

—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』

はじめに

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。同計画は、パリ協定に基づく我が国の NDC（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、長期目標を達成するための「長期的な温室効果ガスの低排出型の発展のための戦略（長期低排出発展戦略）」の策定と 2020 年までの提出を求めている。このため政府は、我が国の「長期低排出発展戦略」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」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。

1. 将来の鉄鋼需給想定

鉄鋼材料は、資源賦存性、製造コスト、機能の多様性、製造時環境負荷、リサイクル性など、基礎素材として求められる多くの側面において優れており、このため、道路、鉄道、ビル、自動車、家電など、社会インフラや耐久消費財などを構成する主要素材として、我々の生活を支えている。

もともと鉄鋼材料は天然資源である鉄鉱石を還元して作られるが、いったん還元された鉄鋼材料は、自動車などの最終製品の寿命が終わったあとも、そのほとんどがスクラップとして回収され再び新たな鉄鋼製品に生まれ変わるとい、他素材にはない優れたリサイクル特性（closed-loop recycling）を有している。このため、一度天然資源から生み出された鉄鋼材料は様々な製品に形を変えながら社会に蓄積されていく（図 1）。

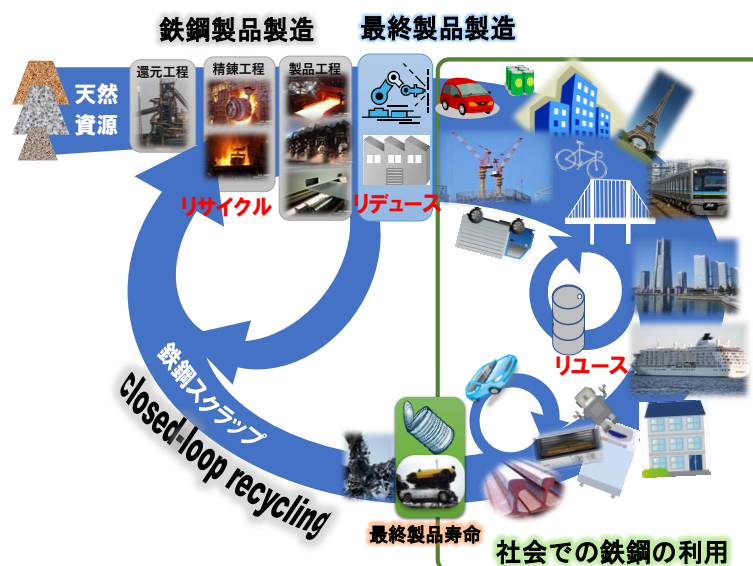


図 1. 鉄鋼のライフサイクルとリサイクル（closed-loop recycling）

図 2 に我が国の鉄鋼蓄積並びに名目 GDP の推移を示す。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。

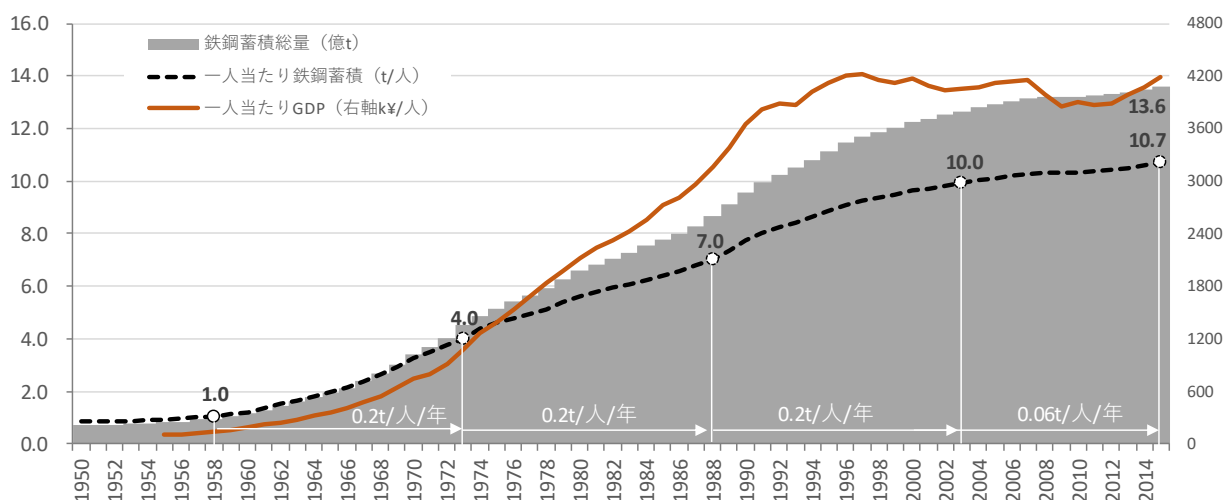


図 2. 日本の鉄鋼蓄積の実績推移

出典：鉄鋼蓄積は鉄源協会、名目 GDP は内閣府平成 29 年度年次経済財政報告による

日本のみならず、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（図 3）、また人口が増えれば蓄積総量は拡大する。OECD 諸国における鉄鋼蓄積量は 10t/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（図 4）。

