

## TODAY



## 転換点となるか COP28 - COP28 の成果と日本の苦悩 -

東京大学公共政策大学院  
TECUSE プロジェクトアドバイザー  
本部 和彦

2023年12月産油国アラブ首長国連邦のドバイで開催された第28回国連気候変動枠組条約締約国会議 COP28 は予定を1日延長し、13日の午後、今回の COP の最重要議題であったパリ協定に基づく最初のグローバル・ストックテイク (GST) の合意文書を採択し閉幕した。

GST とは5年毎に行われる締約国の削減目標などを記載した国別貢献の改訂に際して、これまでの世界の気候変動対応行動とその成果を取りまとめた文書であり、締約国はその内容を踏まえて次の削減目標などを策定するためのものである。

GST の検討における課題は、G7 など先進国にとっては① 1.5℃目標に沿った全球2019年比2030年43%、35年60%という削減目標値と、② 早期大幅削減に必要な化石燃料の利用廃止などの削減策を中印など主要途上国と共有できるか、途上国にとっては③ 削減行動、適応行動、さらには気温上昇に伴う損失・損害対応を行う上で必要となる資金提供をどこまで先進国に約束させられるかであった。

このうち①については、IPCC の第6次評価報告書の記載内容として引用されただけで全球目標として合意されることはなく、②については未対策の石炭火力の削減 (phase down) と化石燃料利用の削減 (transitioning away) に取り組むことが削減行動の選択肢とされたものの、ともに先進国の望んだ強い表現とはならなかった。他方③については、2週間にわたる会議の

冒頭で基金の世銀への設置が認められるなど途上国の主張に沿った形で決着した。

こうした動きで特筆すべきは、多様な選択肢の中から各国がそれぞれの国情に応じた削減策をとることで、多様な排出パスが形成されると認められたことである。とりわけ、これまでドイツなど脱原発国や環境派の反対で認められてこなかった原子力や CCS が削減策として公式に認められたこと、またカーボンニュートラルに向けた移行期に必要な燃料が transition fuel という新たな言葉で認められたことである。こうした動きは、G7 や G20 の場で、多様な選択肢、各国の実情に合った対策の必要性を主張してきた日本の動きとも歩調の合ったものである。

これは、世界の温室効果ガス排出量が一向に減少せず 1.5℃目標の実現可能性がほぼ消滅した中で経済成長を確保しつつ地球環境を守っていくには、当面は化石燃料を賢く使い続けざるを得ない状況にあると考える現実派の勢力が UNFCCC の場でも大きくなっていることを意味する。また閉会のプレナリーの中で、複数の国が 1.5℃目標を、方向は示すが到達することはできない“北極星”と比喻したこともその証左であろう。これまでの南北対立に加えて G7 と小島嶼国などの理想派と経済成長を続ける非 OECD 国という現実派の対立が新たな交渉の火種となろうとしている。

そうした中で、現実世界では、原発の再稼働が進まず、安価な再エネ資源にも天然ガスにも恵まれず、水力資源はほぼ開発し尽くしている日本が、G7 広島サミットの議長として2030年43%、2035年60%削減を目指す合意文書を取りまとめた束縛から逃れどこまで現実的な選択肢を採用できるか、2025年の新たな国別貢献の策定に向けた検討において非常に厳しい判断を迫られることになる。

**日本鉄鋼協会・JRCM 主催ワークショップ**  
**「ビジュアルになりつつある鉄鋼の**  
**グリーントランスフォーメーション戦略と新たな方策の探索」開催報告**  
**東北大学 名誉教授 有山 達郎**

### はじめに

表題のワークショップを2023年11月13日、東京工業大学蔵前工業会館ロイヤルブルーにて開催しました。地球温暖化問題は喫緊の課題であり、2050年においてゼロエミッション、カーボンニュートラルを目標に、各国、様々なセクターにおいて積極的な取り組みがなされています。特に既存の鉄鋼プロセスは炭素に大きく依存し、鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出量は世界の地球温暖化ガス排出量の7%、我が国では14%を占め、鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出削減は業界の最優先課題でもあります。かかる背景から、日本鉄鋼協会高温プロセス部会資源エネルギーフォーラム内に大阪大学碓井建夫名誉教授を主査とする「製鉄工程におけるバイオマス利用高度化・拡大に関する調査研究グループ」が発足し、その活動の一環として本ワークショップは開催されたものです。研究グループはバイオマスを主題に掲げていますが、今回は多角的に鉄鋼のCO<sub>2</sub>削減を捉え、鉄鋼業におけるグリーントランスフォーメーション戦略についての情報集約と課題についての情報の共有化、グローバルな視点から討議を行うことを目的に、様々な分野から識者、関係者のご講演をお願いし、本研究グループのキックオフ的な場としてワークショップを開催しました。

