



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

感謝と恩返し ～これまでの製鉄研究を通じて～

Gratitude and giving-back
-Through Ironmaking Research-

水谷守利 日本製鉄(株)
Moritoshi Mizutani プロセス研究所
主幹研究員

1 はじめに

筆者は日本製鉄(株)に入社前までは名古屋大学マテリアル理工学専攻に在籍し、鉄鋼精錬や素材の高純度化、熱力学平衡に関する研究の権威である藤澤敏治先生にご指導頂いた¹⁾。また、助教や技官の方々からは実験・解析方法を、先輩・同期・後輩とは研究内容や他愛もない悩みも含めて色々と相談にのって頂いた。縁があって、研究室の同期6人全員が鉄鋼会社に入社することになり、藤澤先生は非常に喜んでおられたのが印象的であった(図1)。

現在の職場でも多くの方々に助けられながら、製鉄部門、特にカーボンニュートラルや資源劣質化に関する研究開発に従

事している。一方で、ご指導頂いた方々やお世話人になった方々への感謝の気持ちを大事にしつつも、学会発表や論文では明確に言葉や文章としてお伝えできていないところもある。そのため、今回の「躍動」では、筆者のこれまでの研究の成果に直接、または間接的に結びついたご助言・ご指導内容を紹介させて頂き、勝手ながらこの場を借りて感謝を申し上げさせて頂く。

2 高水素雰囲気下での還元粉化挙動に関する研究

製鉄原料である鉄鉱石やその塊成鉱(焼結鉱、ペレット等)は鉄と酸素が結合している酸化鉄の状態で存在してい



図1 名古屋大学 藤澤研集合写真(2009年頃)。当時、ユニクロで122色柄のカラフルなフリースが販売され、研究室メンバー全員で違う色を着用。藤澤先生曰く、「ダイバーシティ」であり、最近のD&I(Diversity & Inclusion)を先取りしている(Online version in color.)

るため、何かしらの方法で還元する必要がある。この代表的な反応容器が高炉であり、また最近は高炉によらない製鉄法としてシャフト炉も注目されている。高炉やシャフト炉は豎型向流移動層であり、炉内の通気性が生産性に大きく影響を及ぼすため、製鉄原料の強度の低下や還元粉化指数 (RDI : Reduction Disintegration Index) の増加は、装入物粒径と炉内充填層空隙率の低下をもたらし、通気抵抗の増加を引き起こす^{2,3)}。還元粉化とは、焼結鉱やペレットがヘマタイトからマグネタイトへ還元される過程で、その粒子内にき裂が生成し、炉内で粉が発生する現象であり、過去に多くの研究成果が報告されている⁴⁻¹³⁾。また、高炉への水素利用技術の開発に伴い、水素雰囲気下での還元粉化挙動の研究例¹¹⁻¹⁴⁾も増えているが、当時は統一的な見解は得られていなかった。

筆者は水素雰囲気下での還元粉化挙動のメカニズム解明と抑制技術の提示を目指し、まずは知見が多いCO還元での粉化挙動と水素還元での粉化挙動を比較調査した。一方、当時はまだ日本製鉄に入社後、右も左もわからない状況であり、先輩社員の方々に数多くのご助言を頂きながら研究開発を進めた。岡崎潤博士 (現 日鉄テクノロジー株式会社) からは、「ものをよく見ること」の大切さ、特に従来と異なる初めての条件で試験をする際は、外観やマクロ、ミクロの組織観察を通じて現象を捉えて理解することの重要性や、実際の観察に関するスキル・技術をご指導頂いた。その結果、塊成鉱の還元粉化性は、還元条件によって変化する反応様式に大きな影響を受けること、例えば、水素およびCO₂濃度の上昇は、還元反応を均一化し、還元粉化を助長することが明らかとなった (図2)¹⁵⁾。

一方、組織観察で得られた反応様式に関する知見は定性的

なものであったため、次にこの定量化に取り組んだ。ここでは、西村恒久博士から反応工学的なアプローチをご指導頂いた。気固触媒反応の分野で定式化されているThiele数 (ガス拡散係数と反応速度の比からなる無次元数) が反応様式の定量化に活用できる可能性をご助言頂き、実際に水素、CO還元実験の結果からThiele数を導出した。その結果、酸化鉄ペレットの気孔率および気孔径が小さいほど、ガスの粒子内有効拡散係数は低下し、Thiele数は増加すること、Thiele数と還元粉化指数RDIに負の相関があり、特にThiele数が0.7以下においてRDIは顕著に増加すること等が明らかとなった (図3)¹⁶⁾。

