

ESI第10回シンポジウム  
JSER第2回シンポジウム

# 日本鉄鋼連盟 長期温暖化対策ビジョン 『ゼロカーボンスチールへの挑戦』 実現に向けた課題

小野 透

 NIPPON STEEL | 日鉄総研

 日本鉄鋼連盟 The Japan Iron & Steel Federation

# 背景

2014年11月、日本鉄鋼連盟は、2030年を目標年次とした「低炭素社会実行計画フェーズⅡ」を公表した。同計画は、パリ協定に基づく我が国の2030年目標にも反映されており、日本鉄鋼連盟加盟各社は、その達成に向けて不断の努力を行っている。

パリ協定では、締約国に対して、長期目標(2℃目標)達成のための「長期低排出発展戦略」の策定と2020年までの提出を求めており、このため政府は、我が国の「長期戦略」を策定するべく、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会(長期戦略有識者懇談会)」を設置し、検討を開始した。

このような国内外の動きを受け、日本鉄鋼連盟は、現在の「低炭素社会実行計画フェーズⅡ」達成に向けた取り組みに加え、新たに2030年以降を見据え、最終的な『ゼロカーボンスチール』の実現を目指した「長期温暖化対策ビジョン」を策定することとした。

# 鉄連長期温暖化対策ビジョンの策定方針と構成

## [策定方針]

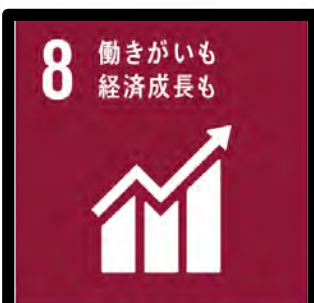
- 2030年以降2100年までをスコープとする
- グローバルな対応を前提とする
- パリ協定長期目標を目指すための方向性を示すものとする
- 現行の低炭素社会実行計画と並立するものとする
- 実行中の国家プロジェクト(COURSE50等)と整合するものとする

## [構成]

- 1) Part 1: 将来の鉄鋼需給想定
- 2) Part 2: 鉄鋼業の長期温暖化対策シナリオ
- 3) Part 3: 日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策

# Part 1: 将来の鉄鋼需給想定

# SDGsとパリ協定



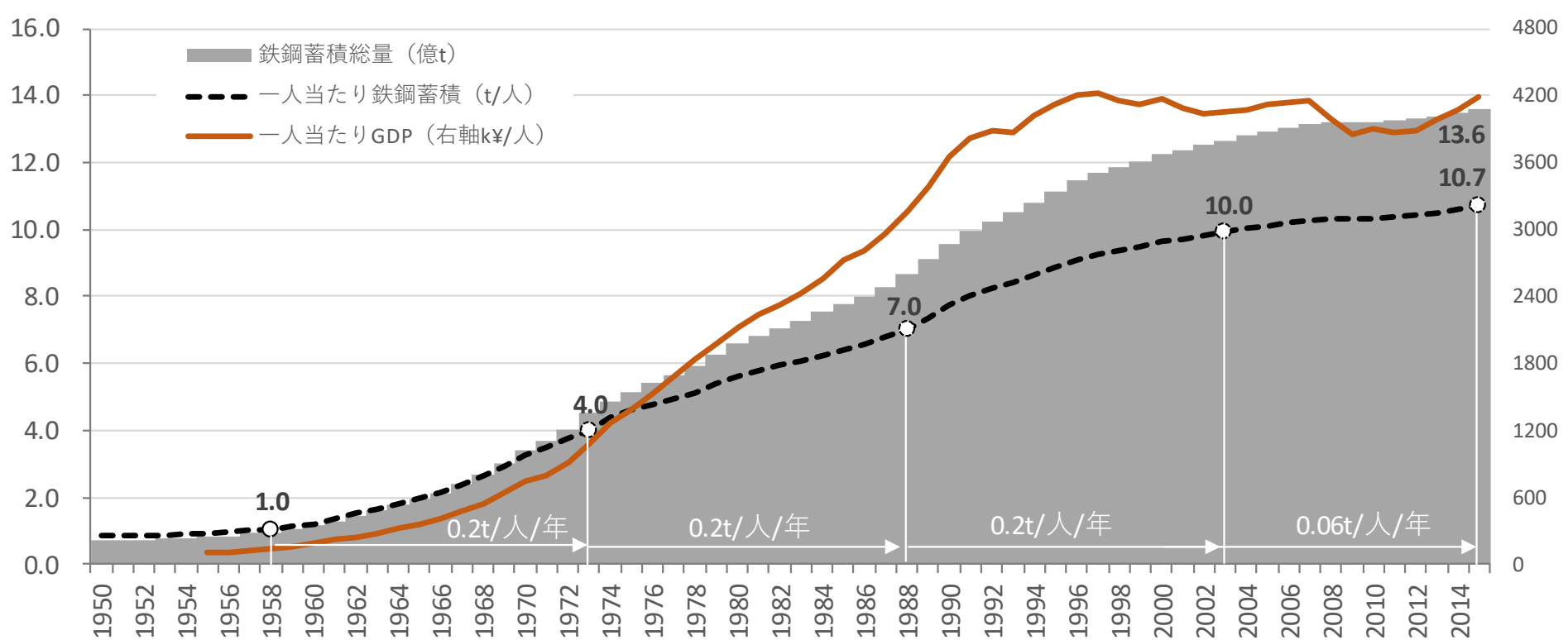
↑  
パリ協定

↑  
鉄鋼需要促進要因

# 日本の鉄鋼蓄積実績推移

将来の鉄鋼需給は、過去の経済成長と鉄鋼蓄積の関係からマクロに想定することとした。このため信頼の高い日本の過去の実績を分析するとともに、海外の研究結果との整合も図ることとした。

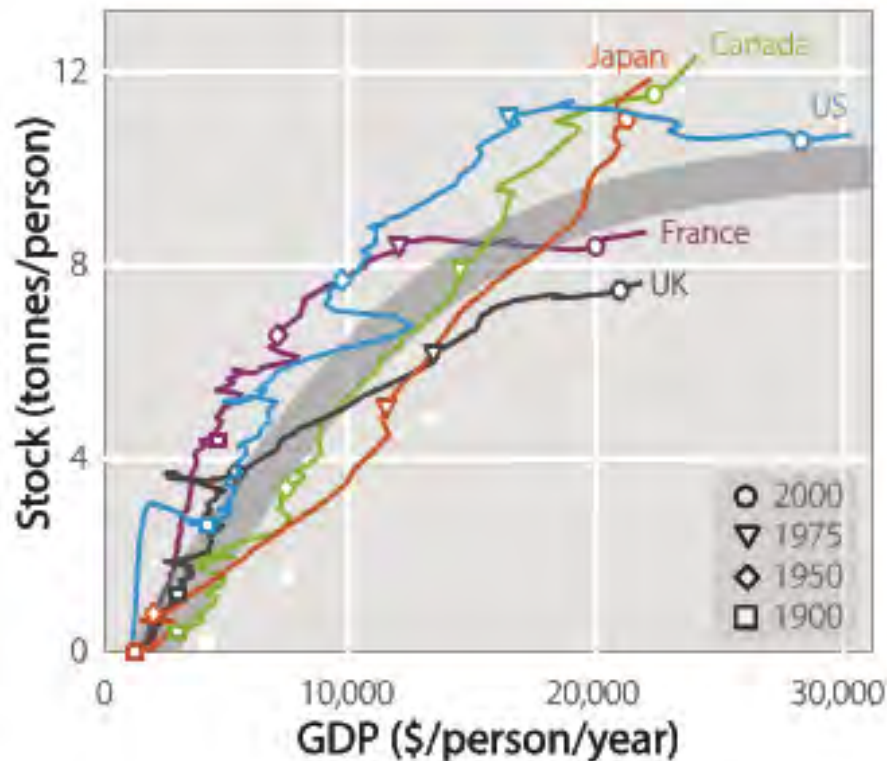
1958年の一人当たりの鉄鋼蓄積は1t/人に過ぎなかったが、1960年代の高度経済成長期を経て1973年には4t/人に達し、15年後の1988年に7t/人、更に15年後の2003年に10t/人に達した。この間の鉄鋼蓄積拡大の速度は+0.2t/人/年となる。その後は、社会の経済的成熟に伴い鉄鋼蓄積は緩やかに推移し(+0.06t/人/年)、現在の鉄鋼蓄積総量は13.6億t(2015年度)、一人当たりでは10.7t/人となっている。





