環境調和社会の実現を目指す製鉄技術開発
学会基調講演録

上島良之（うえしま　よしゆき）
新日鐵住金株式会社　顧問

日本大学生産工学部で開催されました経営情報学会2015年春季全国研究発表大会において，新日鐵住金株式会社顧問の上島良之様による基調講演が行われました．上島様は，主として製鋼プロセス，即ち鉄鉱石を還元溶解したのち不純物を除く精錬と半製品の形状に鋳造する工程の研究開発がご専門の第一級の冶金エンジニアです．その業績は，200件以上の出願特許と40報以上の学術論文で公表され，日本鉄鋼協会および日本金属学会から多数の表彰を受けておられます．また，学協会活動にも鋭意取組まれ，複数の大学客員教授を兼任し，学生や企業若手技術者に対する育成啓蒙活動を通じて社会貢献に尽力されてきました．本講演会では，為替変動や製造業の収益や設備投資の動向など，最近の日本経済のお話しを皮切りに，わが国の製造業と鉄鋼業との密接な連関，製鉄の新技術開発や設備投資の考え方について，事例を交えて興味深いお話しを伺うことができました．貴重な御講演内容の一部になりますが，以下にご紹介します．

1. はじめに

この度は，経営情報学会春季研究発表大会の基調講演という大変光栄かつ貴重な機会を与えて頂き，誠にありがとうございました．本大会のテーマ「インテグレーテッド・インダストリー」の「生産」にスポットを当てた形で，表題の講演を承りました．最初に，日本経済と製造業の活力，鉄鋼産業の位置づけと課題を整理し，次に，最近の製鉄技術開発の事例をご紹介し，活動の根底にある「見える化によるイノベーション」の重要性を述べます．

2. 日本の貿易収支と製造業の活力

資源小国のわが国は，原材料とエネルギー資源を輸入し，これを付加価値の高い工業製品に生まれ変わらせ輸出する，いわゆる加工貿易により成り立っていることは自明です（図1）．リーマンショック以後続いた停滞を脱し，鉄鋼業を含め，世界的なシェアを持つ運輸・産業機械・重工・化学・電機・情報通信などの有力企業が高いレベルで収益を回復され，新鋭設備投資計画を一斉に公表されたことはご存じの通りです．今後，ものづくり立国の推進に一層のはずみが付くと確信しています．

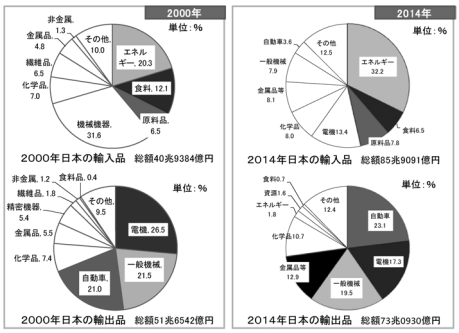


図1　日本の貿易収支．財務省統計［1］に基づき作成

3. 鉄鋼業の位置づけ，課題と責任

現在，世界の鉄鋼市場は100兆円で年間15億tが生産されています．鉄鋼生産量はGDPと連動して増加し，鉄鋼業は2000年以降年率5%で拡大する成長産業です．また国内市場は10兆円で，毎年1億t強の鉄鋼製品が生産されています．いわゆる金属製品の95%は鉄鋼であり，これが，鉄はベースメタルと呼ばれる所以です．物質・エネルギー収支の観点で見ますと，国内鉄鋼業界は，日本国全体の総物質投入量15億tの22%，1次エネルギー供給量22EJの10%を使用しており［2］，当然，社会的な責任があります．1970年代のオイルショックを契機に，省エネルギー・省CO_2技術の技術開発を，業界を上げて継続的に実行し，現在，世界最高

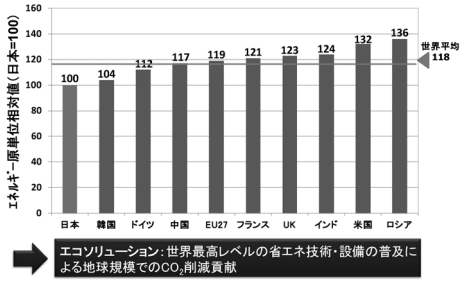


図2　粗鋼製造エネルギー原単位の国別比較．RITE の報告［3］に基づき作成

レベルのエネルギー原単位で，鉄鋼製品の製造を実現しています（図 2）．その結果，鉄鋼製品はもちろん省エネルギー技術も輸出し，地球規模の CO_2 削減に貢献してきました．今後も，一層の省資源・省 CO_2 製鉄技術開発，より付加価値の高い鉄鋼製品開発，お客様とのコラボレーションによる合理的なソリューション技術開発を進めることが，お客様のニーズにお応えし，かつ，社会的責任を果たす原点と考え，推進します．

