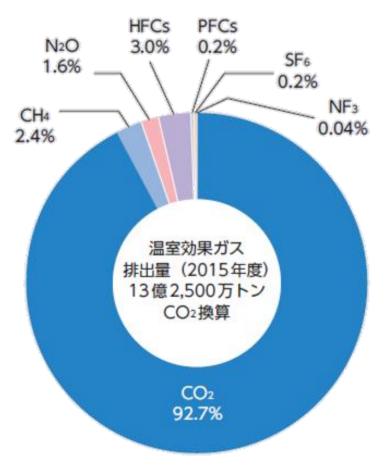
鉄鋼のLCA

2018年5月7日(大阪)-21日(東京)西山記念技術講座

新日鐵住金 礒原豊司雄



環境影響 主因の一つはCO2



日本の温室効果ガス排出量

廃棄物 (プラスチック、廃油の焼却) 2% 工業プロセス その他 (燃料からの漏出等) (2%)及び製品の使用 0.3% (石灰石消費等) (0.3%)4% エネルギー転換部門 (4%)(発電所等) 家庭部門一 6% 15% (39%)(4%)二酸化炭素 総排出量 2015年度 12億2,700万トン 產業部門 業務その他部門 (工場等) (商業・サービス・ 直接排出 34% 事業所等) (28%)22% 間接排出 (5%)運輸部門 (自動車·船舶等) 17% (17%)

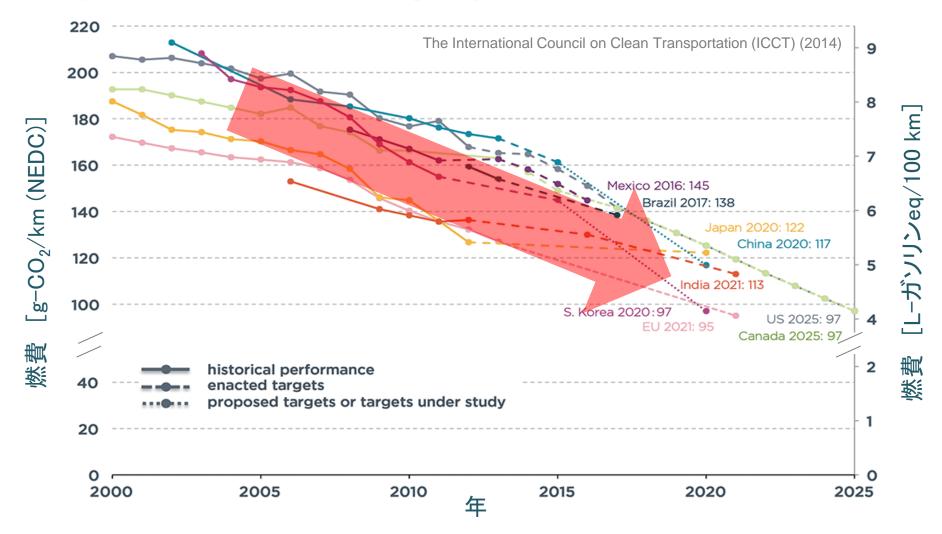
環境省: 平成29年版 環境・循環型社会・生物多様性白書(2017), 114

日本におけるCO₂排出量の部門別内訳

CO₂は排出量が多く、特に産業・運輸部門は排出量の半分を占める。 各セクタ(素材製造、素材使用)毎の削減が求められている。

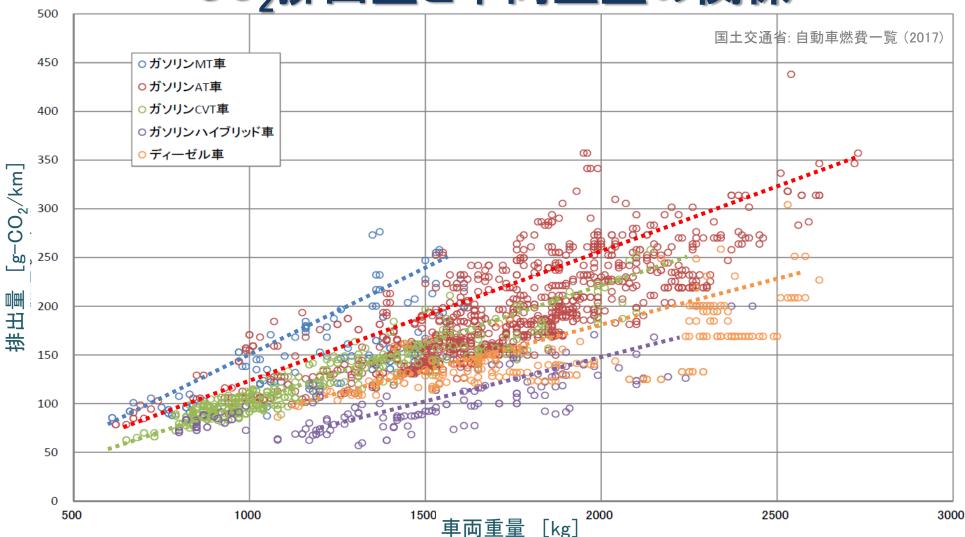
素材製造時の環境影響

各国の自動車燃費規制は年々厳格化



どうすれば燃費を下げられるか?

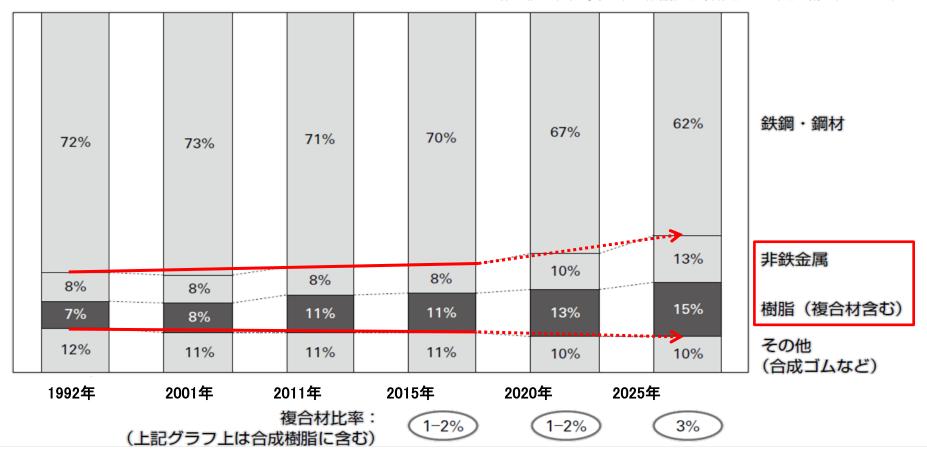
CO₂排出量と車両重量の関係



車両重量とCO₂排出量には明確な相関→自動車軽量化の必要性。

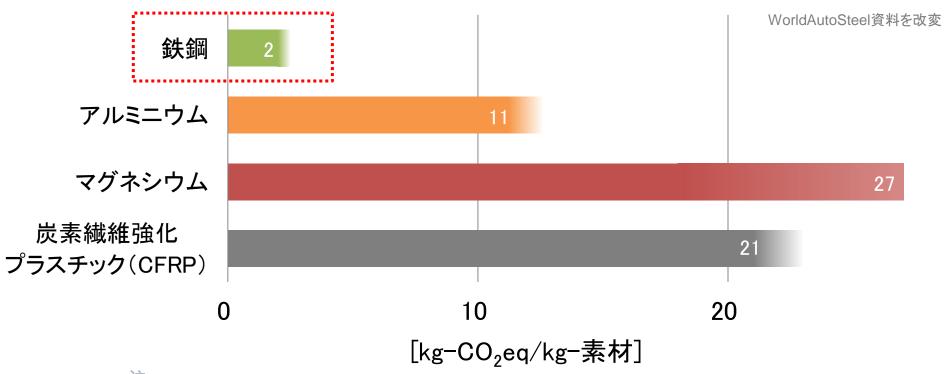
自動車車体素材の構成比の推移

藤田誠人, 中島崇文, 池幡諭, 岡野翔運: 知的資産創造, 4(2017), 55



自動車軽量化のために、鉄→軽量素材へのシフトが進む。

素材製造時CO₂排出量(重量あたり)



