の手動運棒を模写し、軽便な機械装置によって運棒を行わせること）機構を付与することで広い開先幅においても 1 層多パス溶接から 1 層単パス溶接を可能にした。斜切電極の電極回転方式の概要を第 2 図に示す。

2.2 工期短縮

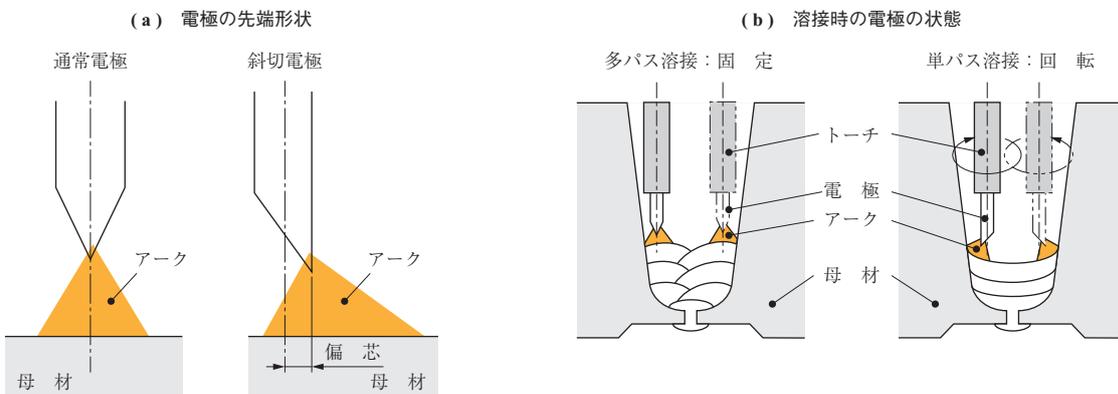
TIG 溶接は全姿勢への適用が可能で溶接スパッタやスラグの処理が不要であるため、連続溶接・放置化に適した溶接方法であるが、ほかの溶接方法と比較して溶着効率が低い。このため、工期の短縮を目指して以下に示す検討を行った。

(1) 狭開先化

溶接領域そのものを削減するため、開先形状の狭開先化を図り、開先角度を従来の 10 度から 6 度への変更を検討した。開先形状の狭開先化比較図を第 3 図に示す。厚さ 150 mm の周継手を想定した場合、この狭開先化によって 78% 程度の断面積削減が見込まれる。



第 3 図 開先形状の狭開先化比較図（単位：mm）
Fig. 3 Schematic diagram of narrow bevel (unit: mm)



第 2 図 斜切電極の電極回転方式
Fig. 2 Schematic diagram of diagonal cutting electrode

(2) 溶接作業効率の向上

従来の自動 TIG 溶接は配管の下側から左右に振り分けた上進 2 分割溶接で施工していた。これは溶着速度が大きい上進溶接を選択したための施工方法である。しかし、振分けを変更するため、装置の引き戻しと次パスの溶接狙い位置のセッティング作業が半周ごとに発生する。これを簡略化して溶接作業効率の向上を図るため、全姿勢で均一に溶接金属が積層可能な適正溶接を確立して往復での施工を可能にする。

第 4 図に見直し前後の溶接施工シーケンス比較図を示す。このシーケンスの見直しによって、溶接作業効率は 30%程度向上することが見込まれる。

2.3 自動化

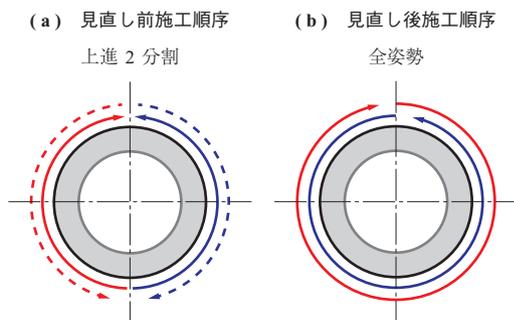
溶接施工時は積層中の状況変化を確認して条件を修正する、あるいは狙い位置を変更するという技量に依存した状況判断をする必要がある。また、厚肉・狭開先となった場合、溶接状況の視認が困難になる。溶接士の技量によらず品質の安定化を図るため、以下の検討を実施した。