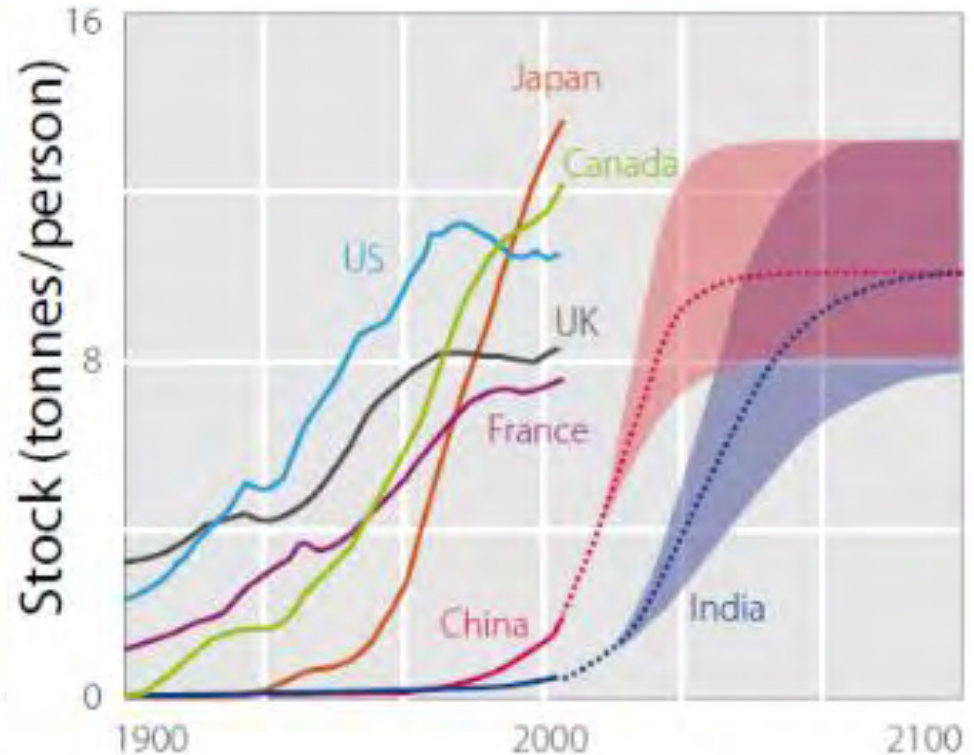
# 世界の鉄鋼蓄積実績推移と将来想定

経済成長と一人当たりの鉄鋼蓄積量には一定の相関があり、また人口が増えれば蓄積総量は拡大する。先進諸国における鉄鋼蓄積量は8～12t/人内外と推計されており、また、今世紀前半には中国において、今世紀中にはインドにおいても、鉄鋼蓄積量が10t/人に到達すると予測されている。



一人当たりGDPと鉄鋼蓄積との関係

出典：Muller, et.al, “Patterns of Iron Use in Societal Evolution”, Environ. Sci. Technol. 2011, 45



一人当たり鉄鋼蓄積の推移

出典：“Sustainable steel: at the core of a green economy”, World Steel Association, 2012

# 鉄鋼蓄積想定試算前提

## [計算前提]

### a) 一人あたりの鉄鋼蓄積量想定

2015年実績: 4.0t/人

2050年想定: 7.0t/人

2100年想定: 10.0t/人

### b) 人口想定

World Population Prospects2017, UN

### c) 逸散・ロス

蓄積総量の0.1%が逸散・ロスするものとした

### d) スクラップ発生率

d-1) 内部スクラップ: 粗鋼生産量に対して12.5% (2015年実績)

d-2) 加工スクラップ: 鋼材出荷量に対して9.3% (2015年実績)

d-3) 老廃スクラップ: 蓄積総量に対して2015年実績0.8%→2050年1.5%→2100年2.0%と徐々に上昇するものとした。

### e) 鉄源の対粗鋼歩留

銑鉄、スクラップともに対粗鋼歩留りを91% (2015年実績)とした

		2015	2050	2100
世界人口 (億人)		73.8	97.7	111.8
鉄鋼蓄積	一人当たり (t/人)	4.0	7.0	10.0
	蓄積総量 (億t)	294	682	1118

	生産量(億t)		スクラップ発生(億t)				スクラップ発生率(%)			鉄鋼蓄積		ロス率(%)	世界人口(億人)
	粗鋼	銑鉄DRI	合計	内部	加工	老廃	内部/粗鋼	加工/鋼材	老廃/蓄積	総量(億t)	一人当たり(t/人)		
2015	16.2	12.2	5.6	2.0	1.3	2.2	12.5	9.3	0.8	294	4.0	0.1	73.8
2020	18.5	13.5	6.8	2.3	1.5	3.0	12.5	9.3	0.9	348	4.5	0.1	78.0
2030	21.0	13.8	9.2	2.6	1.7	4.9	12.5	9.3	1.1	462	5.4	0.1	85.5
2050	26.8	14.0	15.5	3.4	2.2	9.9	12.5	9.3	1.5	682	7.0	0.1	97.7
2100	37.9	12.0	29.7	4.7	3.1	21.9	12.5	9.3	2.0	1118	10.0	0.1	111.8