4. 『3 つのエコ』の視点で進める製鉄技術開発

現在，当社では 3 つのエコの視点で，製鉄技術開発に取り組んでいます（図 3［4］）．ここではエコプロセスとエコプロダクツ ® の一例をご紹介します．

4.1　エコプロセス

製鉄プロセスの概要と製鉄所の全景を示します（図 4［5］）．鉄鉱石原料と還元剤の石炭は全量海外から輸入し，製造した鉄鋼製品を海上輸送するため，臨海製鉄所の形態を取っています．高炉と呼ぶ装置で原料の鉄鉱石の還元と溶解を行います．高炉には上部から鉄鉱石と還元剤のコークスを層状に投入し．下部の羽口から O_2 を富化した 1200°C の加熱空気を高圧で送風します（図 5［6］）．これにより高炉内下部でコークスが燃焼し，発生した CO ガスが上昇し，鉄鉱石の加熱と還元が同時に進行します（（1）式～（3）式）．

$$C + 1/2O_2 \rightarrow CO \qquad (1)$$

$$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2 \qquad (2)$$

図3　当社が取り組む『3 つのエコ』［4］

図4　製鉄所のレイアウト例［5］

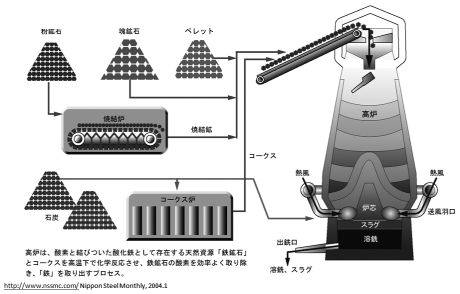


図5　鉄鉱石をコークスで還元し溶銑を作る高炉製銑工程［6］

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO \qquad (3)$$

この製鉄工程だけで鋼材製造エネルギーの 8 割が必要になるため，生産性向上と省エネルギー化の両立を目指し，1960 年代から高炉の大型化技術開発を進め，内容積 5000 m^3 超の世界最大級大型高炉を実用化しました．現在，当社は 5000 m^3 以上の大型高炉を 7 基保有しており，これが製品の国際競争力のベースになっています．大型高炉は高さが 100 m，直径が 20 m あり，反応容器として人間が作った最大級のものと言われています（図 6［6］）．

高炉の内部は円筒形の空洞で，原料鉄鉱石粒子と

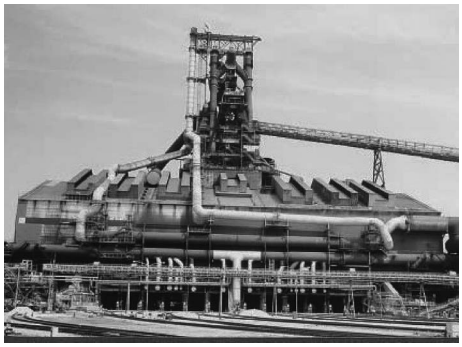


図６　世界最大級の大型高炉外観［6］

図７　高炉の炉床から見上げた炉体内部［6］

還元剤コークス粒子の最適投入が安定操業の要です．直径が大きい大型高炉ほど安定操業の難易度が増します．そこで，最新のシミュレーション技術である粒子法による原料粒子散布や，気体・液体・固体の流動と伝熱とを連成した競合化学反応の 3D モデル化で，より高精度に炉内反応を研究しています（図 7［6］～図 9［8］）．また，実際の高炉に温度と圧力センサーを多数点取り付け，1 秒ごとに計測して，ビッグデータを採取解析しています（図 10［9］）．有意な知見を集積することで「見える化」を進め，本質に迫り，より高生産性と高安定な操業技術・設備技術の開発を行っているところです．

また，還元剤のコークス製造について，生産性を 3 倍にし，CO_2 発生量の削減ができる画期的な次世代コークス炉「SCOPE21」の開発を 1994 年から 2003 年まで国家プロジェクトにより実行しました．技術開発に成功し，2008 年に当社大分製鉄所で 1

