



鋼材のリサイクル性を考慮したLCA

一般社団法人 日本鉄鋼連盟

建設環境研究会



地球の質量の1／3が鉄
鉄鉱石は世界中に広く
存在する豊富な資源



鉄鉱石のストックヤード

45億年前 原始地球の誕生

鉄の大部分は地球の中心に沈んだが、地殻にも5%程度含まれる

40億年前 海の誕生(塩酸)

鉄が海水に溶け込む

25億年前 シアノバクテリアの大繁殖

酸素の大量放出

鉄イオンの酸化

水酸化鉄として沈殿

酸化鉄となり石英粒子と交互に堆積

縞状鉄鉱層の生成

- 世界中の古い地層に広く分布
- 推定埋蔵量は**100兆トン**以上

鉄の優れた構造特性が社会の安全を支える

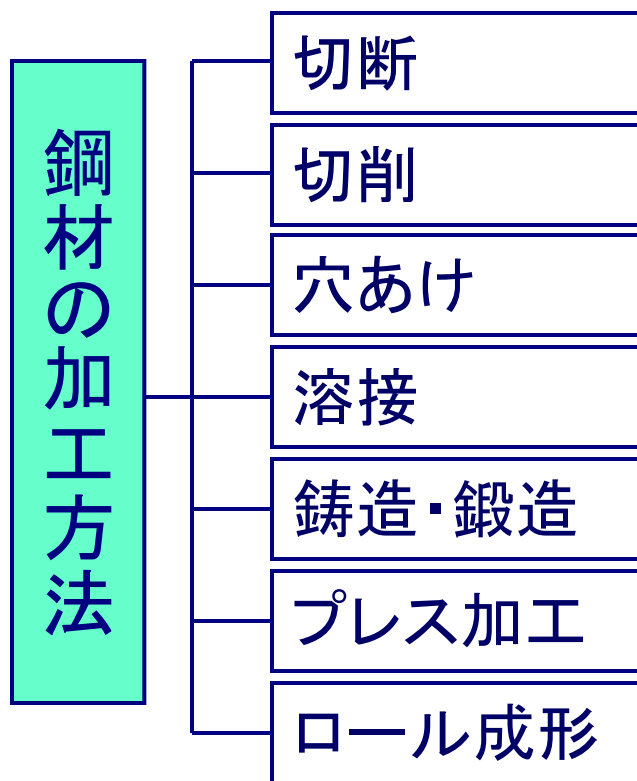


鋼の特長（炭素の割合を約2%以下に調整した鉄）

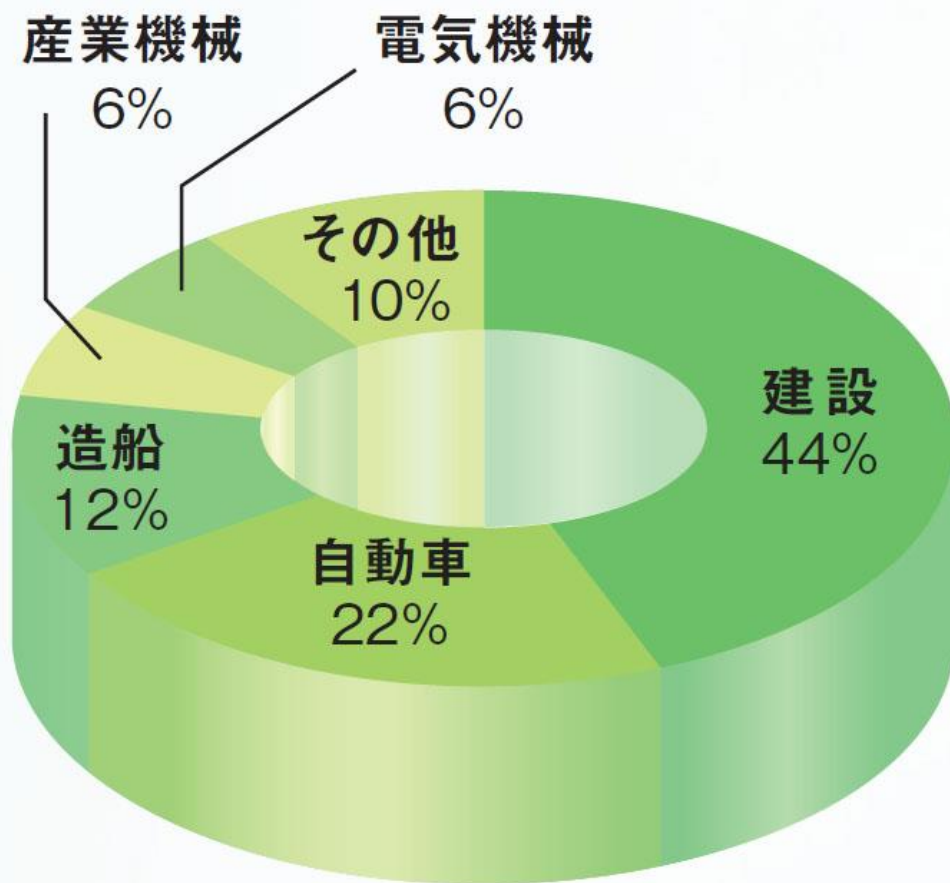
- 他の材料より剛性と強度が高い → 長大構造物に最適
- 塑性変形能力に富む → 抜群の耐震性能
- 熱処理等でさらに高強度化 → 様々な新工法の可能性



