

鉄鋼業におけるマテリアル戦略事例

- ・ ゼロカーボンスチールへの挑戦
- ・ マテリアルDXへの試み

2022年2月3日

日本製鉄株式会社

副社長 小野山修平

日本の鉄鋼業の「勝ち筋」

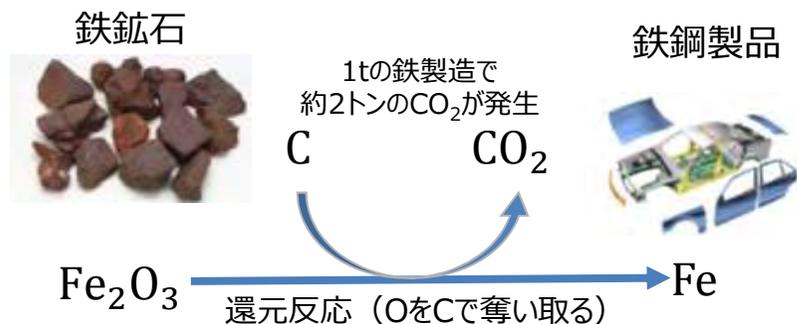
- これまでの日本の鉄鋼業の強みである高級鋼は、カーボンニュートラル社会においても必要不可欠。
※IEALレポートでは、2050年における自動車分野での鉄鋼需要は約2～3億トン/年
- いたずらに生産規模を求めるのではなく、こうした世界最高水準の高級鋼の生産に特化し、付加価値を産み出していくことが重要。
※例えば、電磁鋼板は棒鋼のおよそ2倍程度の単価（貿易統計に基づく試算）
- 他方、製品のライフサイクルを通じた環境負荷が注目される中では、たとえ高級鋼であっても、“グリーン”でなければ、市場に参入できず、ビジネス機会を喪失する懸念。
- スクラップを有効利用することで、“グリーン”に近づくとの声もあるが、2050年以降も需要を十分に満たす量のスクラップ発生が見込めないことなどから、（スクラップは最大限活用しつつ）鉄鉱石を活用した製鉄技術は引き続き必要。
- そのため、世界に先駆けて日本の鉄鋼業が水素還元製鉄等の超革新技术を確立し、グリーンな高級鋼に特化して生産・供給する体制を構築することが、日本の鉄鋼業の「勝ち筋」と考えられる。
- 我が国の場合、諸外国に比べエネルギー価格が相対的に高く、水素価格が高止まりする可能性もあるが、そうした想定下でも日本の鉄鋼業が国際競争を勝ち抜くためには、製鉄所内で発生する水素の有効利用やCCUSの活用等による水素使用量の抑制、原料や水素調達が容易な海外拠点との連携、業態転換も含め、鉄鋼各社が、様々なアプローチを総動員し、持続可能なビジネスモデルを構築することが必要。

出典：「第5回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/005_03_00.pdf」

製鉄プロセスにおける水素活用（国費負担額：上限1,935億円）

- 我が国鉄鋼業は、世界でも最高水準の高品位鋼（超ハイテン材、電磁鋼板等）を供給し、電動車や洋上風力など、脱炭素化で伸びゆく市場を獲得していくチャンス。
- 他方、世界では“グリーンスチール”市場が2050年で世界の半分を占めることが想定され、我が国の高品位鋼であっても“グリーン”でなければ市場に参入できない可能性。
- “グリーンスチール”の製造プロセスは、水素還元を始め技術的に未確立であるとともに、脱炭素化プロセスの研究開発はリスクも高い。
- 高品位鋼で世界の脱炭素化市場の獲得を目指すためにも、これまでと同等の品質を維持しつつ、製鉄プロセスの脱炭素化を実現するための研究開発に官民一体となって取り組む必要。

水素還元製鉄のイメージ



技術課題

<高炉を用いた水素還元技術の開発>

- 高炉法は、エネルギー効率に優れている上、高級鋼の製造が可能。我が国鉄鋼業に技術的優位あり。
- 高炉を用いて水素で鉄鉱石を還元する技術や、発生した CO_2 を還元剤等へ利活用する技術を開発し、高炉における脱炭素化を目指す。