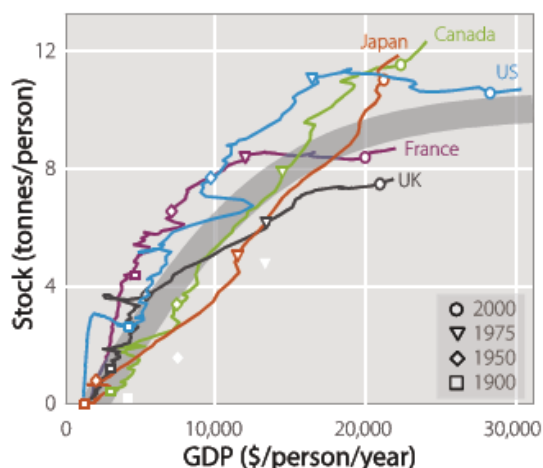


図 3. 一人当たり GDP と鉄鋼蓄積との関係

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

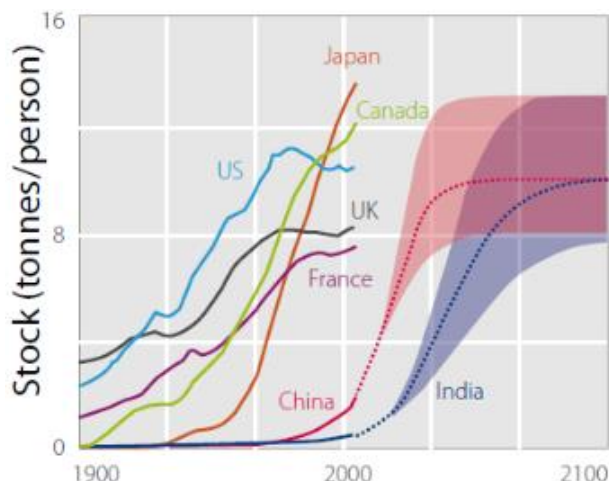


図 4. 一人当たり鉄鋼蓄積の推移

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

表 1 に 2015 年の世界の鉄鋼蓄積推計値と 2050 年、2100 年の想定値を示す。2015 年の世界の鉄鋼蓄積総量は 294 億 t と推計されており、一人当たり蓄積量は 4.0t/人となる。これは 1973 年の日本の実績に相当する。世界人口は将来も増加が予想されており、また世界経

済が成長していく中で、2050年断面では7.0t/人、蓄積総量は682億tに上ると想定した。日本では1973年から1988年の15年を要した4→7t/人への鉄鋼蓄積拡大を、世界では35年を要し、日本より62年遅れで7t/人に到達するとのマクロ想定である。2100年に向けてはさらに不確実性が増すが、SDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) が達成され、経済成長とともに貧困や格差が解消して、世界全体が現在の先進国並みの豊かさを実現しているものとして10t/人と置いた。

表1. 世界人口推移予測と鉄鋼蓄積予測

		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

*UN, World Population Prospects 2017による

この鉄鋼蓄積を満足させるための鉄鋼生産予測を表2に示す。2015年の世界の鉄鋼生産実績は、最終製品中鋼材実使用量12.9億t、粗鋼生産量16.2億tで、鉄源は天然資源ルートである銑鉄 (DRI 含む) が12.2億t、リサイクルルートであるスクラップが5.6億tであった。将来に向けては鋼材需要拡大 (2015年12.9億t→2050年21.3億t→2100年30.1億t) に伴い粗鋼生産も増大 (2015年16.2億t→2050年26.8億t→2100年37.9億t) する。鉄源については、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スクラップ利用量が増大 (2015年5.6億t→2050年15.5億t→2100年29.7億t) していく。しかし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の生産は必須であることから、2100年においても、ほぼ現在並みの銑鉄生産 (12.0億t) が必要となる。図5に2100年までの鉄鋼蓄積・需給想定を示す (計算の前提条件はAppendix I)。