様々な形に加工できる鉄は、建設分野を始めあらゆる分野で活躍。



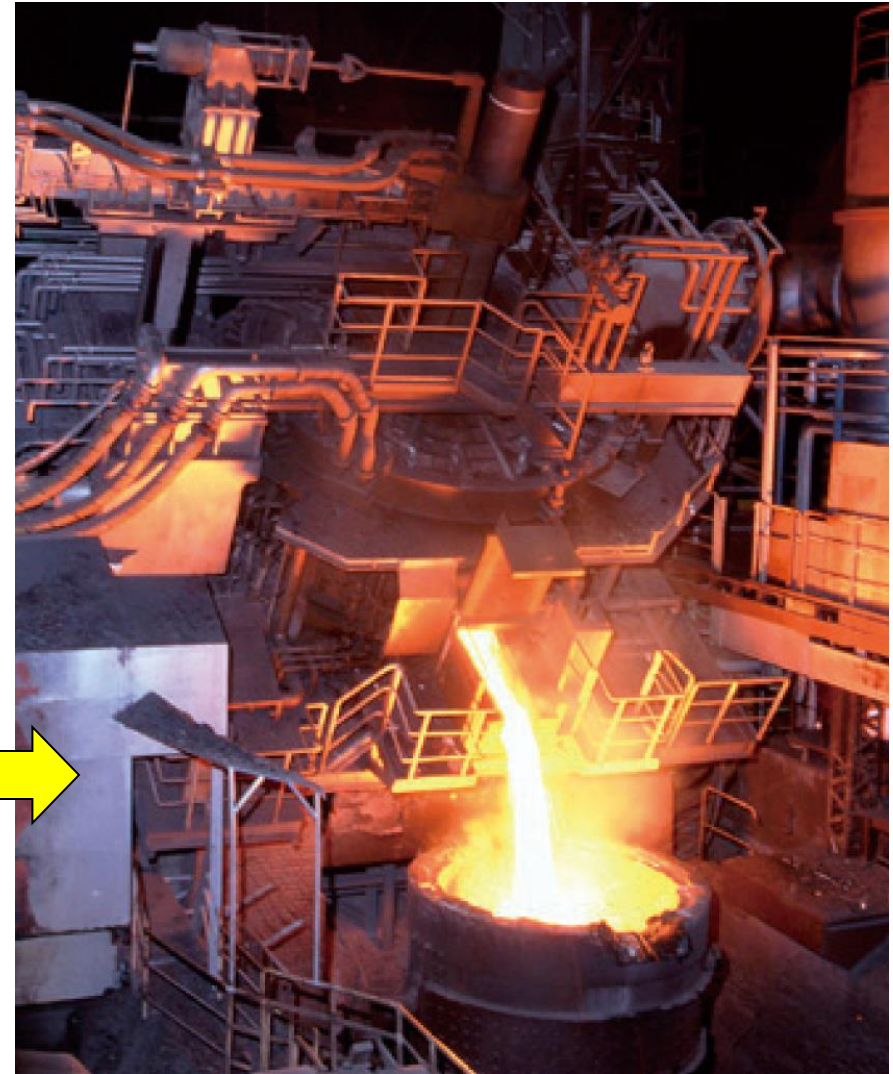
〔 2010年度国内向け普通鋼の用途別受注量 〕



完全にリサイクルすることのできる鉄は循環型社会の推進に大きく貢献。



スチール缶のスクラップ



電気炉で溶解されたスクラップ

鋼材の製造プロセス



リサイクルは高炉と電炉の連携プレー

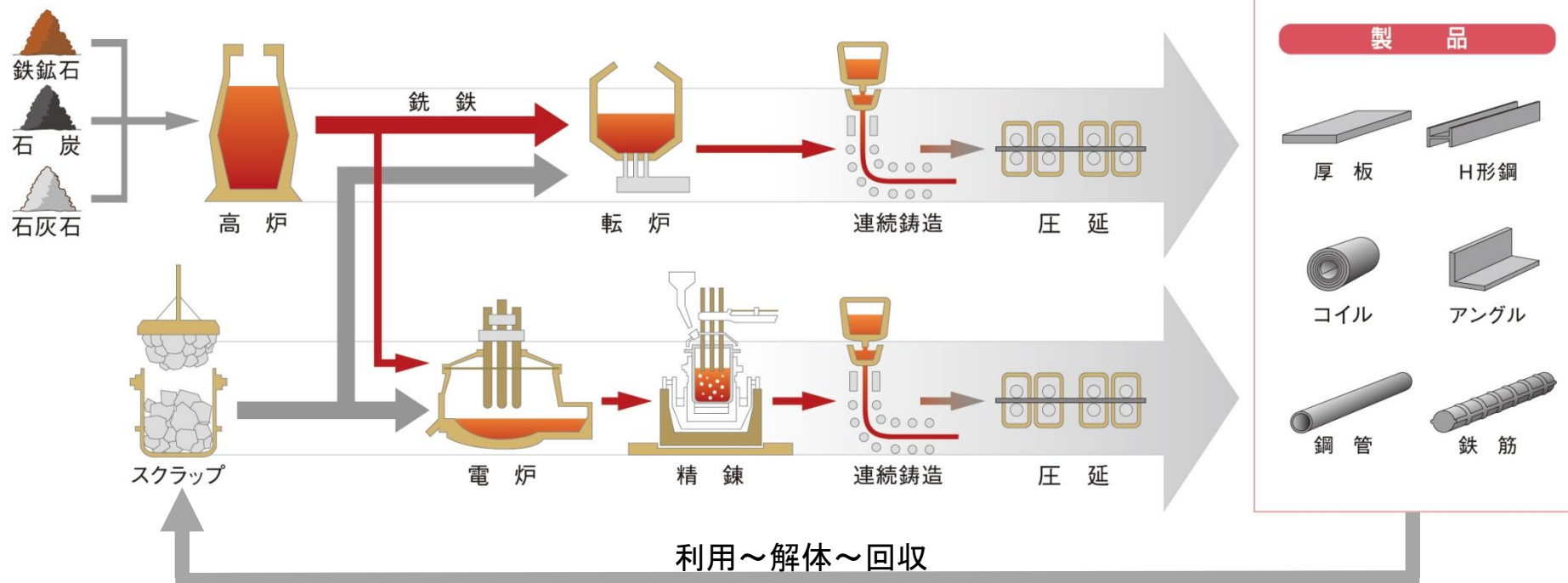
高炉法

高炉で鉄鉱石を石炭で還元して銑鉄を作り、転炉で炭素を除去して鋼にする。転炉ではスクラップも活用する。

電炉法

電炉でスクラップをアーク熱で融解し、成分を調整する。品質保持のために銑鉄も使用する場合がある。

鋼材の製造プロセス

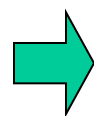


CuおよびSn値の許容限界



| 鋼材グレード | 許容限界 | | 実績 | | 製法 |
|------------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|-------------|
| | Cu (%) | Sn (%) | Cu (%) | Sn (%) | |
| 深絞用鋼板、薄板高級鋼 | ≤ 0.06 | ≤ 0.010 | 0.02 ~0.03 | 0.001 ~0.003 | 主として 高炉鋼 |
| 表面処理鋼板 | ≤ 0.06 | ≤ 0.020 | | | |
| 熱間圧延鋼板、厚板、鋼管 | ≤ 0.10 | ≤ 0.020 | | | |
| 冷間圧延薄鋼板、薄板一般 | ≤ 0.10 | ≤ 0.015 | | | |
| 形鋼、 機械構造用圧延鋼材 | ≤ 0.30 | ≤ 0.025 | 0.20 ~0.35 | 0.010 ~0.020 | 主として 電炉鋼 |
| 棒鋼、 一般構造用圧延鋼材 | ≤ 0.40 | ≤ 0.060 | 0.25 ~0.50 | 0.015 ~0.025 | |

リサイクルを繰り返すと
トランプエレメントが蓄積する



高炉のバージン材で
希釈する必要がある

高炉材と電炉材のバランス良い使用が重要

日本における鉄の循環

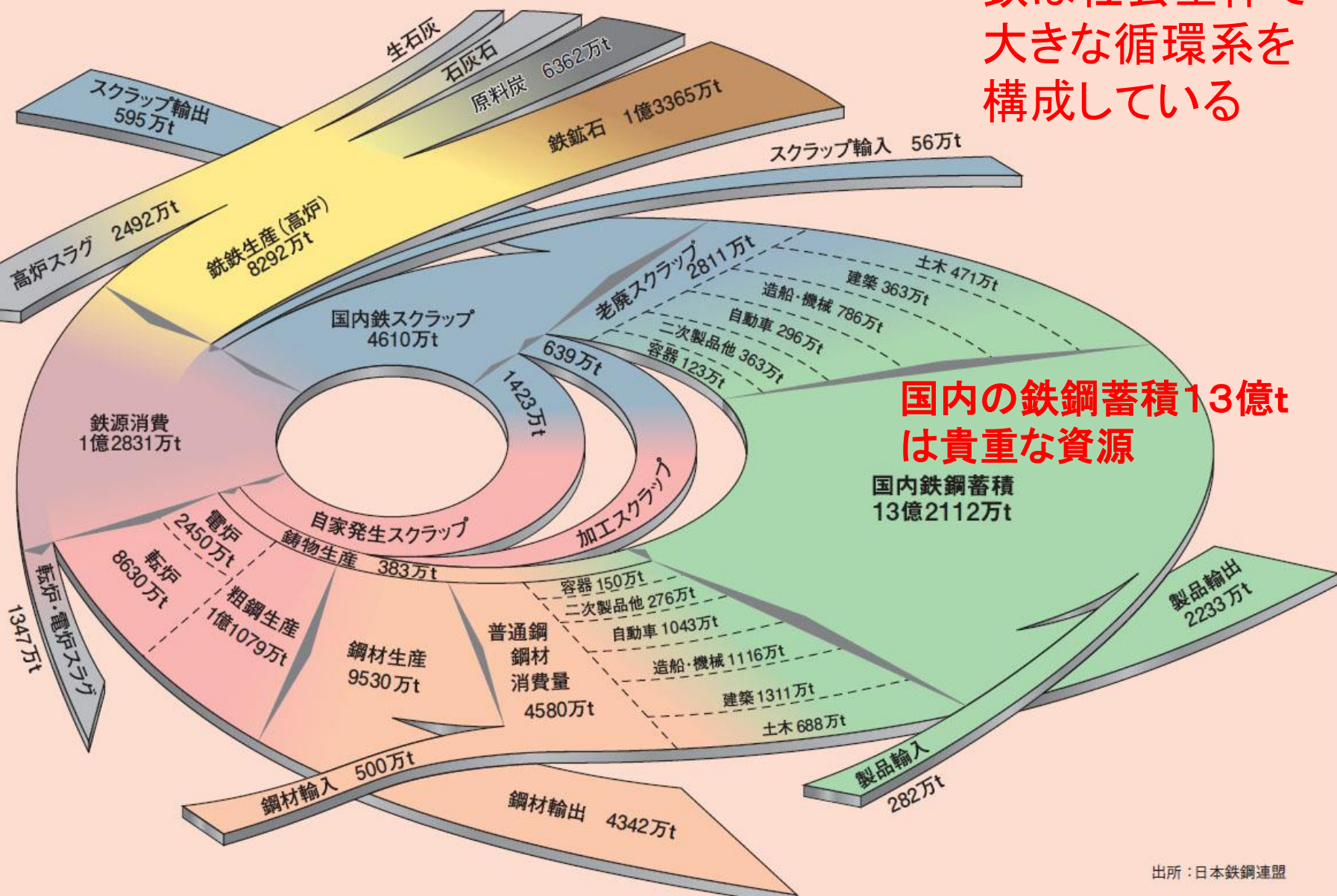


■ 日本の鉄鋼循環図 (2010年度)