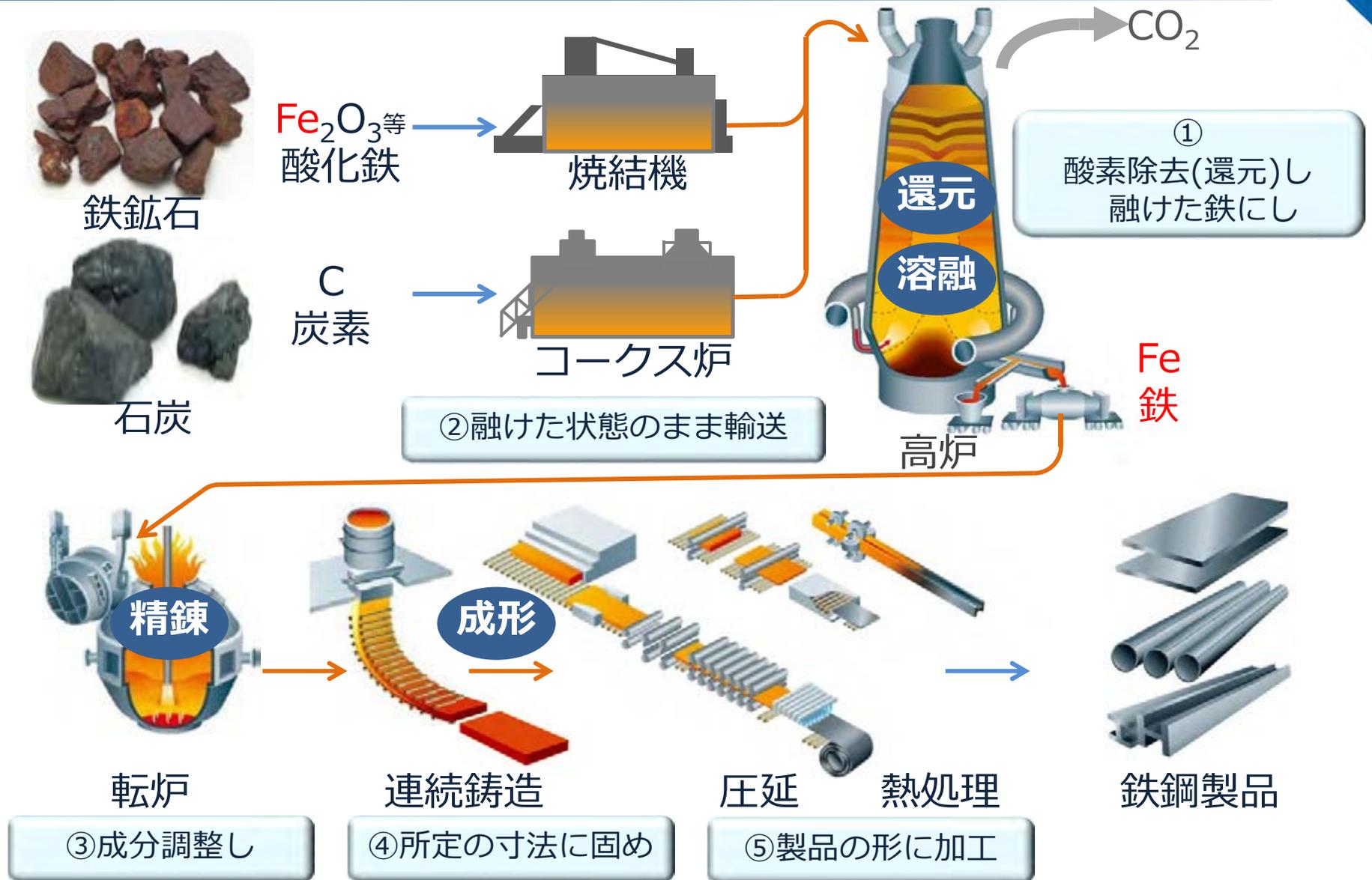
COURSE50試験高炉

※試験高炉において、製鉄プロセスから CO_2 排出を50%以上削減する技術を実証

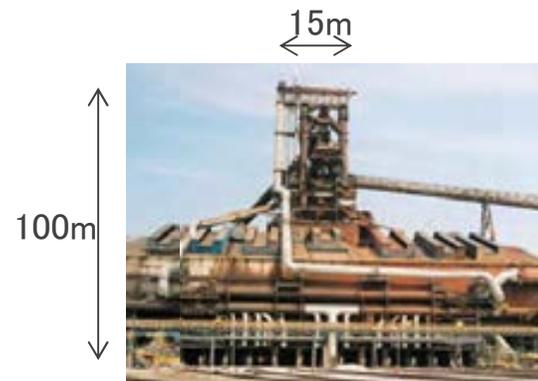
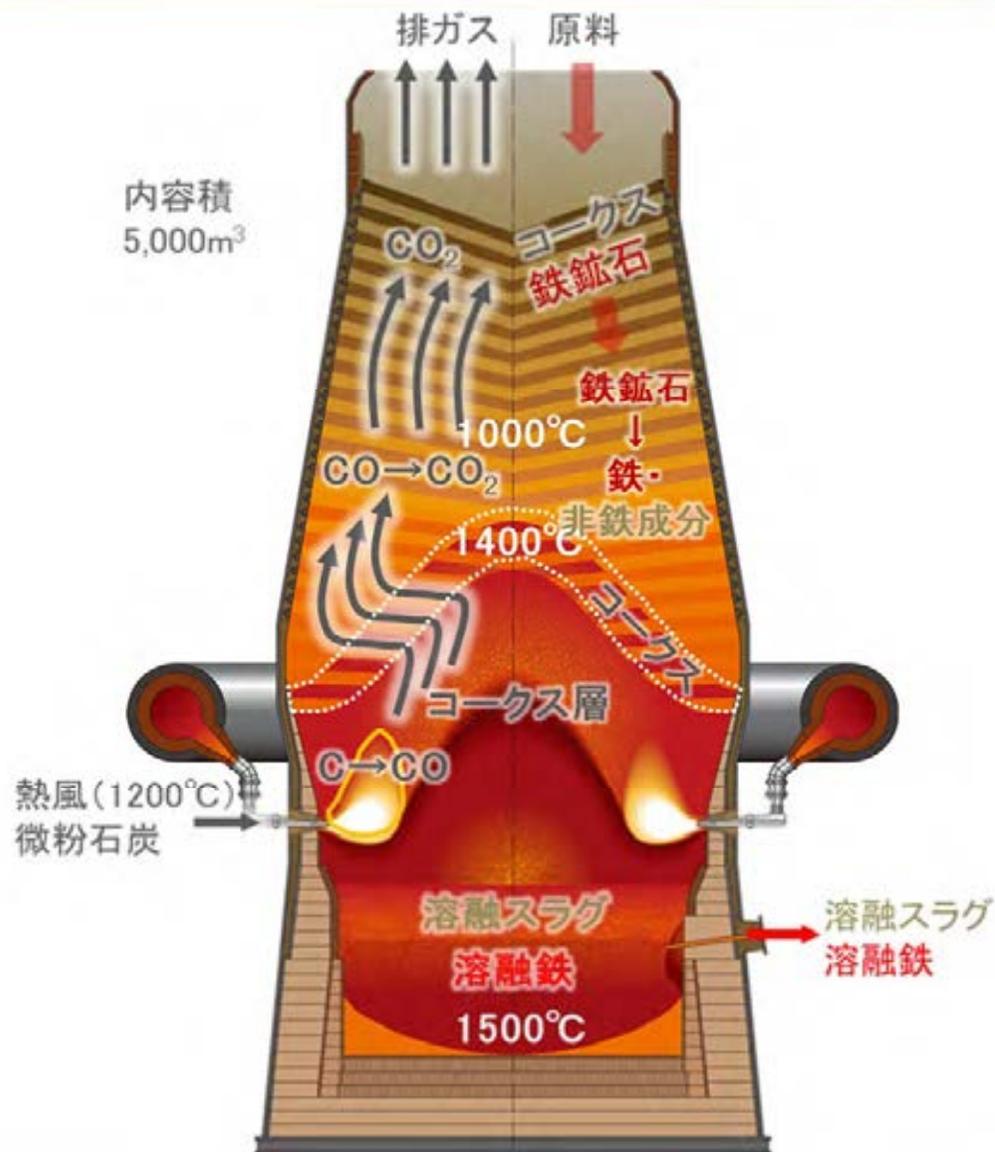
<水素だけで鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発>

- 直接還元法は、還元ガスを全て水素に置き換えることで、CCUなどの周辺技術がなくとも脱炭素を実現することが可能。
- 水素で鉄鉱石を直接還元する技術や電炉での不純物除去技術（高炉法並みに制御する技術）を開発し、直接水素還元炉での高級鋼製造を目指す。