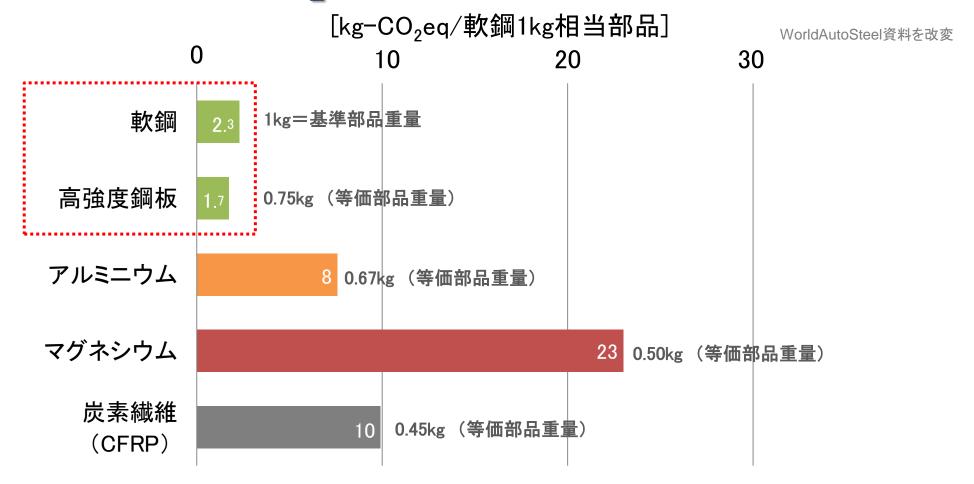
注:

- 鉄鋼およびアルミニウムは全グレードを示している。
- 鉄鋼における高強度ハイテン(AHSS)と従来鋼の差は5%以下。
- アルミのデータは、インゴット製造は全世界平均、インゴットから最終製品までの製造工程は欧州データのみを使用。

鉄鋼の製造時のCO₂排出量(重量あたり)は、 じつは軽量素材より少ない。



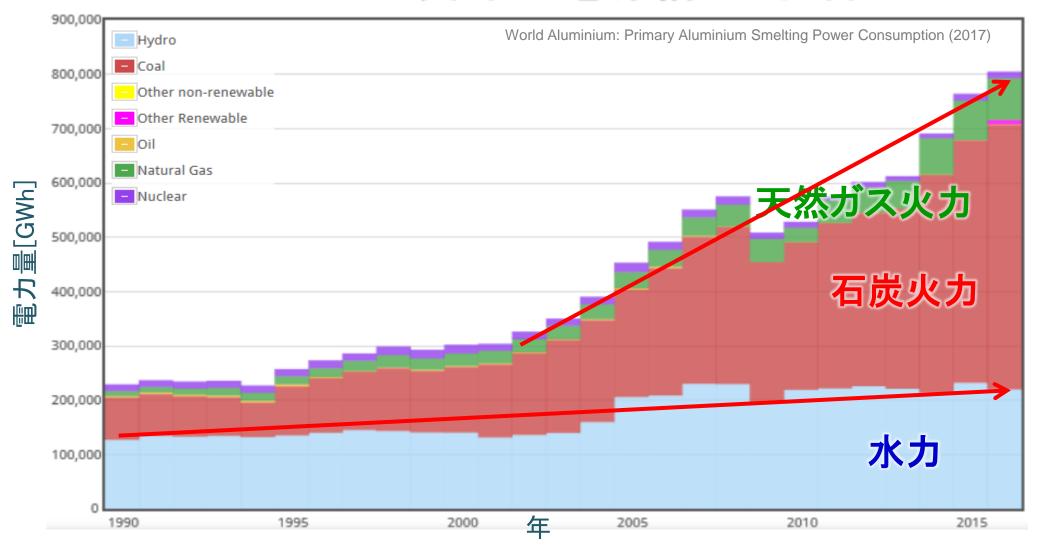
素材製造時CO₂排出量(等価機能部品あたり)



鉄鋼の製造時CO2排出量は、 機能あたりで考えても他素材より少ない。



アルミニウム製錬の電源構成(世界)



アルミは電気製錬。電源構成の7割が化石燃料で、高CO₂排出。

マグネシウムの製造法(2013年)

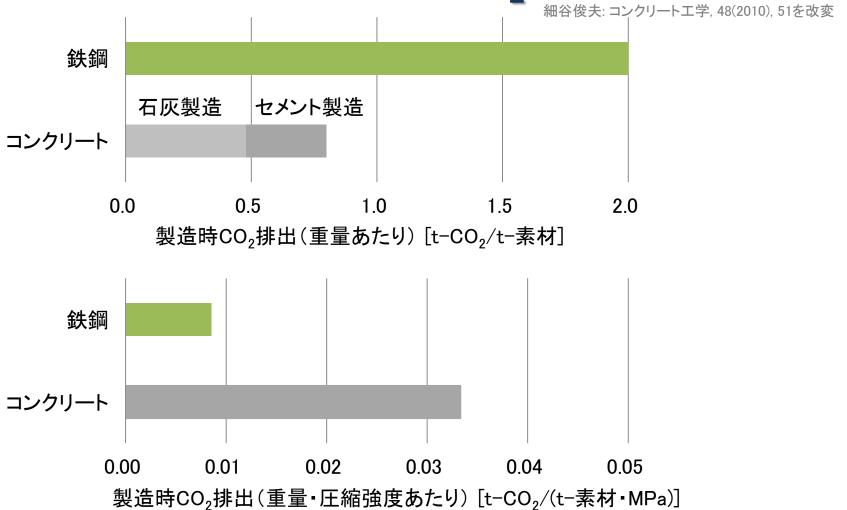
竹中俊英.森重大樹: マグネシウム製錬の状況 (2016)

玉	会社名	製錬方法	使用原料	製錬能力
米国	US Magnesium	新電解法	塩水	63,500
ブラジル	Brasmag	熱還元法	ドロマイト	22,000
イスラエル	Dead Sea Magnesium	電解法	塩水	34,000
中国	山西銀光華盛镁业株式有限公司	熱還元法	ドロマイト	80,000
	太原易威镁业集团有限公司	熱還元法	ドロマイト	60,000
	寧夏恵冶镁业集団有限公司	熱還元法	ドロマイト	70,000
	山西聞喜県瑞格镁业有限公司	熱還元法	ドロマイト	50,000
•	山西聞喜県八達镁业有限公司	熱還元法	ドロマイト	50,000
	府谷県京府石炭化有限責任公司	熱還元法	ドロマイト	30,000
	山西五台雲海镁业有限公司	熱還元法	ドロマイト	30,000
	その他中国企業	熱還元法	ドロマイト	1,152,500
韓国	POSCO*	熱還元法	ドロマイト	10,000
マレーシア	CVM Minerals Ltd. * *	熱還元法	ドロマイト	15,000
インド	Hyderabad等	電解法	海水	900
ロシア	Solikamsk	電解法	カーナライト	18,500
	Avisma	電解法		35,000
カザフスタン	Ust-Kamenogorsk Titanium-Magnesium Plant	電解法		30,000
ウクライナ	Kalush	電解法		18,000
	Zaporozhye	電解法	カーナライト	23,000
セルビア	Bela Stema	Magnetherm法	ドロマイト	5,000
オーストラリア	Latrobe Magnesium Ltd. * * *	熱還元法	石炭灰	10,000
アルメニア	Mergelyan Institute * * * *			300
	合計			1,807,700