鉄は社会全体で
大きな循環系を
構成している

国内の鉄鋼蓄積13億t
は貴重な資源

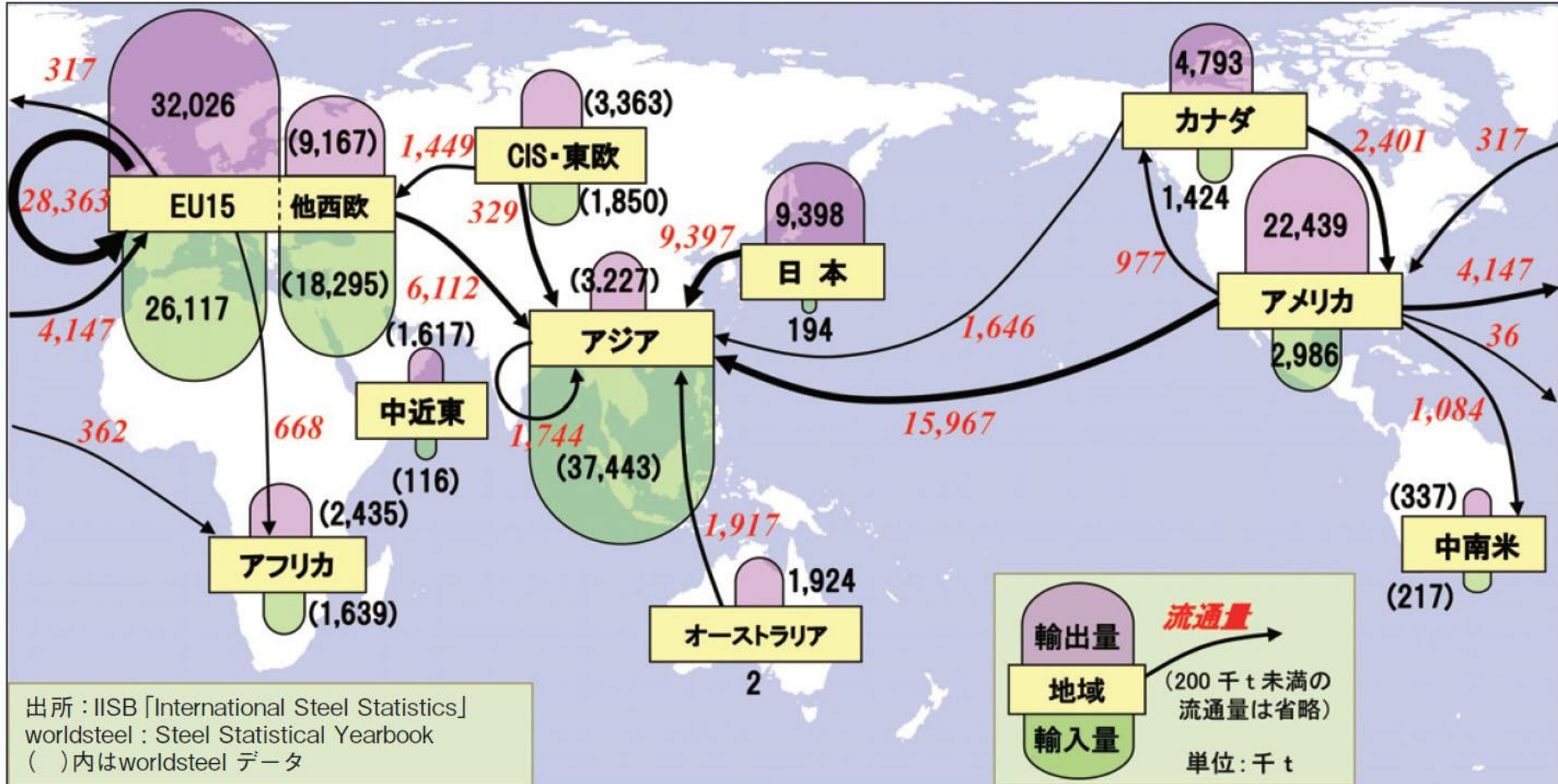
国内鉄鋼蓄積
13億2112万t



鉄スクラップは市場原理で世界を回る



[世界のスクラップ流通図 (2009年)]



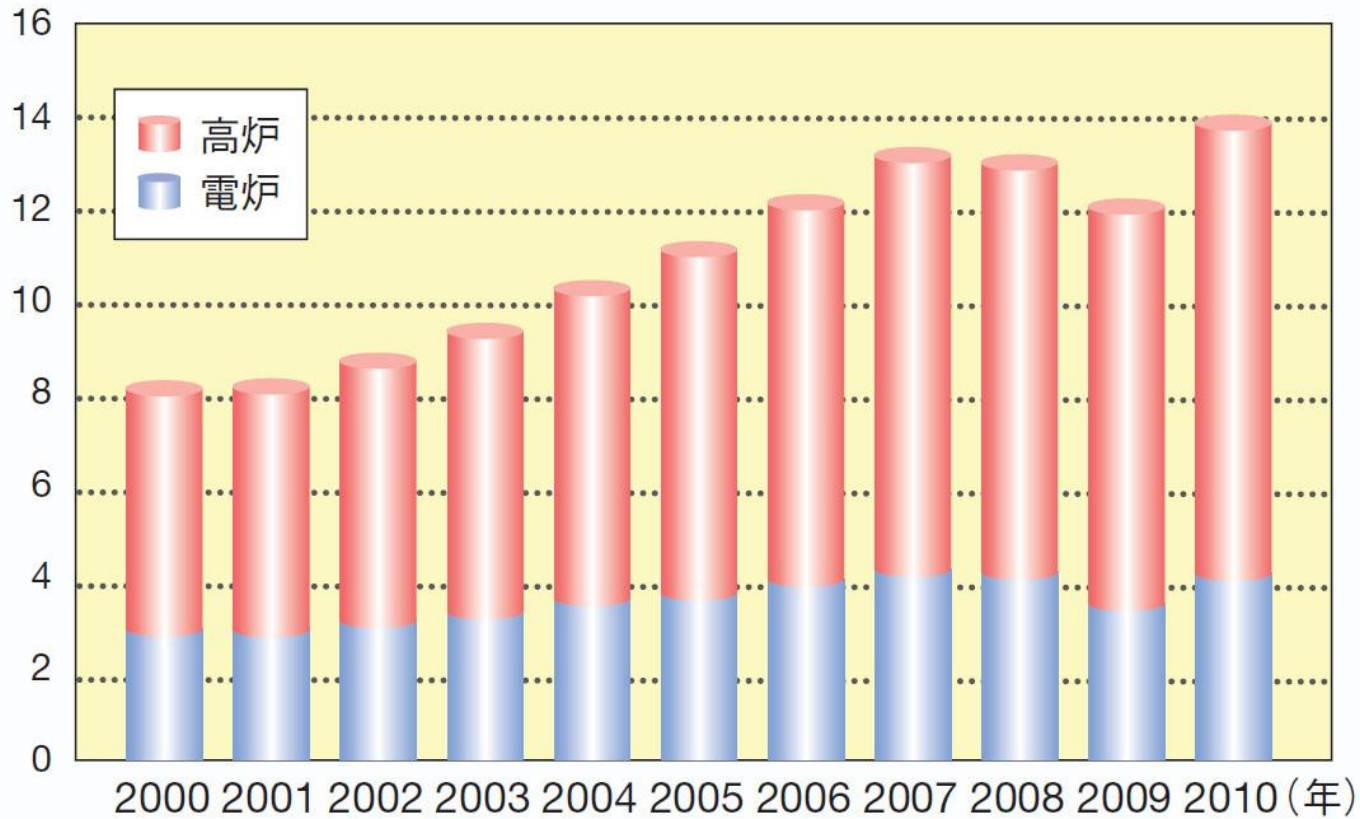
出所：日本鉄源協会

高まる高炉生産の需要



[世界の製法別粗鋼生産の推移]

生産量
(億トン)