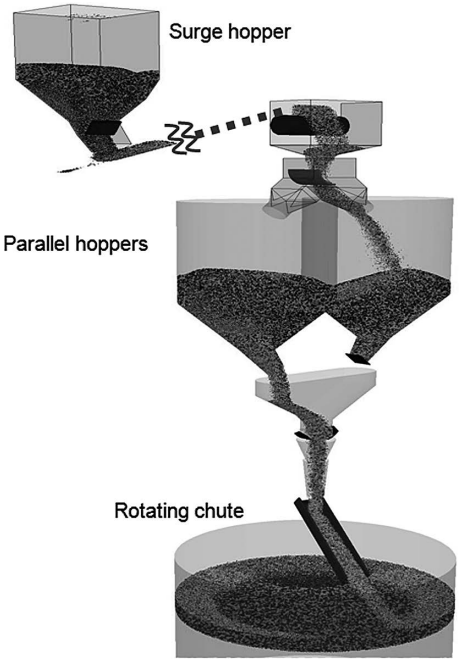


図８　高炉への原料投入シミュレーション［7］

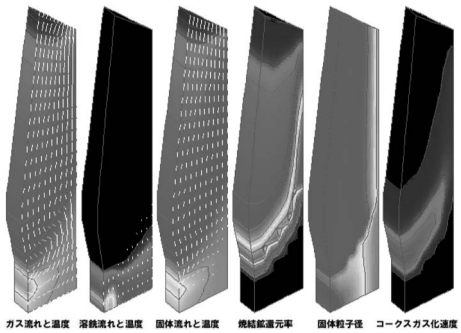


図９　高炉内化学反応の 3D モデル［8］

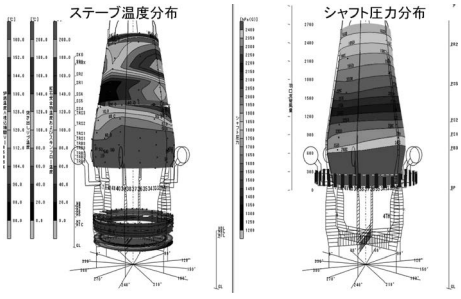


図 10　高炉の温度，圧力のリアルタイム計測 “3D-VENUS”［9］

号機，2013年に名古屋製鉄所で2号機を稼働させました[10]．従来は，石炭粒子を100°Cで8時間予熱し水分を蒸発させた後，1000°Cまで10時間かけて加熱し合計18時間でコークスを製造していました．新技術では，常温から400°Cまで30分で急速加熱し，その後，1000°Cまで5時間強で加熱し合計6時間で製造可能です．急速加熱により3倍の生産性向上とCO_2削減はもちろん，石炭の微視的構造変化により粘結性が著しく向上し熱間強度が増して，高炉内の還元反応促進に好影響をもたらすことがわかりました．一人の高炉研究者の逆転の発想が開発の原点にあり，バブル崩壊による長期不況「鉄冷え」で鉄鋼業界が合理化の真只中にあった1994年に技術開発に着手し，景気回復後の2008年に実用化できたことは幸運でした．

さらに，還元剤としてコークスの代わりに水素を使いCO_2排出量を3割低減する革新的な環境調和型製鉄プロセス技術開発「COURSE50」が，国家プロジェクトとしてスタートしました[11, 12]．鉄鉱石の水素還元は，CO還元よりも10〜100倍速い[13]というメリットがあります．一方で水素還元は吸熱反応であるため，大型高炉内部へのスムーズな熱供給が重要な技術課題です．相反する技術課題を新しい発想で克服する取組みが今なされています．

4.2　エコプロダクツ®

自動車の燃費と衝突安全性を両立する軽くて強いハイテン薄鋼板の開発の一例を述べます．鉄鋼材料の持つ性能をフル発揮させるために，当社は自動車会社と車体設計の初期段階からコラボレーションし，合理的な材料設計とソリューション提案を実行しています（図11[14]〜図13[15, 16]）．例えば，最も優れたプレス成形性が要求される外板は，プレス時には柔らかく，塗装時に熱硬化（Bake-Hardening）するBH鋼板を開発しました．さらに原子レベルでのメカニズム解明を進め，熱硬化は固体鉄中の

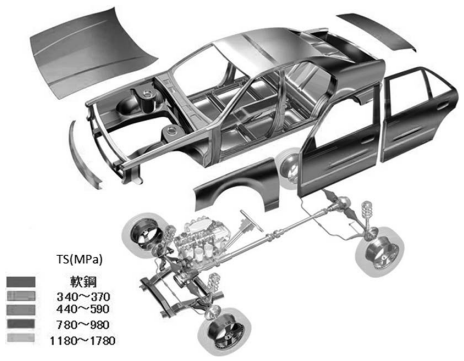


図11　軽くて強い自動車を作るための様々なハイテン薄鋼板[14]