(1) CCD カメラによるモニタリング

溶接作業では欠陥の発生を防止するため、アークの状況をオペレータが確認することで適切な溶接が施工されているかを判断している。しかし、厚板狭開先の全姿勢溶接におけるこの施工確認はオペレータの負担が大きいため、CCD カメラを導入し、溶接のモニタリング負荷を低減させて一人で複数台の同時施工の実現を図った。

(2) 開先倣い機構の開発

溶接施工では積層を重ねるごとに開先幅が少しずつ広がるため、従来技術では積層ごとに振幅の設定が必要であった。このため、電極が開先壁面を検知するまで移動する開先倣い機構の開発によって、振



第 4 図 溶接施工シーケンス比較図
Fig. 4 Comparison of welding sequences

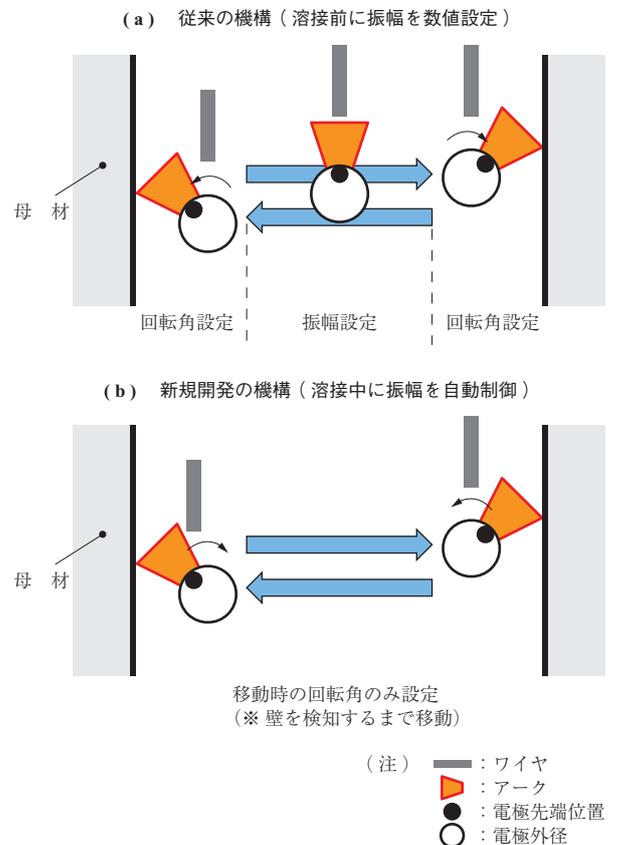
幅設定の省略を図った。開先倣い機構の概念図を第 5 図に示す。

(3) ワイヤ送給位置制御機構の開発

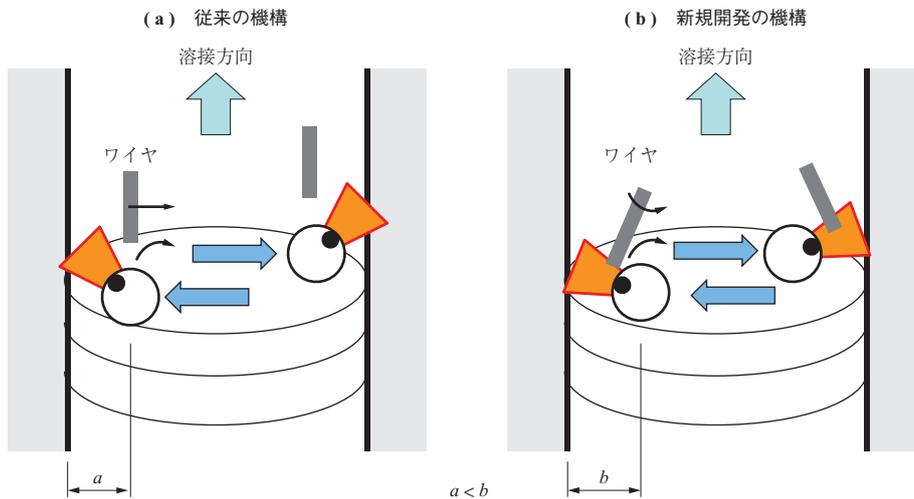
従来技術では電極回転によってアークが偏向しても、開先倣い機構による開先壁面の検出性とワイヤ供給性を両立するためには電極の回転角度は 30 度程度としていた。また、開先壁面とノズルの干渉を避けるため、タングステン電極突出し長さを 30 mm 程度確保していた。

