

一橋大学 GCOE プログラム
「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」
大河内賞ケース研究プロジェクト

新日本製鐵
コークス炉炭化室診断・補修技術

青島矢一
大久保いづみ

2010 年 7 月

CASE#10-05

本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。このプロジェクトは、大河内賞を受賞した業績について事例分析を行うもので、(財)大河内記念会と受賞企業のご協力をえながら、技術革新の概要やその開発過程、事業化の経緯や成果などを分析している。事例研究を積み重ねて、日本の主要なイノベーションのケース・データを蓄積するとともに、ケース横断的な比較分析を行い、日本企業のイノベーション活動の特徴や課題を探り出すことを目指している。なお、本プロジェクトを進めるに際して、(財)大河内記念会より多大なご支援・ご協力をいただいております、心よりお礼を申し上げます。
(プロジェクト活動の詳細については [http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/research/GCOEokochiprize\(A\).html](http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/research/GCOEokochiprize(A).html) を参照のこと)。

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

TEL:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp

大河内賞ケース研究プロジェクト
新日本製鐵:コークス炉炭化室診断・補修技術

2010年7月

一橋大学イノベーション研究センター
青島矢一
一橋大学大学院商学研究科博士課程
大久保いづみ

本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。作成にあたっては以下の方々から多大なご協力をいただいた。ここであらためて御礼申し上げたい。

新日本製鐵株式会社

技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター

プラントエンジニアリング部 部長 加藤健次氏

プラントエンジニアリング部 マネジャー 阿波靖彦氏

プラントエンジニアリング部 グループリーダー 境田道隆氏

計測・制御研究開発部 主任研究員 杉浦雅人氏

本社 製鉄技術部部長 植松宏志氏

技術開発本部 技術開発企画部 技術企画グループ マネジャー 伊藤邦春氏

1. はじめに

新日本製鐵(以下、新日鐵)では、1980年代中盤以降、既存コークス炉の寿命問題が真剣に議論されるようになっていた。1964年から1979年の間に新日鐵は一気に17炉団のコークス炉を建設した。こうした増産体制の確立が高度成長期における新日鐵の躍進をもたらしたのだが、その一方で、建設が短期間に集中したことによって、同じ時期にコークス炉が寿命を迎えるという問題を抱えることになった。80年代当時、コークス炉の寿命は20年といわれており、実際に建設後20年を経過した炉において、当初はみられなかったような損傷問題が顕在化していた。

コークス炉を新設するには300億円もの投資が必要となる。仮に17炉団を新設するとなれば5000億円以上の投資である。また新設するにしても、従来どおりのコークス炉を建設できるのか、という問題もあった。70年代に最後のコークス炉を建設してから長い空白の年月があったため、コークス炉の設計ノウハウと煉瓦を積む築炉工の技能伝承の問題や日本ではできない珪石煉瓦の調達問題などの不安要素があった。こうしたことからコークス炉の寿命問題は、経営の根幹に関わる問題として認識されるようになっていた。

寿命問題に対応して、新日鐵の技術者たちがまず行ったことは、従来個別に行われていた炉体管理を全社で統一することであった。例えば、全社のコークス炉の管理項目と測定方法の標準化を行い「コークス炉の炉令指数化」を推進した¹。これは、稼働年数の異なるコークス炉の炉体寸法と操業状況をプロットして標準値を割り出し、その標準値からの乖離度合いによって、各コークス炉の炉令指数を計算するというものだった。しかし、この指数では劣化の進行度合を示唆する情報は得られても、具体的にどのような損傷や劣化が起きているのかはわからず、コークス炉の補修にいかすことはできない。

コークス炉の損傷の多くは、石炭を乾留してできたコークスを「ところてんのよう」に押し出す際に、炉壁に付着したカーボンとともに、炉壁自体もはがれ落ちてしまうことによって生じる。はがれの結果、炉壁に凹凸ができると、コークスの押し出しが難しくなり、生産性が低下する。さらに、こうした状況が続くと、最終的には炉壁に穴が空いてしまい、使用不可能になる。寿命を延長するには、炉壁の凹凸情報を正確に把握した上で、はがれ落ちた炉壁部分を埋めて平坦化する補修作業が必要となる。

当時、炉壁の診断は、現場の技能者の目視に頼るほかなかった。1つのコークス炉団を構成する100室ほどの炭化室は、それぞれ、奥行き16m、高さ6m、幅45cmという極めて細長い形状をしている。しかもその内部は常に1,200℃近い高温状態にある。ゆえに壁面を目視で診断するといっても、炭化室の外側から、16m先まで続く両壁面の状態を、極めて不自然な状態で

¹ 当時プラントエンジニアリング部コークスグループ長であった横溝正彦氏の個人メモより。

判断しなければならない。いくら熟練した技能工であっても壁面の凹凸状態を正確にとらえることは不可能に近い。また壁面の損傷が認められた場合には、8mもの長さのランス(竿)を炉に挿入し、その先からガス化した補修剤を噴射するという、危険な作業を必要とした。8mもの長さであるから、当然ランスはたわみ、正確な補修は困難を極めることになる。

コークス炉の寿命問題が深刻化する中、90年代に入ると、新日鐵のコークス技術者たちは、熟練工に頼る従来の方法に限界を感じ始めた。コークス炉の寿命問題を根本的に解決するためには、寿命を決める要因を客観的に理解し、損傷状態を定量的に測定する必要がある。その上で補修の正確性と効率性を高めなければならない。

こうした認識に基づき、1994年、当時プラントエンジニアリング部のコークスグループ長であった横溝正彦は、コークス炉の新たな診断・補修システムの開発計画を提案した。この提案に基づき、1995年4月には正式な開発プロジェクトが立ち上がった。開発プロジェクトはプラントエンジニアリング部と計測・制御研究開発部の共同で進められ、名古屋製鉄所に導入された診断システムは1999年に一応の完成をみた。しかし診断と補修を含むシステム全体が大分工場稼働するまでには、その後さらに4年近い歳月を必要とした。

様々な苦労を克服して完成した「コークス炉炭化室診断・補修技術」はDOC (Doctor of Coke Oven)と命名された。それは1,200℃という過酷な条件の炭化炉の中に直接カメラを挿入して炉壁の状態を定量的に把握し、その定量データに基づいて炉壁の補修を行う大がかりな装置である。

2003年に開発第1号機が大分工場に導入されたのに続き、他の工場にも次々この装置が導入された。その結果、2010年時点で、新日鐵のコークス炉は平均で5年以上の寿命延長に成功して、コークス炉の新設にかかる投資負担を大幅に軽減している。

2. コークス炉

鉄鋼の生産方法には、高炉法と電炉法²の二種類があり、最も一般的な方式が高炉法である。2007年の世界の粗鋼生産量13.4億トン、日本の生産量1億2,000万トンのうち、世界では65%、日本では74%が高炉法によって生産されている。鉄鋼一貫製鉄所では、高炉において天然資源である鉄鉱石から鉄を取り出し、最終鉄鋼製品の製造までが同一敷地内で行われる。

高炉法による製鉄工程は、「製鉄工程」「製鋼工程」「連続鋳造工程」「圧延工程」から構成さ

² 電炉法は、鉄スクラップを電気炉の中で電力を用いて溶かして粗鋼を作る方法である。原料として、既に還元された鉄スクラップを用いるため、日本で原料の自給が可能であり、また、エネルギー消費量、CO₂発生量が高炉法による鉄鋼生産よりも少ないというメリットがあるが、一方、品質が劣り、大量生産に向かないというデメリットがある。

れる。まず「製鉄工程」において、焼結鉱³(鉄鉱石に下処理を施したもの)から酸化鉄を還元し銑鉄(熔融銑鉄)を取り出し、次に「製鋼工程」において、銑鉄に含まれた不純物や炭素分をさらに取り除き鋼を造り、その後「連続 casting 工程」で高温の溶鋼を固体にして、スラブ、ブルーム、ビレット等の鋼片と呼ばれる半製品の形にし、「圧延工程」を通して鋼板、棒鋼、線材等の最終鉄鋼製品ができあがる。

第一の「製鉄工程」では、焼結鉱から鉄分を取り出すために酸素を除去(還元)する必要があるが、そのための還元材として使われるのが原料炭(原料用石炭)⁴を蒸し焼きにして作られるコークス⁵であり、高炉法による鉄づくりに欠かせないものである。コークスは石炭よりも燃焼効率が良く、鉄鉱石を溶かす熱源としても使われている。実際の工程では、高炉炉頂から鉄鉱石とコークスが装入され、コークスは炉の下から吹き込まれる熱風や酸素と反応して一酸化炭素や水素などの高温ガスを発生し、上昇気流となって鉄鉱石を溶かし酸素を奪う(間接還元)。溶けた鉄は炉内を流れ、コークスの炭素と接触してさらに還元(直接還元)され、銑鉄となる。

このように製鉄工程で重要な役割を果たすコークスを生産する設備が、コークス炉である。図表 1 に示すように、コークス炉は、炭化室と燃焼室が交互に約 100 個配置された巨大煉瓦構造体(炉団)であり、炉団全体の大きさは、高さ 13m、奥行き 16m、全長は 200m に達する。炭化室一室の大きさは、幅 45cm、高さ 6m、奥行き 16m である。水分調整など事前に適正処理された石炭を炭化室に入れ、無酸素状態で 20 時間約 1,200℃の高温で蒸し焼き(乾留)にし、コークスを生産する。炭化室上部の装入蓋から石炭を装入し、乾留が終了すると、炭化室前後端の扉である炉蓋を開け、水平方向にコークスを押し出して取り出す仕組みとなっている⁶。