# 将来の鉄鋼需給想定

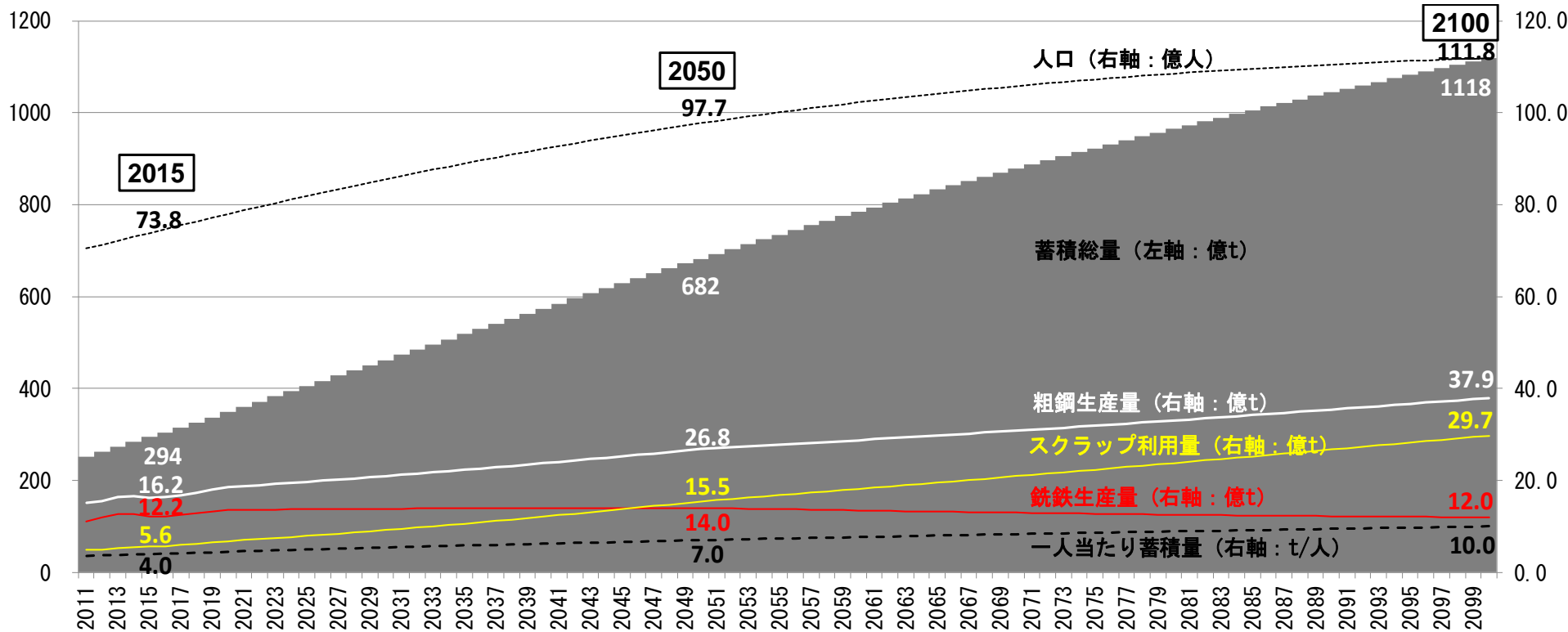
[粗鋼生産量] 鋼材需要拡大に伴い増大

[スクラップ] 主として鉄鋼蓄積拡大による老廃スクラップの発生増加に伴い利用量が増大

[銑鉄生産量] スクラップだけでは鋼材需要を満たすことはできず、また蓄積拡大には天然資源ルートでの生産は必須であることから、今世紀末においても、ほぼ現在並みの銑鉄生産が必要

(億t)

	2015	2050	2100
最終製品中鋼材量	12.9	21.3	30.1
粗鋼生産量	16.2	26.8	37.9
銑鉄生産量	12.2	14.0	12.0
スクラップ利用量	5.6	15.5	29.7



# Part 2: 鉄鋼業の長期温暖化対策シナリオ

# 鉄鋼業の長期温暖化対策シナリオ

## BAU(Business as Usual、成り行き)シナリオ

天然資源ルート、リサイクルルートともに現状の原単位のまま粗鋼生産量が変化。鉄鋼蓄積拡大等に伴いスクラップ回収量(=利用量)が増大。

## BAT(Best Available Technology、先端省エネルギー技術)最大導入シナリオ

既存の先端省エネ技術(CDQ, TRT等の既存技術)を世界に最大限展開。効果はIEA ETP2014のBAT国際展開による削減ポテンシャル(21%)とし、2050年に達成されるものと想定。

## 革新技術最大導入シナリオ

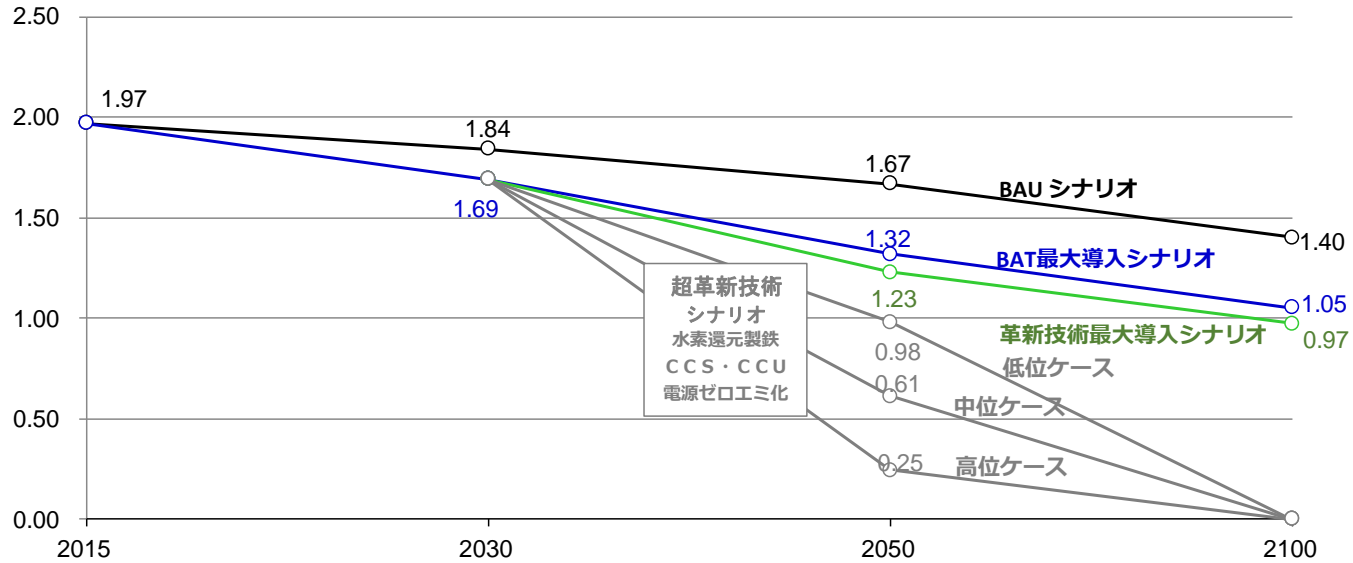
現在開発中の革新技術(COURSE50(水素還元部分)、フェロコークス等)が、2030年以降2050年までに最大導入されるものと想定。

## 超革新技術開発シナリオ

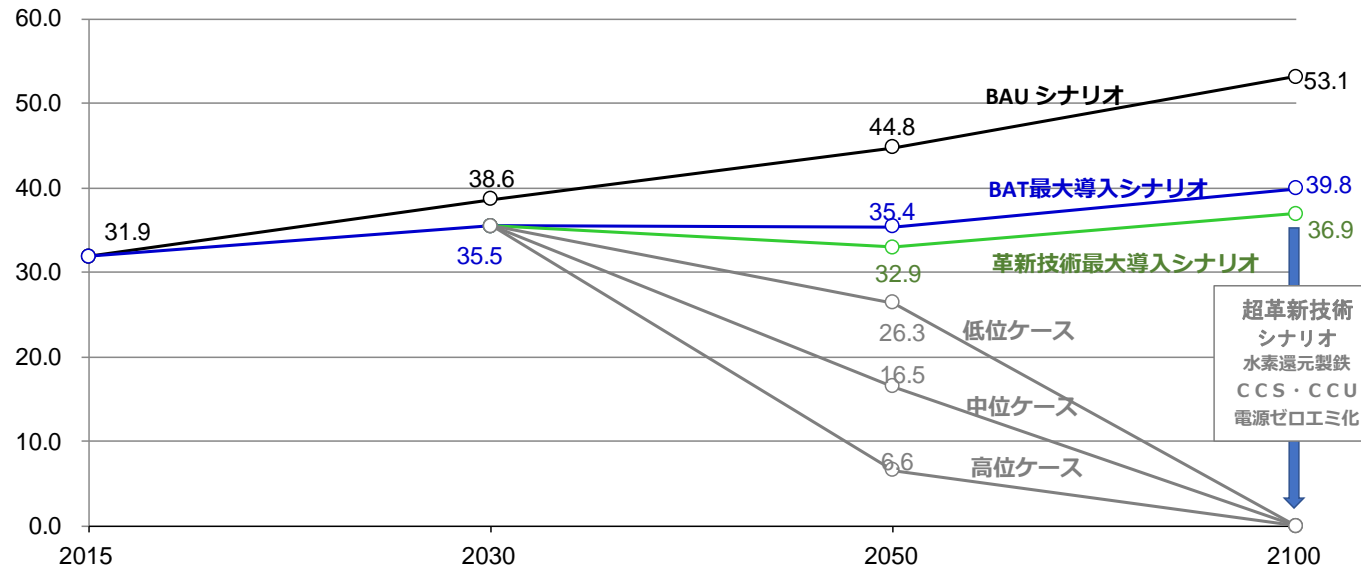
現在まだ緒についていない超革新技術(水素還元製鉄、CCSU等)の導入、並びに系統電源のゼロエミッション化により、2100年の鉄鋼プロセスの脱炭素化達成を想定。

# CO<sub>2</sub>排出量

原単位 (t-CO<sub>2</sub>/t-crude steel)



総排出量 (億t-CO<sub>2</sub>)