高炉法鉄鋼製造プロセス



高炉の機能とコークスの役割



高炉は鉄鉱石から連続的かつ効率的に鉄を生成する超大型化学反応器。

上部から装入された鉄鉱石は鉄へと還元され、**溶融鉄**として下部から連続的に取り出される。

1日1万トン(車1万台分)の還元された鉄を連続生産。

コークスの役割

- ①還元材(炭素C)と熱の供給
- ②高温でも固体のまま原料を支え、炉内でのガス流れを維持

鉄鉱石からの鉄の製造

経路1 炭素(石炭)の利用 …既存技術



還元のために
大量にCO₂発生

CO₂の利用(CCU)・地中固定(CCS)が必要

経路2 水素の利用 …超革新技術

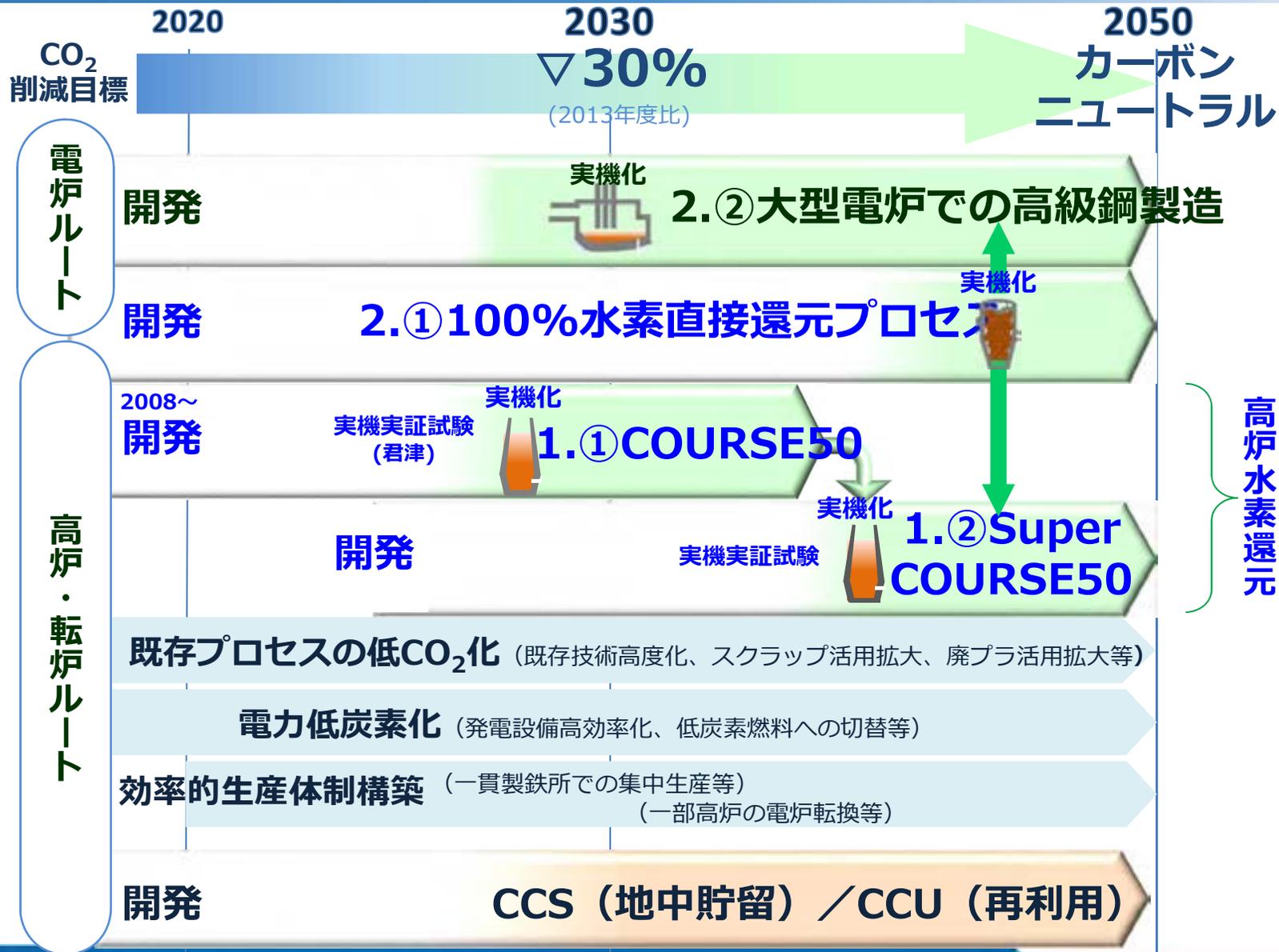


CO₂フリーの加熱が必要

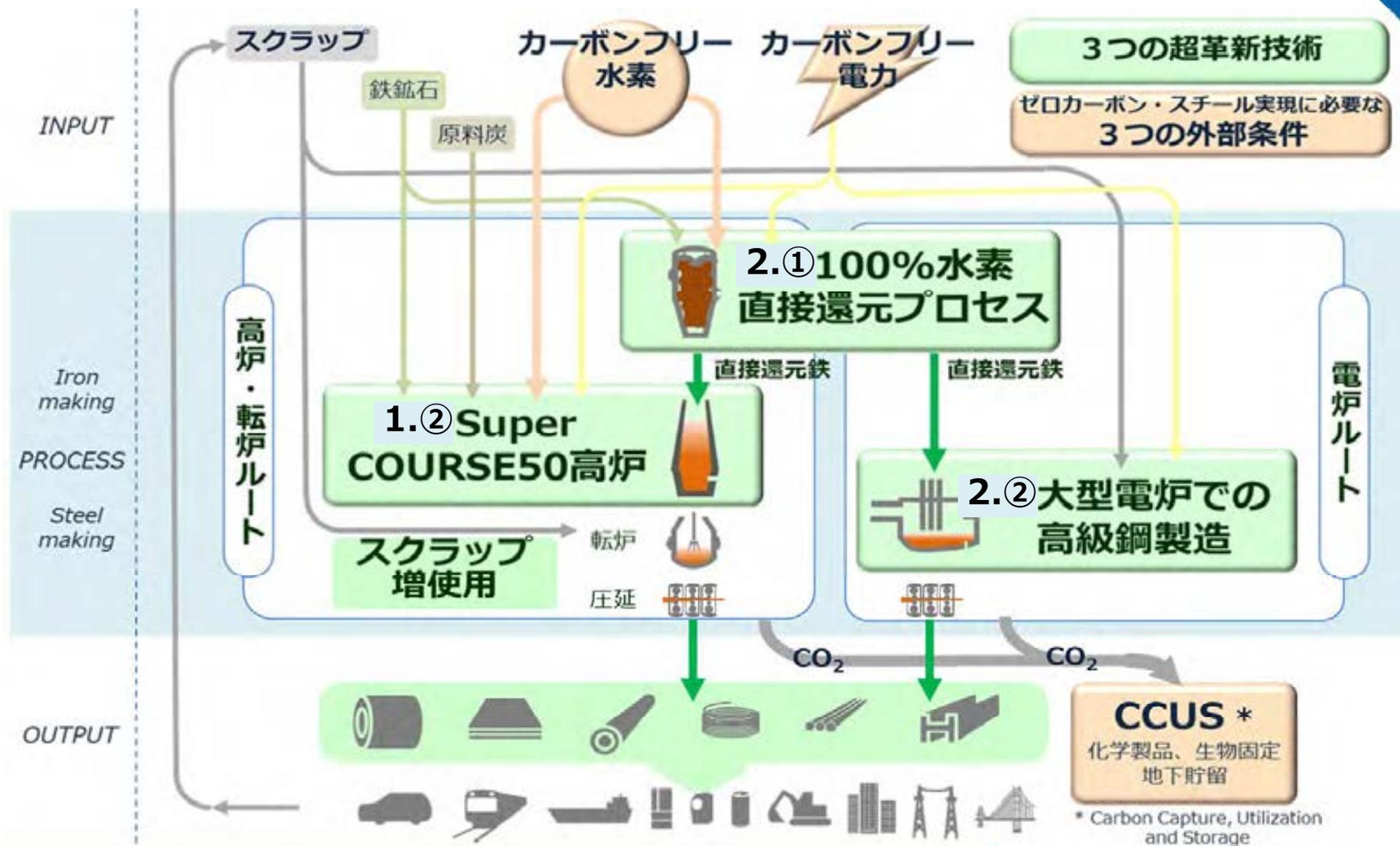
水素の大量、安価安定供給が必要

鉄鉱石から鉄を作るには酸素を取り除く必要がある。
酸素除去には炭素が使われていたが、水素への転換が求められている。

当社のCO₂排出削減施策ロードマップ



カーボンニュートラル社会における産業アーキテクチャー⁸



1.高炉を用いた水素還元技術の開発

① 所内水素を活用した水素還元技術等の開発

事業の目的・概要

2030年までに、所内水素を活用した高炉における水素還元技術およびCO₂分離回収技術等により、製鉄プロセスからCO₂排出量を30%以上削減する技術の実装。(水素還元技術等で10%以上、CO₂分離回収技術で20%以上の計30%以上削減を想定)