コークス炉は、製鉄工程の最上流に位置し、製鉄工程において使用される原料であるコークスを生産する設備である。したがって、コークス炉の生産性低下、補修の効率性と耐久性は、その後続くすべての製鉄工程に大きく影響を与えるものである。

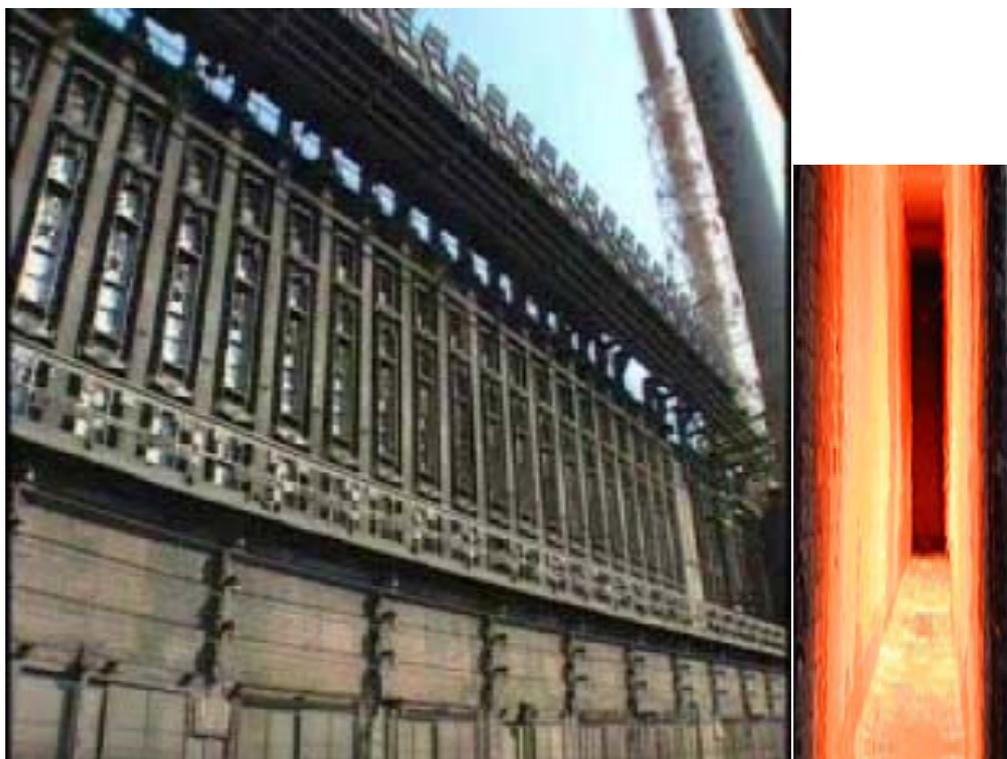
³ 粉状の鉄鉱石と石灰石を約 1,300℃の高温で焼き固めた 5～25mm 程度の塊。

⁴ 高炉製鉄において、コークス製造に用いられる強粘結炭や非微粘結炭等を「原料炭」と称す。

⁵ 鉄鋼業においてコークスは、製鉄用、焼結用、フェロアロイ用、製鋼用などに使用されており、このうち製鉄用(高炉用)における消費が全体の 87.0%を占めている。

⁶ 新日本製鐵株式会社「コークス炉炭化室診断・補修技術」『NIPPON STEEL MONTHLY』2009 年 6 月号,pp1-6.

図表 1: コークス炉



出所: 新日鐵資料

3. 寿命延長の必要性

3.1 コークス炉老朽化の影響

日本国内のコークス炉⁷は、15 箇所に 46 炉団、炭化室は合計で約 4,300 あり、国内のコークス生産量は、年間約 5,000 万トンである。新日鐵グループでは室蘭、君津、名古屋、八幡、大分の 5 箇所に合計 17 炉団⁸、約 1,500 の炭化室を有し、年間約 1,200 万トンのコークスを生産している。コークス炉の設備寿命は 40 年以上という長期に及ぶものであるが、日本のコークス炉の大半は 1960 年代から 1970 年代の高度経済成長期に建設されたものであるため、老朽化が進行し、平均炉令は 36 年に達している。新日鐵のコークス炉令は、2008 年度時点で平均 38 年(直近の新設炉を除く)、最高 44 年である⁹。

⁷ 国内のコークス炉はすべてが室炉式である。海外では米、豪、印、伯他で発生ガスを回収しないノンリカバリ炉が一部あるものの、基本的には日本同様の室炉式が主流である。

⁸ 2008 年に大分製鉄所に新しく導入された次世代コークス炉 SCOPE21 を含めると合計 18 炉団になる。

⁹ 1980 年代にはコークス炉の寿命は 20 年程度と考えられていた。その後、本ケースで記述する DOC に代表される診断・補修技術の進歩もあり、コークス炉の寿命は年々延長されてきた。

コークス炉の老朽化は、(1)熱効率の悪化による、使用エネルギーと CO2 排出量の増加、(2)押し出し負荷の増大による生産性の低下、さらに(3)設備更新にかかる膨大な投資負担という、3つの問題から鉄鋼メーカーの経営に大きな影響を与える。

第1に、老朽化によって炉体の損傷が進むと、熱原単位が悪化して熱効率が低下する。熱原単位とは、1 トンの石炭を乾留するために必要とされる熱量であり、これが悪化すると同じ生産量に対してより多くの熱量、エネルギーが必要となり、同時に CO2 排出量も増加する。コークスの生産工程から発生する CO2 は、製鉄プロセス全体の 10%であり、これは国内の総 CO2 発生量の 1.4%を占める。

第2に、老朽化によって炉壁が損傷して凹凸が生じると、その凹凸にコークスが引っかかることによる押し詰まりが生じて稼働率が下がる。コークス炉の末期では、熱原単位は約 40%悪化し、稼働率は約 50%低下することが確認されている。

第3の問題は、コークス炉の更新にかかる投資負担である。炉の損傷が激しく使用不可能になると更新しなければならないが、生産能力 100 万トン/年のコークス炉 1 炉団の更新には、約 300 億円という莫大な投資が必要となる。新日鐵のコークス炉は高度成長期に集中して建設されたため、更新時期も集中する可能性がある。17 炉団を一気に更新すると投資額は 5,000 億円を超え、経営に多大な影響を与えることになる。

これら3つの問題には、老朽化したコークス炉を順次補修して寿命を延長することによって対応することができる。しかし補修する際にコークス炉の火を止めるわけにはいかない。コークス炉は寿命を迎える日まで稼働し続ける。それゆえ 1,200 度の高温状態を保ったままで、炉の内部を診断して、補修しなければならない。ここにコークス炉の診断・補修の本質的な難しさがある。

3.2 コークス炉の損傷メカニズムと寿命延長の考え方

コークス炉は、長さ 40cm、高さ 12cm、厚み 10cm ほどの珪石煉瓦を積んだ構造体である。コークス製造過程において、1,000°C 超に加熱された炭化室に、常温に近い石炭を装入し、さらには蒸し焼きにされたコークスを押出装置で水平方向に押し出す際に、約 20 時間ごとに炭化室の両側にある炉蓋を開放する¹⁰ことから、珪石煉瓦には機械的負荷や過熱・冷却の繰り返し負荷がかかり、煉瓦表面の亀裂やスポーリング¹¹が発生し煉瓦が損傷する。

長期間の操業サイクルにおいて煉瓦損傷は進行し、その煉瓦表面にカーボン¹²が付着し凸部となり、そのカーボンが押出時に脱落した場合に煉瓦母材を同伴することで煉瓦減肉は更に

¹⁰ 財団法人大河内記念会「コークス炉リフレッシュの実現を可能とした極限環境下での診断・補修技術の開発」『大河内賞受賞業績報告書 第 55 回(平成 20 年度)』2009 年 4 月、pp98-115。

¹¹ 亀裂や割れによって表面が剥落すること。

¹² 石炭の乾留過程で発生したガスが硬化して炉壁に付着する。

進行する。このように炉壁表面は経年的に炉壁凹凸が増大し、この凹凸部にコークス押出時に局所的な荷重がかかった場合には、さらに損傷が進み、煉瓦が脱落する。厚み約 100mm の珪石煉瓦に完全に穴が開くと、炭化室と燃焼室が貫通した状態となる「炉壁破孔」が発生する¹³。

新日本製鐵のコークス炉のうち高度経済成長時代に建設されたコークス炉の平均炉令は 40 年を超えており、稼働開始後は連続操業を続けている。稼働を中断すると炉温が下がって煉瓦構造体の強度が低下してしまうため常時高温に維持されており、破孔の補修は容易ではない。多数並んだ炭化室の各所で炉壁の破孔が多発すればコークス炉全体の生産性が低下し、経済的、或いは環境問題上、存続不可能と判断せざるを得なくなる¹⁴。

炭化室の破孔は、押し出し時の炉壁への側圧が炉壁の持つ構造体強度(側圧に対する耐力)を超えた時に発生する。炉壁側圧は炉壁の凹凸が大きいほど増大するため、破孔防止のためには炉壁凹凸の平坦化が重要となる。そのために開発されたのが、DOC (Doctor of Coke Oven コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置)である。