超革新技術  
シナリオ  
水素還元製鉄  
CCS・CCU  
電源ゼロエミ化

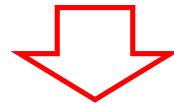
# 水素還元製鉄試算



## • 銑鉄1t製造に必要な水素量

還元:  $601\text{Nm}^3$  + 吸熱反応補完:  $67\text{Nm}^3$  +  $1600^\circ\text{C}$ までの溶銑昇熱:  $85\text{Nm}^3$

=  $753\text{Nm}^3/\text{ton of}$  (理論値)  $\Rightarrow$  効率75%とすると実質 **$1000\text{Nm}^3/\text{ton}$** 程度



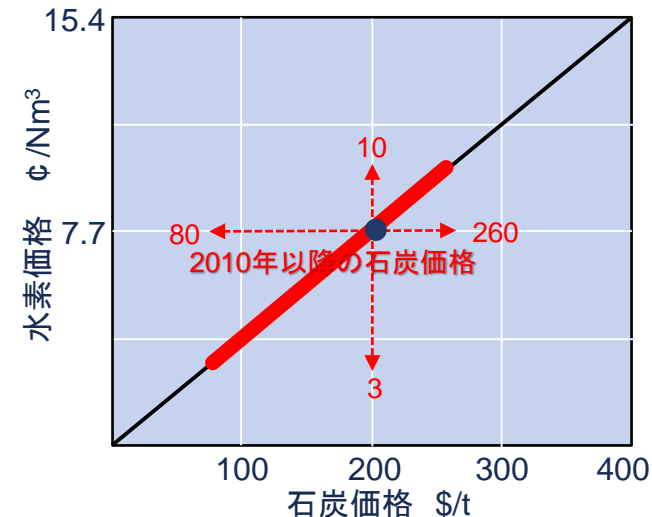
## 量的課題

- 2100年の世界銑鉄生産量12億tの生産に必要な水素量は約 **$1.2$ 兆 $\text{Nm}^3$**
- 水素製造電力原単位\*を $4.5\text{kWh}/\text{Nm}^3$  - $\text{H}_2$ とすると、 $5.4$ 兆 $\text{kWh}$ の電力(日本の消費電力量は約1兆 $\text{kWh}/\text{年}$ )が必要(製造に必要な電力以外に輸送・液化・貯蔵などのために追加の電力が必要)

\*阿部勲夫、「水電解法による水素製造とそのコスト」、水素エネルギーシステム Vol.33, No.1 (2008)

## コスト課題

- 炭素還元製鉄と等価にする場合の水素価格の試算  
**原料単価格を $200\text{\$/t}$** 、原料炭原単位 $700\text{kg}/\text{t-p}$ とすると、原料炭コストは $140\text{\$/t-p}$   
原料炭のうち、「還元機能」に消費される割合は55%(45%は副生ガス化)であることから、  
還元剤コストは $14000 \times 0.55 = 77\text{\$/t-p}$   
これと等価の水素価格は  
 $77\text{\$/t-p} \div 1000\text{Nm}^3\text{-H}_2/\text{t-p} =$  **$7.7\text{ \$/Nm}^3\text{-H}_2$**



# IEA-ETP2017 2DSとの整合性

## IEA-ETP 2017 2DS:

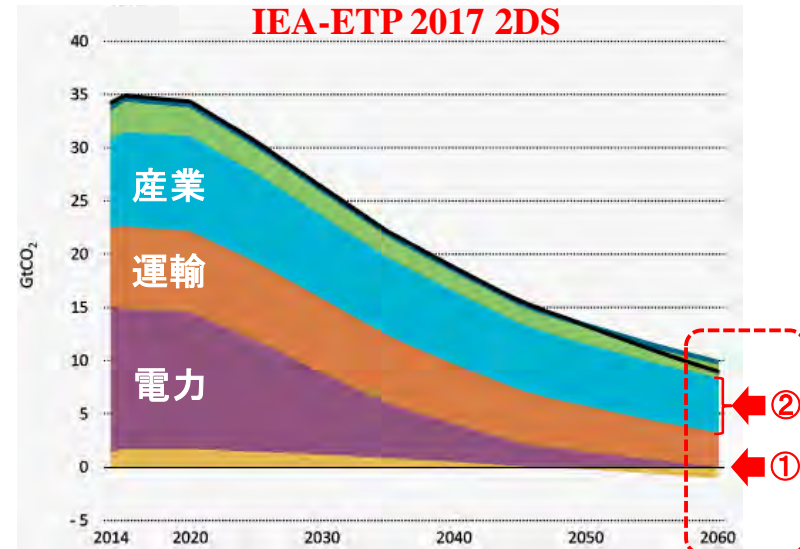
2060年までに、

- ①電力セクターのゼロエミ化、
- ②産業セクターの現状からの30%削減 を想定

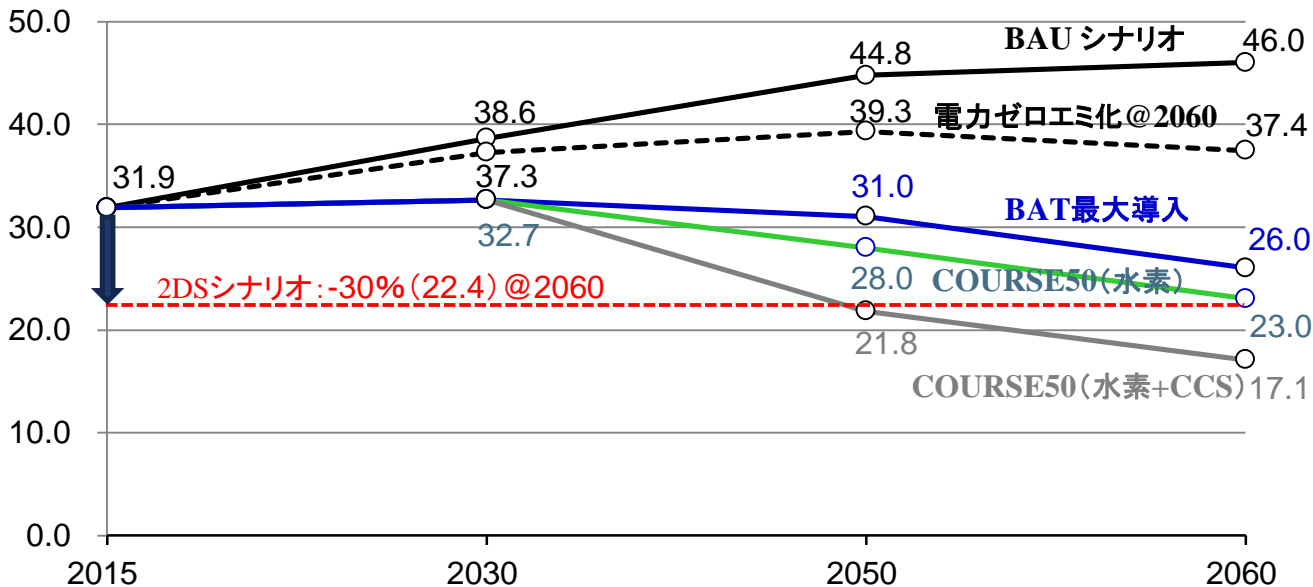


### 試算前提

- 系統電力排出係数: IGES GRID EF v10.2のCombined Averageを使用
- 高炉ルート of 系統電力原単位: 140kWh/t-s (日本の2016平均)
- 電炉ルート of 系統電力原単位: 872kWh/t-s (日本の2016平均)
- 高炉ルート of CO<sub>2</sub>排出係数: 2.4t-CO<sub>2</sub>/t-s
- 電炉ルート of CO<sub>2</sub>排出係数: 1.0t-CO<sub>2</sub>/t-s
- 鉄源の対粗鋼歩留: 0.91 (天然資源ルート、スクラップルートとも)