- ① 実炉実証試験に向けた操業条件の検討 (委託)
- ② 実高炉 (5000m³級) での実証試験 (1/2補助)

実施体制

※太字: 幹事企業

日本製鉄株式会社、JFEスチール株式会社、株式会社神戸製鋼所、一般財団法人 金属系材料研究開発センター

事業期間

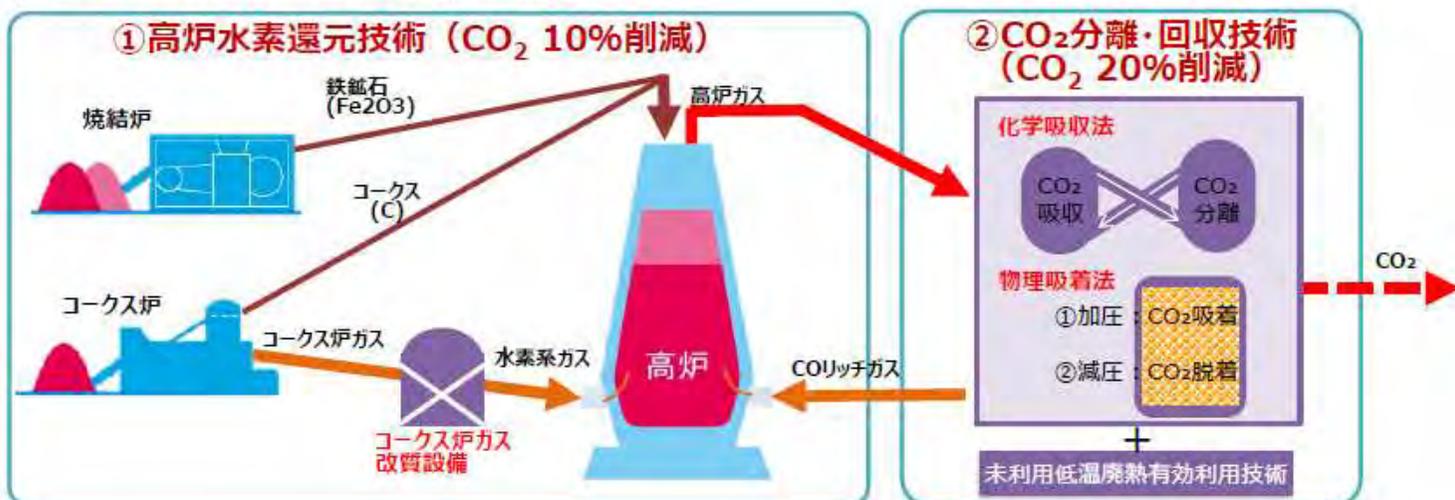
- ①2021年度～22年度(2年間)、②2022年度～29年度(7年間)

事業イメージ

事業規模等

- 事業規模 (① + ②) : 約353億円
 - 支援規模 (① + ②) * : 約140億円
- *インセンティブ額を含む。今後ステージゲート等で事業進捗等に応じて変更の可能性あり
補助率等 委託 → 1/2 補助

COURSE50プロジェクト概念図 (再掲)



1.高炉を用いた水素還元技術の開発

② 外部水素や高炉排ガスに含まれるCO₂を活用した低炭素技術等の開発

事業の目的・概要

2030年までに、中規模試験高炉（500m³級以上）において、外部水素や高炉排ガスに含まれるCO₂を活用した低炭素技術の開発に加え、バイオマスや還元鉄等を一部原料として活用するなど、あらゆる低炭素化技術を組み合わせることにより、高炉法において製鉄プロセスからCO₂排出を50%以上削減を実現する技術を実証。

- ① 要素技術開発および小規模高炉(水素直接吹き込み:12m³、カーボンリサイクル高炉:150m³規模)での検証試験（委託）
- ② 中規模試験高炉（500m³級以上）での実証実験（2/3補助）

※太字: 幹事企業

実施体制

日本製鉄株式会社、JFEスチール株式会社、株式会社神戸製鋼所、一般財団法人 金属系材料研究開発センター

事業期間

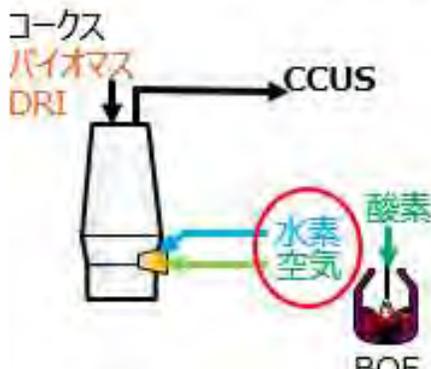
- ① 2021年度～24年度(4年間)、25年度(5年間)、26年度(6年間)
- ② 2025年度、26年度、27年度(6年間or4年間)（技術により異なる）

事業イメージ

従来型高炉技術

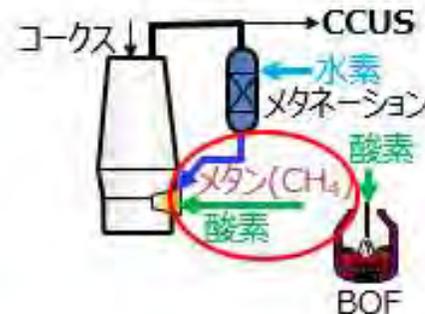


技術①（水素直接吹き込み）



技術②（水素間接吹き込み）

※メタネーション



2.水素だけで低品位の鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発¹²

①直接水素還元技術の開発

事業の目的・概要

2030年までに、低品位の鉄鉱石を水素で直接還元する技術により、中規模直接還元炉（実炉の1/25~1/5）において、現行の高炉法と比較してCO₂排出を50%以上削減を達成する技術を実証。

- ① 要素技術開発および小規模試験炉（実炉の1/250~1/150）での検証試験（委託）
- ② 中規模直接還元炉（実炉の1/25~1/5）試験による実証実験（2/3補助）

実施体制

※太字: 幹事企業

日本製鉄株式会社、JFEスチール株式会社、一般財団法人
金属系材料研究開発センター

事業期間

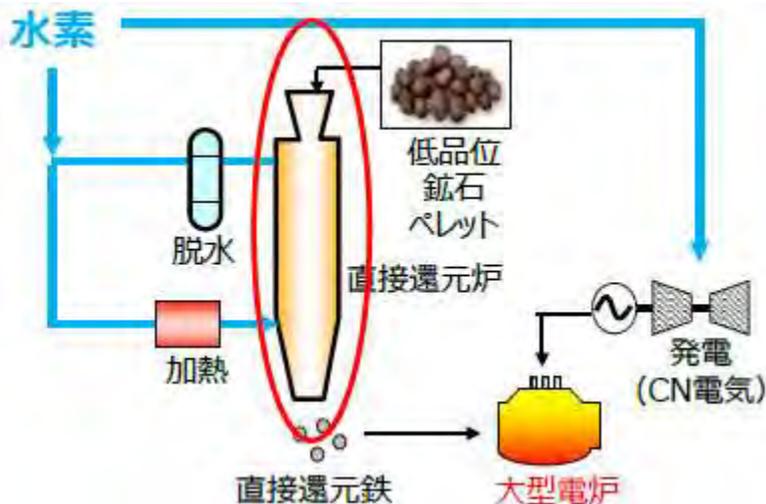
- ①2021年度~26年度(6年間)、②2027年度~30年度(4年間)