4. DOC

4.1 従来のコークス炉炭化室炉壁診断・補修

DOC が開発される以前に新日鐵で一般的に行われていたコークス炉炭化室炉壁損傷度の診断は、現場作業者が炭化室扉付近から炉内を目視で観察するというものであり、作業者の経験と感覚に頼り、煉瓦面の荒れや陥没を定性的に認識しているに過ぎなかった。補修については、目視診断にもとづき、約 1,200℃の環境において幅 45cm の炭化室の窯口から内部に長尺ランスを挿入し、奥行き 16m、高さ 6m の炉壁の両側について、その損傷部に溶射剤を塗布するという方法をとっていた。8m 強の長く重い溶射ランスを用いた人力補修であるために必ず揺れ、たわみが生じ、安定した溶射補修が難しいこと、また、炭化室中央部の評価が困難で定量性に問題があることから、溶射補修面の平滑仕上げ精度が低く、その結果補修後の炉壁の耐久性が低くなる等の問題があった。また、高熱重筋作業であるため作業への負荷が高く、人員は 7～8 名を要する労働集約的な診断・補修作業であった。

当時他の鉄鋼メーカーでは、水冷装置にカメラを搭載して内部に挿入し、撮像・診断する装置も開発されていたが、一般的なカメラでの撮像により得られる画像は斜視であり、分解能、凹凸量、位置の把握すべてが不正確であった。

¹³ 前掲『大河内賞受賞業績報告書 第 55 回(平成 20 年度)』2009 年 4 月

¹⁴ 境田道隆 阿波靖彦 杉浦雅人 中嶋淳 中村功 笠井清人 野口敏彦 塚本義則「コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置の開発」『新日鐵技報』2006 年第 384 号, pp63-68.

4.2 DOC による炭化室炉壁診断・補修

DOC は、炭化室炉壁の損傷状態(凹凸状態)の実態の把握を行う診断装置と、炉壁の凹凸を平滑化する補修装置から構成される。診断装置を使った作業と補修装置を使った作業は、それぞれ別個に行われるが、装置は共通台車上に搭載されている。装置の機械幅は約 34cm、全長は約 25m である。

4.2.1 診断装置

診断技術は、炉壁撮像機能と凹凸測定機能からなる。

図表 2 に示すように、診断装置にはライン CCD カメラ(1024 画素)が、縦に等間隔で 4 台設置されており、高さ 6m の炉壁を撮像する。一次元の映像を、奥行き方向に 1mm ピッチで炉壁全体を撮像し、コンピュータのメモリ上に蓄積することで二次元の映像を生成するスキャナのようなものである。高温雰囲気中で光学鏡面を維持することができるミラーと一体構造で炉内に挿入される。撮像方向をミラーで折り曲げて炉壁を垂直に観察することにより、装置が炉幅方向に蛇行しても観察位置が影響されず、縦方向の亀裂を明瞭に観察できる。約 1,200℃の炉の輻射熱から保護するため、ライン CCD カメラは(幅の狭い)水冷断熱装置内に搭載される。冷却水は、1 分間に 350 リットル流し、最大炉内滞在時間は 12 分である。観察窓に入射する強烈な熱線からカメラを保護するために、赤外線を吸収する耐熱ガラスや赤外線反射膜を加工したガラスを複数枚重ねた熱線遮蔽構造により、内部は 40℃以下に保たれる。

炉壁凹凸計測は、撮像と同時に行われ、ライン CCD カメラの線状視野に上下斜め方向からレーザー光を照射し、炉壁画像にレーザー像を重畳させて凹凸の状態を定量的に把握する。炉壁の凹凸は画像上でレーザー線の変位として観測され、レーザー出射角度やカメラ視野角・視野サイズといった幾何学的条件から三角測量の原理で凹凸量が求まる¹⁵。レーザーは煉瓦ピッチよりやや密に煉瓦 39 段に対し 44 本投射し、炉壁の面的な凹凸情報が得られるようにした。画像と合わせて凹凸を捉えるこの方式により、損傷部位の炉内位置と損傷深さを 3 次元座標データで立体的に把握する。

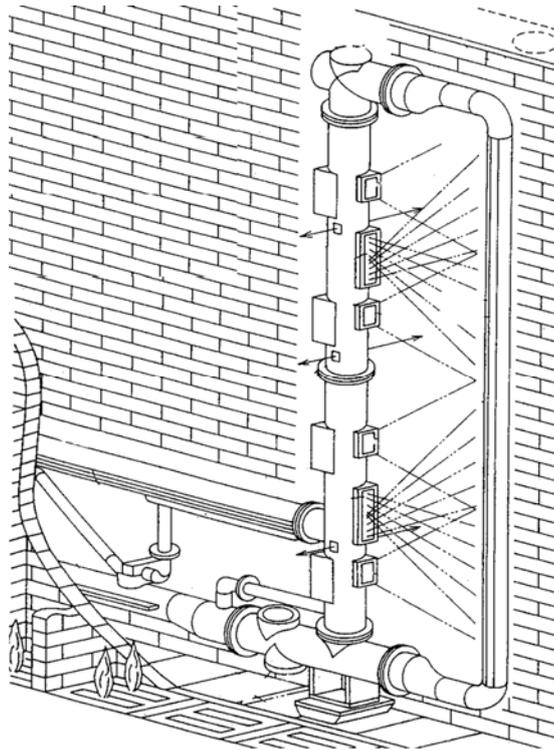
台車上に搭載された診断装置は、扉から挿入され全長 16m の炭化室を約 4 分で迅速に往復して炉壁を撮像する。カメラとレーザーは左右に旋回する機構に取り付けられ、往路と復路で左壁、右壁を切り替え、長さ 16m 高さ 6m の両壁が診断される。

装置が炭化室に入り内部で移動する際に、必ず装置に揺れや蛇行が生じ、凹凸計測データにズレが生じてしまう。それに対し、炉高 6m のうちの凹凸がない炉壁をミリ単位で自動探索し、

¹⁵ 前掲『大河内賞受賞業績報告書 第 55 回(平成 20 年度)』2009 年 4 月

そこを基準として変異量を算出、真の凹凸を高精度に推定する信号処理アルゴリズムを構築し、正しい凹凸データを得ることを可能となっている。

図表 2: 診断装置の構造



出所: 新日鐵資料

4.2.2 補修装置

補修技術は、炉壁形状計測装置と溶射バーナーから構成され、多関節マニピュレータ¹⁶構造の装置を炉内に挿入して、炉壁形状計測と補修を行う仕組みとなっている(図表 3 参照)。

マニピュレータは、長さ 2~3m の短いリンクアームと関節構造の組み合わせで剛性を確保しており、炉内に挿入されると補修部近辺の炉底に脚で自立し、補修を行う方式をとっている。これにより、長手方向の移動(前後)、アームの俯仰動作(上下)、計測装置とバーナーを設置した先端部分を壁に向かって旋回する動作(左右)を、サーボモーターを使って制御し、三次元

¹⁶ マニピュレータとは、人間の手や上肢と同等の機能を持たせ、人間の作業を代替させる機械やロボットのことである。離れた場所から操作することができたため、人体に有害な放射性物質や使用済核燃料の処理や、深海での研究作業などにも用いられる。

の動作を可能にしている。このような構成により、損傷部を溶射補修する上で理想的な溶射施工条件、即ち溶射バーナーと対象面との適正溶射距離と噴射角度 90° を維持し、高精度な手先制御を行うことが可能となっている。

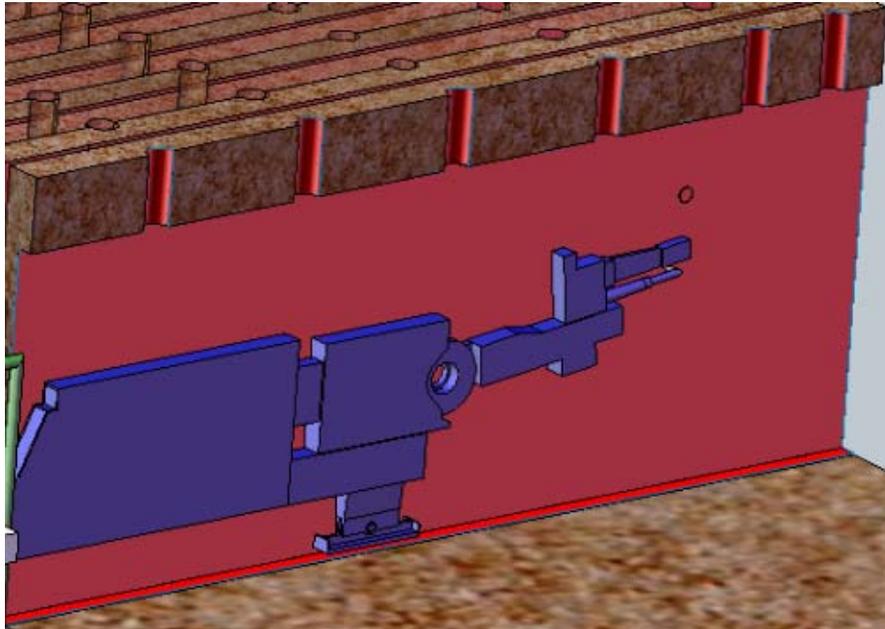
診断装置の凹凸測定機能は、炉団の全炭化室・炉壁全体を高速に測定することが目的であり、そのデータから、炉壁に側圧が生じる陥没箇所が特定される。補修装置では、溶射補修で目標とする±5mmの高精度平坦仕上げを実現するため、また、補修した後に精密に評価・管理するために、陥没部位の立体形状を、時間をかけて(約 20～30 分)より詳細に求める。コンピュータ先端に炉壁との距離を測定する計測器を装備して平面的に走査することで、補修部周辺について深さ方向精度±0.5mm の等高線図を得ることができる。計測器には非接触式のレーザー距離計を使用し、1,200℃の高温環境下で常に安定して陥没形状を計測することが可能である¹⁷。