### 総排出量(億t-CO<sub>2</sub>)



電力セクターのゼロエミ化が達成され場合、製鉄プロセスで消費する系統由来電力がゼロエミとなる。

これに長期温暖化シナリオで示したBAT最大導入効果と、革新技術最大導入シナリオの COURSE50 (水素還元部分) 効果を加えると、2060年段階で、IEA-ETP 2017 2DS における産業部門の削減率-30% にほぼ匹敵するレベルとなる。

さらに COURSE50 の CCS 効果を加えると、2060年においてほぼ半減のシナリオとなる。



---

# Part 3: 日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策

# 日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策

- 3つのエコと革新技術開発を2030年以降の長期温暖化対策においても基本とする
- さらに、パリ協定に基づく長期目標(2°C目標)を念頭に置かならば、現在の製鉄技術を超える超革新的技術開発が必要

## エコプロセス

鉄鋼製造プロセスで世界最高水準のエネルギー効率のさらなる向上

## エコプロダクト

低炭素社会の構築に不可欠な高機能鋼材の供給を通じて、最終製品として使用される段階において排出削減に貢献

## エコソリューション

世界最高水準の省エネ技術を途上国を中心に移転・普及し、地球規模での削減に貢献

革新技術： COURSE50、フェロコークス等  
超革新技術： 水素還元製鉄、CCS、CCU等

# エコプロセス

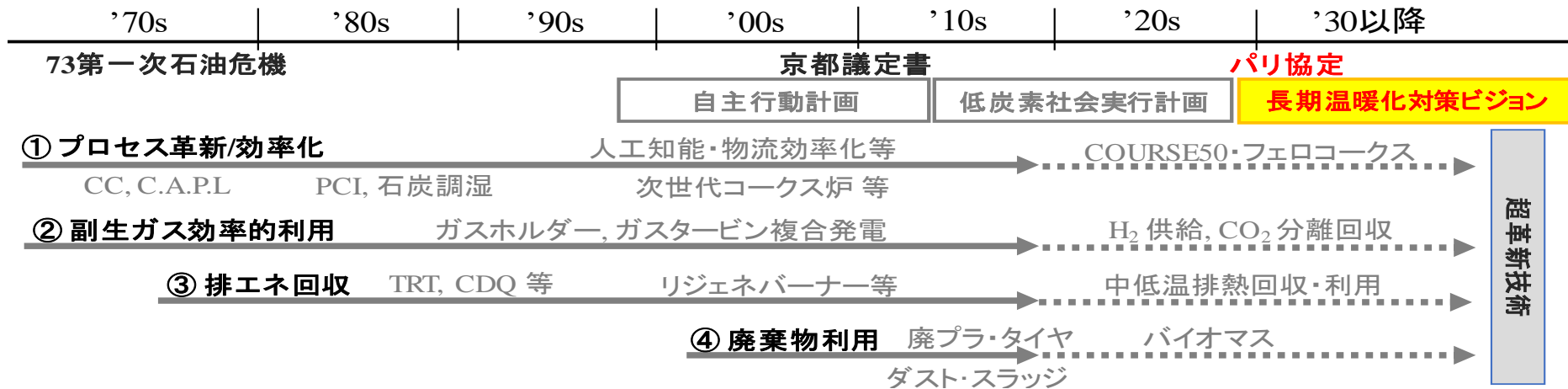
1970年代のオイルショックを契機に、日本鉄鋼業は、

- ①プロセスの連続化などを中心としたプロセス革新、
- ②製鉄・製鋼工程で発生する副生ガスの効率的利用、
- ③排エネルギーの回収・有効利用、
- ④廃棄物資源の有効利用を基本とする省エネルギー技術の開発・導入に取り組んできた。

その結果、世界で最高のエネルギー効率のプロセスを実現してきた。

長期温暖化対策においても引き続き「エコプロセス」の開発・導入に取り組んでいく。

参考: 低炭素実行計画フェーズⅡにおけるエコプロセス効果(2030)は900万t-CO<sub>2</sub>

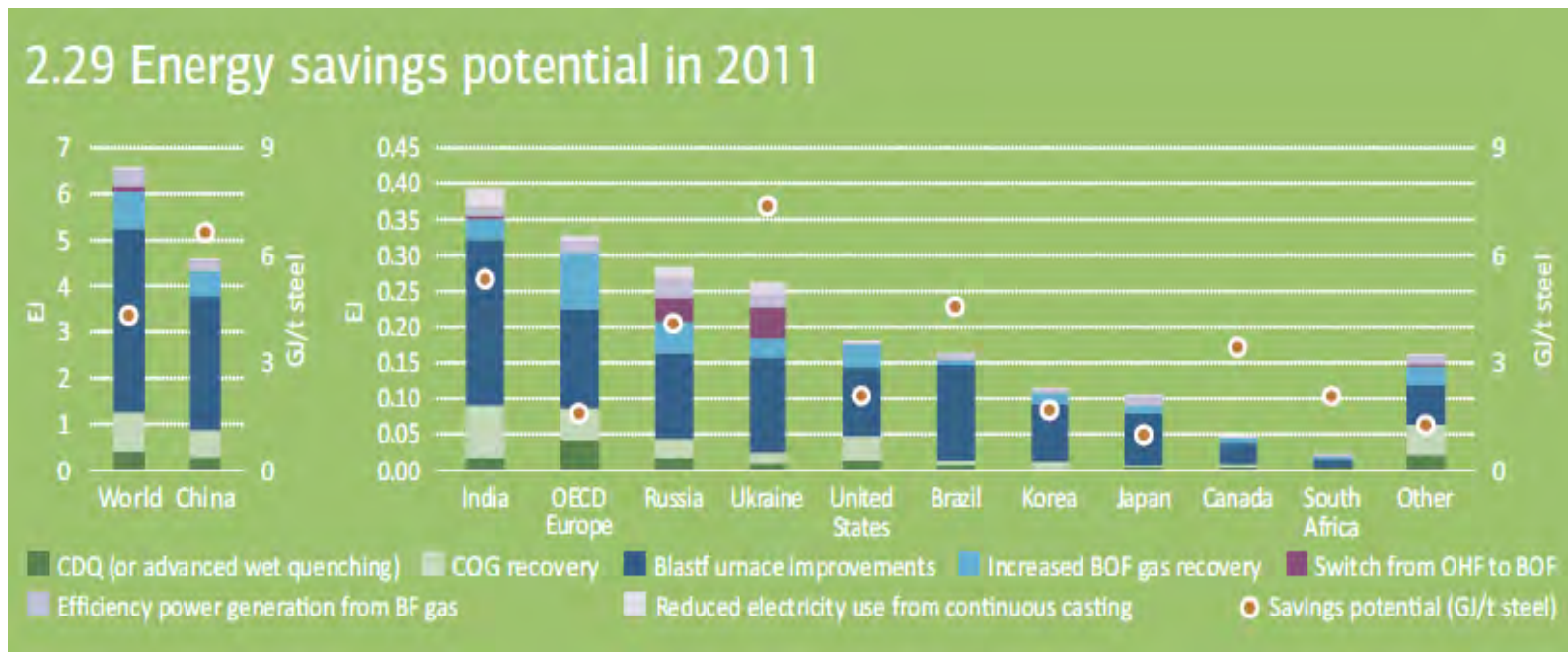


# エコソリューション

日本鉄鋼業は、日本で開発・実用化した省エネ技術(BAT技術)の中国・インド・ASEANをはじめとする鉄鋼業の成長が著しい国への移転や、GSEP「エネルギー効率向上に関する国際パートナーシップ」等の多国間協力の枠組みでの省エネルギー推進を通じて地球規模でのCO<sub>2</sub>削減に貢献してきた。

国際エネルギー機関(IEA)の研究では、省エネルギー先進技術(その多くが日本で開発された)の導入による海外での削減ポテンシャルが極めて大きいことが示されており、引き続き「エコソリューション」に取り組んでいく。