表2. 鉄鋼生産予測 (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

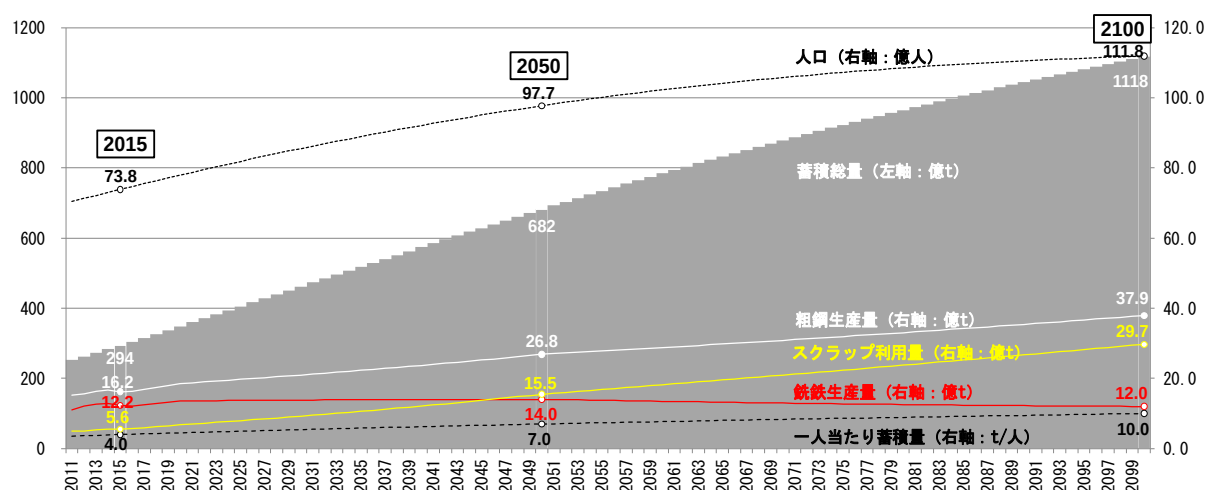


図5. 鉄鋼蓄積並びに鉄鋼生産等推移想定

2. 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増加。鉄鋼蓄積拡大等に伴いスクラップ回収量（＝利用量）が増加し、鉄源に占めるスクラップ比率が上昇。スクラップは天然資源に必要な還元工程が不要であるため、粗鋼あたりのCO₂排出原単位は低減するが、粗鋼生産量の増加影響により、CO₂排出総量は増加。

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

既存の先端省エネルギー技術を世界に最大限展開。IEA ETP2014 では、BAT 国際展開による削減ポテンシャルを 21%としており、2050 年までに達成されるものと想定。BAU シナリオに比べて原単位は改善されるが、粗鋼生産の増加により CO₂ 排出総量は増加。

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、フェロコックス等）が、2030 年以降 2050 年までに最大導入され、天然資源ルートにおける原単位が 10%改善されるものと想定。

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、CCS・CCU 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 年に『ゼロカーボン・スチール』の実現を想定。2050 年の到達レベルにより低位ケース（革新技術最大導入シナリオから原単位 20%削減）、中位ケース（同 50%削減）、高位ケース（同 80%削減）とした場合のシナリオを試算。