日本マグネシウム協会

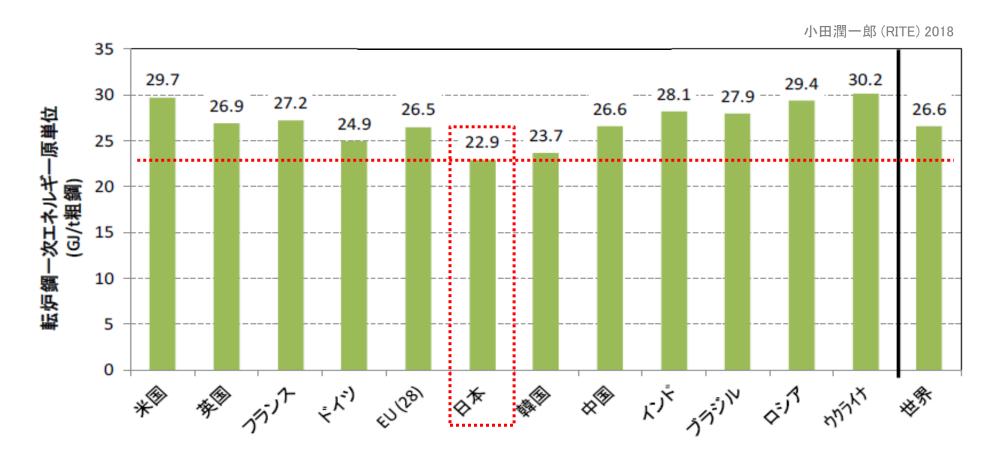
マグネシウムの8割は熱還元法(低効率)の中国で製造されている。

建設素材の製造時CO。排出量



強度を含めて比較すると鉄鋼はコンクリートより製造時低環境負荷。

転炉鋼の一次エネルギー原単位(2015年)



日本の鉄鋼製造時のエネルギー効率は世界ー エコプロセス



転炉鋼のエネルギー削減ポテンシャル

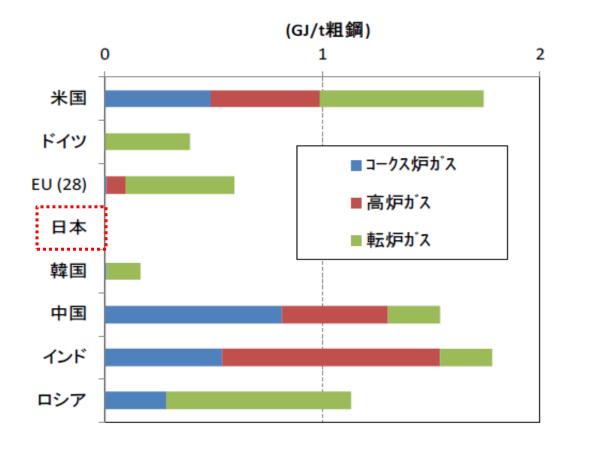
小田潤一郎 (RITE) 2018

2

(GJ/t粗鋼)

■造塊分塊

■平炉



出典)worldsteel "Steel Statistical Yearbook"を基にRITE推計

米国

ドイツ

EU (28)

日本

韓国

中国

インド

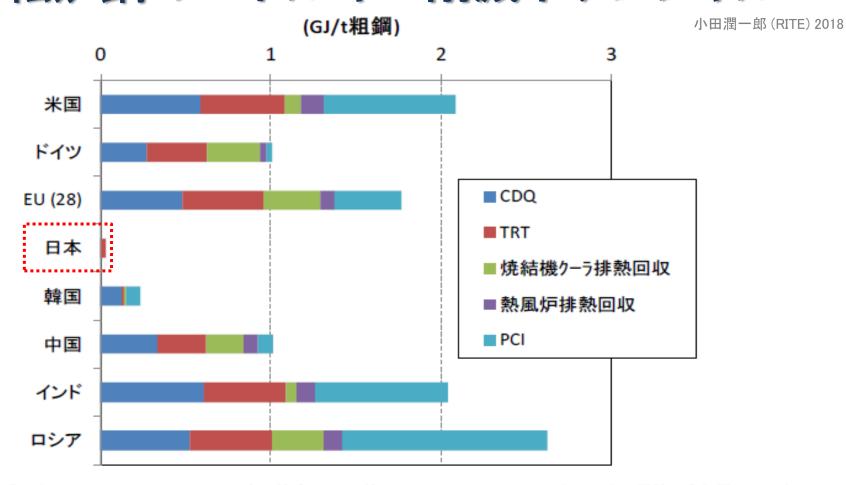
ロシア

ウクライナ

出典)IEA "エネルギーバランス表" (2017) を基にRITE推計

日本は副生ガス再利用、効率プロセス導入が100%。

転炉鋼のエネルギー削減ポテンシャル

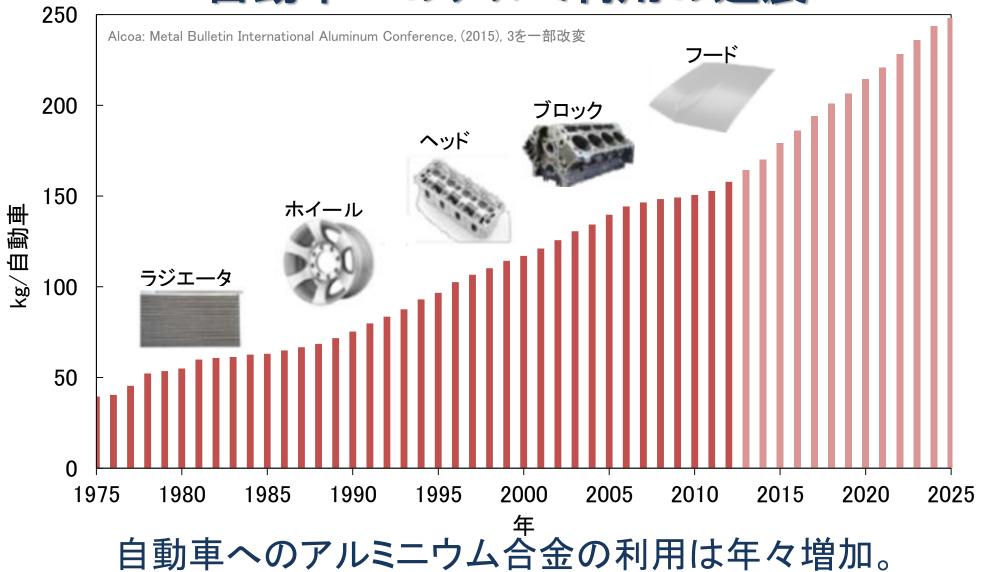


出典) ドイツはArens et al. (2017)、日本は鉄連(2017)、韓国はSchulz et al. (2015)、中国は中国鋼鉄工業年鑑 (2016)を それぞれ参照し設定した