参考: 低炭素実行計画フェーズ II におけるエコソリューション効果(2030)は8000万t-CO<sub>2</sub>



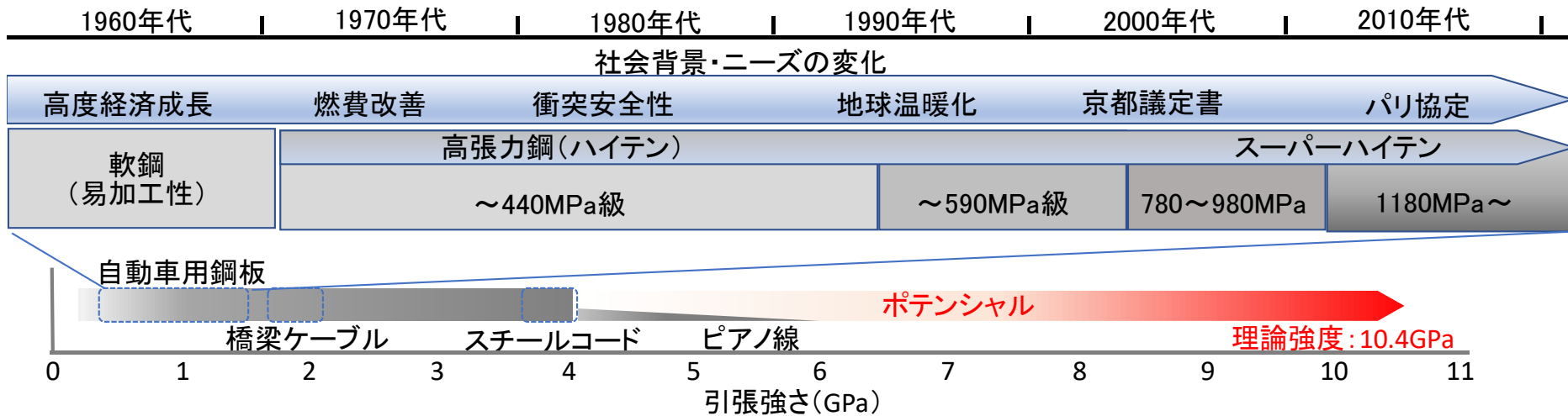
出典: IEA「Energy Technology Perspective 2014」

# エコプロダクト

鉄鋼材料はその機械的特性や電磁的特性を大きく向上させてきた。例えば自動車用鋼板の場合、1970年代から現在に至るまで、様々な社会背景やニーズに応じて高強度化が進められ、自動車軽量化による燃費の改善などによって、CO<sub>2</sub>削減に大きく貢献してきた。

しかし我々が実用化した特性レベルは理論限界値に対して、1/10～1/3(強度の場合)に過ぎない。日本鉄鋼業は、鉄鋼製品のさらなる高強度化のみならず、将来の水素インフラのための次世代鉄鋼製品の開発などを通して、未来社会の基盤を支えるとともに、ライフサイクル全体を通じたCO<sub>2</sub>削減に貢献していく。

参考: 低炭素実行計画フェーズIIIにおけるエコプロダクト効果(2030)は4200万t-CO<sub>2</sub>





# 日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策：超革新技術開発

日本鉄鋼業は、2030年時点での実用化に向けて、COURSE50やフェロコークスなどの革新的製鉄技術の開発を鋭意続けている。これらの技術が実用化された場合、天然資源ルートでのCO<sub>2</sub>排出量の10%削減が期待される(CCS効果を除く)。当面は高炉法が、技術的にも経済的にも鉄鋼製造法の主流と考えられるため、高炉を前提とした低炭素化技術の確立を進める必要がある。

しかし、これらの取り組みだけではパリ協定が目指す長期目標レベルに到達することはできず、それらを超えた「超革新技術」が必要となる。日本鉄鋼業は、COURSE50・フェロコークスの開発によって得られる知見を足掛かりとして、最終的には製鉄プロセスからのゼロエミッションを可能とする水素還元製鉄技術、CCS、CCUの開発に挑戦する。

水素還元製鉄に利用される水素は、製鉄のみならず自動車や民生など様々なセクターで広く利用されることから、社会共通基盤のエネルギーキャリアとして開発、整備されていることが前提となる。特に基礎素材である鉄鋼の製造に利用される水素は、カーボンフリーであることはもとより、安価安定供給も重要な要件となる。また、CCS実施に当たっては、大量のCO<sub>2</sub>の安価輸送・貯留技術の開発に加え、CO<sub>2</sub>貯留場所の確保や社会受容性、実施主体や経済的負担の在り方など、技術面を超えた課題の解決に当たる必要がある。

## 鉄鋼分野における技術開発

		2020	2030	2040	2050	2100
COURSE50	所内水素(COG)利用による高炉内の水素還元比率アップ 高炉ガスからのCO <sub>2</sub> 分離	R&D		導入		
Super COURSE50	外部水素利用による高炉によるさらなる水素還元比率アップ (大量の水素供給が可能となる前提)		R&D		導入	
水素還元製鉄	石炭を利用しない水素還元製鉄		R&D		導入	
CCU	副生ガスからのカーボンリサイクル		R&D		導入	
CCS	副生ガスからのCO <sub>2</sub> 回収	R&D		導入		

## 社会共通基盤としての技術開発

		2020	2030	2040	2050	2100
カーボンフリー電力	脱炭素電源(原子力、再生可能、化石+CCS) 次世代電力系統、電力貯蔵等	R&D		導入		
カーボンフリー水素	低コスト・大量水素の製造・輸送・貯蔵技術開発	R&D		導入		
CCS/CCU	CO <sub>2</sub> 分離貯留・利用技術開発 社会的課題の解決(貯留場所、パブリックアクセプタンス等)	R&D		導入		



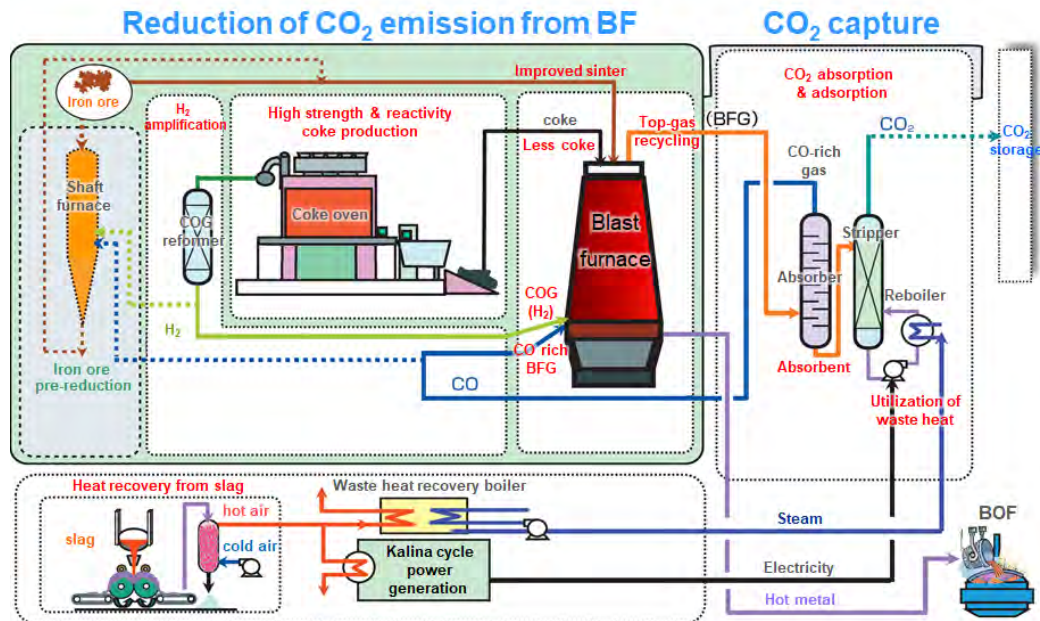
# COURSE50: 水素還元製鉄に向けた技術開発

日本鉄鋼連盟では、COURSE50プロジェクトと温暖化対策長期ビジョンにおいて、水素利用を含む製鉄技術開発を行い、鉄鋼業におけるCO<sub>2</sub>削減を進めます。