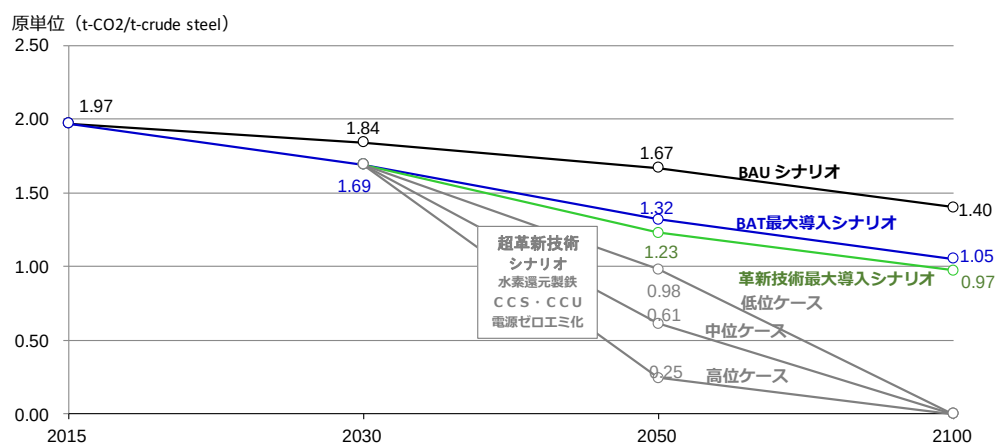


図 6. 長期温暖化対策シナリオにおける CO₂ 原単位の推移

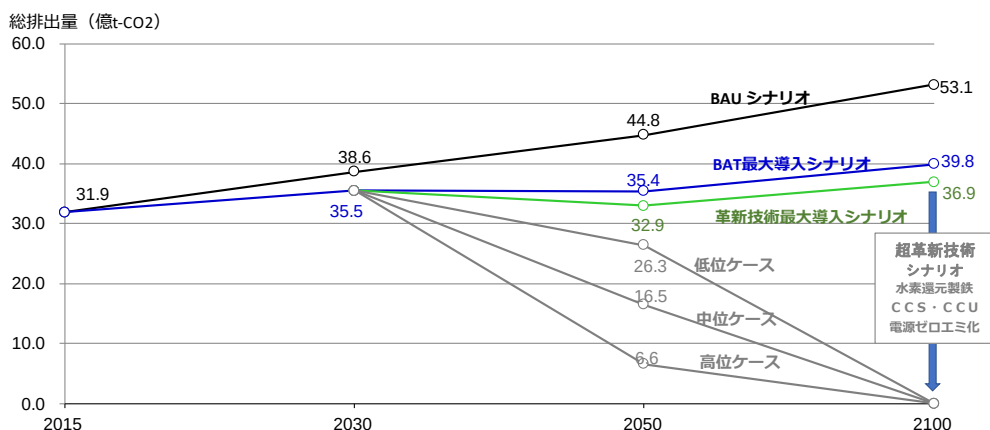


図 7. 長期温暖化対策シナリオにおける CO₂ 排出量の推移

なお、超革新技术シナリオを CCS のみで実行した場合、2030～2100 年の総貯留量は、低位ケースで 911 億 t-CO₂、中位ケースで 1012 億 t-CO₂、高位ケースで 1112 億 t-CO₂と試算される。CO₂埋設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も必要となる。また、2100 年において銑鉄を水素還元で生産する場合に必要な水素量は 1 兆 2 千億 Nm³と試算され、大量のカーボンフリー水素の安価・安定供給が実用化に向けた要件となる。

3. 日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策

世界の鋼材の 40%は国境をまたいで取引されており、日本の場合、鋼材生産の 60%以上が直接、間接輸出され、世界の鉄鋼需要を満たしている。このように鉄鋼産業は、サプライチェーン、マーケットともにグローバル化しており、鉄鋼セクターの実効的な温暖化対策にはグローバルな視点が必須である。

日本の鉄鋼業はこれまで優れた省エネルギー・環境技術で世界の鉄鋼業界全体に大きく貢献してきた。また、製品機能においても世界をリードし、自動車の軽量化や電動化を始め、製品の高機能化、効率化に資する鋼材の開発を通じて、我が国の国際競争力強化、人類の豊かさと地球環境の両立に貢献してきた。このことは現在の「低炭素社会実行計画」の基本であり、2030 年以降の長期温暖化対策においても基本となる考え方である。

加えて、パリ協定に基づく長期目標（2℃目標）を念頭に置くならば、現在の製鉄技術はもとより、現在開発中の革新技术をも超える超革新技术開発が必要となる。図 8 に日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策の基本的考え方を示す。



図 8. 日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策の基本的考え方（3つのエコ+革新技术開発）

1) 3つのエコによる取組

【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製銑・製鋼工程で発生する副生ガスの効率的利用、③廃エネルギーの回収・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（図 9）。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（図 10）。日本鉄鋼業は、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-CO₂