JRCM 殿には多大なご支援を頂き、本稿にその開催結果を報告する次第です。なお、日本金属学会、化学工学会、日本エネルギー学会の協賛も得たことも記します。開催報告として主催者側を代表し、筆者が各講演の内容を発表順に従って紹介いたします。

### 1. 鉄鋼業のグリーントランスフォーメーションに向けての国際動向（東北大学名誉教授 有山達郎）

鉄鋼は産業の中でも投資サイクルが長く、巨大な製鉄所を低炭素、脱炭素に円滑にプロセス転換するためには多大な投資も伴い、先見的なポリシーに基づく戦略構築が必要である。鉄鋼に取って2050年は近未来である。本講演は筆者の講演で至近の海外動向紹介を主題とした。

世界の粗鋼生産量は現在、停滞傾向にあるものの現在、約19億トン/年に達し、今後も東アジ

アを中心に25億トン/年に達する予測もなされている。鉄鋼プロセスはコークスを主たる還元材とする高炉-転炉法、天然ガスを還元用いる還元鉄法、スクラップを鉄源とする電炉法に分けられるが、高炉法が70%を占め、CO<sub>2</sub>発生の主因となっていることから、21世紀初頭から高炉の低炭素を目指した技術開発が実施された。2004年開始の欧州のULCOSプロジェクト(Ultra Low CO<sub>2</sub> Steelmaking)の炉頂ガス循環法が代表とされる。しかし、パリ協定以降、2050年のゼロエミッションへと一段と高い目標が掲げられ、現行高炉の炭素利用の極限を目指したSCU(Smart Carbon Usage)、CO<sub>2</sub>再利用を目指すCCU(CO<sub>2</sub> Capture and Utilization)、そして完全な脱炭素となる水素製鉄法(CDA:Carbon Direct Avoidance)へと指向が転換している。その流れを図1に示す。

SCUとして高炉への還元ガス吹き込み、COG、水素系ガス吹き込み、またCO<sub>2</sub>からの合成メタン吹き込みなど、多彩なプロセス提案がなされ、欧州の一部では小型高炉での実証も進行中である。CCUもthyssenkruppがメタノール製造を主目的にCarbon2Chemの試験プラントを建設し、ArcelorMittalは小規模であるが、発酵によるエタノール製造を開始している。中でも水素製鉄実現が今後のゼロエミッションのキーになる。水素製鉄では再生可能エネルギー由来の水素安定供給がボトルネックではあるが、既存の還元鉄シャフト炉と電気炉とを組み合わせることにより、技術構成としては現実的な位置にあり、決して遠いプロセスではない。ただし、現状の製鉄所に当てはめるには、いくつかの課題もある。現在の還元鉄シャフト炉は高品位ペレットを利用しているが、今後、海上輸送可能な高品位ペレットの多量入手は極めて困難となる。品位が低下すれば、通常の電気炉(EAF)の適用では高FeOの高スラグ比操業となり、鉄歩留まりが低下し、高度精錬も適用しにくい。その観点から、入手容易な通常品位のペレットをシャフト炉で水素還元し、還元鉄を還元雰囲気でのメルターで溶解、加炭、一旦、溶銑化し、