開先壁面の検出性をより安定させるためには電極回転角度を大きくし、溶接時のシールド性を向上させるためには、タングステン電極突出し長さを短くする必要があった。

この課題を解決するため、ワイヤ送給位置を電極中心から角度を付けて制御する機構を開発した。ワイヤ送給位置制御機構の概念図を第 6 図に示す。これによって電極回転は角度 90 度でもワイヤの安定送給が可能になり、タングステン電極の突出し長さは溶接姿勢が変化する全姿勢溶接においても、外乱に強く、良好なシールド性能を確保できる 15 mm への短化を実現した。



第 5 図 開先倣い機構の概念図
Fig. 5 Schematic diagram of groove following system



第 6 図 ワイヤ送給位置制御機構の概念図
Fig. 6 Schematic diagram of welding wire feed system

3. 試験内容および結果

3.1 開先做い機構の検証試験

狭開先に対する開先做い機構の実機適用性評価として、9Cr 系配管を用いた施工性検証試験を実施した。溶接試験状況を第 7 図に、溶接施工選定条件を第 1 表に示す。全姿勢において開先做い機構は有効に機能し、ほぼ放置した状態で溶接施工が可能であった。なお、オペレータによる溶接状況の確認は溶接線前後に配置した CCD カメラの映像で行った。溶接施工後の 90 度ごとの断面マクロ結果を第 8 図に示す。溶接継手は JIS に則った RT (Radiographic Testing) および UT (Ultrasonic Testing) によって、有害なきずが認められないことを確認した。

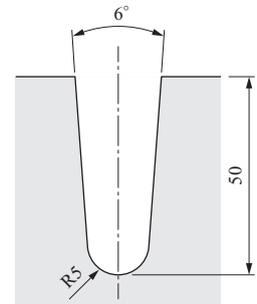
3.2 実工事への適用

3.1 節によって確立した条件を基に、実機の 9Cr 系鋼配管に対して溶接施工を実施した。実機施工は第 2 表に示す三つのステップで実施した。施工時の状況を第 9 図に、施工結果を第 3 表に示す。各ステップにおける実機

(a) 試験状況



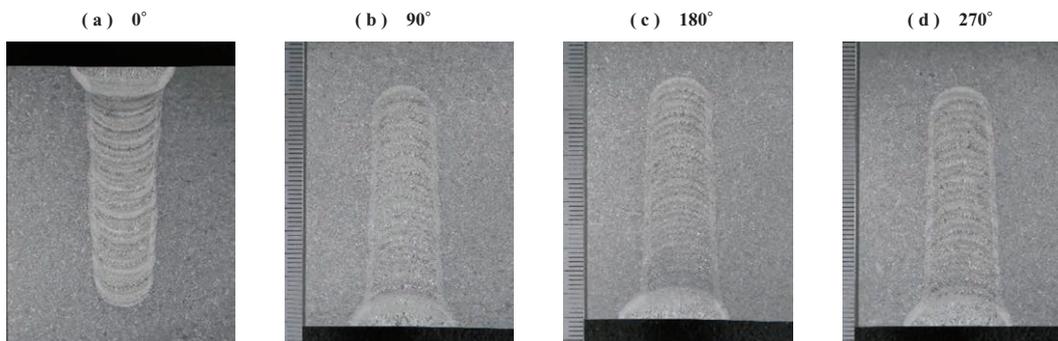
(b) 狭開先形状



第 7 図 9Cr 系配管を用いた溶接試験状況 (単位 : mm)
Fig. 7 Welding test of 9%Chromium piping materials (unit : mm)

第 1 表 9Cr 系配管を用いた溶接施工選定条件
Table 1 Welding plan for 9%Chromium piping materials

溶 接 区 分	1 ~ 8 (1 周を 8 分割)
ピーク電流 (A)	300
ベース電流 (A)	220
アーク電圧 (V)	10
ヘッド走行速度 (mm/min)	30 ~ 40
ピークワイヤ速度 (mm/min)	1 000 ~ 1 530
ベースワイヤ速度 (mm/min)	600 ~ 900

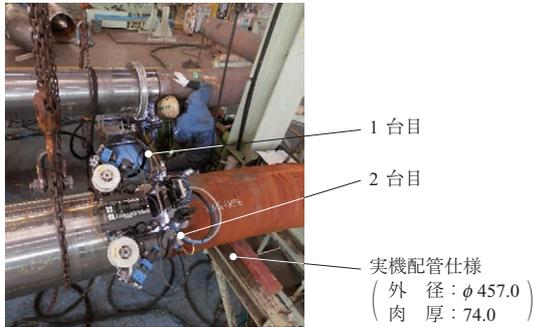


第 8 図 9Cr 系配管を用いた溶接施工断面マクロ結果
Fig. 8 Microscopic observation of weld joint of 9%Chromium piping material