出所：worldsteel

高まる高炉生産の需要

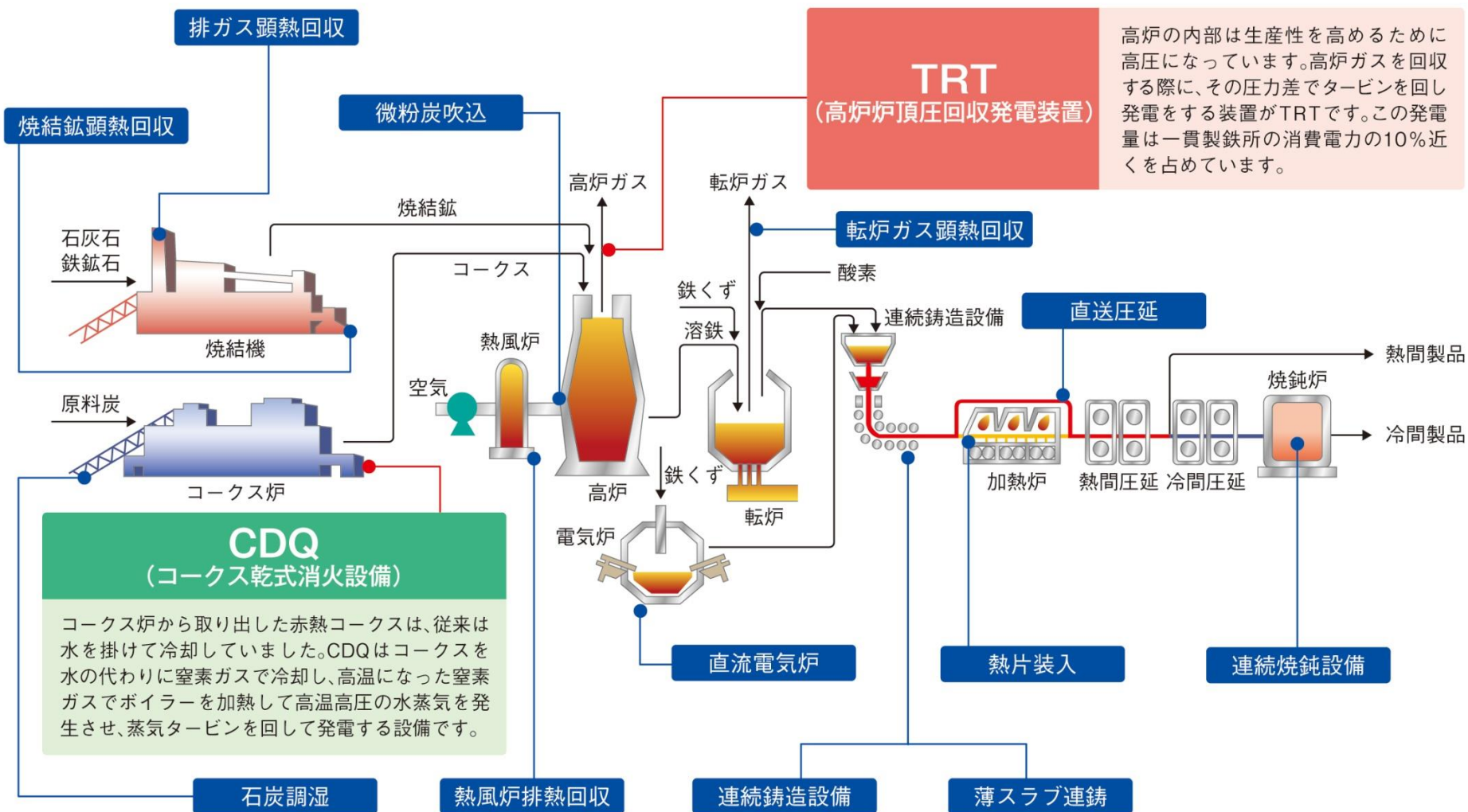


- 中国やインド等の新興国の発展に伴い、世界の鉄鋼需要は中長期的に拡大。国際エネルギー機関(IEA)の分析では、世界の粗鋼生産は2007年の13.5億トンから2050年には22~27億トンに達すると予想。
- 電炉の原料となる鉄スクラップは国際的に流通しているが、社会資本がある程度蓄積されないとスクラップの発生量は大幅には増加しない。
- 電炉での生産のみでは世界の鉄鋼需要を満たすことは不可能であり、高炉での生産を増やすことが不可欠。

製造段階の省エネルギー関連技術



製鉄所内で副生する膨大なエネルギーは、あらゆる工程で回収され再利用されている。

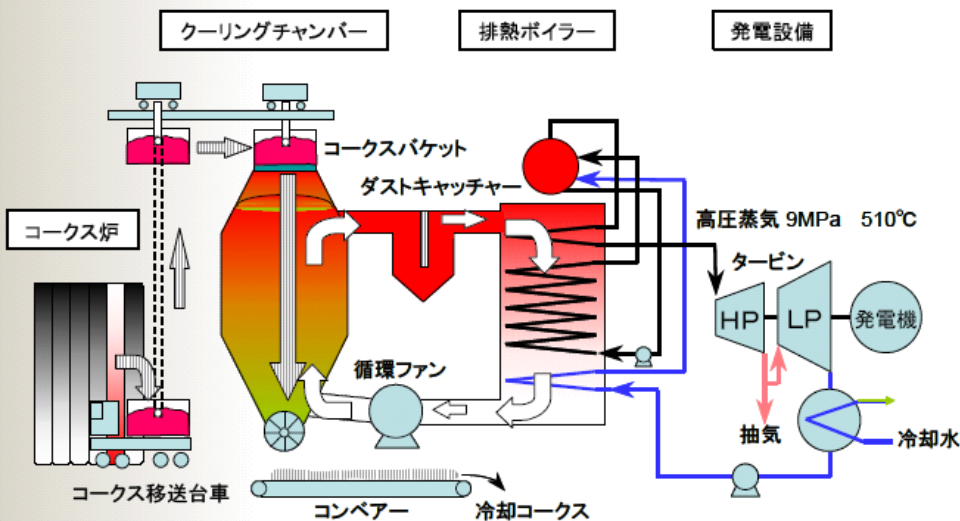




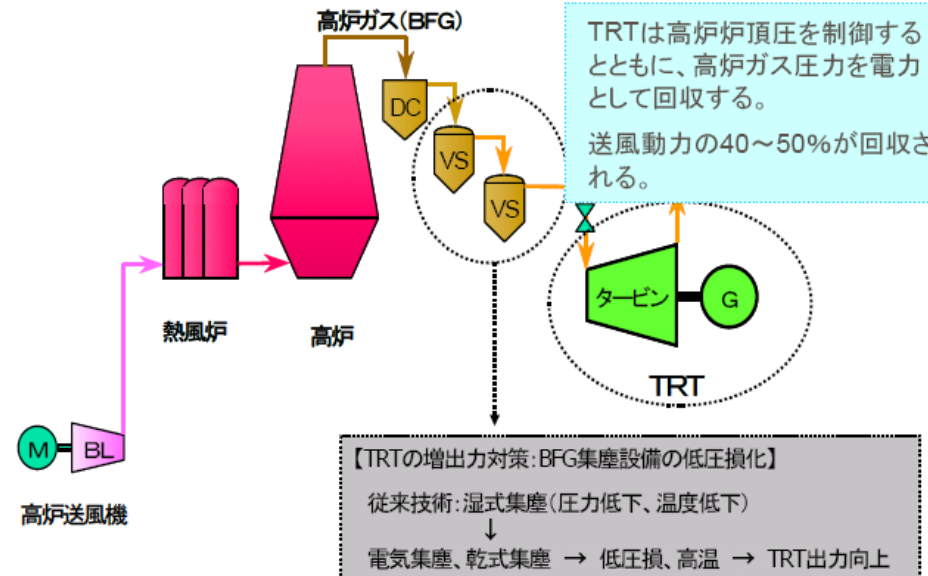
コークス炉から取り出した赤熱コークスは、従来は水を掛けて冷却していました。**CDQ**はコークスを水の代わりに窒素ガスで冷却し、高温になった窒素ガスでボイラーを加熱して高温高圧の水蒸気を発生させ、蒸気タービンを回して発電する設備です。

高炉の内部は生産性を高めるために高圧になっています。高炉ガスを回収する際に、その圧力差でタービンを回して発電をする装置が**TRT**です。この発電量は一貫製鉄所の消費電力の10%近くを占めています。

コークス乾式消火(CDQ)



高炉炉頂圧発電(TRT)