具体的に補修作業とは、損耗した煉瓦面を局所的に肉盛りして平滑面を回復させることを指す。炉壁を高温に維持したまま補修する方法としては従来から、煉瓦壁面に珪石粉体を融着施工する溶射補修が最も有効である¹⁸。DOC では、損傷の細かい凹凸形状に対応できる集束型溶射バーナーを使用し、先から溶射材を損傷部に吹き付けて、平らに仕上げる溶射補修を行っている。溶射の肉盛り量の制御方法については、溶射材の吐出量は一定にし、損傷の深さに応じて溶射バーナーの走査速度を制御することで平坦仕上げを実現した。

¹⁷ 前掲『大河内賞受賞業績報告書 第 55 回(平成 20 年度)』2009 年 4 月

¹⁸ 前掲『大河内賞受賞業績報告書 第 55 回(平成 20 年度)』2009 年 4 月

図表 3: 補修装置の構造



出所: 新日鐵資料

5. DOC 開発プロセス

5.1 開発立案

DOC の開発は 1994 年プラントエンジニアリング部コークスグループ長であった横溝による開発計画の立案から始まった。横溝は以前から、寿命問題が健在化してきたコークス炉の効率的な運用のために、全社的な管理体制の確立をすすめてきた。しかしそれまでの管理方法では炉体の外形寸法や操業状況から炉の状況を推察するにすぎず、寿命延長のための補修作業に有益な情報を得ることはできなかった。それゆえ、炉壁の診断や実際の補修作業は相変わらず現場の熟練工の手作業にたよっていたが、コークス炉の寿命問題がますます深刻化するなか、横溝は、こうした従来の方法の限界を強く認識するようになった。

様々な分析結果は、コークス炉の寿命を決定する主要因が、炭化室の劣化と損傷にあることを示していた。そうした劣化や損傷は生成されたコークスを排出する際に生じる、炉壁に対する「押し出し負荷」が主原因となっていた。炉壁の凹凸が大きくなればなるほど押し出し負荷は大きくなり、それがさらに炉壁にダメージを与えるという悪循環が始まると、炭化室の損傷は加速化されてしまう。この悪循環を断ち切るには、早い段階で、炉壁の凹凸を正確に把握して、補修によって平坦化しなければならない。そのためにはまず炭化室の壁面を可視化することが必要である。そう考えた横溝は、1994 年、炭化室の可視化技術の開発を提案した。

5.2 DOC 開発プロジェクトの立ち上げ

横溝の提案は経営陣に受け入れられ、1995年4月に社内A課題として3年間の計画で開発がスタートした。この開発プロジェクトは、当初プラントエンジニアリング部で立ち上がり、横溝に加えて、入社2年目の新人であった境田道隆¹⁹が参加した。この段階で既に横溝は、炭化室の中に直接カメラを挿入して炉壁の状態を計測するという構想をもっていた。当時、川崎製鉄をはじめ数社が同様の開発を進めていたことから、ハードウェア自体は他社から購入してきて、炉内の解析に関わるソフトウェア部分を自社開発するというのが当初の提案であった。しかし、長さ16m・高さ6mの大きな壁面に対して炭化室の幅は45cmしかない。このように狭い空間に通常のカメラを挿入しても炉壁の全体像を撮像することなどできない。また競合他社も簡単にハードウェアを売ってくれそうにはない。

こうした中、横溝と境田は、同じプロセス研究開発センターの隣にいた計測制御研究開発部(以下、計測・制御部)に、何かいいアイデアはないかと話をもちかけた。話をもちかけられた計測制御部の内藤修治²⁰は、高速に移動する鋼板の傷検査の知識から、2次元センサーを搭載した通常のカメラではなく、1次元のラインセンサーを用いて炉壁をスキャンする方式を提案した。実はこうしたアイデアは、新日鐵が80年代に展開した様々な多角化事業に起源がある。多角化事業の多くは失敗に終わったものの、蓄積された技術の中にはその後の本業に活かされたものも多い。ラインセンサーを使ったスキャン技術は、もともと新日鐵が多角化事業として行っていたファクシミリ事業で必要とされた技術である。内藤のもとで診断技術開発を担った加治屋孝則²¹は、ファクシミリ事業に携わっていた人材である。二人はその技術の応用を考えた。

こうしてDOC開発プロジェクトは、横溝を中心としたプラントエンジニアリング部が全体統括と機械設計を担当し、診断技術の開発は計測・制御部の内藤を中心としたチームが担当することになった。内藤のもとで、診断技術の実質的な開発は、加治屋と入社3年目の杉浦雅人²²が担当することになった。全体で5人という小さなチームであった。この段階では、まだ、補修技術の開発は行われず、飽くまでも診断技術の確立が目的であった。

5.3 診断技術の実証

ラインセンサーを用いて炉壁をスキャンするという基本的なアイデアは確定したものの、実際に、1,200℃もある炭化室にカメラを挿入して、当然振動もある中で、本当に撮像することが可能

¹⁹ 現在、技術開発本部環境・プロセス研究開発センタープラントエンジニアリング部グループリーダー

²⁰ 現在、株式会社日鉄エレクトックス計測・検査システムソリューション部テクニカルリーダー

²¹ 現在、株式会社日鉄エレクトックス計測・検査システムソリューション部プロダクトSI第二グループ部長代理

²² 現在、新日本製鐵株式会社技術開発本部環境プロセス研究開発センター計測制御研究開発部主任研究員

なのかという点に関してチームのメンバーはまだ半信半疑だった。そこで、計測・制御部の技術者はまず、技術の実現可能性を確かめる実験から始め、カメラを簡易的な防熱対策を施して炉に少しだけ入れる方法で、炉壁の熱画像が得られることを確かめた。こうした実験は、富津にある研究センターの隣にある君津製鉄所で行われた。新日鐵は 1991 年に、全国に分散していた研究開発とエンジニアリング機能を富津の技術開発本部に集約していた。プラントエンジニアリング部と計測・制御部との協力体制もこうしたコロケーションによるところが大きいと思われる。それとともに、研究所が君津製鉄所の隣に設置されたことによって、現場からの協力を受けた開発活動がやりやすくなっていた。

6. 診断技術の開発:1996-1999

6.1 プロトタイプの導入

診断技術には、炭化室の炉壁状態を高精度で定量化することが求められた。また計測にはスピードも求められた。計測を行っている間は操業がとまることになるため、時間がかかるほど生産性が低下するからである。具体的な目標としては、画像の解像度は 1mm、炉壁の凹凸測定に関しては 3mm くらいの分解能が設定された。また両側の炉壁全体を測定する時間を 4 分とした。

既に述べたように、エリアセンサを使用する通常のカメラでは、長さ 16m・高さ 6m もある炉壁の状態をたった 45cm の幅の中で撮影することは不可能である。そこで開発チームは、ラインセンサーを搭載したカメラを奥行き方向に 1mm ずつずらしながら、線情報をメモリに蓄積して、それらを合成して 2 次元の画像情報を得るという方法を採用した。ファクシミリやスキャナと同じ方式である。こうした基本的アイデアをもとに開発スタートから 1 年経った 1996 年、名古屋製鉄所のコークス炉にプロトタイプが導入された。

プロトタイプの開発当初、開発陣は、外部の技術や装置を活用しようと試みた。しかし幅の狭い炭化炉の構造や 1,200°C という高温状態など使用環境の特殊性から、すぐに使えるものはなく、ほとんど独自開発することになった。そこで専門分野を超えた様々な技術開発を行わなければならなかった。杉浦は次のようにコメントしている。

非常にスペースが狭いので、当時の市販のラインカメラが入らなく、加治屋が設計して専用の小型ラインカメラを試作しました。まさか新日鐵にはいってカメラを作るとは思い

ませんでした、そういうことからやりました²³。

新たな技術を求めて外部と接触することによって解決の糸口が見つかることもあった。例えば、1,200℃の高温状態だと、通常の耐熱ガラスでは、強い輻射熱がガラス越しに入り込んで、カメラが焼けてしまうという問題がある。これに対して開発陣は、熱線を押し戻す反射膜をつけた特殊なガラスを何層も重ねるという構造をとることによって、結果的に内部温度を 40℃保ち、電子回路を含むカメラを内部に搭載することに成功した。こうした反射膜のアイデアの1つは、杉浦が参加した画像機器の展示会でのやりとりから得られたものであった。杉浦は次のように述べている。

・・・それはたまたまどこかの画像機器展（機器の展示会はメーカーが集まって開催される）にいったときに、赤外線反射膜を加工した耐熱ガラスを見かけ、何に使っているんですかと言ったら、トースターの窓につかっていますと。あれは中でパンを焼いていても意外と外は熱くならないですね。早速使ってみようと考えました。すぐに使えたわけじゃないですけど、このようにいろいろな技術を持ち寄って・・・²⁴。（括弧内筆者追加）