第 2 表 実機配管への全姿勢自動 TIG 溶接の施工ステップ
Table 2 Steps to automatically weld real plant piping

項 目	操作台数	電極回転	開先倣い	ワイヤ回転
ステップ 1	1	適 用	-	-
ステップ 2	2	適 用	-	-
ステップ 3	2	適 用	適 用	適 用

(注) ステップ 1, 2 は溶接経験 7 年の中堅溶接士, ステップ 3 は溶接経験 3 年未満の非熟練者が担当施工した。



第 9 図 実機配管への全姿勢自動 TIG 溶接の施工状況
(単位: mm)

Fig. 9 Automatic welding of actual plant piping (unit: mm)

第 3 表 実機配管への全姿勢自動 TIG 溶接の施工結果
Table 3 Results of automatically welding real plant piping

溶 接 方 法	手溶接	全姿勢自動 TIG 溶接		
		1 継手施工	2 継手施工	
施 工 継 手	1 継手	1	2	3
ス テ ヱ ッ プ	-	1	2	3
施 工 時 間 (h)	58.8	54.0	58.5	51.5

(注) 表中に記載した手溶接に要する時間は, 開先面積と平均的な溶接作業効率から算出した参考値を示す。

溶接では非破壊検査として RT (ASME: American Society of Mechanical Engineers 要求) および UT (社内自主検査) を実施して合格であることを確認した。

ステップ 1 では電極回転機構の実機適用を実施し, 適切な施工が確認された。ステップ 2 ではステップ 1 と同じ機構を用い, 溶接士 1 人で溶接機 2 台を操作し, 2 継手の施工を実施した。装置の段取り替えによってステップ 1 と比較して若干の施工時間の増加が認められたが, 1 台操作時と同レベルの時間で 2 継手の施工が可能であることが確認された。ステップ 3 ではステップ 2 に加えて開先

倣い・ワイヤ回転機構を追加し, 溶接経験 3 年未満の非熟練者で施工を実施した。施工の結果, 各種機能の活用によって非熟練者でも安定した品質の溶接継手が施工可能であり, 溶接施工に要する時間も短縮することができた。

4. 今後の課題

本検討において全姿勢自動 TIG 溶接の施工技術は確立されたが, 今後, さらなる効率化・適用拡大を踏まえて以下の検討を実施する予定である。

(1) 異常検知機構の開発

開先倣い機構と CCD カメラでのモニタリングによって溶接士への負荷低減を図り, 溶接機 2 台持ち施工の実現が可能になった。現在, さらなる複数台持ちと自動化の実現を目指し, 溶接機に異常検知機能を搭載するための検討を進めている。

(2) 現地溶接への適用

本検討の開発は工場溶接の適用とともに現地溶接への適用もターゲットとしている。工場の自動溶接では開先ギャップをゼロとして適用しているが, 現地溶接では配管の合わせを実施する観点でギャップをゼロとすることは困難である。現状はギャップをもつ開先に対して初層手溶接で施工した後, 残層で自動溶接を適用する実績がある。今後の検討事項としてギャップをもつ状態から自動溶接初層を適用する技術開発を進めてゆく。

5. 結 言

全姿勢自動 TIG 溶接の開発を実施し, 装置開発, 適正溶接条件検討, 回転電極および開先倣い機構を確立して実機溶接へ適用し, 以下を実現することができた。溶接経験の少ない非熟練者で溶接装置 2 台持ちでの施工を可能にし, 適切な品質を確保しつつ, 手溶接と比較して半分の工数での施工を実現することができた。今後は 4 章に挙げた課題を克服し, さらなる安定化と適用拡大を目指してゆく。