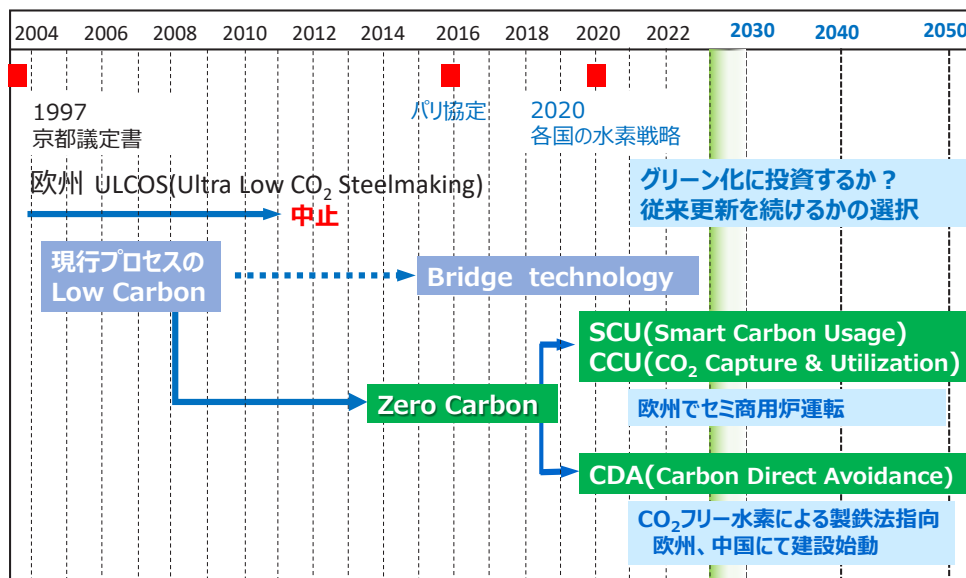


図1 鉄鋼分野の2050年のゼロエミッションに向けた動き（著者の講演より）

既存の転炉で酸化精錬を施すプロセスが既存の製鉄所、高級鋼製造に適し、活発に開発されつつある。いわば、高炉上部を水素還元シャフト炉で、下部を還元雰囲気のリム炉で再現することになる。ドイツの thyssenkrupp は、本方式で2026年に250万トン/年のプラントを稼働予定である。SMSグループが受注している。本計画にはEUの多大な支援があることも見逃せない。ドイツのHKMも同様な計画を持つ。現状の製鋼以降のプロセスを活用でき、転換も円滑にできる。アジアではPOSCOがシンターフィードを原料とし、原料の対応力を拡大した流動層によるHYREX構想を発表し、デモ機建設予定である。リム炉方式採用である。中国ではCOGを還元材源に活用し、河北鋼鉄が60万トン/年の商用炉を張家口に建設、稼働させ、2基目を建設中である。さらにBaowuも湛江に100万トン/年規模の還元鉄プラントを建設中で動きが活発である。いずれもCO<sub>2</sub>フリー水素が安定的に入手できるまでは天然ガスあるいはCOG利用であるが、実質的に水素製鉄への始動ともいえる。海外企業はProven technologyを最大限活用した効率的な商用化を目指し、事業投資段階にもある。2030年には世界の現行高炉の7割が更新を迎えるとされ、将来方向の決定は現時点で既に重要である。

## 2. 商社の考えるグリーントランスフォーメーション 将来戦略（三菱商事 財部誠太郎氏）

同社は総合商社でありグリーントランスフォーメーションに関して様々な取り組みをしているが、本講演では金属資源と次世代エネルギー・トランスフォーメーション戦略に関連したご紹介を頂いた。

金属資源については鉄に限らず世界最高水準を目指したコスト競争力と品質を重視したポートフォリオを保有し、資源全体にサプライヤーとの連携を強化している。特に還元鉄は世界的にニーズが高まり、還元鉄のトレーディングのみならず、海外での還元鉄事業開発と脱炭素に資する新技術への投資も進めている。新技術の一つとしてPrimetalsによる新たな流動層還元プロセスであるHYFOR開発に参画している。HYFORは微粉鉱、低品位鉱石を事前処理なしで直接利用できるプロセスであり、新たなマーケットを開発すべくパイロットプラント建設を予定している。またSCOPE3の範疇として、鉄鋼生産に伴って不可避免的に発生するCO<sub>2</sub>回収とCCSバリューチェーン構築事業を大洋州にて検討を進めている。水素利用にはそのサプライチェーン構築が必須であり、水素の直接液化、トルエンを媒体とした輸送、アンモニア利用による効率的な大量輸送の実現など、多角的な取り組みをしている。アンモニア輸送は原料調達、輸送と総合的な技術を必要とするが、総合商社として海外の有力パートナーと共同でサプライチェーン構築を進めている。また、現在、e-fuelがクリーン燃料として世界的に注目されているが、米国キャメロンにてCO<sub>2</sub>を再生したe-methane製造計画を立ち上げ、2030年には我が国に13万トン/年の導入を計画している。さらに、将来を見据え、有望なスタートアップ企業への支援、ソフト的なカーボンマネジメントにも取り組み、カーボンオフセットとなる原生林再生などグローバルなカーボンニュートラルに繋がる事業にも参画している。