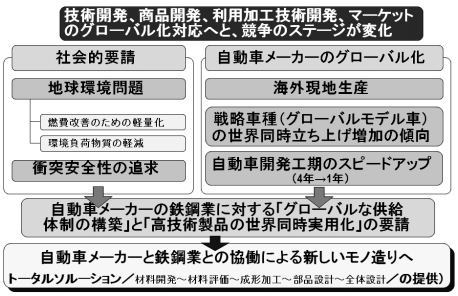


図12　お客様と一体になった開発[15]

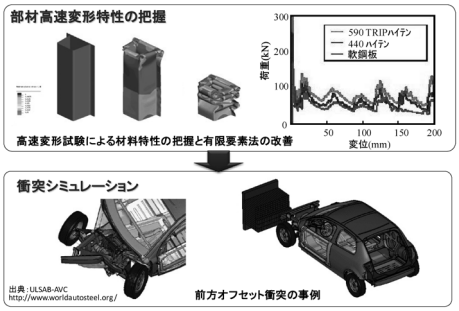


図13　車体衝突シミュレーションの事例[15]

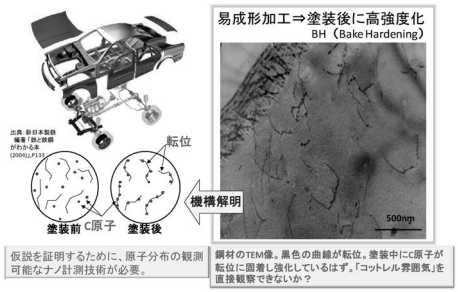


図14　易成形高強度の自動車外板用BH鋼板の開発[15]．プレス加工時に固体鉄中で移動増殖した格子欠陥の転位を，塗装焼付時の熱で炭素原子を拡散させて固着，外力が掛かったときの転位の移動を阻害し，鋼を強化した．

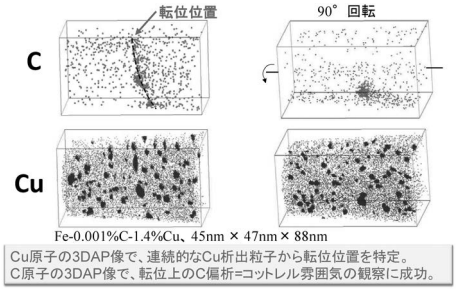
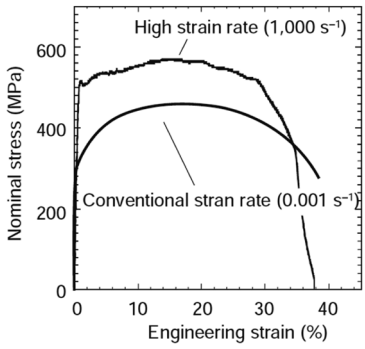
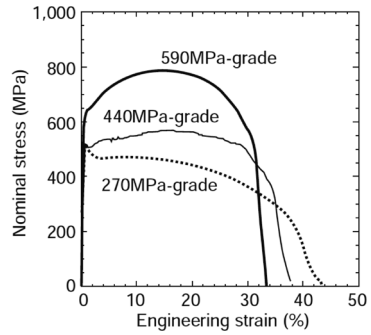


図15　固体鉄中の転位上への炭素原子固着現象「コットレル雰囲気」の直接観察．3Dアトムプローブにより成功した[15, 16]．図中の破線が転位，緑の点が炭素原子で，転位上への炭素原子の集積固着が明瞭にわかる．



静的特性と動的特性の比較（440MPa級鋼）



改良法により測定された応力ー歪関係（歪速度10^3/s）

図16　車体衝突を模擬した高速変形下での応力歪曲線[17]．世界最高精度の実測に成功した．

格子欠陥への炭素原子の固着によることを世界で初めて実証しました（図14[15]，図15[15]）．また，車体部材はもちろん，使用した鋼材そのものの衝突安全性を世界で最も正確に計測できる特殊な高速変