このようにリーダーの内藤を含めてたった 3 人の開発陣は、専門外の論文を読んで技術を一から勉強し、様々な外部イベントに参加して情報を集め、様々な知識や技術をもつ社内の技術者に意見をもとめることを通じて多様な技術を結集し、独自の装置開発を進めていった。その結果、開発スタートから 1 年後の 1996 年には診断装置のプロトタイプが完成して、名古屋製鉄所に導入されることになった。しかしながら、この診断技術が完成をみるまでには、さらに 3 年もの歳月を要することとなった。

6.2 課題に対する対応

名古屋製鉄所に実際にプロトタイプを導入して炉壁の計測を行ってみると、それまで想定しなかった様々な問題が顕在化した。

診断装置のプロトタイプにはラインセンサーをもつ4つのカメラが搭載されていた。炉壁は 6m の高さであるから1つのカメラで 1.5m分の情報を得ることになる。しかし、炭化室の幅は 45cmしかないため、十分な焦点距離を確保できない。どんな広角レンズを用いたとしてもそのままでは炉壁を真横から撮影することはできない。搭載するカメラの台数を増やせば全体の撮影できるが、1,200℃の炉内には強烈な輻射熱が発生しており、開口部を極力少なくしないと、装置自体

²³ 筆者による杉浦氏へのインタビューより。2010年2月16日。新日鐵技術開発本部（富津）にて。

²⁴ 前掲、杉浦氏に対するインタビューより。

が損傷してしまう。輻射熱の問題からしてカメラを 4 台しか搭載できないとすれば、全体を撮像するには、炉壁に対して斜めから撮影して焦点距離を確保するしかない。しかし幅 45cm の炉内に挿入されたカメラが揺れ動きながら斜めから撮影すると、ブレが大きくなって十分な精度をもった画像を得ることができない。

こうした問題に直面した開発陣が考案したのが金属製の耐熱ミラーの採用である(図表 2 参照)。炉壁に対して垂直に設置されたミラーで光を屈折させてカメラに取り込むという方法である。炉壁の高さに相当する 6m の長さをもった棒状の耐熱ミラーを、両側の炉壁に向かって 2 面だけ 20-30mm ほど削り取る。そして炉壁の画像情報を反射させてカメラに送るようすれば十分な精度で画像を得ることができる。しかしそのためには、1,200°C の炉内で損傷することなく機能する耐熱ミラーが必要となる。またミラーが加わったことによって従来よりも多くの冷却水を循環させるような大がかりな装置を新たに建設しなければならない。こうした問題に対処するための装置の改造にはその都度数ヶ月の期間を要することになった。

もう 1 つの問題は、炉壁の凹凸をいかに測定するのかという問題であった。耐熱ミラーをつけることによって炉壁の詳細な表面画像を得ることはできる。しかし表面の画像からは凹凸情報はわからない。診断装置にレーザーの距離計をたくさん積むという方法も考えられる。しかし耐熱ミラーの装着によって幅 45cm に挿入する装置としては既に限界の大きさであった。別途装置を付け加える余裕はない。また多くの距離計を搭載すると、窓から入る輻射熱の問題で装置がダメージを受ける危険性がある。余計なスペースをとることなく、輻射熱を受ける窓も極力減らしたい。開発陣がこうした難題に直面する中で内藤が考えついた方法が、ラインセンサーの視野に入る壁面(実際には壁面の線)に向けてカメラの下部から斜めに複数のレーザーポイントをあてるという方法であった。もし壁面凹凸があれば、レーザーポイントのあたる位置がずれるので、カメラ側で検知することができる。そのずれ情報をコンピュータで計算して凹凸情報へと変換する。こうすれば、表面の画像認識も凹凸の測定も同じカメラを用いて行うことが可能になり、窓もカメラ 1 つに対して 1 つ追加されるだけで、輻射熱の問題も最小化できる。こうして開発陣は、スペースの問題と輻射熱の問題を同時に解決しつつ、高精度で素早い凹凸測定を実現することに成功した。

6.3 大がかりな改良と現場の協力

名古屋製鉄所における装置の改良には 3 年もの年月を要することになった。問題解決の新たなアイデアが浮かぶと、試験機を用いてその効果を確認、富津のラボに戻って実験を繰り返し、最終的には装置のおおがかりな改良が施される。こうした大がかりな改良には、その都度、半年から 1 年の年月を必要とした。当時の様子を杉浦は次のように語る。

・・・レーザーを斜めから多数出して測るという原理を何ヶ月もかけて考えて、では、それを載せるにはどうしたらいいのかと。真っ赤な壁にレーザーをあてるので、赤いレーザーでは見えないじゃないか。では何ワット必要なのか、というのを計算して、レーザーを1本買ってきて窓を加工して付けてと、また何ヶ月もかけて改造していくわけです。・・・場合によっては富津にもどってきてラボレベルでレーザーを調べる。半年、1年がかりでの改造という感じなんです。・・・他の産業に比べるとずいぶんのんびりしているように思われるんですけど、大がかりな試験なんです²⁵。

こうした大がかりな試験を進めるには現場の人々の協力が不可欠であった。この段階では診断技術のみの開発であったため、開発陣も含めて誰も、補修技術を含めた全体像をきちんとイメージできてはいなかった。現場も、この技術の導入による職場の変化を具体的にイメージしていたわけではなく、むしろ、研究所が新しい技術をもってきて、何かをつくろうとしていることに興味をもち、自主的な協力を惜しまなかったという。その後、補修装置を含めて大分工場に1号機が導入されることになるのだが、その時も現場の全面的な協力が、導入の実現にとって極めて大きな役割を果たすことになった。

6.4 さらなる課題：ノイズ処理アルゴリズムの開発

このように1999年に診断装置は一応完成した。しかし画像処理のソフトウェアに関してはまだ多くの改善を必要としていた。この改良作業は、その後、補修装置とともに大分工場に実機が導入される段階まで続いた。内藤と加治屋は別の開発に移り、ソフトウェア開発は一人残った杉浦が担当した。

画像処理で問題となったのはブレからくる凹凸情報のノイズであった。診断装置は炭化室に揺れながら入っていく。装置が壁に対して付いたり離れたるように揺れるため、そのままでは、その揺れが凹凸情報として認識されてしまう。実際の壁面の凹凸と装置の揺れをいかに分離できるか。正確な凹凸情報を得るにはこれが課題となった。

1999年以前には、傾斜センサーによってハード的に装置の揺れを検知方法を探索していた。しかし6mの高さもある装置のmm単位の揺れをハード的に検知することは難しく、技術的に行き詰まった。そこであらためて、ソフトウェアによって揺れと凹凸情報を分離することにした。

装置のカメラ搭載部分は常に直線を保ったままで揺れるので、揺れによる疑似的な凹凸は壁に対して全体的に生じる。しかし凹凸は壁の一部だけにしか存在しない。したがって、単純化していえば、この差分をとれば、真の凹凸情報をえることができる。こうしたアイデアに基づいて、

²⁵ 前掲、杉浦氏に対するインタビューより。

画像処理ソフトウェア技術が完成したのは 2004 年のことであった。杉浦は完成にいたるまでのことを以下のように述べている。

6メートルのものがミリ単位で揺れているのをどうやって取り除くかということで、すぐに使える技術はなく、実は 2004 年に完成したけど、1999 年から 2004 年までの途中 2 年は私が悩んでいる期間でした²⁶。

一方の補修技術に関して、1999 年までの期間は、溶射バーナーの開発などの要素技術の開発を行っていた。1999 年に診断技術がほぼ確立し、炉壁の損傷状況の詳細な観察が可能となり、補修装置の要求仕様が明確となったことを受けて、開発陣は具体的な補修装置の開発に着手することとなった。

7. 補修技術の開発と DOC 第 1 号機の導入:1999–2003

7.1 診断・補修一体導入の要求

炭化室炉壁補修の実効性を上げるには、炉壁状況を正確に診断した上で、その情報に基づいて高精度に補修しなければならない。つまり診断装置と補修装置を一体化した導入が必要となる。しかし 1999 年時点で、診断装置はほぼ完成したのに対して、補修装置は未完成であった。また、診断装置による炉壁の診断結果から明らかになった補修装置に対する要求スペックは、当初想定したスペックよりもはるかに高いものであった。そのスペックを満たすために診断装置開発の場合と同じような大規模プロトタイプ開発をおこなうとなれば、さらに数年の時間を要することは明らかであった。

こうした状況の中、診断補修技術の早期確立の必要性を強く認識していた本社サイドでは、診断と補修の一体化技術による延命効果を実機において検証することがトップダウンで決定された。補修技術が確立を待たずして、現場での実機化をすすめるという決定である。技術を十分に確立した後に実機化を行う、新日鐵の堅実な社風からすると、これは極めて異例なことであった。

実機1号機の対象炉としては、大分製鉄所の第 1、第 2 コークス炉が選定された。当初は、最も古い名古屋製鉄所のコークス炉に導入することが検討されていたが、診断装置で観察した結果、名古屋製鉄所のコークス炉の損傷度は比較的低いことが判明した。そこで、炉壁の損傷に

²⁶ 前掲、杉浦氏に対するインタビューより。

対して強い危機感を持っていた大分製鉄所への導入が計画され、大分製鉄所は、補修装置技術が未完成である段階での実機化を受諾した。こうして 1999 年から急遽補修装置の実機化へ向けた開発が始まった。

7.2 開発体制

1999 年、診断・補修一体装置 DOC の開発、実機化プロジェクトがスタートした。環境・プロセス研究開発センター(以降 EPC と称す)²⁷の機械技術部 FA グループで自動化、省力化関係の仕事を担当していた阿波靖彦は、その知見を買われプラントエンジニアリング部コークスグループに異動し、プロジェクトリーダーとして実証機設計製作の最初から最後までを担当することとなった。