### 3. 地政学から見たエネルギーセキュリティーと グリーントランスフォーメーション (エネルギー総合工学研究所 小野崎正樹氏)

グリーントランスフォーメーションは資源、エネルギーの問題と直結する。両者に恵まれていないわが国では、今後、カーボンニュートラルの世界となれば様相は複雑化し、エネルギーセキュリティーの重要性はさらに増す。本講演では歴史的な地政学の観点からエネルギーセキュリティーの重要性事例の紹介、そして今後の再生可能エネルギー入手に関して我が国の取るべき方向を論じて頂いた。

現在の日本のエネルギー源は原油と天然ガス輸入に依存している。地政学的にそのルート確保は盤石でない。今まで何度か危機を経験し、克服してきたが、今後のカーボンニュートラルに向け、エネルギー源が再生可能エネルギーに転換していく中で、エネルギーセキュリティーの問題は従来以上にクローズアップされる。エネルギーキャリアは天然ガス、メタノール、液体水素、アンモニアと多様化し、それらが全て今後の候補となり、輸入先、輸送方法は大きく変化することが予測される。また、それらの生産国は特定国ではない。世界に拡大し、供給ルートは複雑化する。天然ガスを除けば、そのほとんどは二次エネルギーであり、それらの生産段階にも関わりながら、導入を図らねばならない。インフラ投資も必要とする。これらの認識が地政学的な分析を踏まえ、一層に重要となる。鉄鋼では水素製鉄が叫ばれているが、カーボンニュートラルの世界になれば、鉄資源だけでなく再生可能エネルギーの拠点をどこに確保するか、その輸入形態の探索、最適な鉄鋼生産拠点のあり方をどうすべきかなど、地政学を踏まえた戦略策定が必須となる。

### 4. バイオマス転換 ～カーボンニュートラルから ネガティブへ (九州大学教授 林潤一郎氏)

カーボンニュートラルの表現は多用されているが、現実にはネガティブエミッションが存在しないと成立しない。バイオマスの燃焼、貯留に加え、社会への持続的蓄積を図る概念も含む BECCS(Bioenergy with Carbon Capture and Storage) の展望についてご講演を頂いた。

バイオマスは供給に関して限定的なエネルギー源であり、単なる発電利用は得策でない。バイオマスのケミカルポテンシャルに着目し、単糖を化学品の基幹物質(プラットフォーム)として捉えれば、バイオマスを基盤とし、付加価値を上げた

様々な化学品の生産システムの構築も可能である。単品製造ではなく、マルチプラットフォーム生産と位置付ければ経済性も向上する。一方、必然的に廃棄物が生じるために、それらをガス化して合成ガスに転換する支援システムも整備しなければならない。その合成ガス化もCO<sub>2</sub>の再利用によって収率の向上も可能である。残存ポテンシャルを炭化物(チャー)としての保存形態で鉄鋼での還元材利用もできる。さらにトレファクションに引き続いて熱間成型、高温域での炭化を施すことによって高強度コークスの製造可能性も見出されている。

以上のように単糖をプラットフォームとして利用する方法、ガス化とC1ケミカルとの連結、炭化物として貯留、鉄鋼でCO<sub>2</sub>フリーとなるコークス化など、バイオマスは様々な展開力に富む資源であり、Realityのあるネガティブエミッション技術として社会に貢献できる。