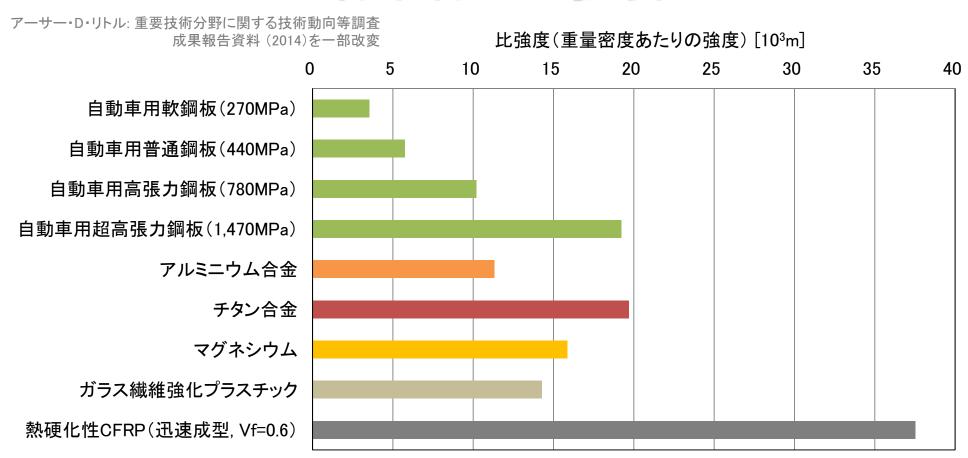
日本は排熱回収等もほぼ完全導入。

素材使用時の環境影響

自動車へのアルミ利用の進展



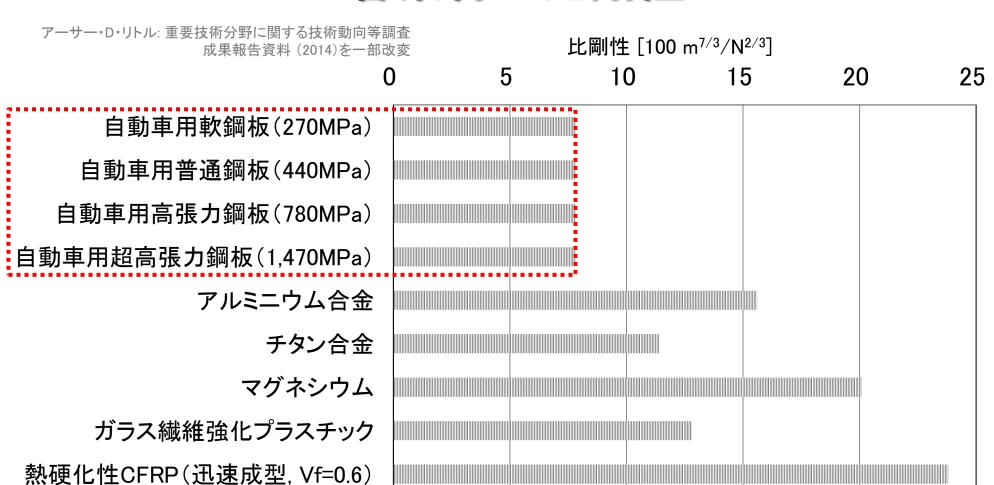
各素材の比強度



超高張力鋼(超ハイテン)の比強度はアルミを超えている。 →同じ強度なら超ハイテンはアルミより軽い。



各素材の比剛性

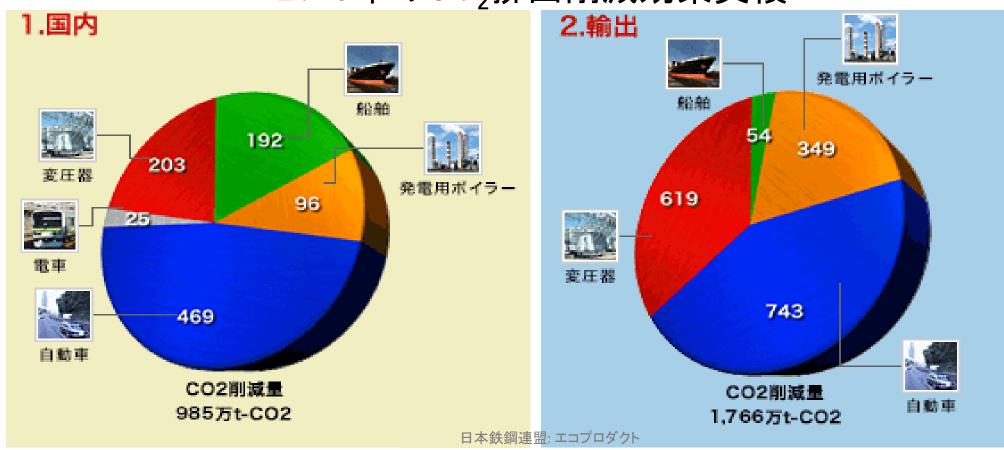


鉄鋼の比剛性は軽量素材より劣→形状(閉断面等)で工夫



エコプロダクツ

2015年のCO₂排出削減効果実績

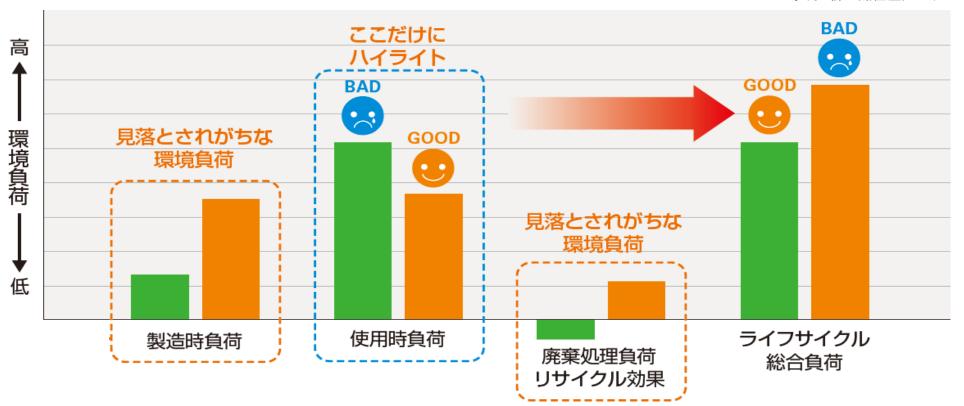


エコプロダクツは日本が生み出す高機能鉄鋼製品。 製品使用時のCO₂排出を削減する。

製品のライフサイクル全体での環境影響

LCA (Life Cycle Assessment) の考え方

季刊 新日鐵住金, 20(2017)



製造時、使用時に加えて、廃棄/リサイクルも含めた製品のライフサイクル全体で環境負荷を考える。

LCAに関する規格

ISO

ISO14040 環境マネジメント-LCA-原則及び枠組み ISO14044 環境マネジメント-LCA-要求事項及び指針



EPD(Environmental Product Declaration)

製品の環境負荷量の開示。1998年スウェーデンで開始。日本では日本ガス機器検査協会が運営。



CFP(Carbon Footprint of Products)

製品の環境負荷量の開示。2007年に英で開始。日本は4省庁が2009~2011年度に制度構築、産業環境管理協会が運営。





PEF/OEF (Product/Organisation Environmental Footprint)

製品(PEF)と組織(OEF)の環境フットプリント。2010年からEUが検討中。

GHG Protocol Scope 3

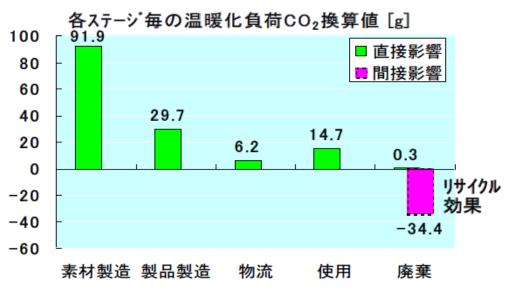
組織のサプライチェーン全体のGHG(温暖化ガス)排出量の開示。 米GHG Protocolが2011年に発行。Scope 1は直接排出、Scope 2は 間接排出。省エネ製品によるGHG削減効果も反映される。



エコリーフにおけるLCA表示

	全ステージ合計
温暖化負荷(CO ₂ 換算)	142.8 g (108.4 g)
酸性化負荷(SO ₂ 換算)	0.332 g (0.273 g)
エネルギー消費量	2.16 MJ (1.74 MJ)