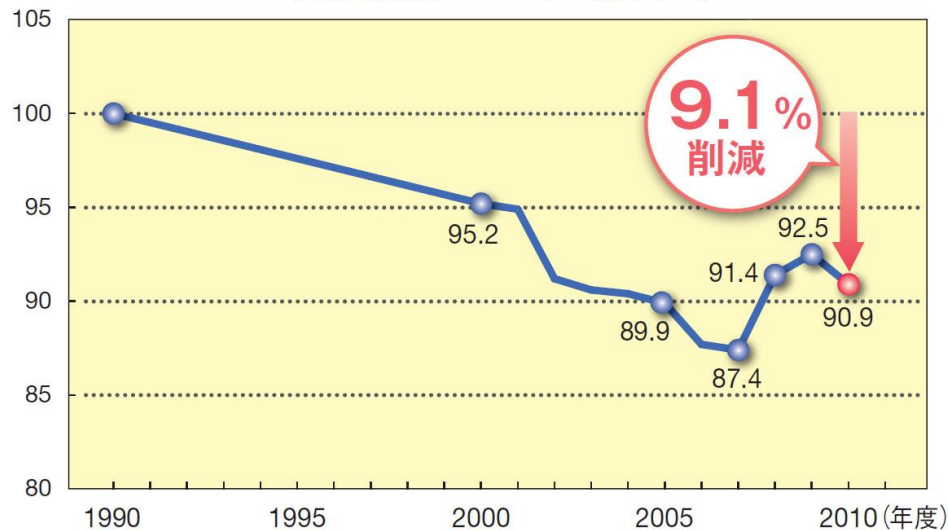


省エネルギー関連技術の成果



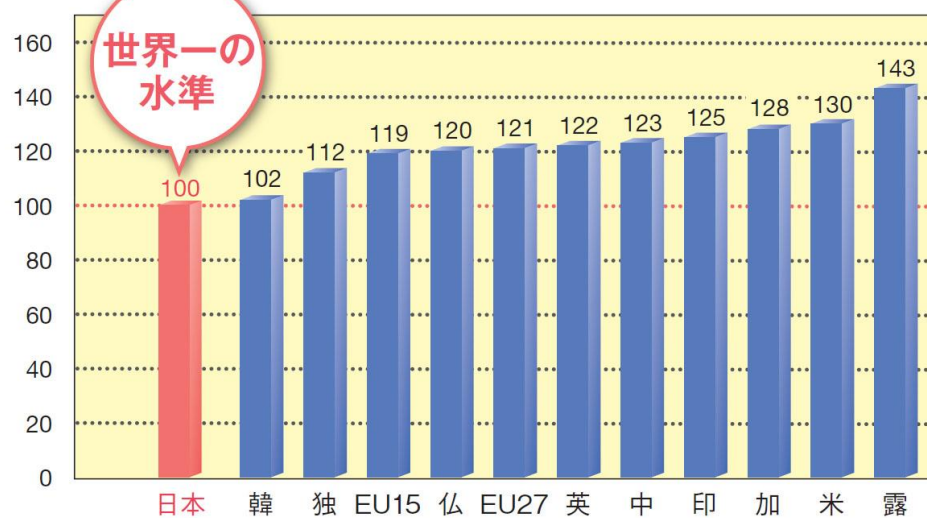
■ 1990年を100とすると
9.1%のエネルギー原単位を削減

[鉄鋼業のエネルギー原単位]



■ 世界で最も進んだエネルギー消費効率

[鉄鋼業のエネルギー原単位の国際比較]