3 還元粉化時に発生するき裂の定量化とAE測定への挑戦

その後も引き続き還元粉化に関する研究に取り組んだが、暫く良い成果が得られなかった。当時の筆者は2章で述べたThiele数を如何に発展させるかに固執しており、研究開発の視野やアプローチが非常に狭くなっていた。そんな時に、入社時の上司である齋藤公児博士 (現 日鉄総研シニアフェロー) に「いつまでも過去の成果に捕らわれていては、新規性・進歩性がある研究開発ができない。今後は『No More Thiele数』だ!」と激励頂いたことで視野が広がり、従来にないアプローチを検討することにした。

一方、従来にないアプローチが天から降ってくるわけでもないため、当社の行動指針でもある「現場現物をもとに、本質を追究する」ことにした。具体的には、実際に試験を実施している日鉄テクノロジーの方々と対話しながら、還元粉

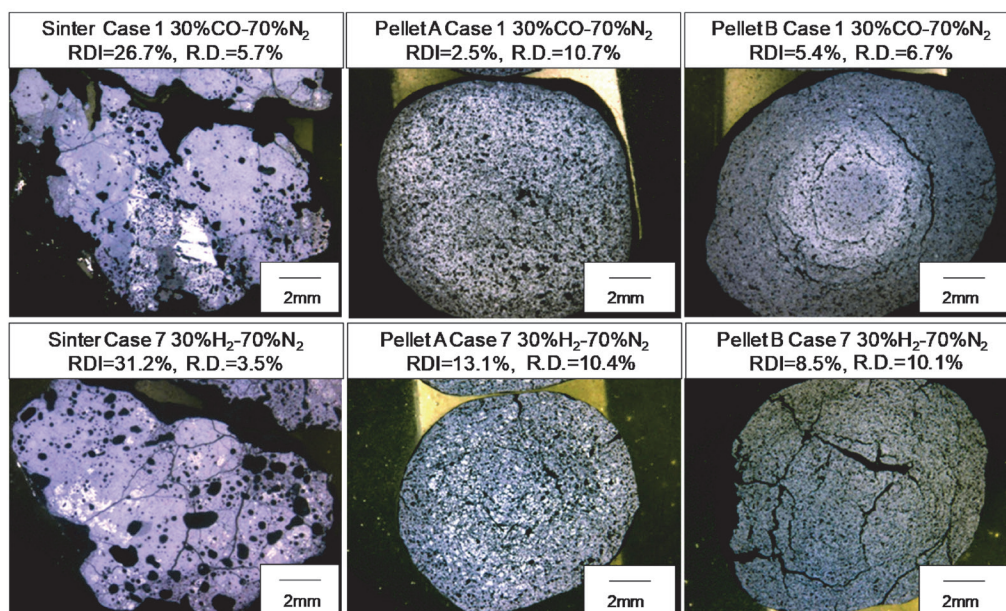


図2 焼結鉱、ペレットの還元後のミクロ組織 (773K for 1.8 ks) (Online version in color.)

化に関する実験に立合い、サンプルを観察することにした。ちょうどその時、水素還元吸熱反応に伴う炉内温度の変化を測定するため、熱電対を試料層に装入した実験をしていたところ、作業の方の一人が試料とは反対側の熱電対の端子箱に耳を接地させ、聴診器のように中の音を聴こうとした。何故それをやったかは感覚的なことらしいが、還元粉化は粒子内にき裂が入る現象であるため、き裂発生時の音を測定できれば、還元粉化の*in-situ*評価に適用できるのではないかと考え、材料中のき裂や欠陥のラボレベル解析に適用されているAcoustic Emission (AE) 法¹⁷⁻²¹⁾に注目した。AE法はき裂生成や欠陥をリアルタイムで検出できる非破壊検査技術であり、主にガスホルダー等の構造物のき裂生成の監視といった設備診断技術として普及されている。しかしながら、AEセンサー内の圧電素子(例えば、ジルコン酸チタン酸鉛; PZT)のキュリー点は350℃程度であり、キュリー点以上の温度帯ではセンサーの機能が失われてしまうため、高炉内のような高温