お知らせ

・本文中の商品名やソフトウェア名は一般に各社の商標または登録商標です。

<p style="text-align: center;">I H I 技 報</p> <p style="text-align: center;">第 55 卷 第 2 号 (通巻 第 302 号)</p> <p style="text-align: center;">平成 27 年 5 月 22 日 印刷 平成 27 年 6 月 1 日 発行 年 4 回 発行</p> <p style="text-align: center;">定 価 1 部 350 円 (本体 324 円)</p> <p style="text-align: center;">[無断転載を禁じます。]</p>	<p>発行責任者 笠 俊 司</p> <p>発行所 株式会社 IHI 技術開発本部技術企画部 〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目 1 番 1 号 電 話 (03) 6204 - 7092 http://www.ihico.jp/ E-mail : TY9776@ihico.jp</p> <p>印刷所 富士ゼロックスシステムサービス株式会社 (発売元) 〒135-0061 東京都江東区豊洲三丁目 1 番 1 号 電 話 (03) 6204 - 8422 F A X (03) 6204 - 8877</p>
---	---

株式会社 I H I

支 社

北海道支社	〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西4-1(北海道ビル)	電話(011)221-8121 FAX(011)221-5229
東北支社	〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町1-1-1(三井生命仙台本町ビル)	電話(022)262-3688 FAX(022)227-6252
秋田オフィス	〒010-0001 秋田県秋田市中通2-3-8(秋田アトリオンビル)	電話(018)835-8815 FAX(018)835-8816
福島オフィス	〒963-8005 福島県郡山市清水台2-13-23(郡山第1ビル)	電話(024)938-0131 FAX(024)938-0145
新潟オフィス	〒950-0087 新潟県新潟市中央区東大通1-3-10(三井生命新潟ビル)	電話(025)245-0261 FAX(025)243-5474
北陸支社	〒930-0004 富山県富山市桜橋通2-25(富山第一生命ビル)	電話(076)441-4808 FAX(076)441-3196
中部支社	〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南1-24-20(名古屋三井ビルディング新館)	電話(052)565-7700 FAX(052)565-7709
静岡オフィス	〒420-0853 静岡県静岡市葵区追手町2-12(静岡安藤ハザマビル)	電話(054)255-8961 FAX(054)255-7137
浜松オフィス	〒430-7712 静岡県浜松市中区板屋町111-2(浜松アクタワー)	電話(053)457-5611 FAX(053)457-5613
豊田オフィス	〒471-0833 愛知県豊田市山之手4-46(三井住友海上豊田ビル)	電話(0565)29-2331 FAX(0565)29-7279
関西支社	〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町4-2-12(東芝大阪ビル)	電話(06)6281-2075 FAX(06)6281-2011
中国支社	〒730-0051 広島県広島市中区大手町2-7-10(広島三井ビル)	電話(082)246-2280 FAX(082)246-2100
山口オフィス	〒745-0036 山口県周南市本町1-3(大同生命徳山ビル)	電話(0834)31-8100 FAX(0834)32-2456
四国支社	〒760-0023 香川県高松市寿町2-4-20(高松センタービル)	電話(087)821-5031 FAX(087)822-7893
九州支社	〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通2-1-82(電気ビル北館)	電話(092)771-7241 FAX(092)751-6416
沖縄オフィス	〒900-0015 沖縄県那覇市久茂地2-14-3(朝日生命沖縄ビル)	電話(098)862-7758 FAX(098)863-7122

工 場

相馬第一工場	〒976-0001 福島県相馬市大野台1-2-1	電話(0244)37-3712 FAX(0244)37-3731
相馬第二工場	〒976-0001 福島県相馬市大野台1-2-3	電話(0244)37-3712 FAX(0244)37-3731
瑞穂工場	〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229	電話(042)568-7000 FAX(042)568-7012
横浜工場	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2717 FAX(045)759-2603
愛知工場	〒478-8650 愛知県知多市北浜町11-1	電話(0562)31-8000 FAX(0562)31-8010
相生工場	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2206 FAX(0791)24-2268
相生鋳造部	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2701 FAX(0791)24-2692
呉第二工場	〒737-0027 広島県呉市昭和町2-1	電話(0823)26-2105 FAX(0823)26-2170

研究所 (技術開発本部)

基礎技術研究所	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2227
生産技術センター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2225
総合開発センター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2226
インキュベーションセンター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2224
R&Dテクノセンター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2311