事業規模等

- 事業規模（①+②）:約723.5億円
- 支援規模（①+②）*:約345億円

*インセンティブ額を含む。今後ステージゲート等で事業進捗等に応じて変更の可能性あり
補助率等 委託 → 2/3補助

事業イメージ



2.水素だけで低品位の鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発 13

②直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発

事業の目的・概要

2030年までに、低品位の鉄鉱石の水素直接還元鉄を活用した電気炉プロセスにおいて、自動車の外板等に使用可能な高級鋼を製造するため、大型電気炉一貫プロセス（処理量約300トン規模）において、不純物（製品に影響を及ぼす成分）の濃度を高炉法並み（リン150ppm、窒素40ppm以下）に制御する技術を実証

- ① 要素技術開発および小型試験電気炉・炉外処理炉（処理量3～10トン規模）での検証試験（2/3補助）
- ② 大型試験電気炉・炉外処理炉（処理量約300トン規模）における実証実験（1/2補助）

実施体制

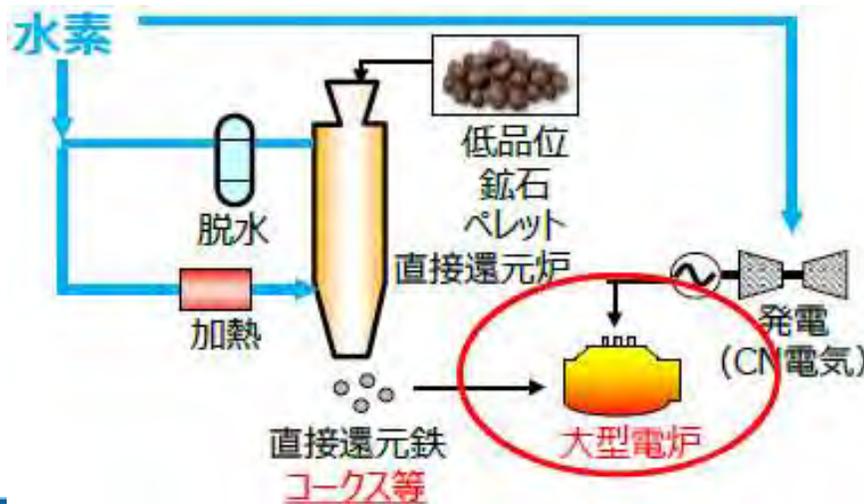
※太字:幹事企業

日本製鉄株式会社、JFEスチール株式会社、株式会社神戸製鋼所、一般財団法人 金属系材料研究開発センター

事業期間

①2021年度～25年度(5年間)、②2025年度～30年度(6年間)

事業イメージ



事業規模等

- 事業規模（①+②）:約367.6億円
- 支援規模（①+②）*:約236億円

*インセンティブ額を含む。今後ステージゲート等で事業進捗等に応じて変更の可能性あり
補助率等 2/3 → 1/2 補助

当社のゼロカーボン・スチール実現への挑戦と社会との連携

当社は、日本の鉄鋼業が引き続き世界をリードし、日本の産業全般の競争力を維持・強化するために必須である、ゼロカーボン・スチールの実現に向けた**超革新技術の他国に先駆けた開発・実機化**に、経営の最重要課題として果敢に挑戦

当社のゼロカーボン・スチール必要投資イメージ

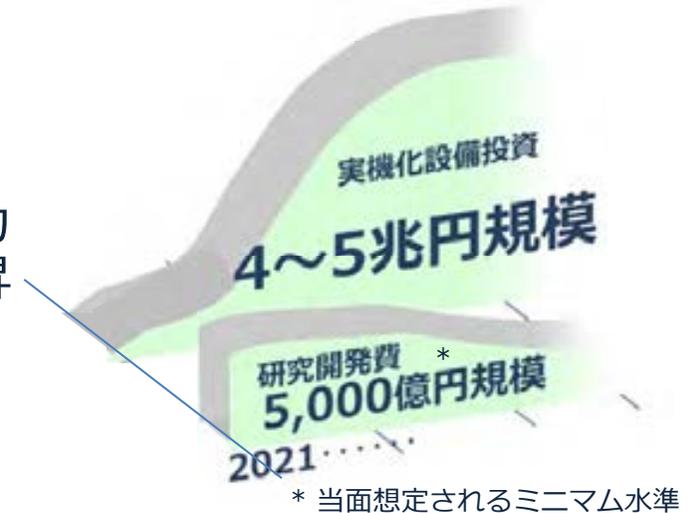
ゼロカーボン・スチール実現に伴う 3つのコストアップ

- ① 巨額の研究開発費
- ② 実機化のための巨額の設備投資
- ③ 安価なカーボンフリー水素・カーボンフリー電力が調達できた場合においても、操業コストが上昇

粗鋼の製造コストは現状の倍以上となる可能性

ゼロカーボン・スチール実現に必要な 3つの連携

- ① **「環境と成長の好循環」を実現する国家戦略**
非連続的イノベーション等の研究開発に対する長期かつ継続的な政府の支援
安価安定大量の水素供給インフラ確立、国際競争力あるコストでのゼロエミ電源の実現、CCUS等の開発・実用化のための国家プロジェクト推進
- ② **国際競争におけるイコールフットィング確保、産業競争力強化、
ビジネスチャンスにつながる政策の一体的実現**
- ③ **社会全体でコスト負担するコンセンサスの形成**
研究開発や既存設備の転換を伴う設備投資、大幅な製造コスト上昇等、ゼロカーボン実現に伴うコストを社会全体で負担するしくみの構築