環境下において直接測定することができない。ここでも社内の計測技術の専門家にご助言頂きながら、炉内で発生したAEを伝搬する導波棒を用いる間接的な測定方法を採用した²¹⁾。

充填層試料の還元試験では、試料と導波棒の摩擦、還元過程の体積膨張によるき裂生成、冷却過程の熱応力によるき裂生成、それぞれに特徴的な周波数を有するAEが検出された(図4)。また、焼結鉱の還元過程におけるAEの周波数はペレットよりも高い。これらの観点から、周波数解析により、還元、冷却の各段階に発生するAEの分離と定量的評価が可能であることを示すことができた。また、還元に伴う体積膨張および冷却過程の熱応力に起因するAEエネルギーの和とRDI値には相関が認められる(図5)。これらの結果は、本研究で開発した*in-situ*評価手法を適用することで、焼結鉱、ペレットおよび塊鉄石の冷却過程のき裂生成の影響を排除することが可能であると示唆された²²⁾。

前章と本章の研究は東北大学の社会人博士コース在学中にまとめたものであり、東北大学大学院環境科学研究科 葛西栄輝教授に格別の御高配と御指導を賜った。在学中は夜遅く

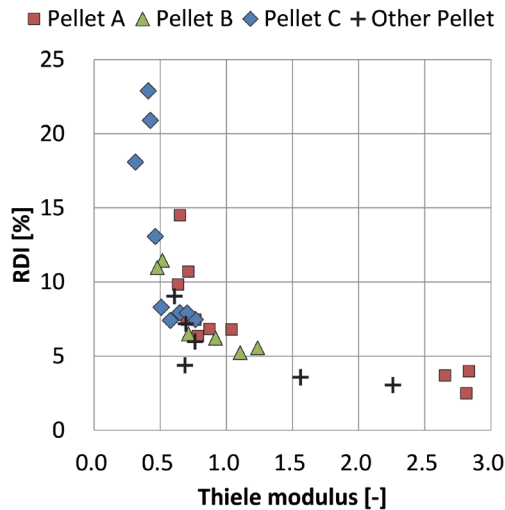


図3 Thiele数と還元粉化指数 RDI の関係 (Online version in color.)

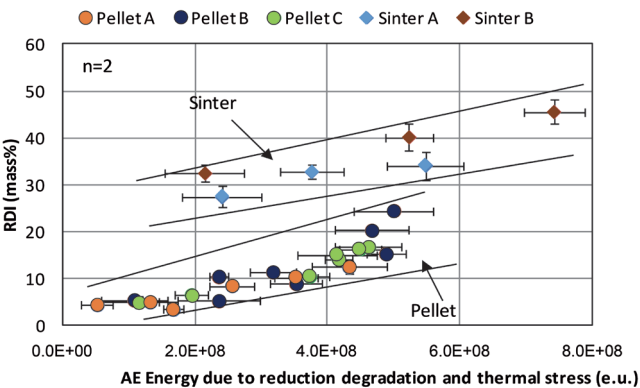


図5 還元過程のAEエネルギーと還元粉化指数 RDI の関係 (Online version in color.)

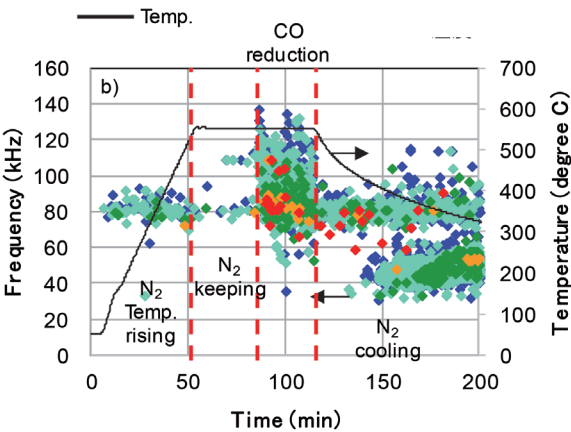
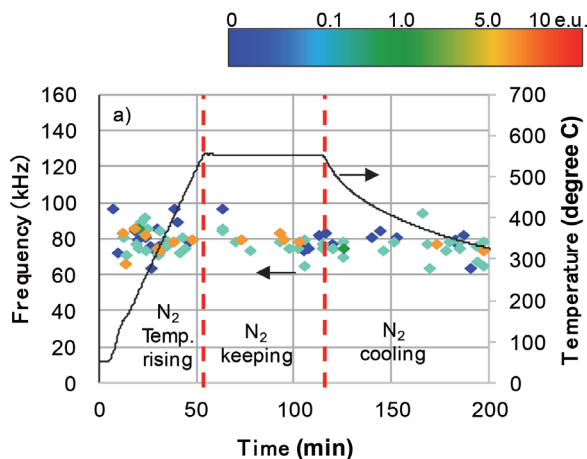