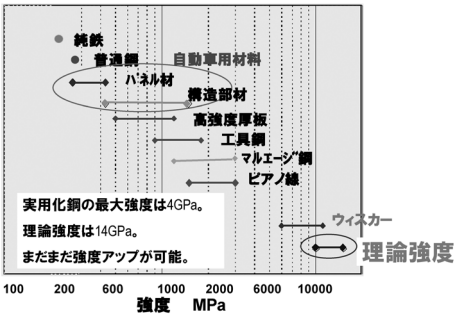


図17　鋼の理論強度と超高強度鋼への挑戦[15]

形試験機を開発，これがISO化されました．車体部品の成形加工時は柔らかく，車体衝突時には強度が増すという鋼材特性を明らかにし，より合理的な車体設計に貢献しています（図16[17]）．

この他，厚鋼板・鋼管・棒鋼・線材など多品種に亘る鋼材開発活動により，鉄の理論強度14GPaの中の4GPaまでの鋼材が，工業的に実用化できました（図17[15]）．今後，さらに高強度・高靭性鋼の開発と実用化に挑戦して参ります．いま，すべての事象を理解して製造しているわけではなく，私どもがまだ気がついていない未知の現象はたくさんあるものと思われます．新たな切り口で，ナノ・ミクロ・マクロのマルチスケールで研究開発を進め，未踏の部分を一つ一つ明らかにし，理論強度に迫る超高強度鋼材を，ミニマムのエネルギー原単位で製造できるよう技術開発を推進します．

5. おわりに

高炉の大型化による生産性向上と操業安定性の両立，ハイテン鋼材の強度と加工性の両立など，相反する要求特性を高次元で両立させる新しい技術「サプライズ」が，かつてなく求められています．鋼の本質に迫るべく，仮説を立て，高度な「見える化」技術を駆使して観察し，仮説を修正しながら，ゴールを目指し，社会に役立つ鉄鋼製品・製造技術・ソリューション技術に仕上げる，このPDCAの繰り返しで着実に技術をステップアップさせ，ものづくり立国に貢献したいと思います（図18）．小生自身も微力ですが，社内の若い世代の技術者と取り組み，お客様とパートナー企業，大学研究者の方々の

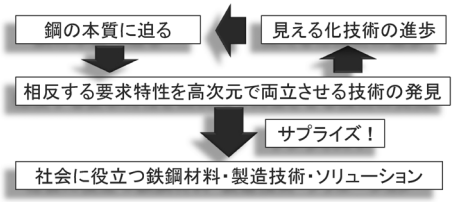


図 18　製鉄技術開発の PDCA

お力を頂きながら，さらなる技術の拡大再生産を目指します．

以上，雑駁ですが，当社で進めております製鉄技術開発の『3 つのエコ』の視点と，最近の具体的開発事例を申し上げました．ご参考になりましたら幸甚に存じます．

末筆になりましたが，貴学会と会員各位の益々のご発展とご活躍を心よりお祈り致しております．

引用文献

［1］財務省：http://www.customs.go.jp/toukei/info/tsdl.htm
［2］新日鐵住金：2012 環境・社会報告書（2012），p. 27.
［3］RITE：2010 年時点のエネルギー効率の推計（鉄鋼部門），平成 24 年 9 月 24 日．
［4］新日鐵住金：http://www.nssmc.com/csr/env/eco/index.html
［5］新日鐵住金：http://www.nssmc.com/works/kimitsu/about/visit.html
［6］新日鐵住金：http://www.nssmc.com/company/nssmc/science/08.html
［7］山村和人，松崎眞六，藤　健彦，山田　亘，中川淳一：新日鉄技報，391（2011），p. 143.
［8］新日鐵住金：http://www.nssmc.com/tech/nssmc_tech/process/03.html
［9］高松信彦，栗原喜一郎，圃中朝夫，斎藤元治，加来久典：新日鉄技報，391（2011），p. 79.
［10］新日鐵住金：http://www.nssmc.com/news/20130618_100.html
［11］日本鉄鋼連盟：http://www.jisf.or.jp/
［12］新日鐵住金：http://www.nssmc.com/csr/env/warming/future.html
［13］長坂徹也，萬谷志郎：鉄と鋼，78（1992），p. 1753.
［14］新日鐵住金：http://www.nssmc.com/tech/nssmc_tech/car/car_01/index.html
［15］勝山憲夫：水曜会誌，24（2010），p. 331.
［16］3D アトムプローブの解説例として，J. Takahashi, K. Kawakami and Y. Kobayashi: Mater. Sci. Eng. A, 535（2012），p. 144.
［17］上西朗弘，吉田博司，栗山幸久，高橋　学：新日鉄技報，378（2003），p. 21.