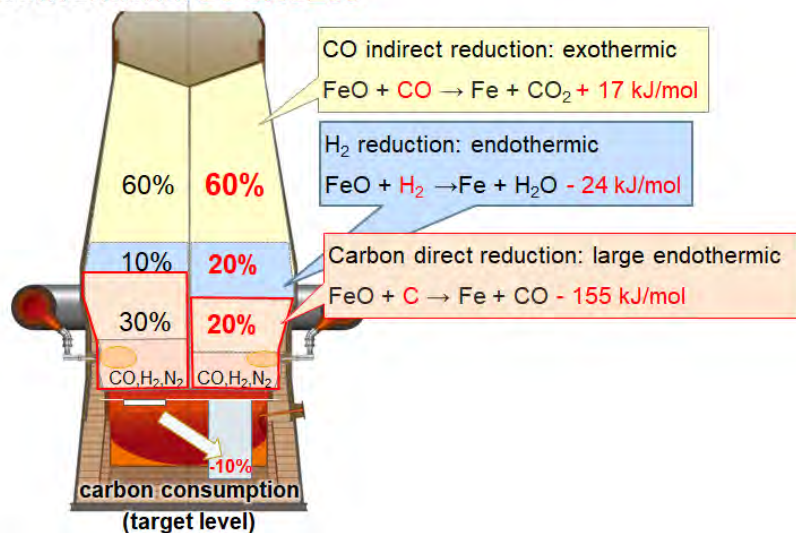
COURSE50プロジェクト  
製鉄所内の水素を利用、増幅して水素による鉄鉱石還元の割合を増すとともに、発生CO<sub>2</sub>を分離回収することにより、高炉から発生するCO<sub>2</sub>の削減を目指します。



## COURSE50試験高炉



## Conventional COURSE50



# おわりに

2030年以降の超長期に関しては、社会の状況や技術の動向など、現時点では想定しえない不確実性を含んでいる。そのような不確実な状況の中での「長期温暖化対策ビジョン」は、パリ協定長期目標を目指すための方向性を示すものであり、『ゼロカーボンスチール』に向けた挑戦を意味するものである。

日本鉄鋼連盟加盟各社は、我が国のパリ協定中期目標(2030)達成に向けて、低炭素社会実行計画を着実に進めていくとともに、2030年以降の長期目標についても、3つのエコと革新技術の開発を基本とした温暖化対策に取り組んでいく。

6/25、ArcelorMittal Europeは、2030年までに直接排出を30%削減、  
2050年までにカーボンニュートラルとするClimate Actionを公表

9/30、Arcelor Mittal Group全体の目標とすることを公表

2030年目標：「直接排出の30%削減」としており、スクラップ利用拡大による達成  
が可能

2050年目標：革新技術の開発導入に加え、クリーンエネルギーの供給、サステナブル  
ファイナンスへのアクセス、カーボンリーケージ防止策(CBA) が必要  
としている  
さらに、コスト上昇の受容、莫大な投資が必要としている

## What will our roadmap to 2050 cost?

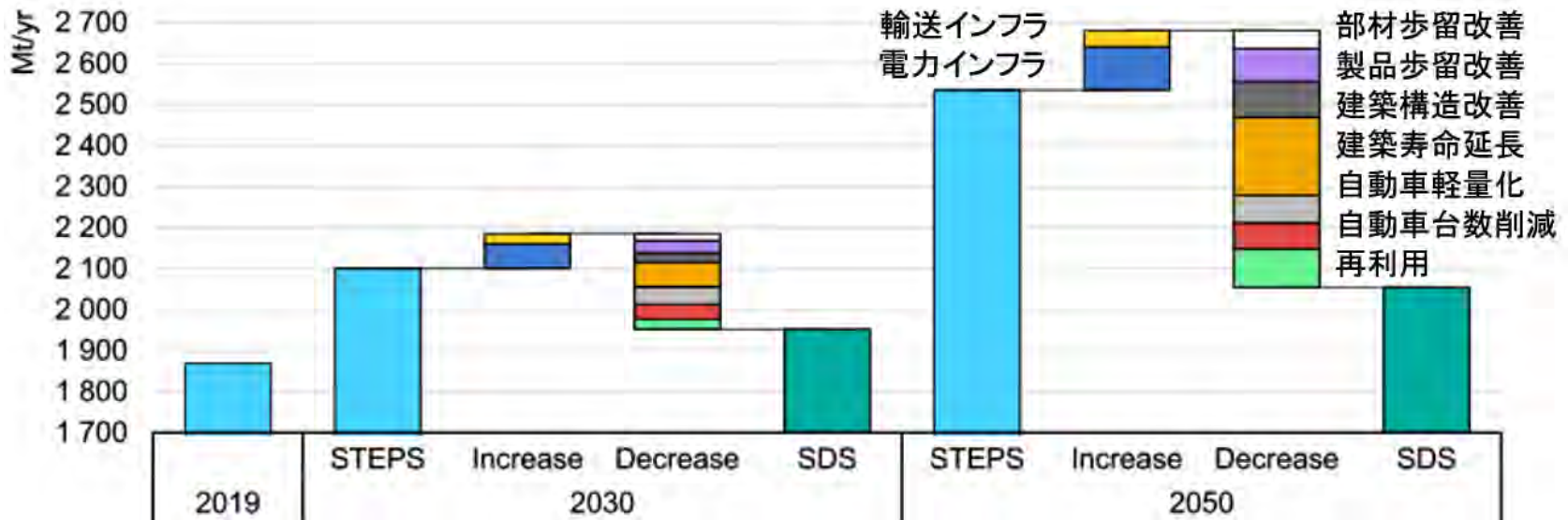
	Investment needed	Production cost increase
	ArcelorMittal Europe steel footprint	Clean energy infrastructure
Smart Carbon	€15-25 billion	€15-165 billion <sup>1</sup> +30-60% <sup>1</sup>
DRI route	€30-40 billion	€40-200 billion <sup>2</sup> +50-80% <sup>2</sup>

- 2070年までにエネルギーセクター(鉄鋼含む)のネットゼロを目指すIEA Sustainable Development Scenario (SDS)に整合する鉄鋼セクターの技術シナリオと政策戦略を示す
- 経済発展によって鉄鋼需要が拡大する中で、材料効率改善による鉄鋼需要の抑制、削減技術の導入、エネルギー転換(水素、スクラップ比率拡大による電化)により目標を達成するシナリオ

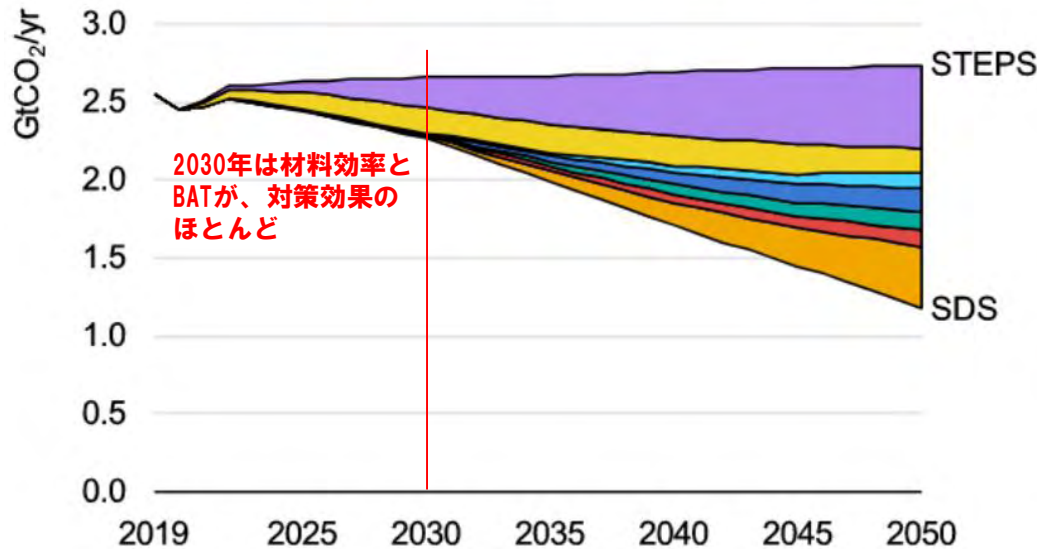
	2019	2050 STEPS	2050 SDS	参考 JISFビジョン	備考
鉄鋼蓄積 (t/人)	4.2	6.4	6.2	7	IEAは「in-use」蓄積 JISFは総蓄積
粗鋼生産量 (億t)	18.9	25	20.5	26.8	IEAはSTEPS⇒SDSに、「材料効率改善」織込み
エネルギー原単位 (GJ/t)	18.9	14.8	12	-	IEAは最終エネルギー消費原単位 (3.6MJ/kWh)
CO2直接排出原単位 (t-CO2/t-steel)	1.4	1.1	0.6	低位: 0.98 高位: 0.25	IEAは直接排出 (Scope 1) JISFは間接排出含む (Scope 1, 2)
CO2直接排出総量 (億t)	26	27	12	低位: 26.3 高位: 6.6	