図4 還元試験時に発生するAE重心周波数の一例 a) 焼結鉄、N₂雰囲気、b) 焼結鉄、CO還元 (773 K for 3.6 ks) (Online version in color.)

までお付き合い頂き、研究内容だけでなく研究者としての心構えや人としての在り方をご指導頂きました。改めて深く感謝申し上げます。

4 断熱型向流移動層シャフト炉シミュレーターの開発

製鉄プロセスからのCO₂排出量の削減に向けて、高炉の還元材比の低減や高炉への水素利用技術に加えて、最近では高炉法によらない直接還元製鉄法の活用や水素還元製鉄法の開発が注目されている。筆者らはシャフト炉型の直接還元製鉄を対象として、炉内の反応、伝熱および物流挙動の評価が可能な断熱型の向流移動層であるシャフト炉シミュレーターを開発した²³⁻²⁵⁾。

本試験装置は既報の鉄鉱石還元用シャフト炉^{26,27)}の炉体仕様を基本に、断熱型高炉内反応シミュレーター (Blast Furnace Inner Simulator: BIS)^{28,29)}の断熱機能を付与して設計された(図6)。炉高は4.0m、炉内径は100mm φであり、所定の比率に混合されたH₂-CO-CO₂-CH₄-N₂ガスはガス加熱炉にて所定温度 (Max1150℃) に予熱され、反応管下端から約100mmの位置に吹込まれ、炉内を上昇する間に鉱石を加熱するとともに還元する。二重管構造の炉頂には5mm φの孔が多数あり、ここから還元ガスが排出されてガス分析装置に送られる。排出装置は回転テーブル機構であり、成品の排出速度は8-24 kg/minの範囲で制御される。炉体は高さ方向に10組の電気炉および熱電対から構成される。同一高さに反応管外部と内部の測温が可能な熱電対がそれぞれ設置され、両者の温度差が一定となるようヒーターの出力が制御されることで、反応管からの熱の放散が防止され、断熱系が保証される²⁸⁾。

この装置の立上げ試験時に、炉内で多量に粉が発生し、棚吊による操業停止が頻発した。最終的には鉄鋼協会にて講演したように、還元率90%程度の還元鉄の製造が可能な長時間

の連続運転を実現したが、ここに至るまでに諸先輩方、実験遂行された日鉄テクノロジーの方々、装置メーカーや施工業者の方々等、多くの関係者のご助言やご対応のお陰で達成できたことを、この場を借りて感謝したい。

本装置を用いることで、炉内高さ方向の温度、還元率、充填物の強度等の評価が可能となる(図7)。例えば、炉内への熱供給が少ない条件(低ガス量、高生産等)では、600-650℃の低温熱保存帯が炉上部に発生し、還元率約10%のFe₃O₄で反応が停滞することが明らかとなった。

なお、これらの開発は最近のカーボンニュートラルの社会的要請がまだ強くない時期に開始されており、当時主導された諸先輩方の先見の明や実際に開発を推進された想いの強さによって成し遂げられたものである。筆者も将来の糧となるような研究開発を進めることができるよう、日々精進していきたい。