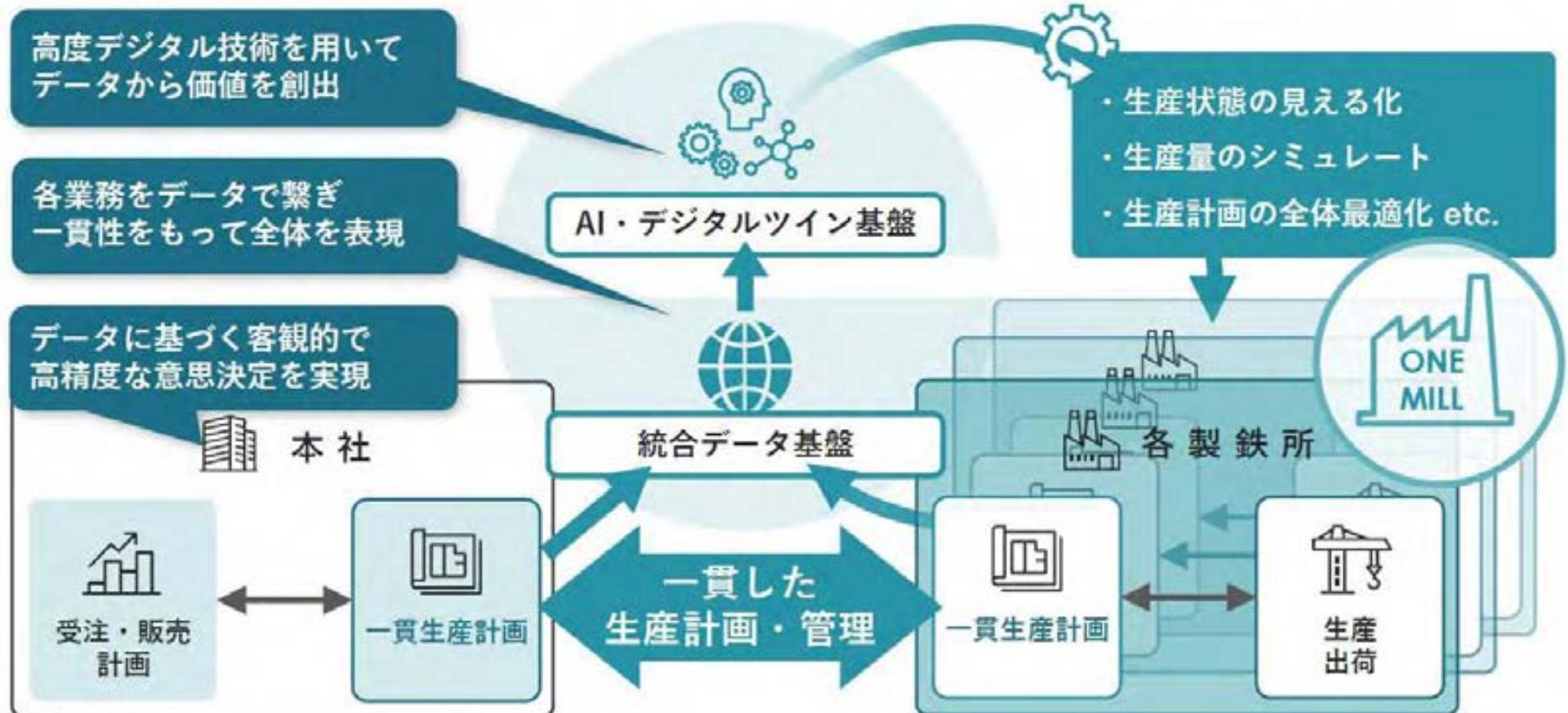


鉄鋼業におけるマテリアルDXへの試み



日本製鉄における仮想ワンミルの構築

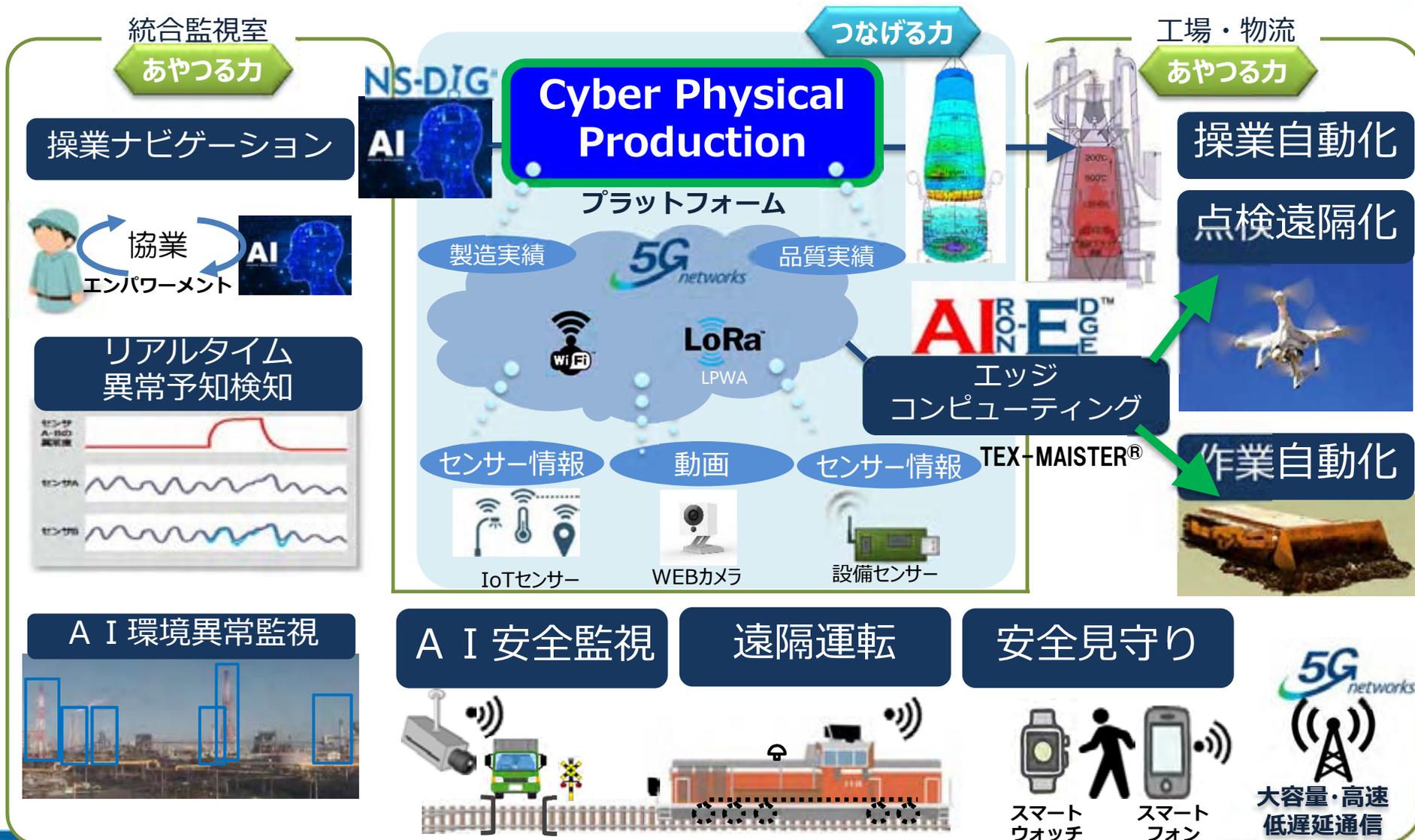
複数事業所の横串連携により生産の柔軟性向上と全体最適化を実現



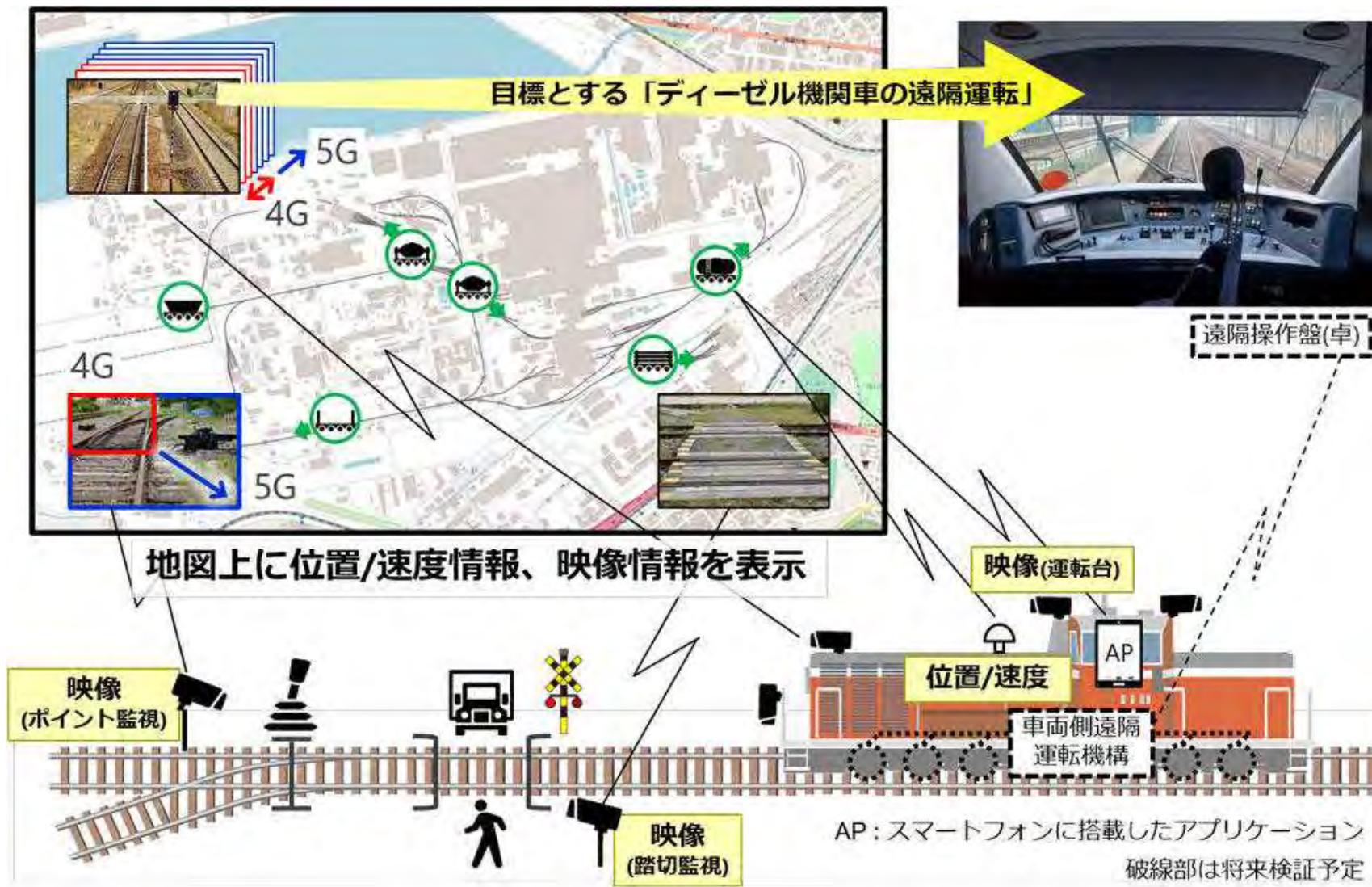
Copyright ©2020 NS Solutions Corporation. All Rights Reserved.

出典:「<https://ascii.jp/elem/000/003/105/3105004/img.html>」

現場で蓄積したデータを統合データプラットフォームに接続し、最新AI技術と組み合わせる手法「Cyber Physical Production」により遠隔管理と大幅な生産性向上を図る。