阿波は、実機開発の全体統括を行うと同時に、機械装置の設計からエンジニアリング、社内実機展開を専任として担当することになった。そして阿波を中心に、計測・制御研究開発部、機械技術部、システム制御技術部、無機材料研究開発部(炉材技術)、土木建築技術部を含む、部門横断的な開発兼エンジニアリングチームが編成された。

1999 年時点でハードウェア的にはほぼ完成していた計測装置については、実機化エンジニアリングの段階でシステム制御技術部にバトンタッチされた。一名が専任で実機化を担当し、その後の全社展開も行った。課題として残されていた凹凸計測ソフトウェアの改善は、計測・制御研究開発部の杉浦が引き続き担当した。

機械設計は機械技術部 FA グループマネジャーの中嶋淳²⁸が専任で行った。無機材料研究開発部はレンガの材質など炉材関係を研究する部門であるが、溶射補修技術に関して、溶射材料や集束型溶射バーナーの開発を担当した。また、専任ではないものの、土木建築技術部、電気計装技術部も協力した。以上のような、様々な専門家の集まった横断チームの他、大分製鉄所の機械設備の専門家 3 名が就き、全社的協力体制のもと、診断・補修一体装置 DOC の開発とエンジニアリングが進められた。

7.3 開発と実機化の並行作業

プロジェクトに与えられたミッションは、2000 年末までに大分製鉄所に DOC の実機 1 号機を導入し、その後、全社に 10 基分の DOC を展開することであった。2000 年末に導入目標が設定されたのは、老朽化したコークス炉の早期診断・補修に対する本社側からの要請によるものであった。

²⁷ EPC では、環境・エネルギー・資源リサイクル分野への対応、製鉄、製鋼、圧延の製鉄プロセスの新技术開発、ならびにそれらの設備の実機化エンジニアリングが行われている。

²⁸ 現在、技術開発本部環境・プロセス研究開発センター機械技術部マネジャー

1999年当時、診断装置はほぼ完成していたが、補修装置はまだラボベースの試験段階にあった。本来であれば研究開発を終えてからエンジニアリングに移行するのが理想である。しかしコークス炉の劣化は待たないという状況であり、なるべく早く実機を導入したい。研究開発の終了を待っている時間的余裕はない。そこで開発陣は、研究開発と実機化を同時に進めるコンカレントエンジニアリングの方法を採用することにした。

しかし1999年の時点では、DOCの全体構成、装置駆動方式、運転制御システム、狭隘部安定挿入、全体の断熱・冷却の方法など、あらゆることがまだ見えていない状態であった。作業を自動化するために必要な、炉壁補修のあるべき姿や方法についての原理的な理解も不十分であった。このように、開発の終了を待たずに実機化を進めるという「力業」ゆえ、開発陣は、想定外の様々なトラブルに直面することとなった。その結果、大分製鉄所への実機第一号期の導入は計画よりも3年間も遅れることになった。阿波は当時の状況をつぎのように語っている。

・・・どういふものをつくるべきかというのが、このタイミング(1999年)では見えてなかった。見えない谷があるということが見えてなかった。・・・私の実感としては苦節3年と。3年間この谷を埋めるのに時間がかかったことになります。・・・選択肢の1つは、開発が終わった後にエンジニアリングに移ろうと・・・もう1つは、見えないけどもう走っちゃえと、実機をつくらうという走りかたがあると思いますが、今回は社のニーズもありまして、ここの部分(谷の部分)は実機をつくりながら埋めていくという、・・・コンカレントエンジニアリングですね²⁹。

7.4 課題解決プロセス

7.4.1 基本構造の決定

1999年に補修装置の開発と実機化が決定した後、開発陣はすぐに、補修装置の形状と構造、炭化室への挿入方法などの検討を始めた。補修の精度を保つためには、バーナーの溶射間距離と角度を維持することが必要である。そのためには非常に近い距離で補修をする必要がある。そこで開発陣は、補修機そのものを炉内に入れる構造とすることを決定した。

長尺アームを炉外から駆動する(人力作業の延長線上の)方式も考案されたが、それでは、アームの撓みや振動から高精度な手先制御は困難である。そこで、長さ2~3mの短いリンクアームと関節構造の組み合わせで剛性を確保した多関節のマニピュレータを炉内に挿入し、補修部近辺の炉底に脚で自立させ、3次元の動作により位置を決め、補修を行う方式を考案した。

²⁹ 筆者による阿波氏へのインタビューより。2010年2月16日。新日鐵技術開発本部(富津)にて。

装置を直接炉内に挿入するという、この大胆な発想が本技術開発のポイントとなったのだが、それが同時に、幅狭設計という困難な課題を生み出すことになった。

7.4.2 装置挿入上のトラブル

繰り返し述べるように炭化室の高さは 6m もあるのに幅は 45cm しかない。この炭化室に装置全体を挿入するのだから、その形状は当然、薄く、細長くなる。この薄さの中に、3 軸の同軸制御を行うマニピュレータの他、LP ガス、酸素ガス、溶射体、エア等の入ったホース、装置を動かすギア系など全て組み込まなければならない。それゆえ装置内部のレイアウト決定は難しい方程式を解くような作業であった。

できあがった補修装置は、まっすぐに立てて炉内に挿入した状態で、炉壁に対して片側 14mm 程度の余裕しかない。必要な機能をすべて搭載するためには、これ以上幅の狭い装置を作ることは困難である。その一方で、300 トン近い重量の装置を走らせるため、装置の傾きややねりが生じるのは避けられない。また、炭化室とその入口にも傾きがあるため、相対的な傾斜もある。それゆえ、装置の本体やそれを覆う断熱材が炉の窯口に接触するというトラブルが何度も発生し、大きな問題となった。

この問題に対して開発陣は、1,200℃の熱から装置を守る能力をもちつつも、しかも幅が狭く、低伝導率で変形しにくい断熱材の開発を進めた。もう1つは、炉と装置の相対的な傾斜を制御する、傾斜補正装置の開発を行った。これら2つの開発を組み合わせることによって、片側 14mm という制限の中でも、炉に接触することなく円滑の装置を挿入できるようになった³⁰。

7.4.3 断熱と冷却の問題

1,200℃という過酷な条件下から装置を保護するには高度な断熱と冷却の技術が必要となる。もちろんこれは診断装置の開発段階で既に直面していた課題であったが、診断装置向けに開発された冷却や断熱の方法を補修装置に応用することはできない。診断装置の炉内滞在時間は約 4 分と短いのに対して、補修装置の炉内滞在時間は数時間にも及ぶからである。また可動部の多い補修装置には診断装置以上の断熱性能が求められる。

1,200℃の高温環境で多関節構造の装置を駆動させた例は無く、長時間動かしてもダメージがでないよう炉壁の輻射熱から装置を保護する新たな工夫が必要であった。また、補修装置を長時間炉内に入れると炉壁を冷やしてしまうため、炉壁保護のためにも補修装置の断熱が重要となった。この課題に対して開発陣は、熱伝導率が極めて低い材料を装置の中にサンドイッチ

³⁰ 傾斜の問題解決については、2003 年の大分製鉄所の実機 1 号機の導入に間に合わず、2 号機から導入されている。

チ構造に挟み込んだ。また補修装置の冷却には、パイプを通すのではなく、装置の内部に迷路のように水路を刻み込んだジャケット構造が採用された。ジャケットの中には、モーター、ギア、ユーティリティ配管、電気計装配線、給排水ホース、溶射用粉体やガスのホースなどが内蔵されており、その周りに非常に複雑な水路が巡っている。水冷ジャケット構造では、ジャケット内での冷却水の流れに偏りが生じて、高温の冷却水が滞留して沸騰して装置を傷めるという問題が起きやすい。こうした問題を避けるために開発陣は試行錯誤を繰り返した。

7.4.4 炉内挿入時のステックスリップ現象

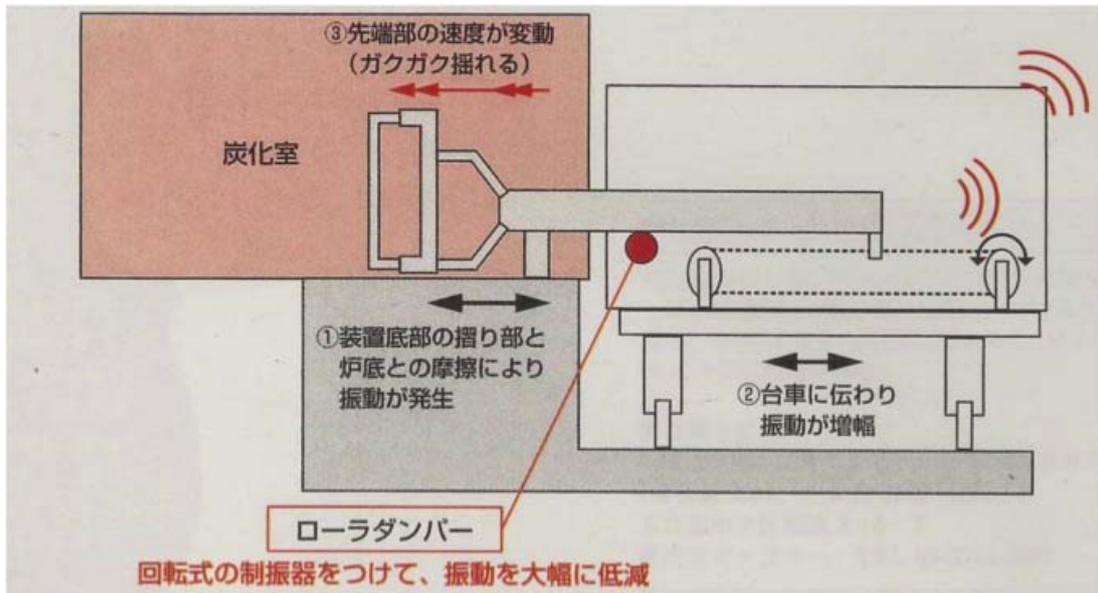
実機化の過程で最も大きな問題となったのが、DOC をコークス炉内に挿入する際にステックスリップ現象³¹が発生することであった。炉底に重い装置を滑らせていくことにより、コークス炉の底面と装置底部との間に摩擦が生じるが、その摩擦抵抗に変化があるために振動が生じる。消しゴムを机の上で引っ張ったときにかくんかくんという動き方をするのがこの現象である。消しゴムとは異なりDOCの診断装置と補修装置はそれぞれ10トンと20トン程の大重量であるために、この振動が特に大きく、良好な診断画像の撮像を妨げる障害となっていた。