※()内はリサイクル効果注3を含んだ環境負荷を示します。

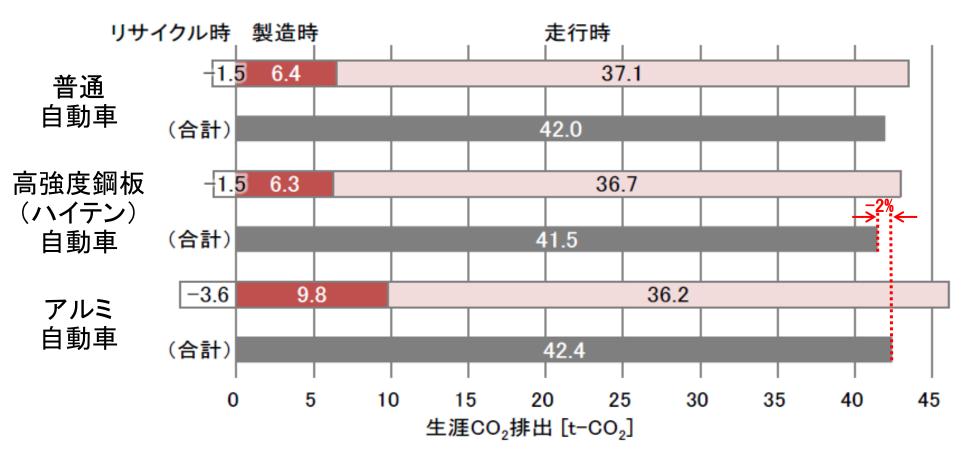


エコリーフ製品環境情報 prodobj-782

環境ラベルのエコリーフではLCAを採用。

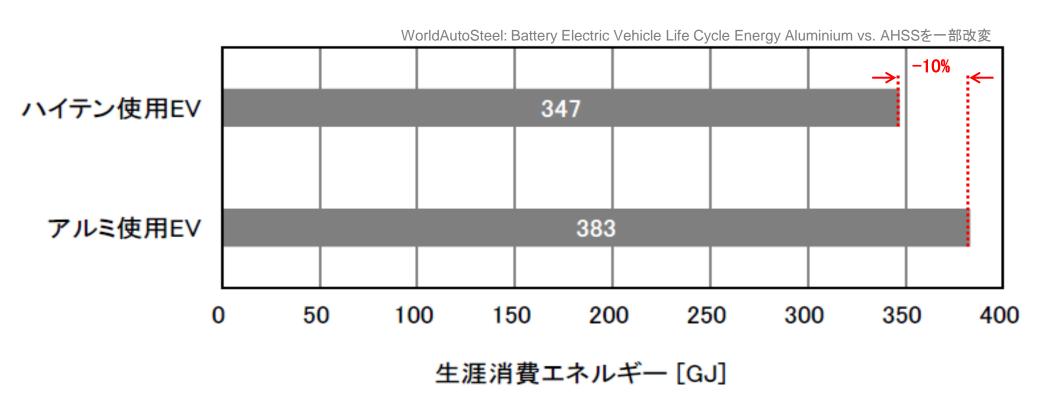
ガソリン自動車における各素材のLCA

WorldAutoSteel: Comparing Material Usage in Production Vehicle Efficient Designsを一部改変



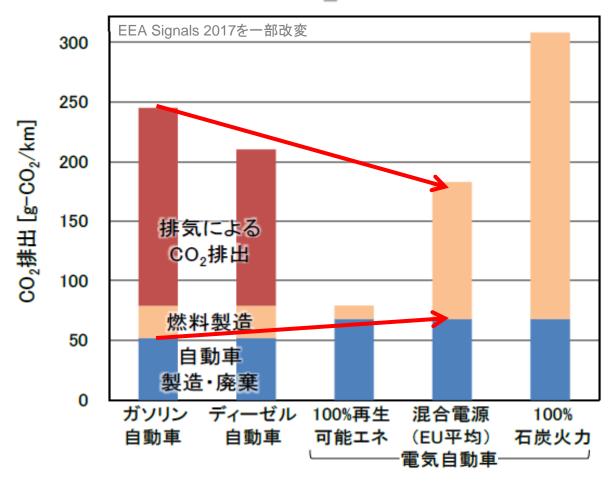
ハイテン使用車はアルミ使用車よりLCAで2%の低環境負荷。

電気自動車における各素材のLCA



ハイテン使用EVはアルミ使用EVより LCAで10%の低環境負荷。

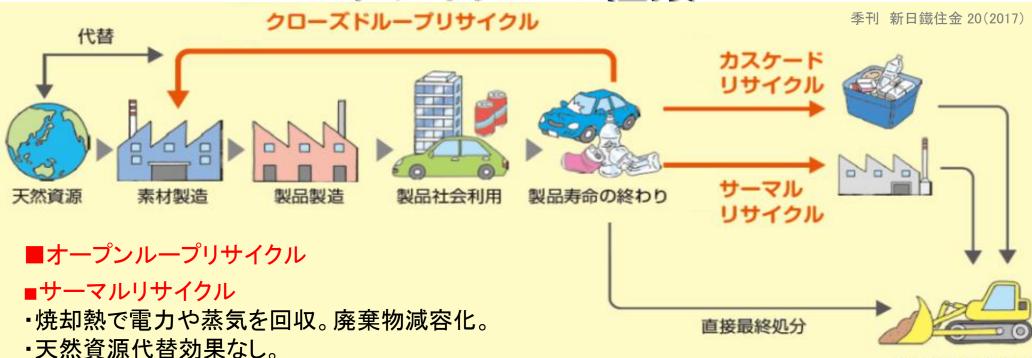
燃料によるCO2排出量の違い



走行時排出減少に伴い製造/廃棄時排出が相対的に大 →素材選択がより重要になってくる

素材のリサイクル

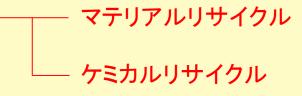
リサイクルの種類



- ■カスケードリサイクル(ダウンリサイクル)
- 性質変化を伴う有限リサイクル。
- 天然資源代替効果あり。

■クローズドループリサイクル

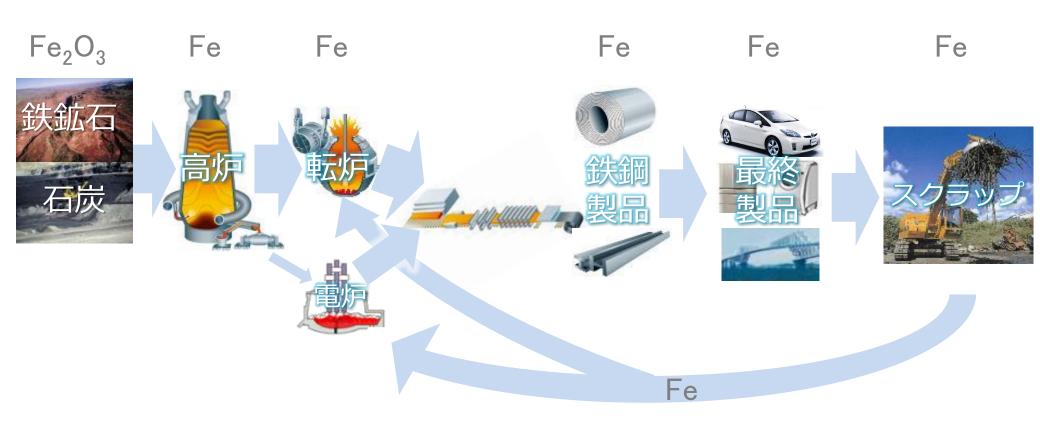
- ・性質を維持したままの無限リサイクル。
- ・天然資源代替効果あり。





素材寿命の終わり

鉄鋼の製造とリサイクル



鉄は高炉-転炉で作られるが、一度作られた鉄は電炉や転炉で何度でも何にでも生まれ変わる。

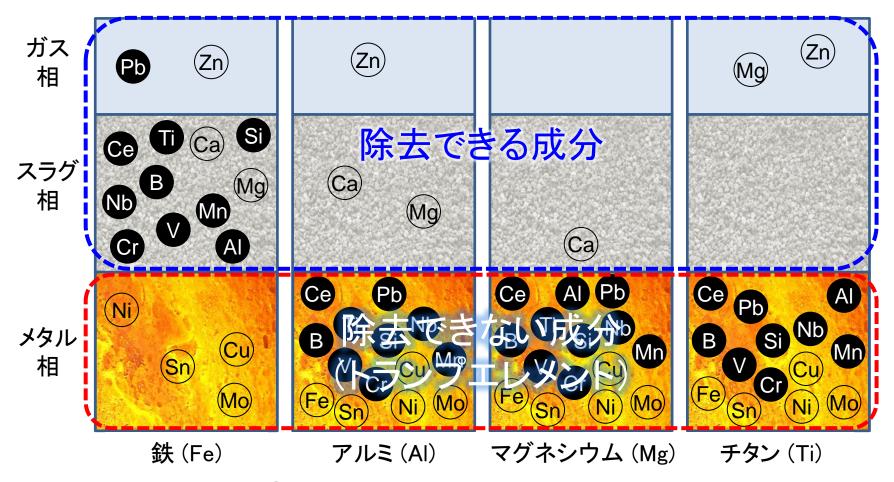
自律的/持続可能なリサイクルの要件

- ① 分別/選別が容易 →鉄(だけ)は磁石に付く
- ② 再生のための負荷が低い →金属は溶かすだけで再利用可
- ③ 経済合理的なリサイクルシステムが存在→金属は古来より有価物として取引されている