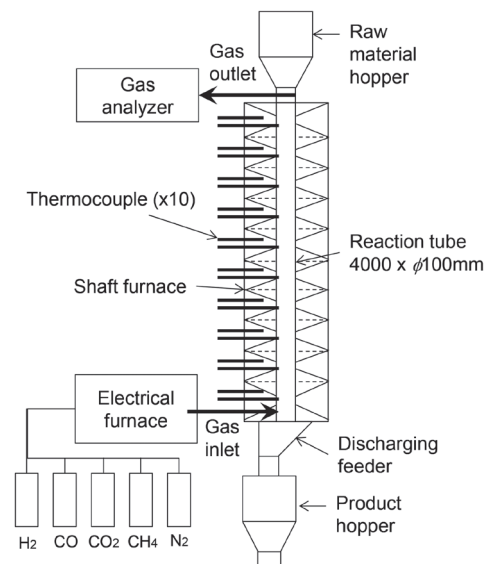


図6 断熱型向流移動層シャフト炉シミュレーターの概要

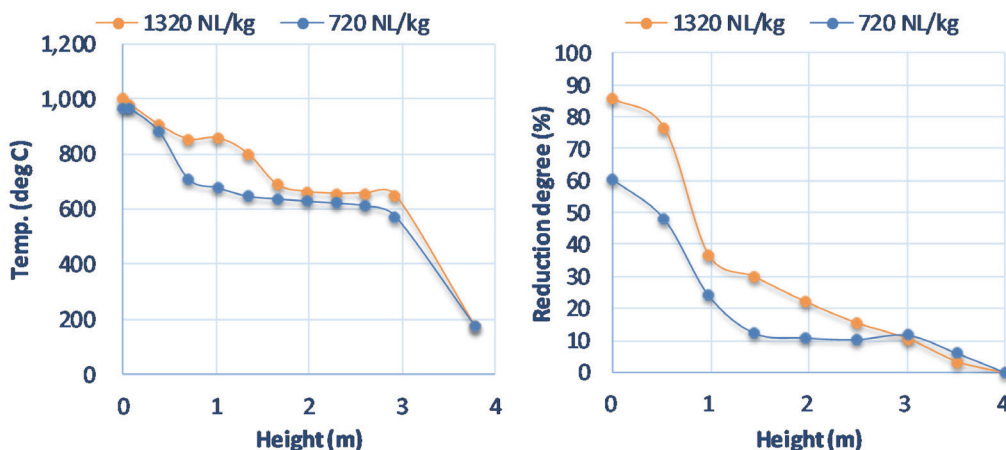


図7 シャフト炉シミュレーターの高さ方向の温度および還元率分布の一例 (Online version in color.)

5 おわりに

筆者のこれまでの研究を振り返ってみたが、ほとんどの成果は筆者一人では到底達成できるものではなく、お世話になった方々からのご指導・ご助言等によって達成されてきた。また、その過程で様々な断面で多くの関係者にご迷惑をお掛けしているにも関わらず、たくさんの方々からご支援とご助言を頂いたお陰で、何とか活動が続けることができている。未だにきちんとした形で恩返しができているが、技術やノウハウ、想いを次代に伝承していくと共に、研究成果の事業化を目指していくことで、少しでも形となる何かを残していきたい。

また、上司や先輩の方々にご指導頂き、学協会で発表の機会を頂いた。その場では様々な大学の先生方から多岐にわたる指導とご助言を頂き、実際に研究の進め方や今後の方針について大変参考になった。一方、製鉄業におけるカーボンニュートラルの社会的要請が強まる中、国内外でも様々なプロジェクトが計画され、既に開始しているものもある。今後は産学官の連携等に関するプロジェクトに携わることで、何かしらの形で恩返しすることも考えていきたい。(とはいえ、そのようなプロジェクトではご指導頂く機会も多くなるので、返す恩が増えるばかりになりそうだが…)

最後に心の支えであった家族(妻と5人の子供)に改めて感謝したい。日々の家事・育児で忙しい中、研究業務に集中させてもらい、いろいろと迷惑を掛けたこと、この場を借りてお詫び申し上げるとともに、深く感謝して本記事を締めることにします。家族に対してどの様に恩返しするかはまだ決まっていないが、まずはコロナが落ち着いた段階で、一家7人の初めての家族旅行を計画し、思い出作りに貢献したいと考えている。子連れでお勧めの観光スポットがあれば是非、ご一報ください。