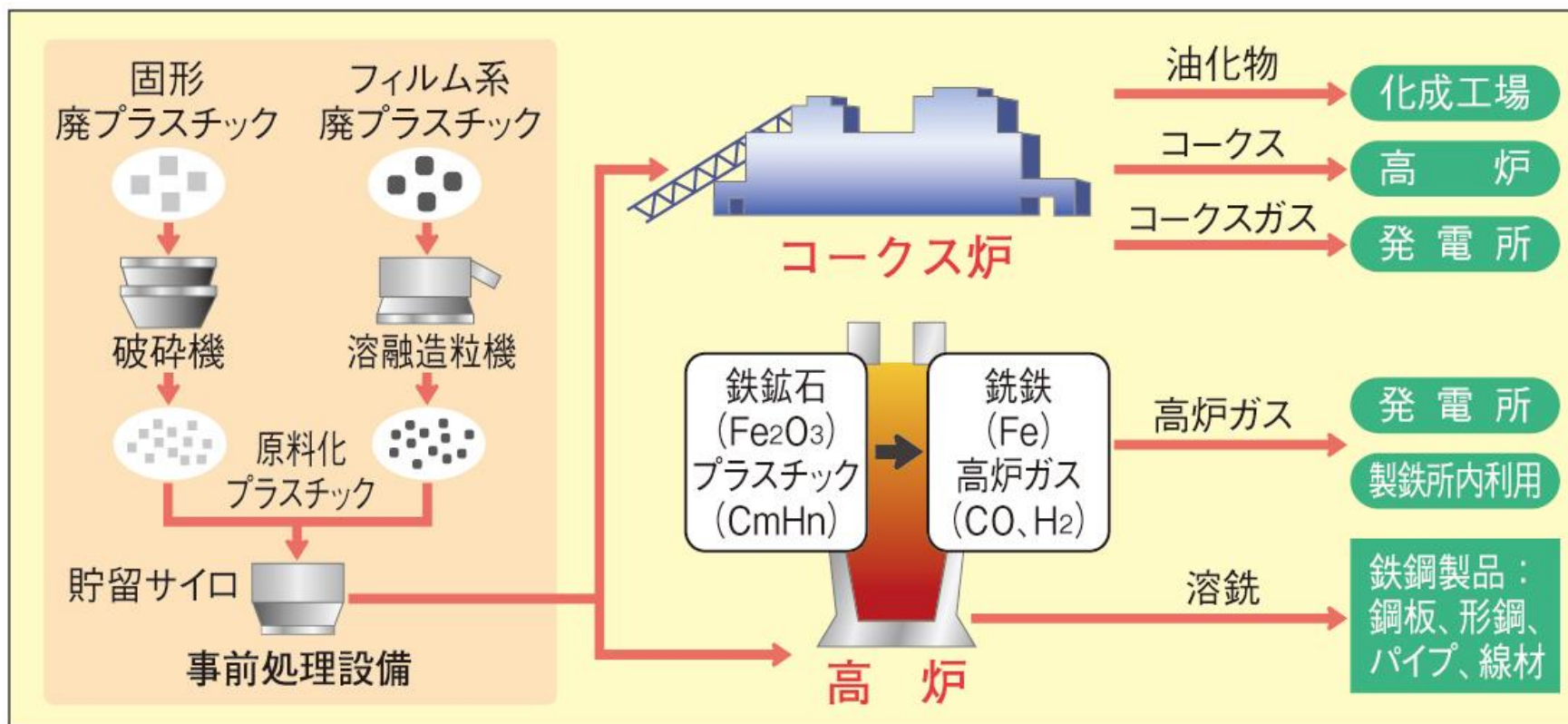


廃プラスチック等のリサイクル活用



- コークス炉の投入して油やガス、コークスを生産
- 高炉に吹き込んで鉄鉱石の還元剤として利用

〔 廃プラスチックのリサイクル工程 〕

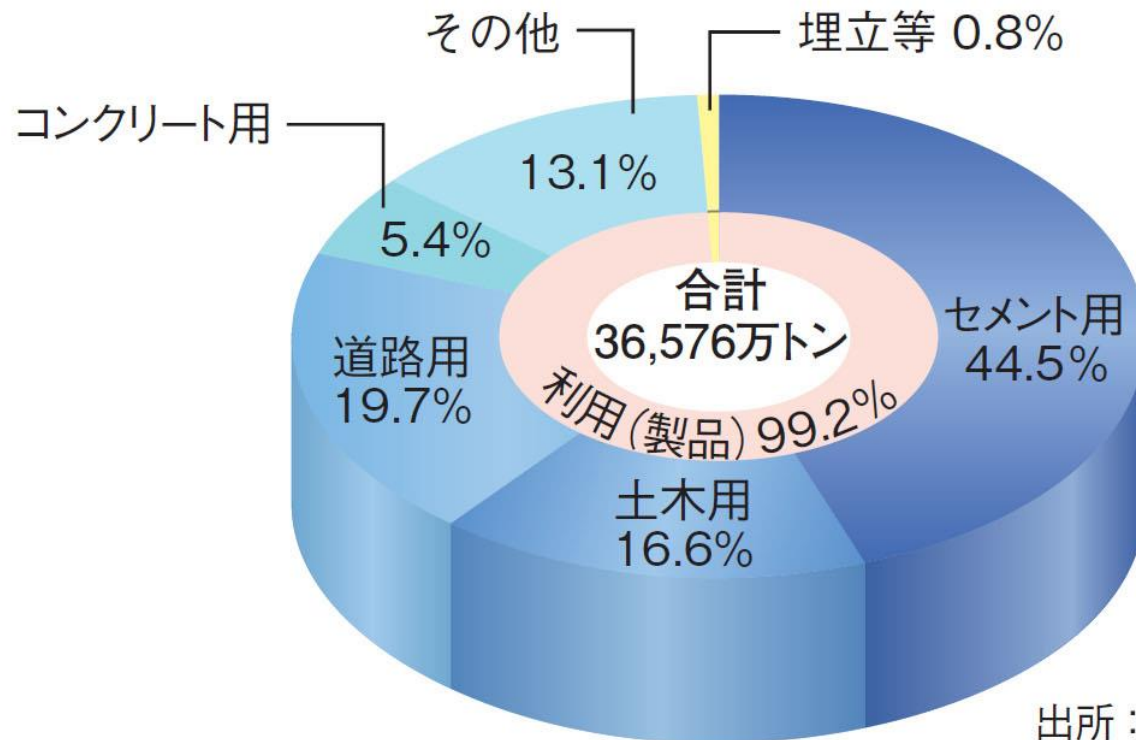


鉄鋼スラグの有効活用



- 副産物の鉄鋼スラグは、ほぼ100%有効活用
- 高炉スラグから作られるセメントは、CO₂削減に大きな効果

〔鉄鋼スラグ製品の用途別使用量(2010年度)〕

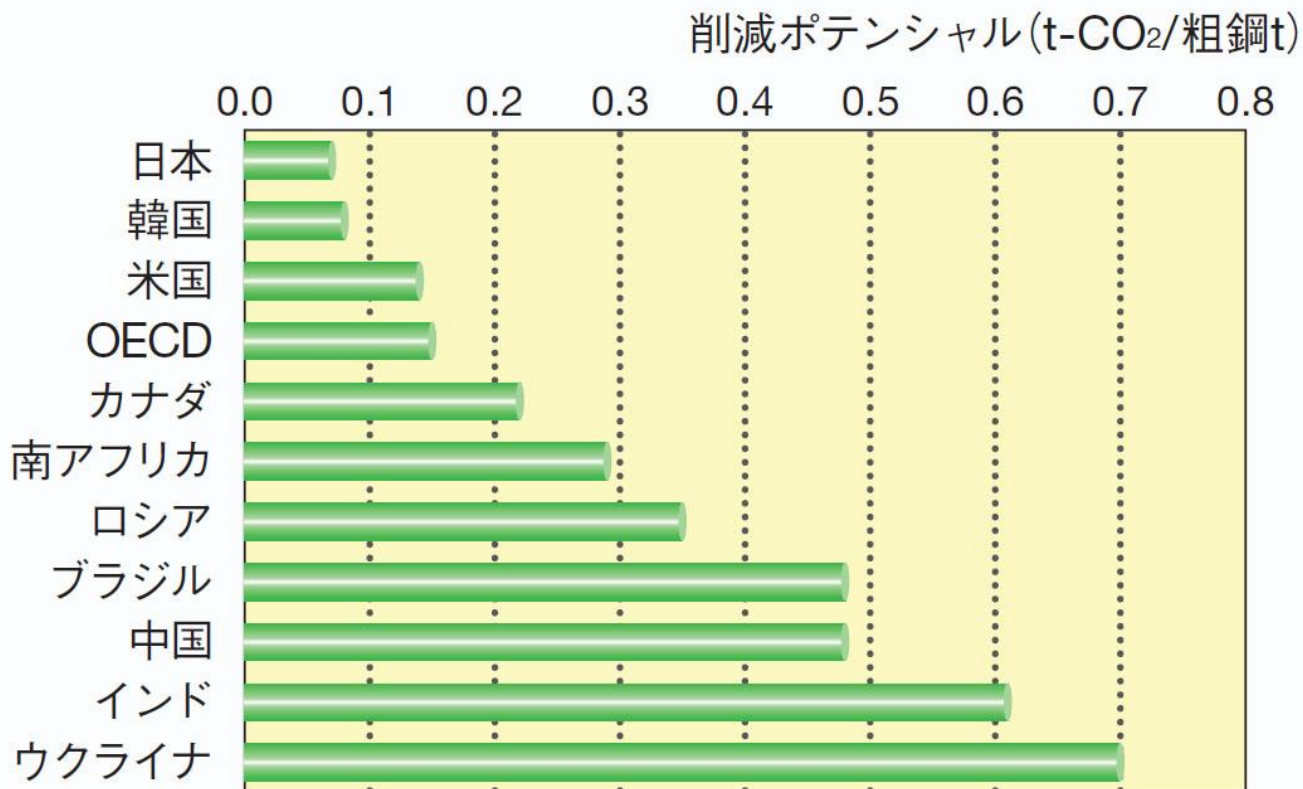


出所：鉄鋼スラグ協会

日本の製鉄業の省エネ効率是世界一



〔省エネ技術が普及した場合の各国のCO₂削減可能量〕



出所：エネルギー技術展望 2008、IEA 発表資料

世界的視野で地球温暖化対策を



地球温暖化対策には、世界の鉄鋼業全体によるCO₂削減努力が重要。

- 電炉はコークスで鉄鉱石を還元しないので、CO₂の発生が高炉より少ない。しかし、国内の鉄鋼製造プロセスを高炉から電炉に切り替えても、地球全体のCO₂削減にはつながらない。なぜなら、日本から輸出されるスクラップが減る分だけ、他国では高炉生産が増えるから。
- むしろ、エネルギー効率の悪い他国の高炉生産が増加することで、炭素リーケージを招き、地球全体としてはCO₂が増加。
- 日本の鉄鋼業はその優れた省エネ関連技術を海外に普及させ、鉄鋼業全体として地球のCO₂削減に協力。

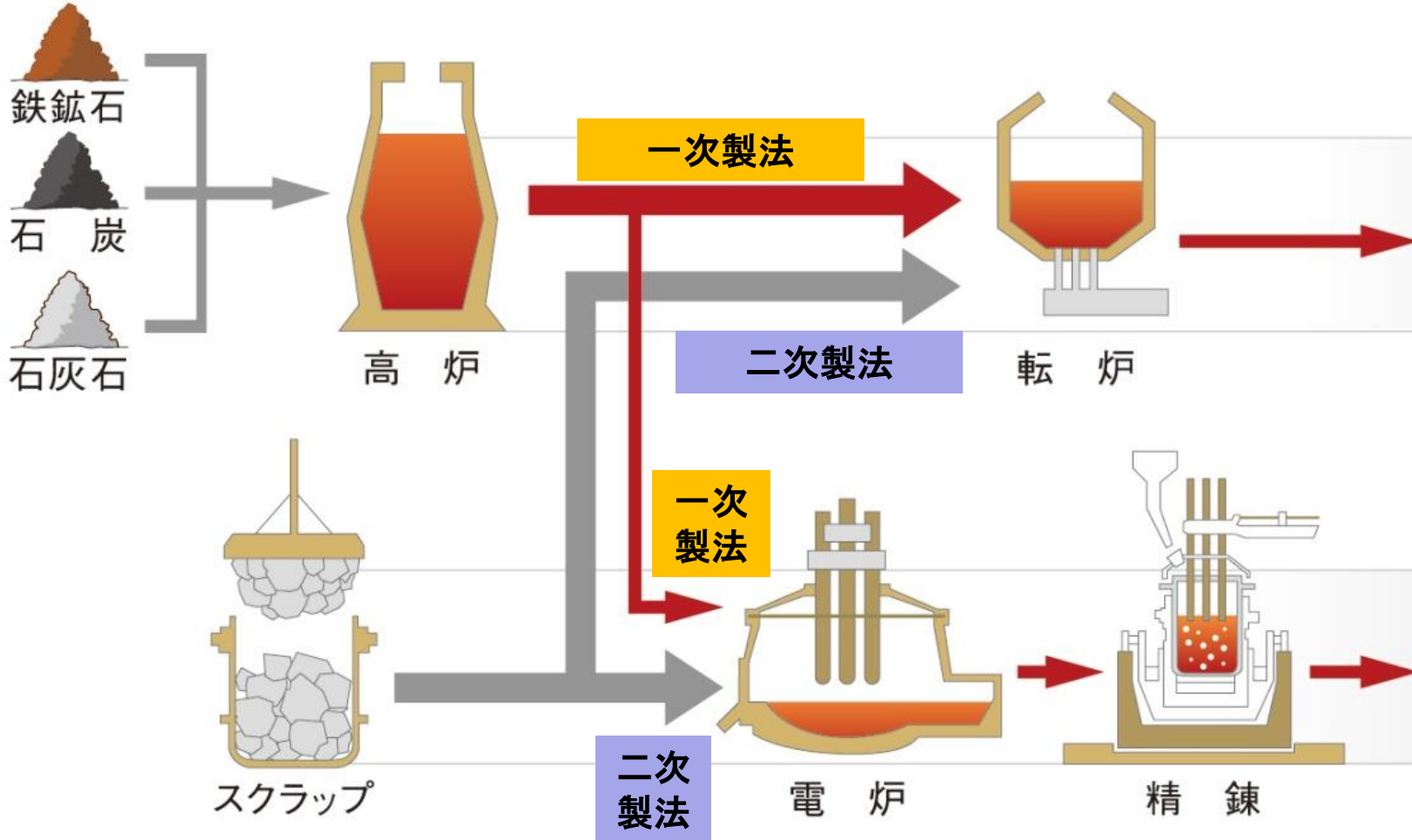
鉄鋼製品の環境評価技術



- 鉄鋼業は、製品種類に応じて高炉と電炉のそれぞれのプロセスの特性を活かし様々な鉄鋼製品を社会に供給。
- 鉄鋼製品は、高炉法※¹（一次製法）と電炉法※¹（二次製法）の2つの製法が組み合わさって生産され、一体的な鋼材（スクラップ）の循環プールを形成。全ての鉄鋼製品はこの循環プールを介して何度でも循環利用される。
- 世界鉄鋼協会（WSA）は、高炉法と電炉法を合わせた全体システムとして鋼材の環境負荷を評価する方法論を確立。これが世界の鉄鋼業で共通した考え方となっている。