### 5. 韓国のグリーントランスフォーメーション戦略 (POSCO Dr.Sanghan Son 氏)

講演者のDr.Son氏は本ワークショップのために来日し、カーボンニュートラルを目指した韓国における鉄鋼の技術開発戦略、低炭素、ナショナルプロジェクトなど研究開発動向全般についてのご紹介を頂いた。

韓国では鉄鋼業由来のCO<sub>2</sub>発生量は国内の16.7%である。その内、高炉法が85%を占め、CO<sub>2</sub>削減の当面目標として高炉-転炉法の改善から始め、POSCOは2040年で50%削減、2050年においてカーボンニュートラルと段階的な技術開発を掲げている。国のプロジェクトとしてPOSCOの他にHyundai、Dongkuk Steelも加わったCOOL STAR(BF Based Low Carbon Technology)が産学共同プロジェクトして起案されている。抜本的な水素製鉄としてHYREX(Hydrogen Reduction Steelmaking)プロセスが提示されている。図2に示す。シンターフィードを対象に4段流動層で水素還元を行い、メルターのESF(Electric Smelting Furnace)を経て、既存の転炉に繋げる。水素還元による温度低下は酸素添加で補う。流動層は既存のFINEXの還元技術を活用し、ESFはPOSCOが既に光陽に保有するFe-Ni精錬用の大型メルター技術(135MVA、120MVA)を活かす計画である。すでに水素還元のベンチスケール実験、1t/hのメルター実験を開始し、2030年には100万トン/年のデモ機建設を計画している。なお、既存の高炉、FINEXでの炭素依存を緩和するために、バイオマス利用の研究も実施中である。

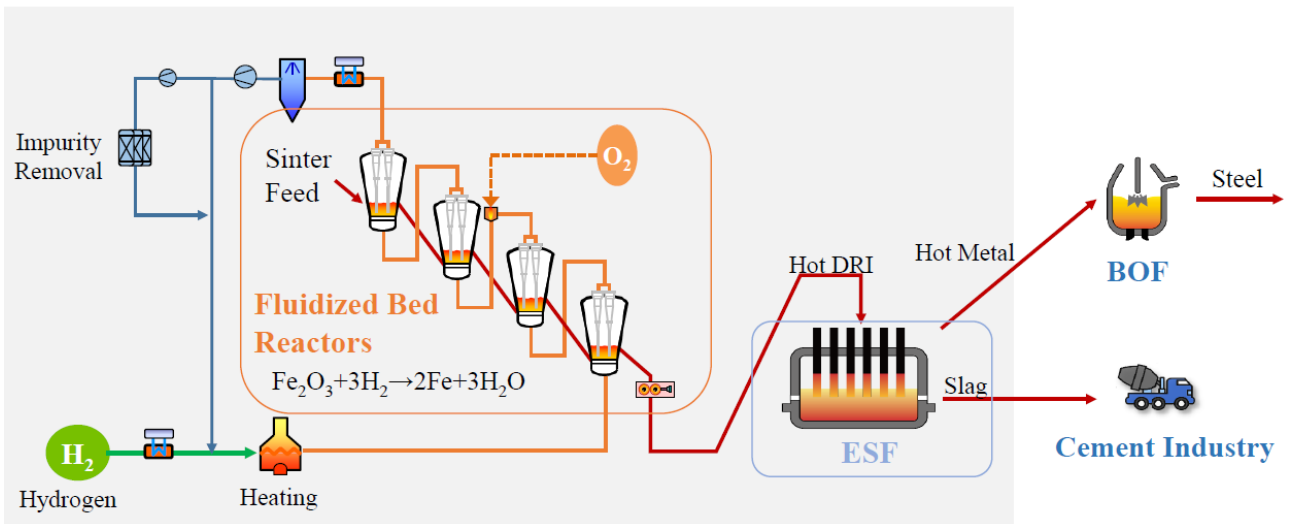


図2 POSCO が開発を進めている HYREX(Dr.Son 氏の講演より)

### 6.The Green Transformation in Chinese Ironmaking Industry (北京科技大教授 Dr.Jianliang Zhang 氏:On-line 講演)

中国は約 10 億トン/年の粗鋼生産量であり、その動向は注目される。本 WS では中国を代表する製鉄研究者である北京科技大の Zhang 教授に中国鉄鋼全般の CO<sub>2</sub> 削減に向けての至近の動向と、現在、進行中である新プロセス開発の紹介を頂いた。