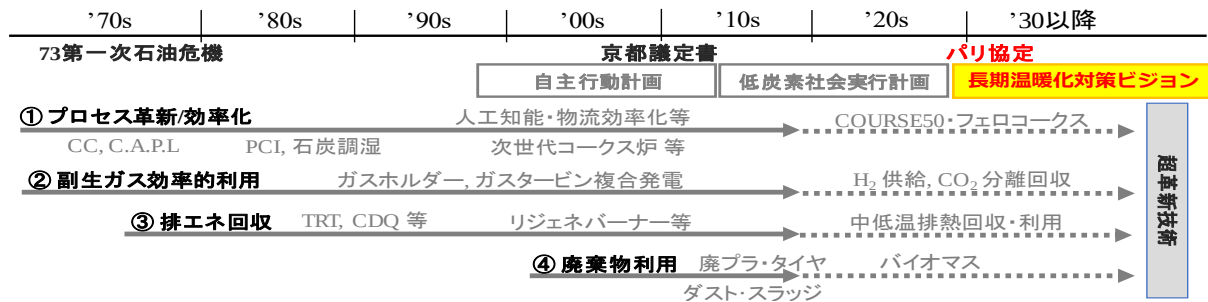


図 9. 日本鉄鋼業のエコプロセスの取り組み

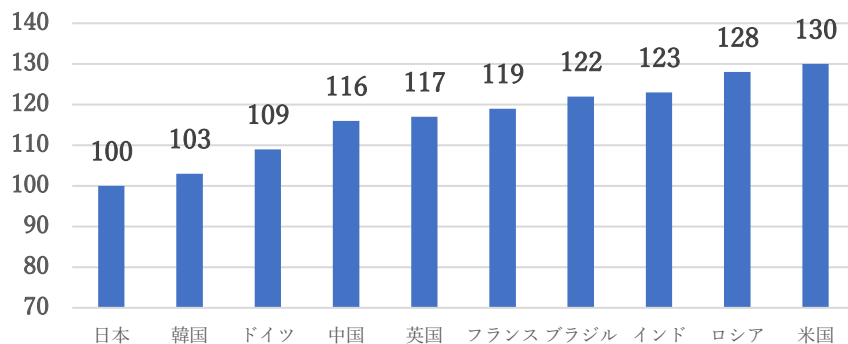


図 10. 鉄鋼業のエネルギー原単位国際比較 (日本を 100 とした指数)

出典：RITE「2015 年時点のエネルギー原単位の推計」(指数化は日本鉄鋼連盟)

[エコソリューション]

日本鉄鋼業では、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 CO₂ 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 (図 11)、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-CO₂

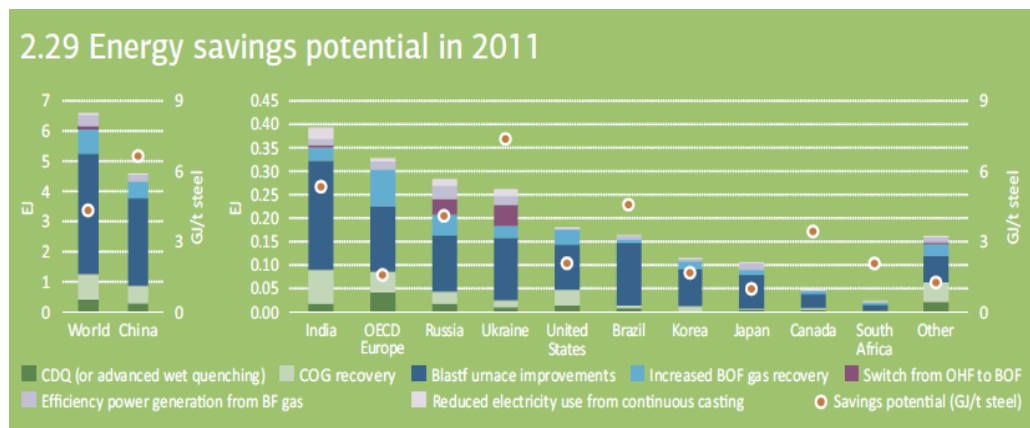


図 11. 鉄鋼業の省エネポテンシャル国際比較 (2011 年時点)

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、CO₂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（図 12）。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 CO₂ 削減に貢献していく。