Closed-loop Recyclingに必要な追加要件

- ④リサイクルによる品質低下が起こりにくい
- ⑤多様な製品に再生可能

リサイクルプロセスにおける不純物除去

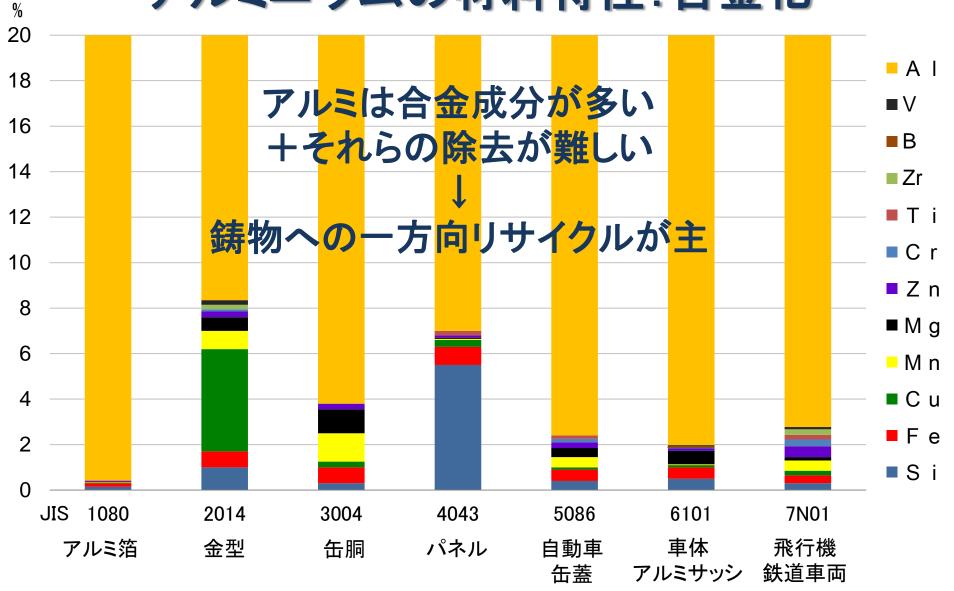


E:鉄からは除けるがAI、Mg、Tiからは除けない元素

平木岳人, Xin Lu, 中島謙一, 松八重一代, 中村愼一郎, 長坂徹也: 軽金属のリサイクル性に関する熱力学的検討, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会(2012) 23 269を一部改変

鉄の混入元素の多くは除去可能。除けない金属もほとんどは磁気選別可能。

アルミニウムの材料特性:合金化



鉄鋼の材料特性:組織制御

2007. 6 NIPPON STEEL MONTHLY 粗圧延機→→仕上圧延機→→ ホットレベラ オンライン水冷プロセス CC 0000 温度変化 圧延と冷却の組み合わせで一層強靱化 加熱 什 I FF延 冷却 粗圧延 金属組織の変化 **粒成長抑制** 再結晶 態 延伸 強冷却: 中間冷却: 緩冷却: マルテンサイト ベイナイト フェライト・パーライト

鉄鋼製品は比較的低合金かつ製錬で除去可能。 組織制御が主なので溶解でリセットされ、別組織を新たに作成できる。

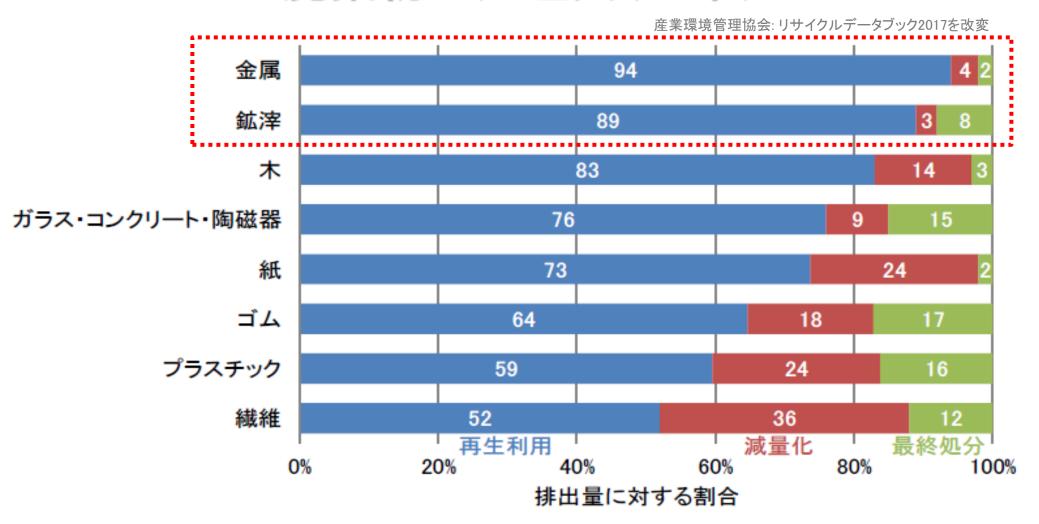
500~600N/mm2

クラス

600~800N/mm²

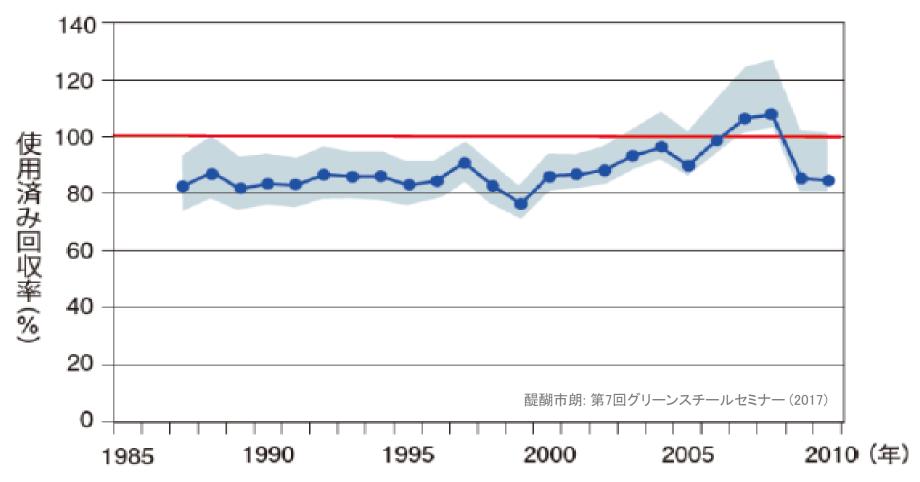
800N/mm²超

廃棄物の処理法(日本)



金属、鉱滓は他素材と比べて再生利用率が高い

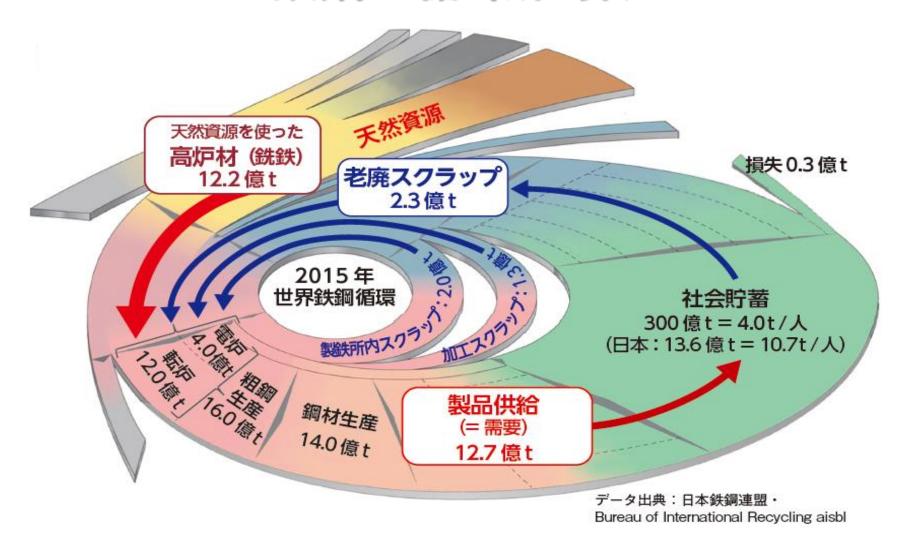
鉄鋼の老廃スクラップ回収率(日本)



鉄鋼のリサイクル率は90%以上。他金属と比べても高い。 鉄はリサイクル性が高く、実際に高度リサイクルされている。

鉄の循環と 生涯環境負荷の考え方

鉄鋼の循環(世界)