参考文献

- 1) 水谷守利, 立花敏裕, 佐野浩行, 藤澤敏治: 資源と素材, (2008), 22.
- 2) 埜上洋, 植木保昭, 村上太一, 植田滋: 鉄と鋼, 100(2014), 227.
- 3) L. Lu, J. Pan and D. Zhu: Quality Requirements of Iron Ore for Production, Iron Ore, (2015).
- 4) 佐々木稔, 肥田行博: 鉄と鋼, 68 (1982), 563.
- 5) 坂本登, 福与寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984), 512.
- 6) 稲角忠弘, 品田功一, 川辺正行: 鉄と鋼, 68 (1982), 2207.
- 7) 志垣一郎, 沢田峰男, 前川昌大, 成田貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), 1513.
- 8) 田口昇, 大友崇穂, 田阪興: 鉄と鋼, 69 (1983), 1409.
- 9) 春名淳介, 鈴木章平, 山田肇, 岩月鋼治, 小口哲夫, 小島清: 鉄と鋼, 69 (1983), S742.
- 10) 岩永祐治: 鉄と鋼, 68 (1982), 740.
- 11) T. Murakami, Y. Kamiya, T. Kodaira and E. Kasai: ISIJ Int., 52 (2012), 1447.
- 12) T. Murakami, T. Kodaira and E. Kasai: ISIJ Int., 55 (2015), 1181.
- 13) T. Murakami, T. Kodaira and E. Kasai: ISIJ Int., 55 (2015), 1197.
- 14) 竹内直幸, 岩見友司, 樋口隆英, 主代晃一, 大山伸幸, 佐藤道貴: 鉄と鋼, 99 (2013), 448.
- 15) M. Mizutani, T. Nishimura, T. Orimoto, K. Higuchi, S. Nomura, K. Saito and E. Kasai: ISIJ Int., 57 (2017), 1499.
- 16) M. Mizutani, T. Nishimura, T. Orimoto, K. Higuchi, S. Nomura, K. Saito and E. Kasai: ISIJ Int., 58 (2018), 1761.
- 17) M. Mizutani, T. Nishimura, T. Orimoto, K. Higuchi, S. Nomura, K. Saito and E. Kasai: ISIJ Int., 58 (2018), 1413.
- 18) 榎学, 藤川真一, 岸輝雄: 日本金属学会誌, 58 (1994), 418.
- 19) M. Ohtsu: Research in Nondestructive Evaluation, 6 (1995), 169.
- 20) K. Ito, H. Kuriki, M. Watanabe, S. Kuroda and M. Enoki: Materials Transactions, 53 (2012), 671.
- 21) H. Nakamura: Journal of The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 62 (2013), 267.
- 22) G. Briche, N. Tessier-Doyen, M. Huger and T. Chotard: Journal of the European Ceramic Society, 28 (2008), 2835.
- 23) 水谷守利, 西村恒久, 折本隆, 樋口謙一: CAMP-ISIJ, 33 (2020), 483, CD-ROM.
- 24) 水谷守利, 西村恒久, 折本隆, 樋口謙一: CAMP-ISIJ, 34 (2021), 334, CD-ROM.
- 25) 水谷守利, 西村恒久, 折本隆, 樋口謙一: CAMP-ISIJ, 35 (2022), 149, CD-ROM.
- 26) 原行明, 坂輪光弘, 近藤真一: 鉄と鋼, 62 (1976), 315.
- 27) 原行明, 橋爪利夫, 石川英毅, 相田晴美: 製鉄研究, 289 (1976), 31.
- 28) 内藤誠章, 岡本晃, 山口一良, 山口剛史, 井上義弘: 鉄と鋼, 87 (2001), 357.
- 29) 内藤誠章, 岡本晃, 山口一良, 山口剛史, 井上義弘: 新日鉄技報, 384 (2006), 95.

(2023年2月9日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東北大学 大学院環境科学研究科 教授

村上 太一

水谷さんと初めてお会いしたのはいつだったか、この原稿を依頼されたときに考えてみましたが、さっぱり思い出せませんでした。私の専門のひとつは製鉄原料、特に還元粉化や水素還元はメインフィールドでこれは水谷さんと同じなので、毎月のように連絡を取り、年に何度もお会いしていました。思い出すのは最近のエピソードばかりでしたので、ご本人に確認してようやく当時のことを思い出しました。入社されて数年の2013年のことでした。水谷さんから突然メールが来ました。ISIJ Int.に掲載された焼結鉄の還元粉化の論文に関して質問があり、ディスカッションをしたいので研究室を訪問したいということでした。おそらく当時の上司の指導だったのだと思うのですが、ものすごくやる気のある方だなと感心しました。ディスカッションもかなり盛り上がり、2時間以上も話をしていたように思います。それ以来、様々な仕事を一緒にさせていただいております。