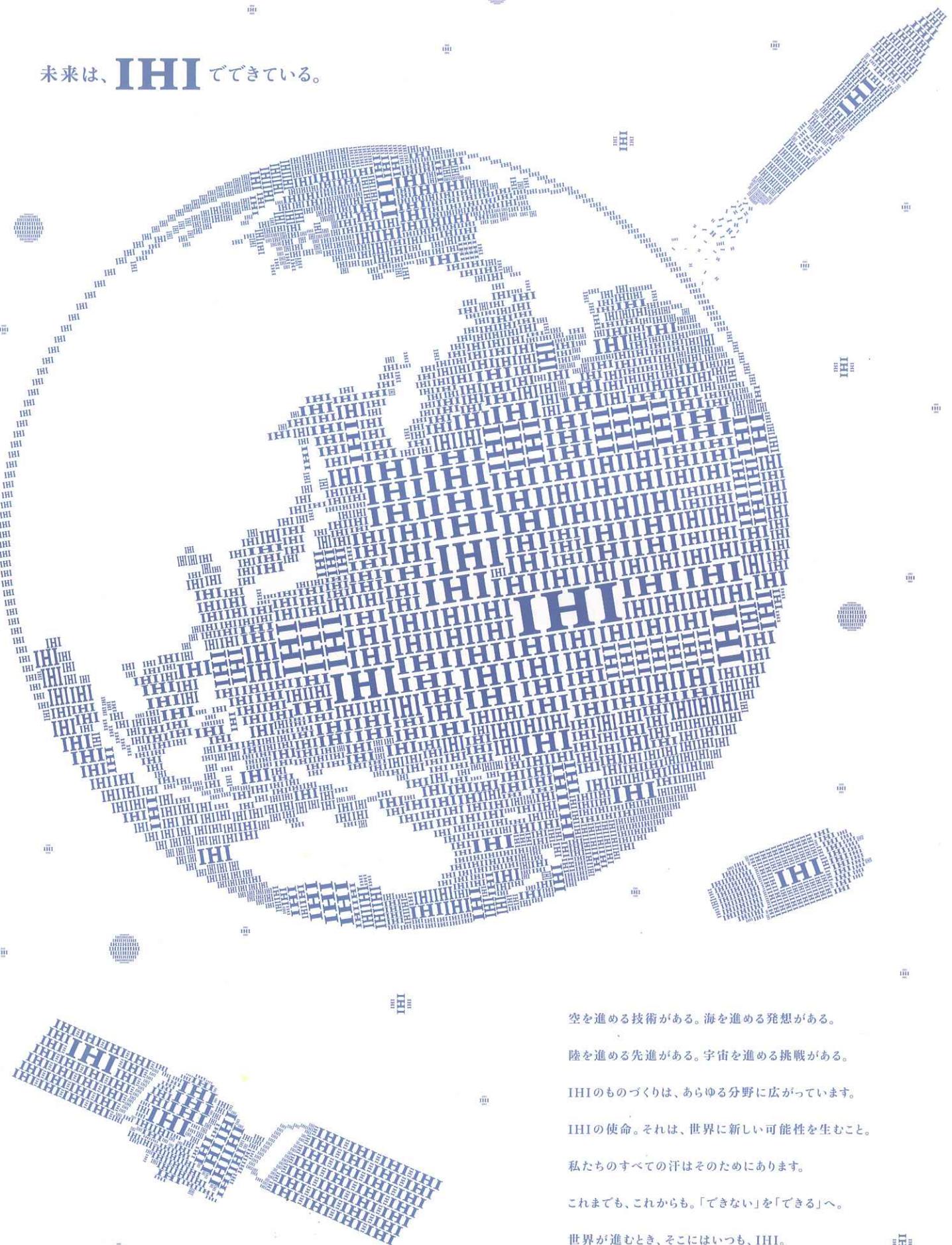
事務所

本社	〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1(豊洲IHビル)	電話(03)6204-7800
横浜エンジニアリングセンター (1, 2号館)	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2002
昭島事務所	〒196-8686 東京都昭島市拝島町3975-18(IH昭島ビル)	電話(042)500-7250
相生総合事務所	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2206
呉総合事務所	〒737-0027 広島県呉市昭和町2-1	電話(0823)26-2105

海外事務所・海外支社

Paris, Alger, Moscow, Bahrain, New Delhi, Bangkok, Kuala Lumpur, Hanoi, Jakarta, Beijing, Shanghai, Taipei, Seoul, Singapore

未来は、**IHI** でできている。



空を進める技術がある。海を進める発想がある。

陸を進める先進がある。宇宙を進める挑戦がある。

IHIのものづくりは、あらゆる分野に広がっています。

IHIの使命。それは、世界に新しい可能性を生むこと。

私たちのすべての汗はそのためにあります。

これまでも、これからも。「できない」を「できる」へ。

世界が進むとき、そこにはいつも、IHI。