鉄鋼はスクラップを介して無限循環している。

無限循環している鉄鋼材料の環境負荷

A Amato, L Brimacombe, N Howard. (1996) Ironmaking and Steelmaking, Vol23, No. 3, 235-241

総製造量 =
$$1 + r + r^2 + \cdots + r^{n-1}$$

総環境負荷 =
$$X_{pr}$$
 + rX_{re} + r^2X_{re} + · · · + $r^{n-1}X_{re}$

総環境負荷
$$= \frac{X_{pr} + rX_{re} + r^2X_{re} + \cdots + r^{n-1}X_{re}}{1 + r + r^2 + \cdots + r^{n-1}}$$

$$= (X_{pr} - X_{re}) \frac{(1-r)}{(1-r)} + X_{re}$$

$$\rightarrow X_{pr} - r(X_{pr} - X_{re}) \qquad (n \rightarrow \infty)$$

r: スクラップ回収率×再生歩留

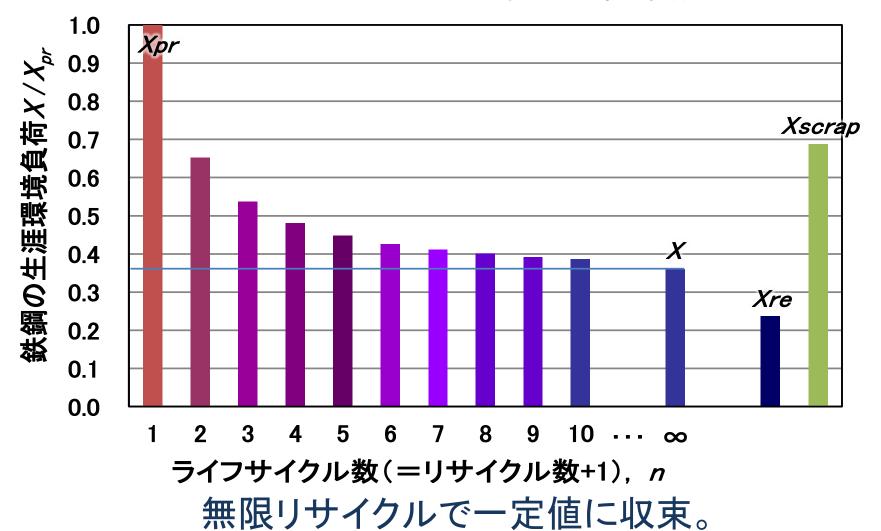
X_{pr}: 高炉の環境負荷

X_n: 電炉の環境負荷

スクラップの環境負荷とリサイクルクレジットも考慮し 無限の生涯で平均化した環境負荷で考える。

鉄鋼の生涯環境負荷

リサイクルシステム全体での環境負荷



無限循環している鉄鋼材料の環境負荷

A Amato, L Brimacombe, N Howard. (1996) Ironmaking and Steelmaking, Vol23, No. 3, 235-241

総製造量 =
$$1 + r + r^2 + \cdots + r^{n-1}$$

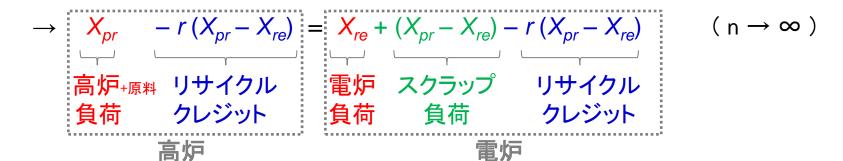
総環境負荷 =
$$X_{pr}$$
 + rX_{re} + r^2X_{re} + · · · + $r^{n-1}X_{re}$

r: スクラップ回収率×再生歩留

X_{pr}: 高炉の環境負荷

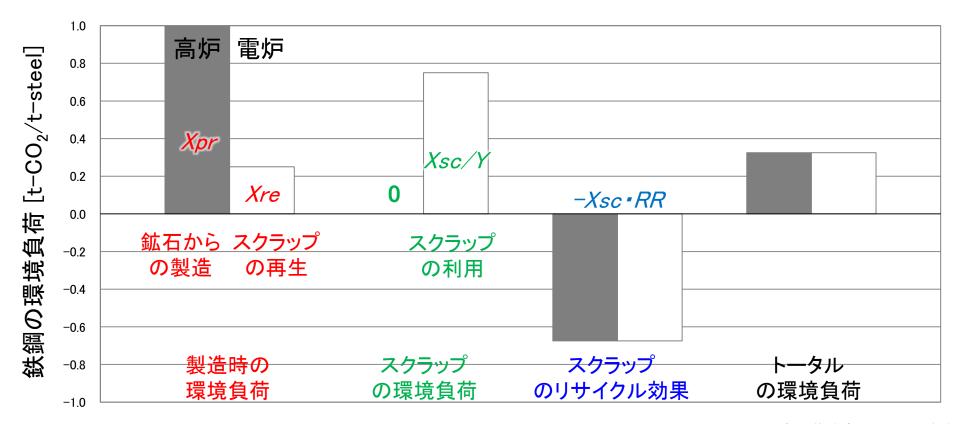
X_n: 電炉の環境負荷

総環境負荷 =
$$\frac{X_{pr} + r X_{re} + r^2 X_{re} + \cdots + r^{n-1} X_{re}}{1 + r + r^2 + \cdots + r^{n-1}} = (X_{pr} - X_{re}) \frac{(1-r)}{(1-r^n)} + X_{re}$$



スクラップの環境負荷とリサイクルクレジットも考慮すると高炉プロセスも電炉プロセスも環境負荷は一緒になる。

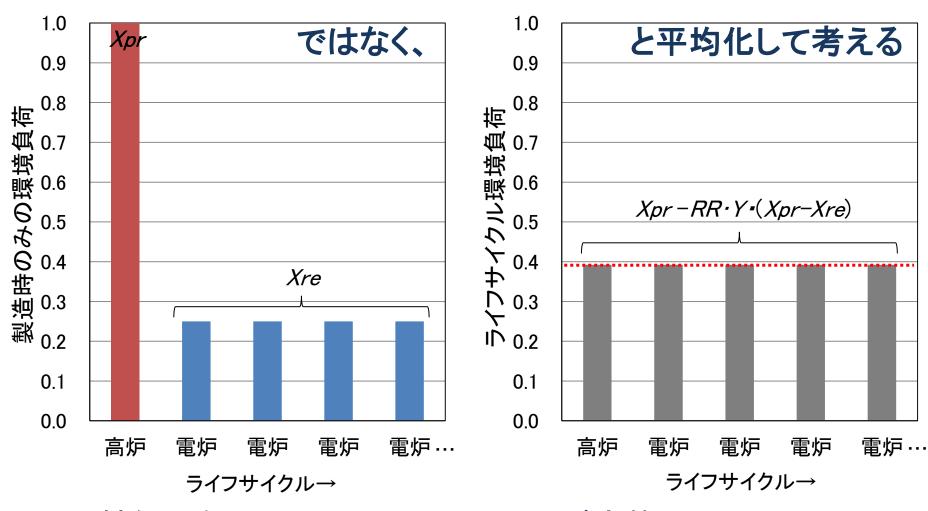
worldsteelのライフサイクル環境負荷の考え方



季刊 新日鐵住金, 20(2017)を改変

- ・鉄の環境負荷は無限リサイクルの生涯で考える。
- ・スクラップの環境負荷も考える。

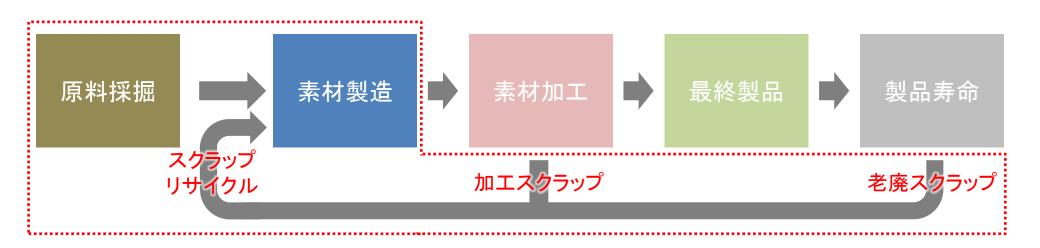
worldsteelの鉄鋼環境負荷の考え方



鉄鋼は無限リサイクルしているのが実態。 →環境負荷をライフサイクルの生涯全体で考える。

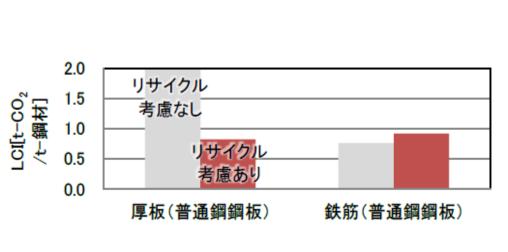
鉄鋼製品のライフサイクルインベントリ (LCI=環境負荷)計算手法の国際規格化

ISO 20915: LCI calculation methodology for steel products を日本の提案により2015年から推進中。 今年中にISO規格化成立の見込み。