あれから10年、今や製鉄研究の中心人物の一人となって、GI基金のナショプロでは主力として活躍されています。プロジェクトが立ち上がる前から、大学の再委託先との調整や説明をされておりましてし、村上が実施させていただいている再委託研究の担当者としてもいろいろ

と動き回って調整をさせていただいております。また、講演大会や各種講演会でも積極的に発表や質問をされており、若い研究者の手本になっているのではないかと思います。一方で、製鉄分野では製鉄部会主催で予告セッション「製鉄技術者若手セッション」を開催していますが、すでに10年選手の水谷さんが2022年の秋季講演大会で発表しているのを見て驚きました。「水谷さん、あなたはもう若手じゃないでしょう」とご本人に申し上げたところです。今回、躍動を執筆したのを機に若手は正式に卒業していただければと思います。

化石燃料を多量に使用している製鉄のゼロカーボン化は今後の重要な課題です。鉄鋼協会でも「鉄鋼カーボンニュートラル研究助成」が昨年度から開始していますし、GI基金は最大10年のプロジェクトです。なによりも国が2050年に実質排出ゼロを宣言しています。2050年に向けて主力となる世代である水谷さんへの周囲の期待も非常に大きいのではないかと思います。産学の連携をうまく何度もハンドリングされてきた水谷さんなら大丈夫と思いますが、これからもバリバリと鉄鋼業、製鉄分野を盛り上げてください。

JFEスチール(株)スチール研究所 研究企画部 主任部員

村尾 明紀

安全に！ JFEスチールの村尾と申します。水谷守利様の【躍動】記事を拝読し、先輩研究者のエールとして、製鉄研究に約20年従事させて頂いております村尾から僭越ながらコメントさせて頂きます。

今回、本記事の執筆依頼を受けた際に数々のご縁を思い出しました。水谷さんとの出会いは2009年頃のリクルート活動の時期に遡ります。水谷さんとは同じ大学の同じ専攻、学科であり、鉄鋼業界への就職を考えていた水谷さんは、弊社も候補の一つであり、工場見学訪問してくださりました。学生の皆様と大学OBで酒を片手に鉄について熱く語ったのを今でも覚えております。その後、水谷さんは記事内容の通り、日本製鉄に入社、製鉄研究開発部門に配属され、本記事でも紹介されています焼結鉄の研究開発のご担当となりました。高炉やシャフト炉での鉄源（鉄鉱石、焼結鉄、ペレット等）のCO₂、H₂還元時の粉化挙動、メカニズム解明、亀裂の定量化や新測定方法、新シャフト炉シミュレータ等の開発に尽力され、論文にも纏められているようにすばらしい成果を出されています。次のご縁は、日本鉄鋼協会主催で年2回開催されます講演大会や製鉄部会、色々な国際会議の場で一時期、毎回のように顔を合わせたことです。現況報告、技術的な議論、悩みや愚痴等、酒を片手に楽しく共

有させて頂きました。水谷さんは私と比較してかなり若いにも関わらず、常に堂々として報告され、他企業の先輩や大学の先生方とも前向きに活発な議論をされる姿を見て、自分が見習うべき点が多々あることを痛感しました。至近の国際会議では、キプロスやスウェーデンで一緒にさせて頂きましたが、水谷さんが世界中の企業や研究機関を相手に飛び回っている状況を拝聴して、すでに社内の焼結研究者の代表として活躍されていることを認識し、刺激を受けました。今回、水谷さんの記事を通じて、自分自身のキャリアにも当てはめて、初心に戻ると共に、諸先輩方はじめ、職場の皆様にご感謝の気持ちをもって業務を推進しなければならないと再認識させて頂きました。

最後に、足元の鉄鋼業の置かれている状況は、皆様ご存知のように、気候変動問題に対する危機感が世界中に広がっている中、環境負荷の少ない鉄を製造することが重要となっています。鉄鋼業のカーボンニュートラル化は非常に難しい課題ではありますが、このご縁を基に、お互い切磋琢磨し、時には連携しながら力を合わせて前向きに取り組んでいきましょう。

以上、エールというよりもまさに感謝の意になりましたが、水谷さんの今後の益々のご活躍を祈念致します。