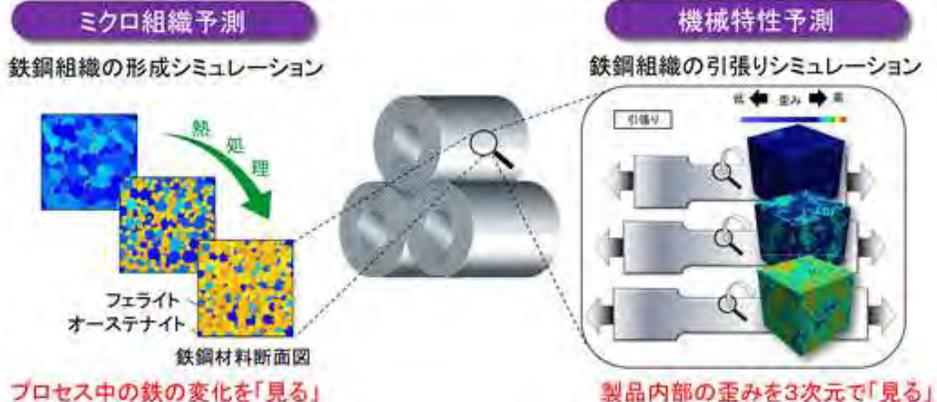
5G & 人工衛星測位 の製鉄所実装



出典: 「https://www.nipponsteel.com/news/20200812_100.html」

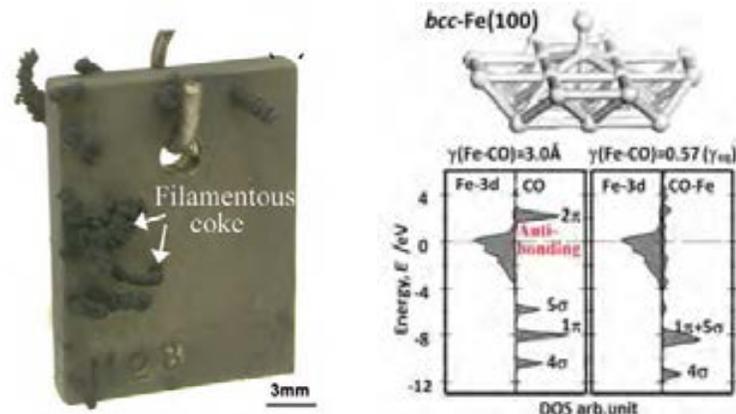
物理シミュレーション（原子レベル～マクロスケール）¹⁹

鉄鋼材料（組織制御・力学特性予測）



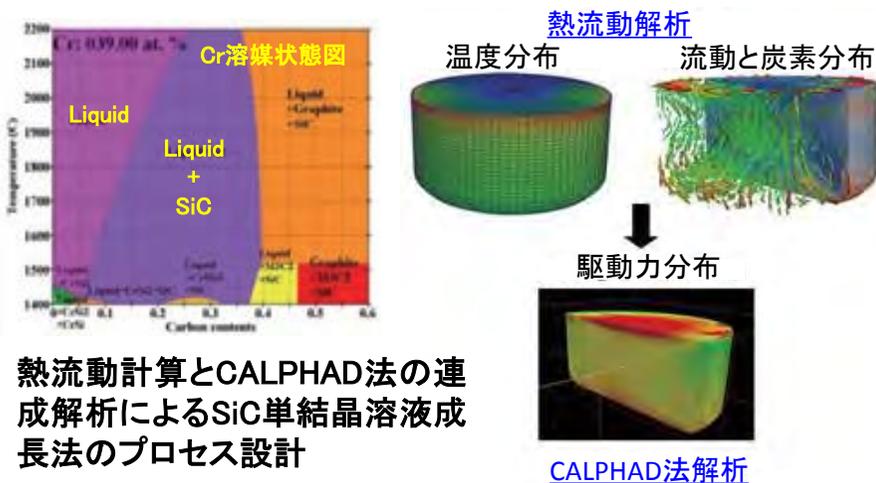
Phase-Field法による製品内部の未知現象の解明

鉄鋼材料（腐食・防食特性制御）

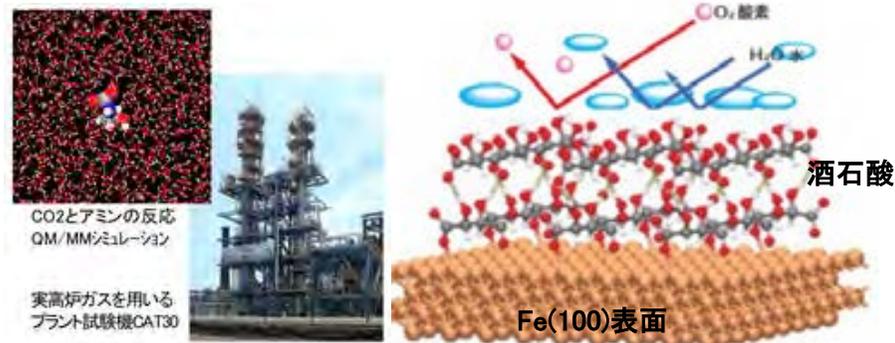


第一原理計算によるNEXAGE™696における耐メタルダスティング機構の解明

材料製造プロセス設計（マルチフィジックス解析）



環境材料・有機機能材料設計



量子化学計算による（左図）CO₂吸収液設計と（右図）鋼板腐食抑制に有効なインヒビター（酒石酸）の吸着構造解明

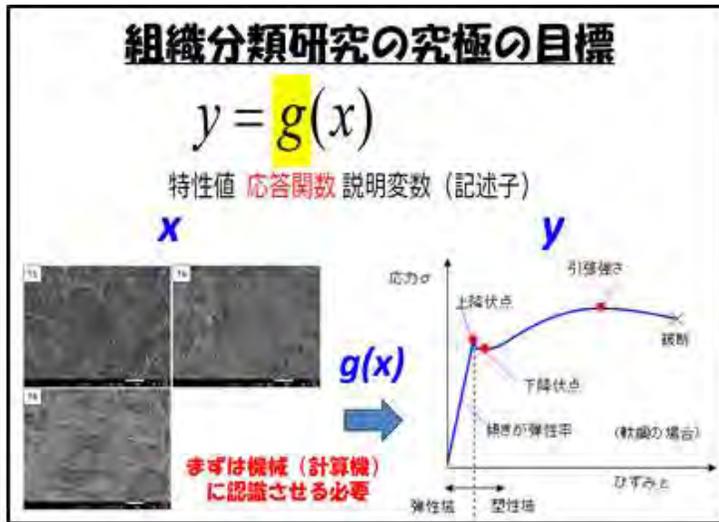