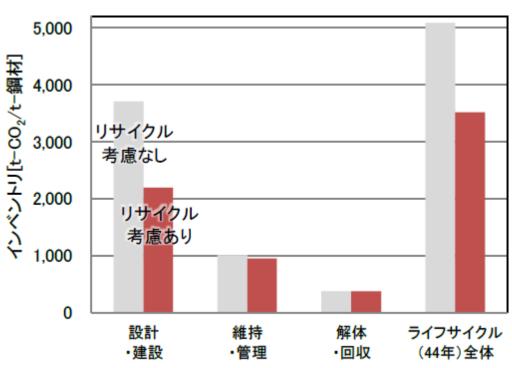


ISO/FDIS 20915

建設における鉄鋼リサイクルを考慮したLCA



日本鋼構造協会: 建設分野における鋼構造物のLCA検討, (2014), 9 を一部改変



日本鉄鋼連盟 建設環境研究会: 鉄鋼製品のリサイクリング効果を 考慮したLCA手法及びシミュレーション事例の紹介 を一部改変

リサイクルを考慮するとライフサイクル環境負荷は下がる

スクラップのグローバル流通

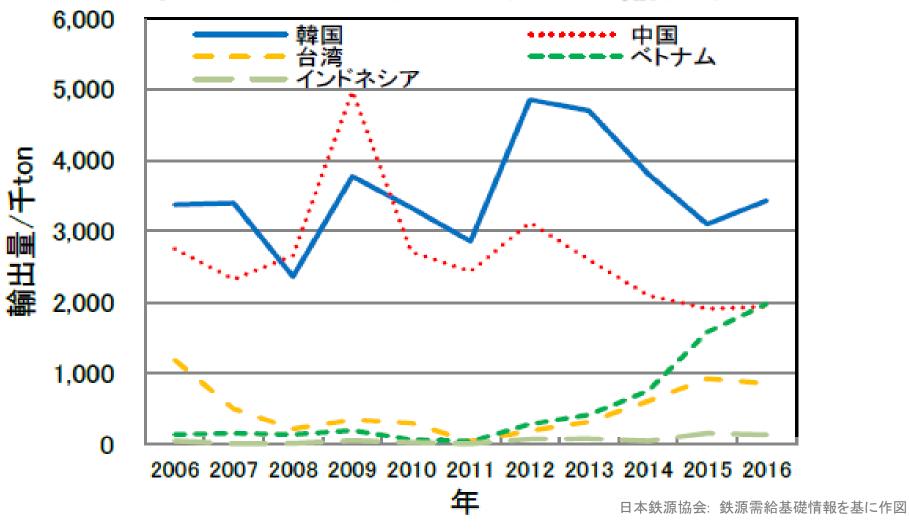
日本はスクラップをもっと国内で 使用すべき?

世界のスクラップ流通



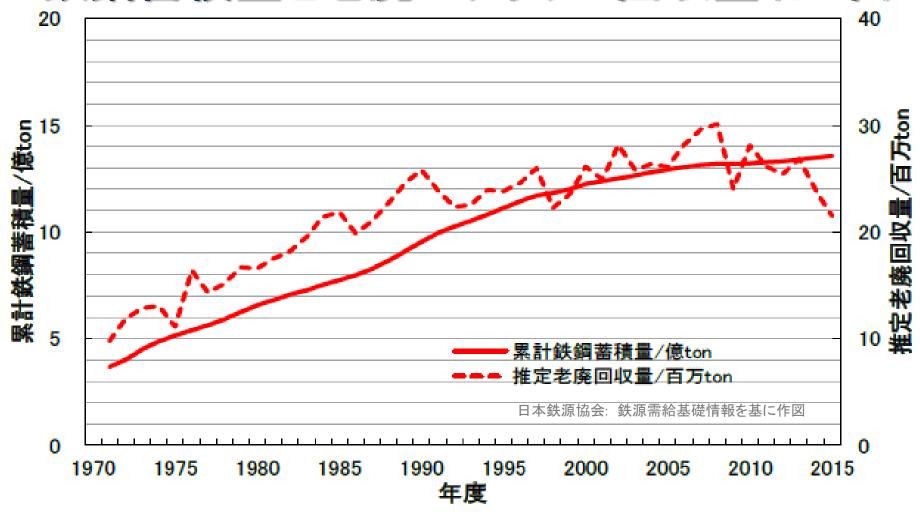
日本は世界有数の鉄鋼輸出国

日本からの主なスクラップ輸出先



日本のスクラップは東アジア各国で輸入されている。

鉄鋼蓄積量と老廃スクラップ回収量(日本)

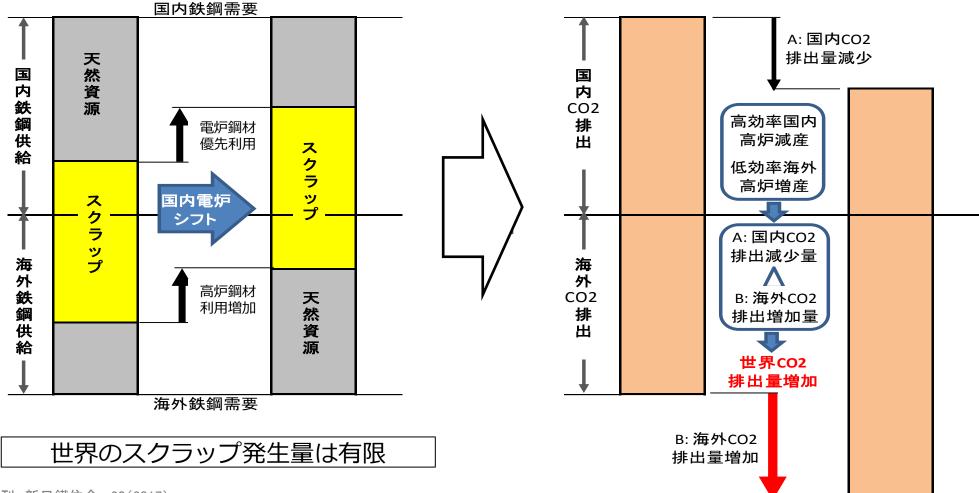


鉄鋼蓄積と老廃スクラップ回収量はほぼ比例するが頭打ち

鉄鋼需給の変化とCO。排出量への影響

鉄鋼需給の変化

CO2排出量の変化



季刊 新日鐵住金, 20(2017)

無理なスクラップ国内優先使用は地球規模のCO。排出量増加を招く



まとめ

- ・素材の環境影響は、製造、使用、廃棄/リサイクルの合計であるライフサイクル全体で考えること(LCA)が重要。
- ・製造時、使用時(軽量性)、リサイクル時、全体(LCA)のいずれで考えても鉄鋼は他素材と比べて環境負荷が低。
- ・磁気選別可能で、再生も容易なので、古来より鉄鋼は ほぼ100%リサイクルされている。
- 鉄鋼はクローズドループリサイクルが成り立っている、 何度でも何にでも再生できるほぼ唯一の工業素材。
- ・無限循環している鉄鋼のLCAは生涯の平均値で考え (worldsteel)、高炉材も電炉材も環境影響は同一。
- スクラップ利用はグローバルで考える必要がある。