参考：低炭素実行計画フェーズ II におけるエコプロダクト効果(2030)は 4200 万 t-CO₂

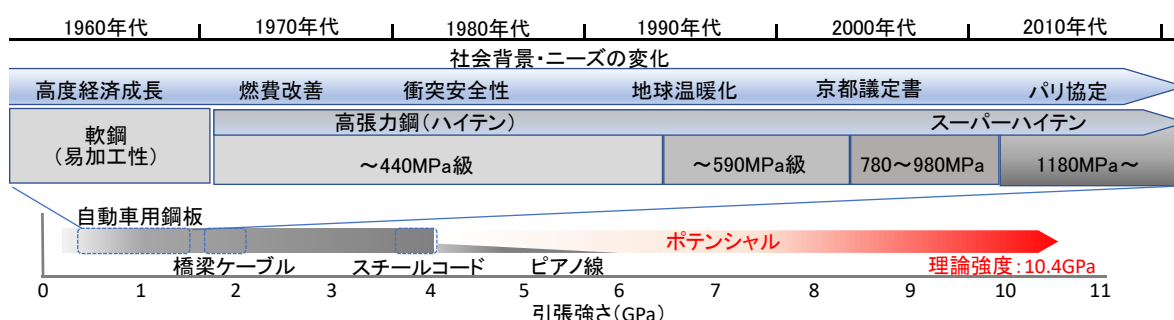


図 12. ハイテン化の歴史と将来のポテンシャル

2) 超革新技術開発への取り組み

日本鉄鋼業は、2030年時点での実用化に向けて、COURSE50やフェロコッ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、天然資源ルートのCO₂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（図 7における革新技術最大導入シナリオ）、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・フェロコッ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、製鉄プロセスで発生するCO₂を分離回収し貯留するCCS（Carbon Capture and Sequestration）、あるいはCO₂を原料とし有価物を生成するCCU（Carbon Capture and Utilization）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CO₂の安価輸送・貯留技術の開発に加え、CO₂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。

図 13 に超革新技術開発に向けたロードマップを示す。

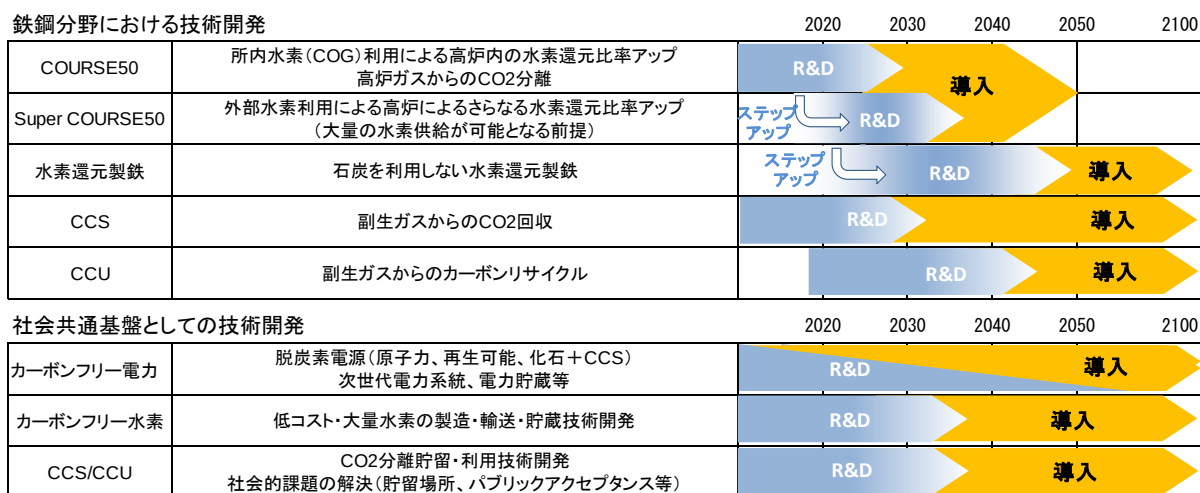


図 13. 超革新技術開発に向けたロードマップ

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、この「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。

Appendix I : 将来の鉄鋼需給の計算前提

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

		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

b) 人口

国連「World Population Prospects2017」を使用

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。

表 A-I 将来の鉄鋼需給計算結果（抜粋）

	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	1.3	2.2	12.5	9.3	0.8	294	4	0.1	73.8
2020	18.5	13.5	6.8	2.3	1.5	3	12.5	9.3	0.9	348	4.5	0.1	78
2030	21	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	15.5	3.4	2.2	9.9	12.5	9.3	1.5	682	7	0.1	97.7
2100	37.9	12	29.7	4.7	3.1	21.9	12.5	9.3	2	1118	10	0.1	111.8

Appendix II : IEA-ETP 2017 2DS との関係

IEA-ETP 2017 2DS では、2060 年までに、電力セクターにおける実質排出ゼロ、産業セクターにおける現状からの 30%削減を想定している。

電力セクターが 2060 年までにゼロエミッション化を達成した場合、製鉄プロセスで消費する電力のうち系統由来の部分がゼロエミッションとなる。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。

- 計算前提： 1) 系統電力の排出係数：IGES GRID EF v10.2 の Combined Average を使用
 2) 高炉ルートの系統電力原単位：140kWh/t-s（日本の 2016 年度実績平均）
 3) 電炉ルートの系統電力原単位：872kWh/t-s（日本の 2016 年度実績平均）
 4) 高炉ルートの CO₂ 排出係数：2.4t-CO₂/t-s
 5) 電炉ルートの CO₂ 排出係数：1.0t-CO₂/t-s
 6) 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）