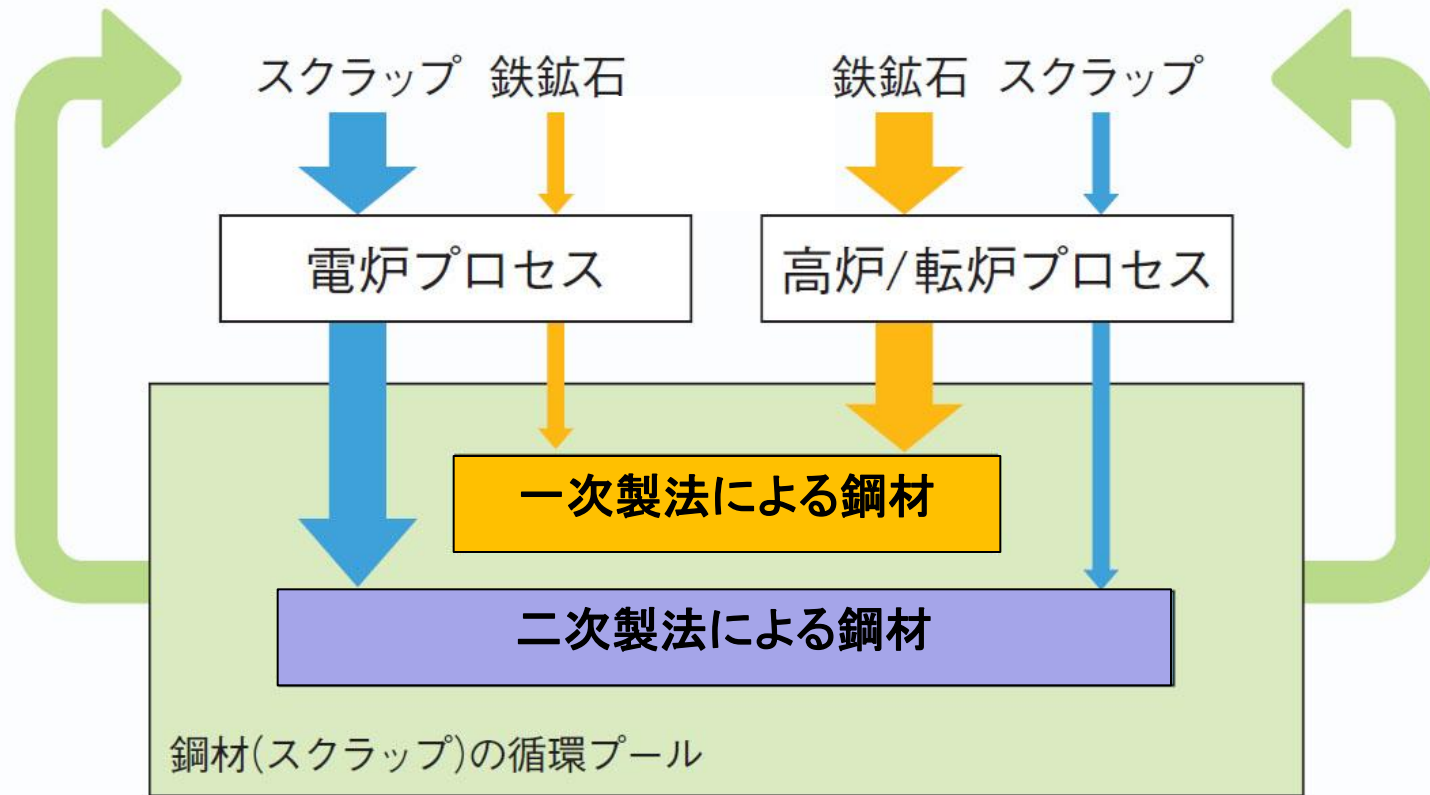
※¹ 高炉法： 0%スクラップ前提の理論的製法。高炉ルートに限らない。→「一次製法」
電炉法：100%スクラップ前提の理論的製法。電炉ルートに限らない。 →「二次製法」

一次製法と二次製法





[鉄の循環の考え方]



出所：LCA 方法論レポート、worldsteel, 2011

鉄鋼製品のリサイクルはClosed-Loop型



・ ISO14044に基づく考え方

- 鉄鋼製品のように再溶解により固有の特性を変化させずに新たな鋼材を生産する場合：
Closed-Loopと見なせる。

・ 鉄鋼製品でのリサイクリングシステム

- 高炉と電炉は各地域により、それぞれが得意とする製品を製造しており、結果として量、品質の両面での機能分担が図られたリサイクルシステムが構築されている。
- 資源面も含め両者は相互に補完しあっており、鉄鋼製品全体をシステム境界として定義でき、鉄鋼製品のリサイクルはClosed-Loopと見なせる。

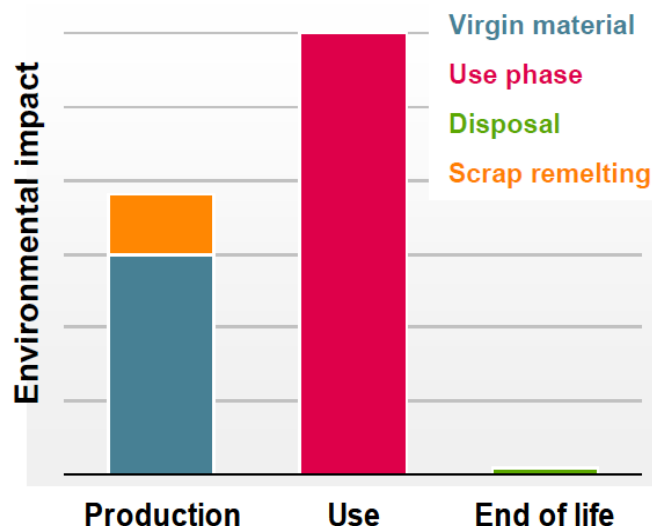
・ 将来のシナリオ

- 世界の鉄鋼需給は今後も増加が予測され、高炉法による一次原料の生産は引き続き世界規模で確保される。
- 今後のリサイクリングシステムの高度化と社会整備により、こうしたシステムは永続的に維持可能である。
- 鉄鋼製品のリサイクル優位性
 - ・ 回収が容易(磁選)・品質の劣化が少ない・商品の要求に応じた作りこみが可能etc.

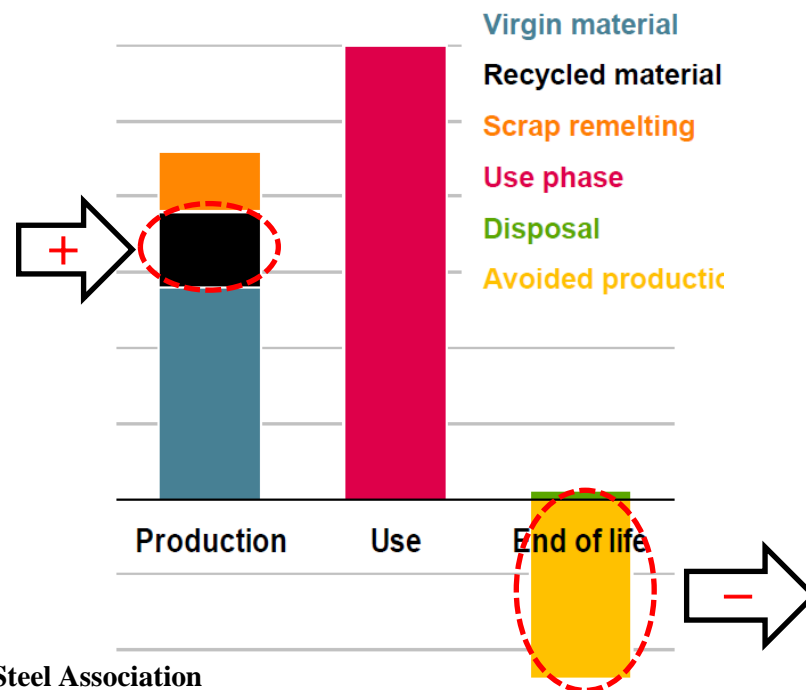
WSAの鉄鋼製品LCA評価方法



Cut-off approach (Recycled content method)