この問題に対して当初プラントエンジニアリング部は、無機材料研究開発部と共同で、摩擦の少ない材料を装置に装着するという方向で解を模索した。しかし耐摩耗性や寿命という点からその材料を利用することが不可能であることが判明し、断念することになる。試行錯誤を繰り返す中、システム制御技術部や製鉄所の制御に詳しい担当者との情報交換から解決の糸口が見つかり、最終的にはローラー式のダンパーを考案し、実機に採用することになった。

図表 4 に示されるように、重い装置はローラーの上を走るようになっており、装置と炉底その間の摩擦抵抗が変化してステックスリップ現象を起こそうとすると、ダンパーを制御する油圧回路によって、その急激な動きを抑えるような逆の抵抗を発生させる。ローラーのダンパーを採用したのは装置を16mも動かすからである。ローラーダンパーを採用することによって装置台車の振動振幅は当初の10分の1にまで減少し、円滑な挿入を行うことが可能となった。

³¹ 物体と物体がすべり運動をするときに、スムーズに動かず摩擦と急な滑りを繰り返すことにより起きる振動現象。立て付けの悪い障子を動かすときなどに見られる。

図表 4: ステックスリップ現象とその対策



出所:NIPPON STEEL MONTHLY, 2009.6, p5

7.5 課題解決における協力体制

大分製鉄所の現場における実機試験で開発陣は何度も失敗を繰り返すことになった。毎日失敗する度に、開発陣は作業室に集まって、反省会を開いた。反省会では様々な意見が出され、対策が決まると、次の日にそれを試してみる。そしてまた失敗すると反省会を開く。こうした毎日が続いた。当時の様子を阿波はつぎのように述べる。

朝、ミーティングをして、試験をして、夕方に反省会をして、じゃあ、次にこういうことをやろうというミーティングを回していくわけですね。こういうルーティンを回していく中で、対策アイデアができあがったら、今度はオフラインでその現象を定量的に解析をして、・・・これはよさそうだから実装してみようということで、実装して実機試験に回していくと、こうして1つ1つ課題を解決していきました³²。

実機化では製鉄所で試験が行われるため、現場やグループ企業の技術者との密な交流が不可欠であった。その協力が得られたことは非常に大きかった。補修作業は、約 1200℃の炉の前で、7-8名が交代しながら重いランスを使って行う3K作業であることから、現場の作業員には、作業を楽にしたい、無人化したいという気持ちが強くあり、診断・補修を自動で行う装置

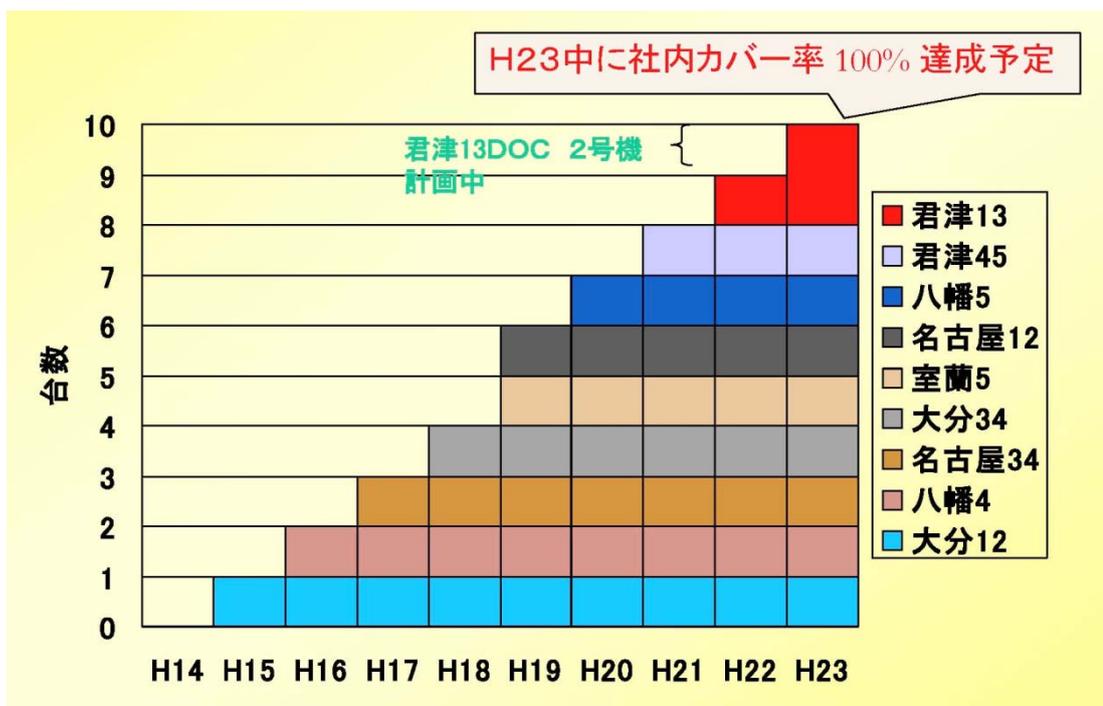
³² 前掲、阿波氏に対するインタビューより。

DOC の開発に非常に協力的であった。また現場には、設備技術の専門技能者や設備メーカーの技術者もおり、それらの人たちからも多くの支援を得ることができた。さらに研究開発センターの要素技術部隊とも頻繁な情報交換を行った。

このように、コークス炉の実態をよく知る工場、設計・製造力を持つグループ企業、高度な専門技術を持つプロジェクトメンバーが一体となって議論を行い、そのアイデアをラボ試験、実機試験へとつなぐことで、多くの課題が解決された。

こうし DOC は、2003 年に完成し、大分製鉄所に導入された。大分製鉄所の第 1、第 2 コークス炉で実証機評価を完了以降は、同機を 1 号機として、合計で 10 機が全社的に展開され、現在も稼働中である。また 2010 年までには社内の全コークス炉に DOC を配備する予定となっている³³(図表 5 参照)

図表 5:DOC の社内展開



出所: 新日鐵社内資料

8. 開発成果

³³ 大分製鉄所における実証機試験を経た後の、実機設備構成上の主な変更点は、診断・補修各作業の切り替えを迅速化するために、それぞれに別々の挿入駆動装置を設けたことと、装置と炭化室の相対的傾きを補正するための装置を設けたことである。また、装置の整備、試運転を目的としたテストコースを炉壁側に設けた。

図表 6 には、従来の人手による診断・補修から DOC に移行した時の効果を示したものである。

まず、測定精度は±2mm となり、目視と比較して 5 倍の精度が実現された(炉壁画像解像度は 1mm、炉壁凹凸の分解能は 3mm)。また、従来は 30 分かかっていた診断時間は 4 分に短縮された。それによって装置の挿入による炉壁の温度低下の問題も極小化された。診断時間の大幅短縮によって、コークスの生産性を維持しつつ多くの炭化室の診断を行うことができ、効率的な補修が可能となった。DOCを導入することにより、1 炉団約 100 の炭化室を順に診断、炭化室個別の詳細な損傷情報をデータベース化し、効率的な補修優先順位付けを行い、炉壁破孔の予防保全を行うことができるようになった。

補修についても大幅な高精度化が実現された。補修面の仕上がり平坦度±5mm を実現し、補修後の耐久性も高まった。凹凸度が±5mm 以上になると押出負荷が急激に上がる為、平坦度±5mm は炉壁の負荷を落とす効果的なポイントである。補修部の耐久性も従来の 1-2 年から 5 年以上と大きく向上し、コークス炉の寿命延長に貢献している。

作業員は DOC の操縦を運転室からの完全遠隔操作により行うことになり、作業環境が大幅に改善された。また、人員も従来は約 8 名必要であったのが、2 名で行うことが可能となった。これによって現場の作業員は高温下での重労働から解放されることになった。

DOC 導入によりコークス炉の延命が可能となるため、コークス炉のリプレース時期を先延ばしにすることができる。その経済効果は設備投資額の金利負担等の低減により総額数百億程度と試算される。さらに、生産性の向上や稼働率の安定化による省エネルギーの実現は、経済効果とともに環境負荷の低減にも一定の貢献をしている。