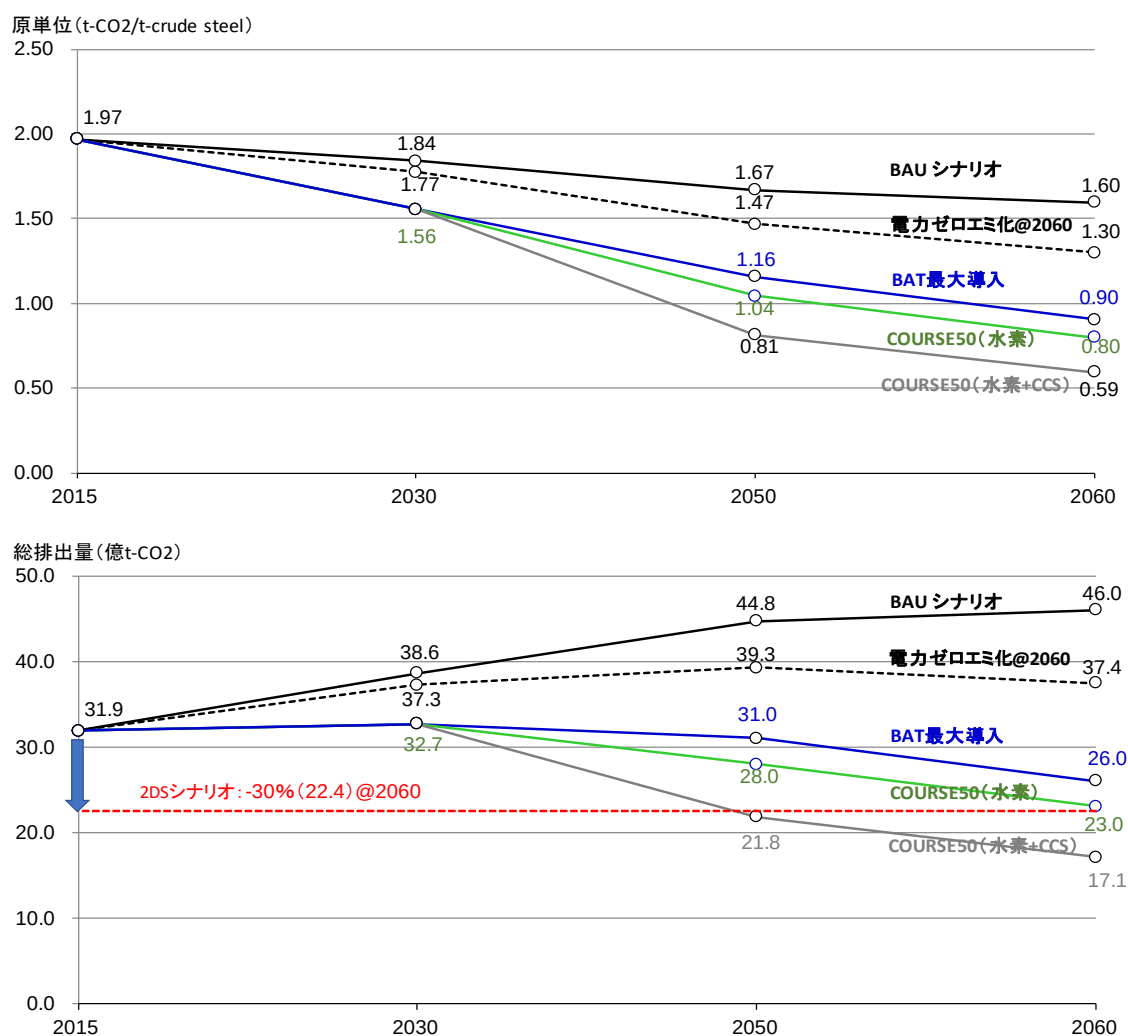


図 A-II IEA-ETP 2017 2DS と長期温暖化対策シナリオとの関係

Appendix III : 水素還元製鉄試算

水素還元製鉄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。現行の石炭還元と比較して量やコストの課題を以下のように試算した。

- 水素還元による銑鉄製造（化学式）



- 上式に基づく銑鉄 1t 製造に必要な水素量

還元:601Nm³ + 吸熱反応補完:67Nm³ + 1600℃までの溶銑昇熱:85Nm³ = 753Nm³/ton of (理論値) ⇒ 効率 75%とすると実質 1000Nm³/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 Nm³
- 水素製造電力原単位*を 4.5kWh/Nm³-H₂ とすると、5.4 兆 kWh の電力（日本の消費電力量は約 1 兆 kWh/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