中国ではその生産量の大きさから、現行製鉄所の省エネ技術の全国展開を進めている。高炉では原料の性状改善による還元材比低減はもとより、Jin Tang Steel(京唐鋼鉄)の大型高炉では操業度を維持しながら、スラグ比低減を目指し、ペレット比を 55%まで増、高温送風で還元材比 480g/t を達成している。他、コークス性状、PCI 技術の改善など基盤的な技術の整備を図り、計測設備の充実化とビッグデータ解析、モデル解析の高度化など、既存のプロセスの改善を産学共同で全国的

に展開している。

新プロセス開発として Baowu が系列の Bayi Steel で 430m<sup>3</sup> の小型商用炉を用い、水素還元強化と酸素高炉双方の特徴を持つ HyCROF (Hydrogen-enriched Recycling Oxygenate Furnace) の操業を実施し、30%の炭素インプット削減を達成している(図3参照)。本技術は 2023 年 10 月から 2500m<sup>3</sup> の高炉での検証に移っている。また還元鉄プロセスの導入として、HBIS(河北鋼鉄)は張家口にて 60 万トン/年のプラントを完成し、商用運転に入っている。同プロセスは COG を還元材源とし、Zero Reformer 形式を採用している。Baowu は上述のように湛江に 100 万トン/年の還元鉄プラントを建設中であり、2023 年末から操業開始である。中国は短期的には省エネの一層のレベルアップによって -25%の CO<sub>2</sub> 削減をねらい、将来的には CCUS と現有高炉の水素利用強化、そして水素製鉄によって Near-zero emission を目指す。

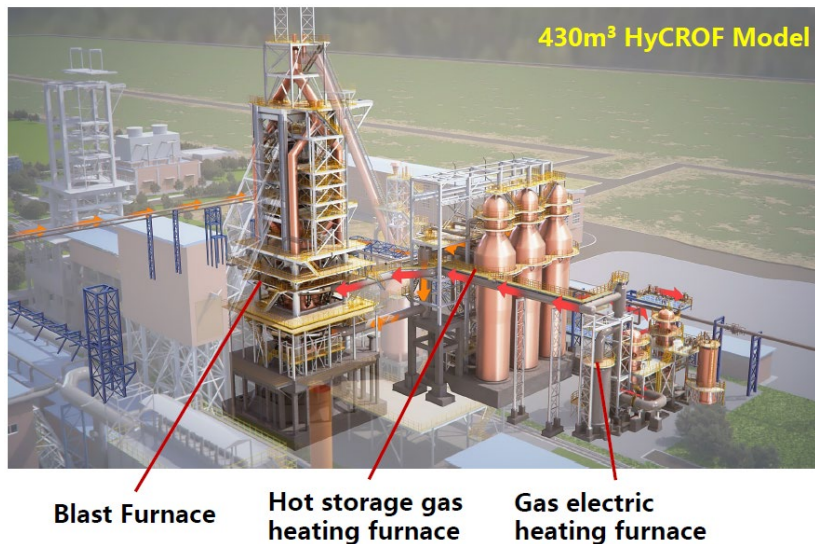


図3 Baowu の Bayi Steel における HyCROF プロセス (Zhang 教授の講演より)

## 7. EASyMelt-An alternative net-zero low coke steelmaking solution: The advantageous usage of NH3 as green reductant for integrated steel making (Paul Wurth Dr.Peter Kinzel 氏 :On-line 講演、IHI 成野秀一氏)

製鉄エンジニア分野のトップ企業である欧州のPWは鉄鋼の低炭素、脱炭素として還元鉄並びに高炉低炭素の極限を目指すEASyMeltを含む図4の将来構想を提出している。本講演ではDr.Kinzel氏からEASyMelt、また同社と関係の深いIHIの成野氏にはアンモニアの利用展望についての講演を頂いた。