図表 6: 従来技術と DOC の技術内容の比較

		従来技術(目視診断、手作業補修)	DOC (完全機械化)
診断	測定精度	±10mm 程度	±2~3mm
	診断時間	約 30 分/窯	4 分/窯
	作業負荷	高熱被爆作業	低(運転室)
補修	補修精度	±20mm 程度	±5mm
	補修効率	0.1 m ² /hr	0.7 m ² /hr
	補修部耐久性	1-2 年	5 年以上
	作業負荷	高熱重筋作業(3K)	低(運転室)
人員		10 名	2 名(監視)

出所: 新日鐵資料

9. 開発プロセスの特徴と今後の展望

高度経済成長に合わせて 1960 年代中盤以降短期間に集中して建設したコークス炉が同時期に寿命を迎えるという深刻な問題に直面した新日鐵は、炭化炉の診断と補修を自動化した DOC を自社開発することによって、コークス炉の寿命を大幅に延長し、経営に対する影響を回避した。DOC の開発は決してスムーズに進んだわけではなかったが、新日鐵の開発陣は、1,200℃の炭化炉の中に直接診断カメラや補修装置を挿入するという常識破りのアイデアを実際の装置として実現することに成功した。

DOC 開発の成功理由はおそらく多岐にわたり、成功につながる因果メカニズムを特定することなど到底できないが、以下で、DOC 開発を支えていた背景要因を開発プロセスの特徴として記述することは意義があるかもしれない。

9.1 全社的な課題の共有とトップダウンの意思決定

新たな技術開発を進める際には社内で様々な反対意見がでることが珍しくないが、DOC の開発過程ではそうした反対は一切みられなかった。コークス炉の寿命問題は、誰もが認める深刻な問題であり、社内でのベクトルは常時一致していた。経営陣もこの開発には積極的であり、大分工場への実機第 1 号機の導入は、トップの決断に基づく本社側からの依頼によるものであった。実機導入の予算申請は製鉄所が本社に対して要求するのが通常である中、これは極めて異例なことであった。DOC の実機化で重要な役割を果たした植松宏志³⁴はその時のことを次のように述べている。

通常我々、実機の設備予算というのは、製鉄所側が要求元となって、それを本社に提出して、それに対して判断が下されて、・・・こういう流れなんですね。大分の (DOC) 1 号機はまったく逆なんですよ。本社側が、製鉄所はまったく寝耳に水なんですけど、大分につくりたいと・・・。診断装置のプロトタイプができあがって、・・・うまくいったなど、それはそれでよかったんですが、本当にこれで延命できたのかと・・・。それで当時の副社長が、「実機を 1 機うってみろ」と、こういう決断をしてくれて・・・。苦節 3 年はあったんですが、・・・トップダウンがあったということはスタートしては大きかったですね³⁵。

³⁴ 現在、新日鐵製鉄技術部部長。

³⁵ 大河内賞記念プロジェクト講演会における植松氏の発言より。2010 年 1 月 20 日。一橋大学イノベーション研究センターにて。

9.2 専門を超えた学習と研究機能の地理的集約の効果

高温で狭いというコークス炉の特殊な環境で機能する装置には、外部で開発された汎用的な技術を採用することはできなかった。それゆえ開発陣はほとんどの技術を独自開発しなければならなかった。しかし技術開発に携わった技術者は、診断装置で4人、補修装置でも4-5人程度であり、装置開発に必要となる技術要素を網羅するだけの専門家はいなかった。それゆえ開発メンバーはそれぞれ、自分の専門分野を超えて、装置開発に必要となる技術を自ら一から勉強する必要にせまられた。杉浦は次のように述べている。

鉄鋼メーカーは電機メーカーとちがうので、そんなにその専門家が、・・いるわけじゃないので、必要があればそれを勉強してやると。もちろん大学の先生に相談しにいたり、社外の専門メーカーに相談にいたり、買ってきたり、そういうことは最大限研究の効率化という意味ではしますけど³⁶。

専門外の技術を学習しながら課題解決を進める上では、社内の多様な専門の研究者、技術者からの支援も極めて大きな役割を果たした。社内における専門分野間の技術交流を促進したと思われるのが1991年に行われた研究所の統合である。新日鐵では、1991年に組織体制の変革が行われ、千葉県富津市君津製鉄所の隣に位置する技術開発本部総合技術センターの研究所(鉄鋼研究所、先端技術研究所、環境・プロセス研究開発センター)に、研究開発とエンジニアリングの部隊が集められた。それにより、プロジェクトごとに基礎研究から実機化エンジニアリングまでが一貫して行われる体制となり、様々な部門の専門家が結集し、知恵を出し合えるような環境が生まれていた。

実際、診断装置にラインセンサーを用いるというアイデアは、プラントエンジニアリング部の横溝が隣の計測・制御研究開発部に相談を持ちかけたことから生まれものである。補修装置の開発においても、開発チーム外の他の研究者からの支援が、課題解決を促進していた。また補修装置開発では、機械、制御、材料などの異なる専門領域からなる横断的な開発チームが編成されたが、チーム内でのアイデア交換や相互協力も、メンバーが所属する各部署が同じ場所に存在していることによって容易になっていたと考えられる。さらに、研究所の隣に君津製鉄所があったため、開発技術者が現場に頻繁にでむいて、実機による試験を行うことができたことも大きかった。

³⁶ 前掲、杉浦氏に対するインタビューより。

9.3 おわりに

DOC はコークス炉の寿命問題に対応して開発された技術である。しかし DOC による診断・修復は寿命延長だけでなく、熱効率や稼働率を向上させることによって、CO₂ 排出量の削減にも貢献している。鉄鋼業が排出する CO₂ の量は、日本の産業全体の 37%にも及び、コークス炉が発生する CO₂ は一貫製鉄プロセスの 10%を占めている。高炉においてコークスによる還元を維持する限り、コークス炉の省エネルギー化は、鉄鋼メーカーにとって終わりのない課題である。新日鐵では環境調和型製鉄プロセスとして、次世代コークス炉の技術開発を進めているが³⁷、その一方で、DOC による診断と補修の精度とスピードのさらなる向上も、変わらず重要な課題となっている。

³⁷ SCOPE21(石炭高度転換コークス炉製造技術の開発)の実証炉 1号機が新日鐵大分製鉄所の第5コークス炉として平成20年2月に稼動した。

参考文献・資料

新日本製鐵株式会社 技術開発本部「炭化室診断補修装置 DOC の開発」(大河内賞ケースプロジェクト講演会用資料 2010年1月20日)

新日本製鐵株式会社 技術開発本部 環境プロセス研究開発センター「鉄鋼製造におけるコークスとは？」(大河内賞ケースプロジェクト講演会用資料 2010年1月20日)

境田道隆・阿波靖彦・杉浦雅人・中嶋淳・中村功・笠井清人・野口敏彦・塚本義則「コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置の開発」『新日鐵技報』2006年第384号, pp63-68.

笠井清人・筒井康志「最近のコークス炉用耐火物技術について」『新日鐵技報』2008年第388号, pp54-61

財団法人大河内記念会「コークス炉リフレッシュの実現を可能とした極限環境下での診断・補修技術の開発」『大河内賞受賞業績報告書 第55回(平成20年度)』2009年4月, pp98-115.

新日本製鐵株式会社「コークス炉炭化室診断・補修技術」『NIPPON STEEL MONTHLY』2009年6月号, pp1-6.

鉄鋼新聞社『鉄鋼年鑑』各年版

日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』各年版

「新日鐵、コークス炉自動補修、設備導入へ 寿命5年超延びる」『日本経済新聞』(2009年3月9日)

「新日鐵と JFE、コークス炉、寿命50年に一効率よく補修、更新集中避ける」『日本経済新聞』(2004年7月22日)

ホームページ

新日本製鐵株式会社ホームページ (<http://www.nsc.co.jp/>)

IIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2010

NO.	著 者	タ イ ト ル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003 年 2 月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機—自動販売機業界での成功要因」	2004 年 3 月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機—新たなる課題への挑戦」	2004 年 3 月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機—飲料自販機ビジネスの実態」	2004 年 3 月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004 年 3 月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績 V 字回復への改革」	2004 年 3 月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004 年 3 月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004 年 3 月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004 年 3 月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004 年 3 月
CASE#04-12	伊諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004 年 10 月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004 年 10 月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004 年 11 月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 —300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化—」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A)：事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B)：事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鑄造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鑄造システムの開発」	2009 年 7 月
CASE#10-01	清水洋 工藤悟志	「東芝： 0.6 μ m 帯可視光半導体レーザの開発」	2010 年 1 月
CASE#10-02	山口裕之	「東レ： 非感光ポリイミド法に基づくカラーフィルターの事業化と事業転換」	2010 年 3 月
CASE#10-03	三木朋乃 積田淳史 青島矢一	「NHK 放送技術研究所・NHK エンジニアリングサービス・日本ビクタ 株式会社： 話速変換技術を搭載したラジオ・テレビの開発」	2010 年 4 月
CASE#10-04	青島矢一 高永才 久保田達也	「日本電気： 最先端 LSI 量産を可能にした ArF レジスト材料の開発」	2010 年 5 月
CASE#10-05	青島矢一 大久保いづみ	「新日本製鐵： コークス炉炭化室診断・補修技術」	2010 年 7 月
CASE#10-06	久保田達也 青島矢一	「横河電機： 高速共焦点顕微鏡の開発と事業化プロセス」	2010 年 7 月