原料炭価格を\$200/t、原料炭原単位 700kg/t-p とすると、原料炭コストは\$140/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 140×0.55=\$77/t-p

これと等価の水素価格は\$77/t-p÷1000Nm³-H₂/t-p=7.7 ¢ /Nm³-H₂

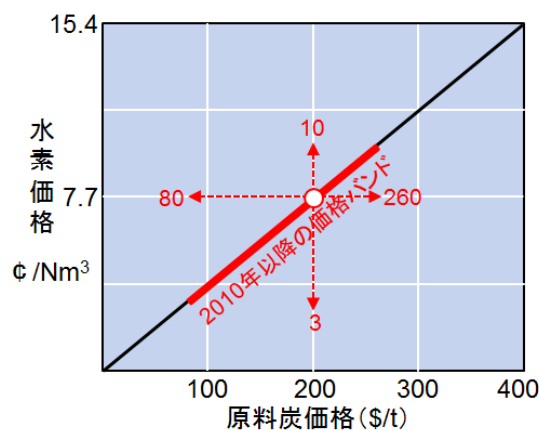


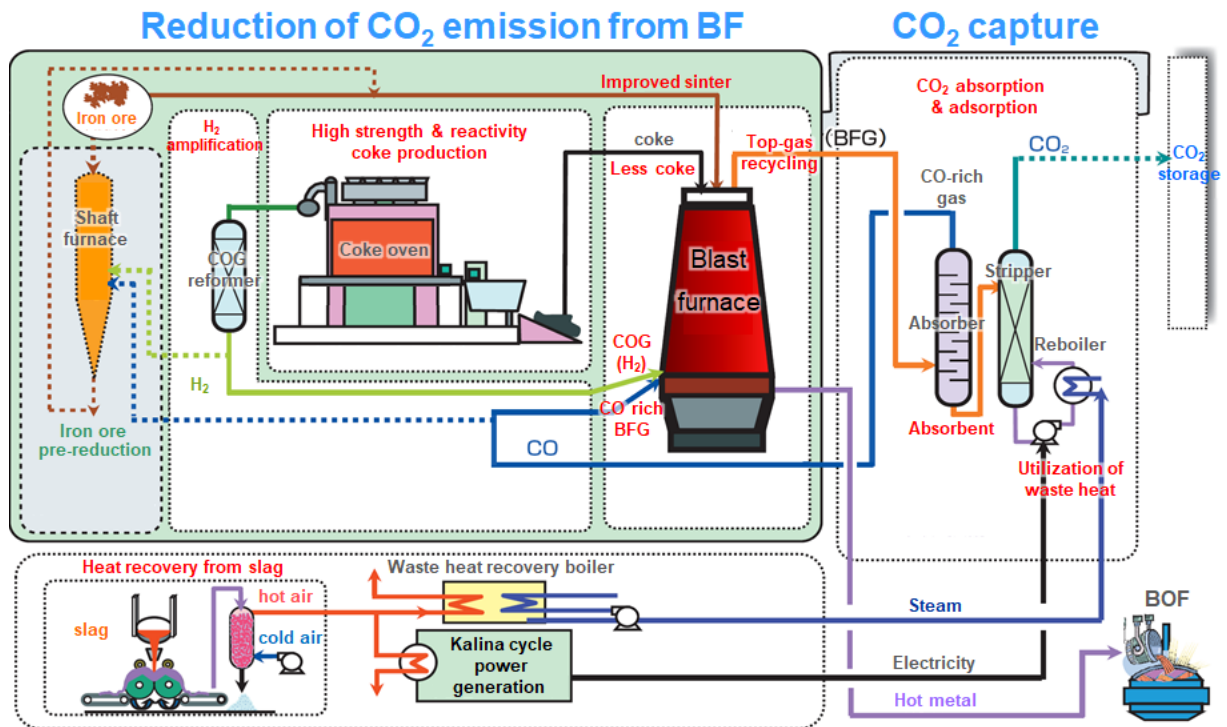
図 A-III 水素価格と原料炭価格

Appendix IV：水素還元製鉄に向けた技術開発（COURSE50）

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 CO₂ 削減を進める。

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 CO₂ を分離回収することにより、高炉から発生する CO₂ の削減を目指す。



試験高炉外観

高炉内還元比率



Conventional COURSE50