EASyMeltとは、Electrically Assisted Syngas sMelterの略称で、現行高炉をベースにCOG、天然ガスのCO<sub>2</sub>ドライリフォーミングによるSyngas吹き込みにプラズマによるガス加熱を加えたプロセス構成である。水素の吹き込み効果強化を狙い、水素リッチの多量のSyngasを高炉シャフト下部に、あるいはプラズマ加熱した高温還元ガスとして羽口に吹き込み、コークス比のミニマム化を狙っている。多量水素源としてはアンモニアに着眼し、プラズマ加熱前に分解して吹き込む。日本など多量の水素確保が困難とされる国でアンモニアを水素キャリアーとし、水素多量使用を可能とするプロセス構想である。様々なケースの試算を行い、コークス比で130-230kg/tの予測を得ている。最大-58%のCO<sub>2</sub>削減となる。Tata Steelとインドにて600m<sup>3</sup>クラスの商用高炉試験を行う計画である。

アンモニアは水素の効率的な輸送法として注目されているが、IHIグループは発電、鉄鋼などにおける脱炭素手段としてアンモニアの海外での製

造、海上輸送、そして国内での受け入れ基地など総合的なサプライチェーンの構築を目指している。PWのEASyMeltはその一環で、我が国に適した鉄鋼の水素利用形態であり、PW社は高炉でのアンモニアによる水素多量使用時のCAPEX/OPEXなど経済的優位性に関する定量的評価も行っている。

### おわりに

本ワークショップは研究グループの最初の活動であったが、参加者は100名を超え、鉄鋼外分野の参加者も多数、見受けられ盛況となった。On-lineの海外講演もあり、円滑な講演、質疑に危惧もあったが、大学側グループの支援もあって杞憂であった。様々な角度からの鉄鋼でのCO<sub>2</sub>大幅削減に関する講演で、参加者の方々の今後のご活動の役に立てれば幸いです。海外も含め、各講演者の方々にご講演の快諾を頂いたことを付記し、感謝の意を表します。また、本ワークショップは研究グループ委員の他に下記の方々のご協力で実現できたもこともここに改めて記載いたします。特に東北大学、東京工業大学の学生の方の多大なご協力も得ました。

日本鉄鋼協会・高温プロセス部会 資源・エネルギーフォーラム内製鉄工程におけるバイオマス利用高度化・拡大に関する調査研究グループ

- 主査 碓井建夫 (大阪大学 名誉教授)
- 副主査 有山達郎 (東北大学 名誉教授)
- 幹事長 小西宏和 (大阪大学 助教)
- 協力 林 幸 (東京工業大学 教授)
- 村上太一 (東北大学 教授)
- 渡邊 玄 (東京工業大学 助教)

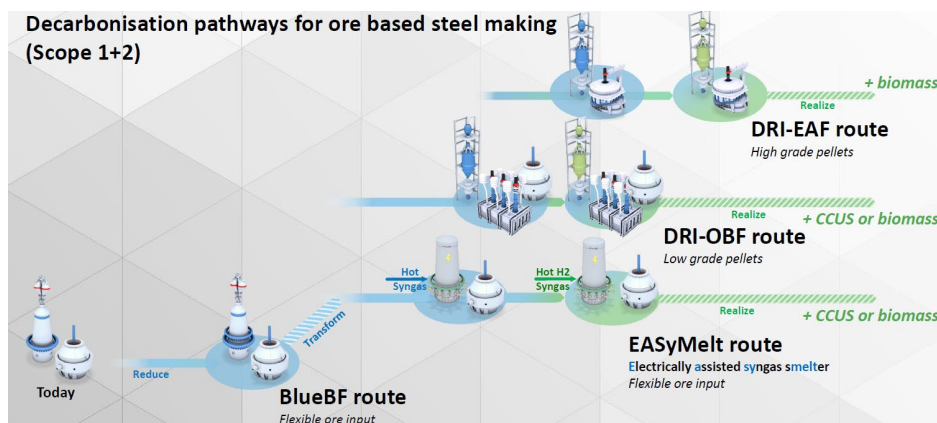


図4 Paul Wurth 社の将来構想 (Dr.P.Kinzel 氏講演からの図)

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第 443 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2024年1月1日  
 発行人 小紫 正樹  
 発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター  
 〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階  
 TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285  
 URL <http://www.jrcm.or.jp/> E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)  
 ※送付先の変更・中止等は上記 E-mail に御連絡をお願いいたします。