図1. 鉄鋼組織分類技術の目的

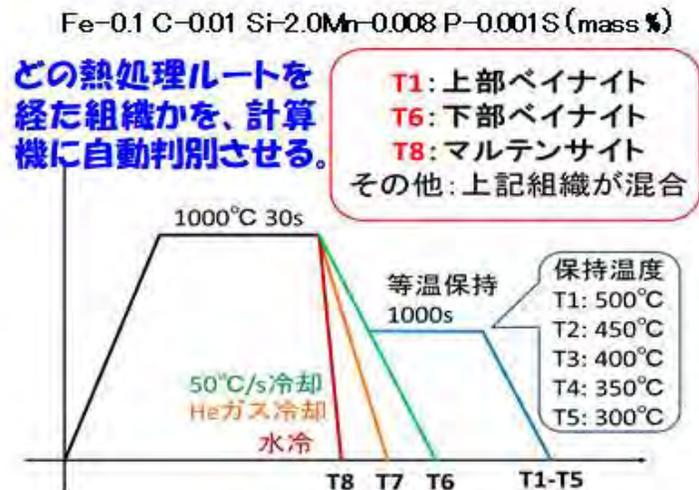


図2. 熱処理パターン

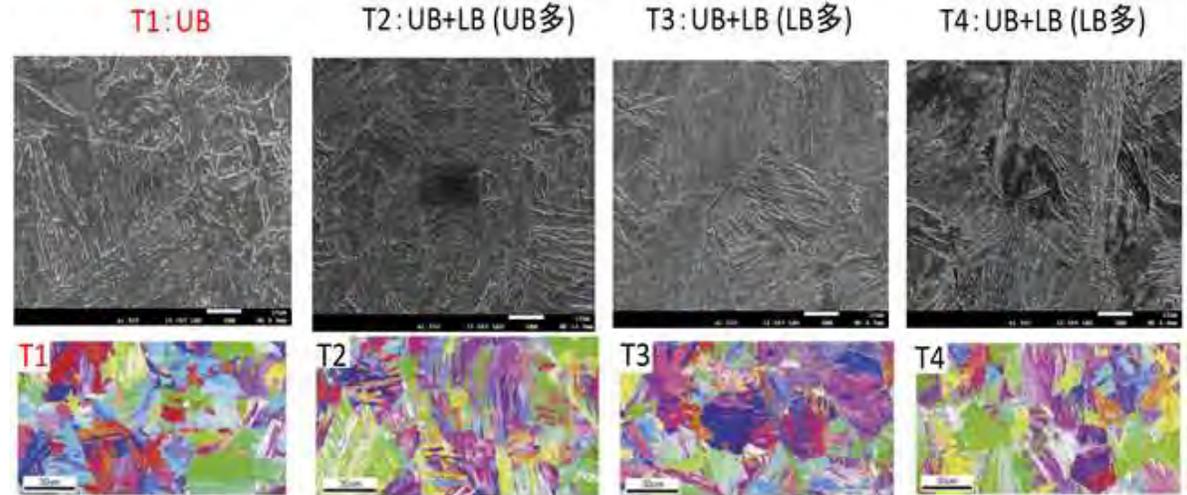


図3 鉄鋼材料組織の熱処理依存性(上段:SEM像、下段:EBSD)

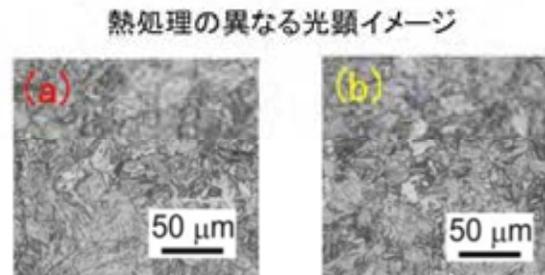


表1. 組織分類AIの性能

観察方法	判別法	判別正答率
EBSD	バリエーション境界密度	81 %
SEM	テクスチャー解析	90 %
SEM	深層学習	98 %

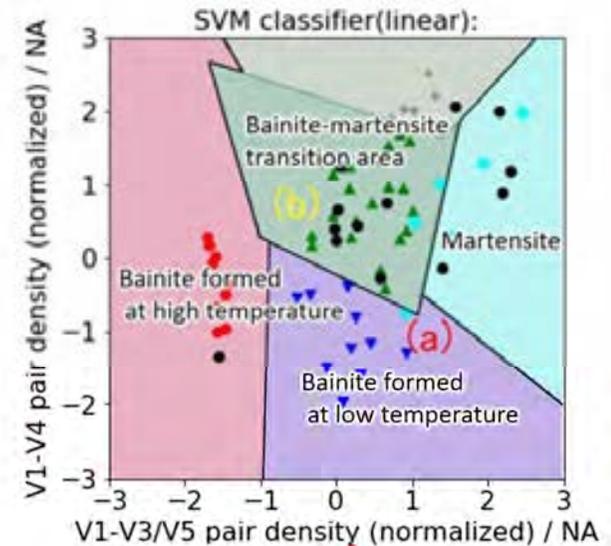


図4. 鉄鋼組織状態図の導出

- 構造用鉄鋼材料は益々高度化した性能が要求される

水素社会、
環境保全、
EV化、
国土強靱化



- 現象が複雑で多数存在する支配因子が交絡し、因果関係が見えづらい
予測精度の高い、新しい物理モデルの構築が必要



データ駆動型研究

- 深層学習によるマイクロ組織の識別・定量化
- ミクロ組織解析から特性予測