End of life approach (Closed material loop method)



出典：World Steel Association

- ◆ 異なる製品システム間での環境負荷控除や割付はなし。
- ◆ リサイクルされるスクラップには過去のライフサイクルの環境負荷の割付なし。

- ◆ スクラップのリサイクルにより、次のライフサイクルにおいて1次ルートの生産量低減分相当の環境負荷が低減される。
- ◆ 同時に、リサイクルされるスクラップには過去の環境負荷が割付られる。

鉄スクラップのLCI (Scrap LCI)



1 kg のスクラップで、二次製法によりY kg の鋼材を生産し、Y kg の一次製法による鋼材分のLCIを肩代わりする。

X_{pr}: 一次製法による鋼材のLCI (0%スクラップ前提の理論値)
X_{re}: 二次製法による鋼材のLCI (100%スクラップ前提の理論値)
Y : 二次製法における鋼材の生産効率(歩留まり)。

とすると、

$$X_{pr} \cdot Y - X_{re} \cdot Y = (X_{pr} - X_{re}) \cdot Y \text{ 分のLCIを節約}$$
$$= \text{Scrap LCI と定義}$$

鋼材のリサイクル性を考慮したLCI including EoL

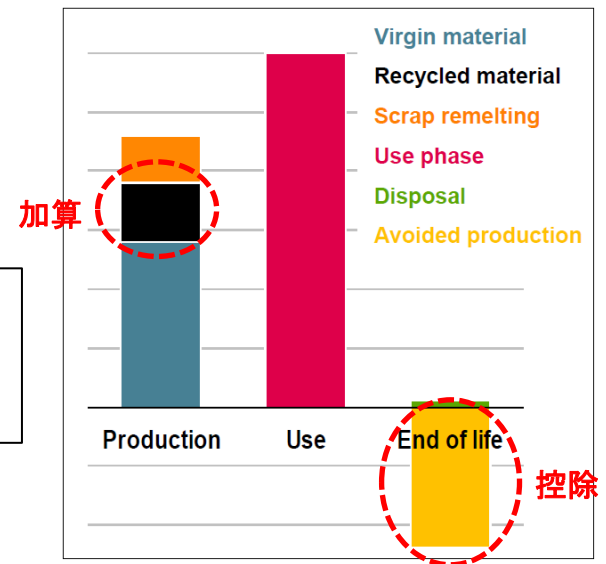


Scrap LCIを考慮しない鉄鋼製品のLCIから、
回収率を考慮した**Scrap LCI**を次代へ持ち越し(控除)し、
製造時の使用率に応じた**Scrap LCI**を過去の環境負荷分として
付加(加算)する。このとき、

- X : 鉄鋼製品LCI(Scrap LCI考慮なし)
- RR : 鉄スクラップの回収率
- S : 製鉄プロセスにおけるスクラップ使用率

とすると、

$$\text{LCI}_{\text{including EoL}} = X - RR \cdot \text{ScrapLCI} + S \cdot \text{ScrapLCI}$$





$$LCI_{\text{including EoL}} = X - (RR - S) \cdot (X_{\text{pr}} - X_{\text{re}}) \cdot Y$$

このとき、Scrap LCI = $(X_{\text{pr}} - X_{\text{re}}) \cdot Y$

X : 鉄スクラップの環境負荷クレジットを考慮しない鋼材LCI

RR : 鉄スクラップの回収率

X_{pr}: 一次製法による鋼材のLCI (0%スクラップ前提の理論値)

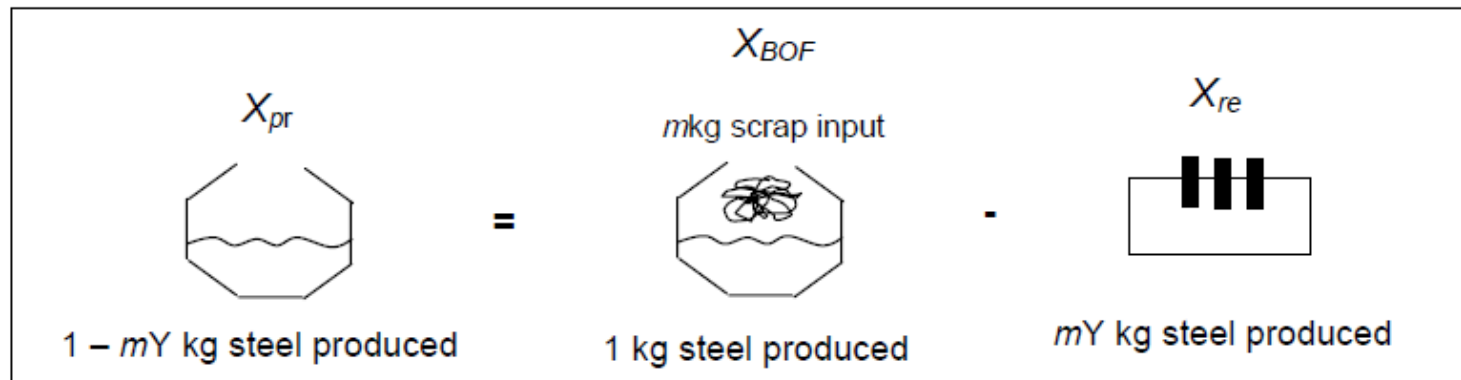
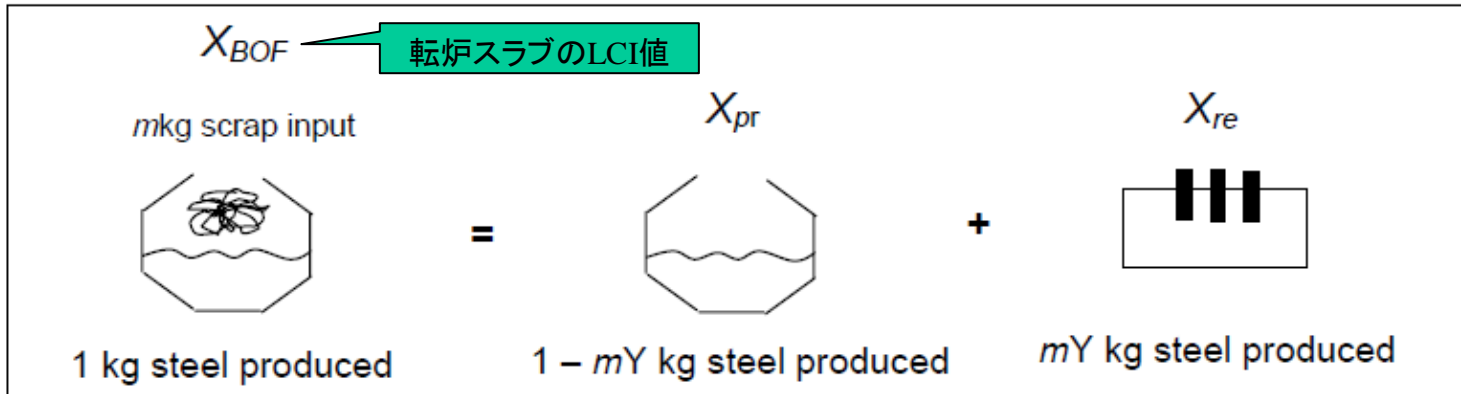
X_{re}: 二次製法による鋼材のLCI (100%スクラップ前提の理論値)

Y : 二次製法における鋼材の生産効率(歩留まり)。

S : 製鉄プロセスにおけるスクラップ使用率

Scrap LCI: 鉄スクラップのLCI

X_{pr} の理論値の例 (鋼スラブ)



$$X_{BOF} = (1 - mY)(X_{pr}) + mYX_{re}$$

ここで、 $m = Scrap_{BOF}$, $Y = 1 / Scrap_{re}$ とすると、

$$X_{BOF} = \left(1 - \frac{Scrap_{BOF}}{Scrap_{re}}\right)(X_{pr}) + \left(\frac{Scrap_{BOF}}{Scrap_{re}}\right)X_{re}$$



$$X_{pr} = \frac{X_{BOF} - \left(\frac{Scrap_{BOF}}{Scrap_{re}}\right)X_{re}}{1 - \frac{Scrap_{BOF}}{Scrap_{re}}}$$