- 鉄鋼生産者、政府、金融、研究コミュニティなどの主要な利害関係者が鉄鋼セクターからのゼロエミッションに向けた進展を加速するための優先行動、方針、マイルストーンの概要を提案
- 構成 Chapter 1. Steelmaking today  
Chapter 2. The future of steelmaking (鉄鋼需給・技術シナリオ)  
Chapter 3. India in the spotlight  
Chapter 4. Enabling more sustainable steelmaking (鉄鋼ゼロエミ加速に向けた提言)

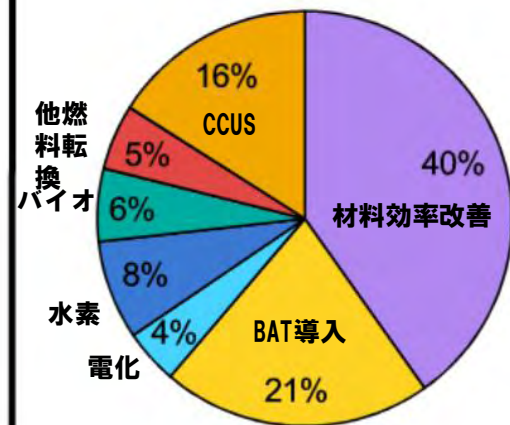




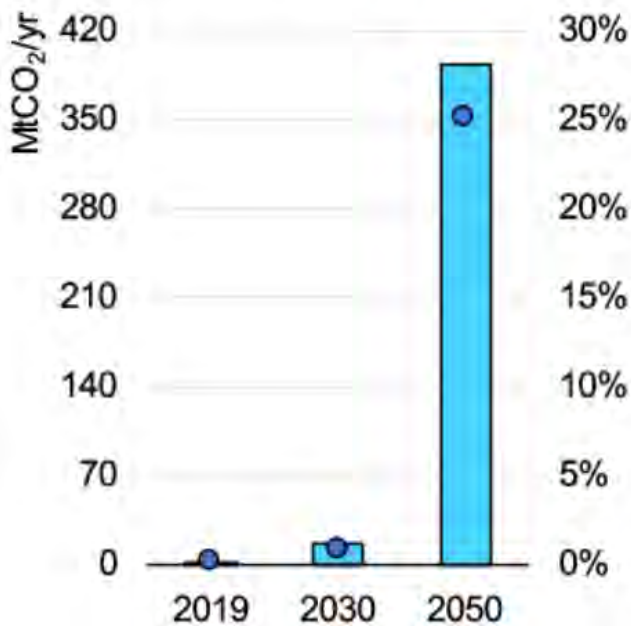
Iron and steel sector direct emission reductions



Cumulative direct emission reductions between 2020 and 2050

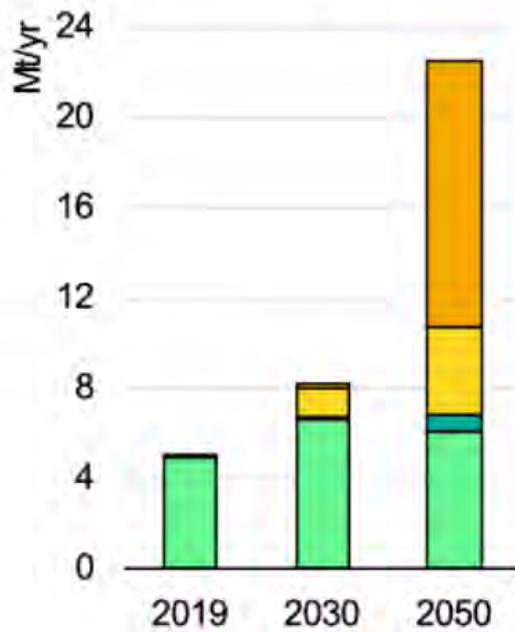


### CO<sub>2</sub> captured



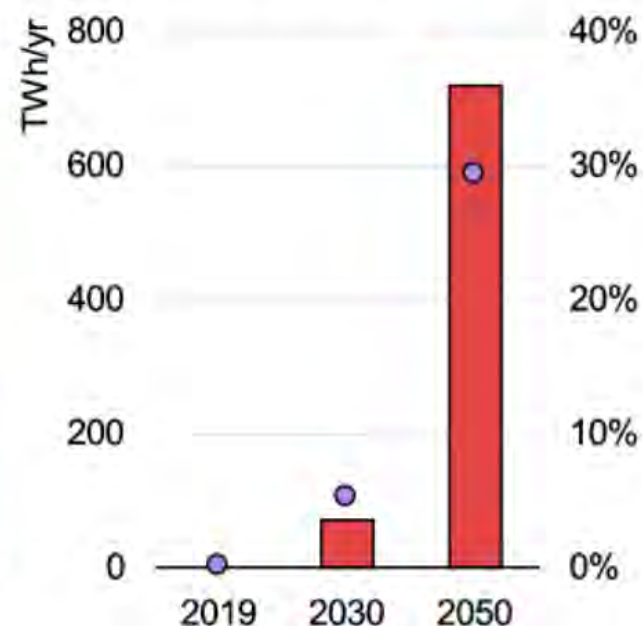
- Captured CO<sub>2</sub>
- Share captured CO<sub>2</sub>

### Hydrogen use



- Electrolytic H<sub>2</sub> primary reducing agent
- Electrolytic H<sub>2</sub> injected
- Fossil DRI H<sub>2</sub> with CCUS
- Fossil DRI H<sub>2</sub> without CCUS

### Electricity for H<sub>2</sub> production



- Electricity for electrolytic H<sub>2</sub>
- Share of steel sector electricity used for electrolytic H<sub>2</sub>



# カーボンニュートラル実現に向けた課題

## 1. 革新技術開発

- ✓ 水素還元技術（吸熱反応）の商業規模での実現

\* 電力は技術の選択であるのに対して製鉄は未踏の超革新技術開発が必要

## 2. 社会インフラ整備

- ✓ 莫大な規模のクリーン水素/アンモニア資源開発・サプライチェーン構築
- ✓ 商業規模CCS実現のための技術的・社会科学的課題解決、法整備
- ✓ 大量のカーボンフリー電力の安価安定供給

## 3. 設備転換

- ✓ 製鉄・製鋼工程の革新プロセスへの転換、資金確保（数千億～兆円レベル）
- ✓ 既存製鉄・製鋼プロセス等の座礁資産化（数千億～兆円レベルの特別損失）

## 4. コスト負担

- ✓ 製品性能向上にも生産効率向上にも寄与しない設備投資（CAPEX）
- ✓ 高コスト用役・原料利用に伴う生産コスト（OPEX）

## 5. 事業環境

- ✓ 技術開発、国内での生産活動、設備投資が継続できる事業環境
- \* 足元の電力コスト、長期的な安定供給の予見性