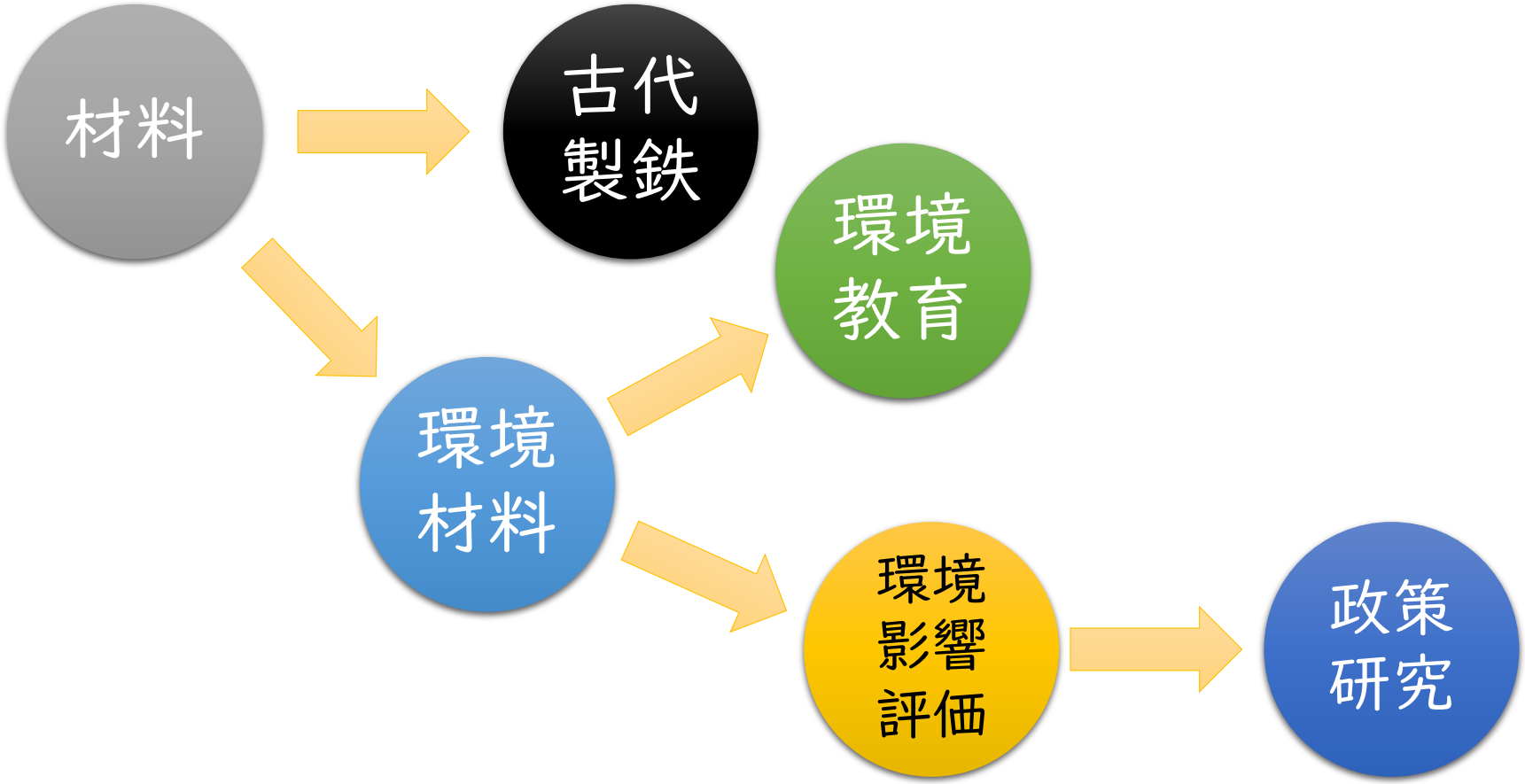
カーボンニュートラル社会が誘発する資源問題

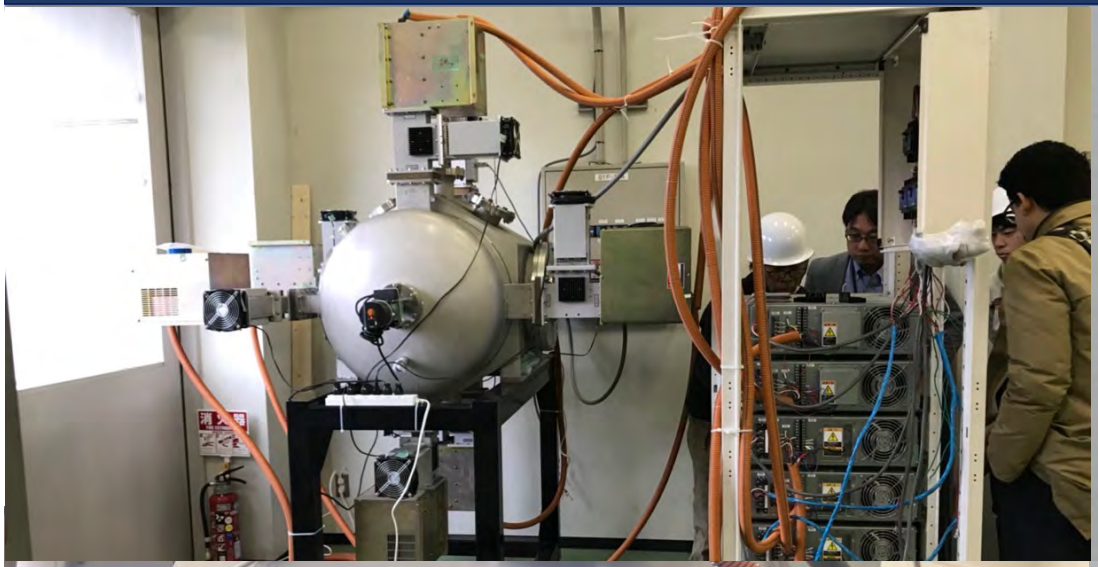
～資源パラドックス問題～

立命館大学　山末英嗣

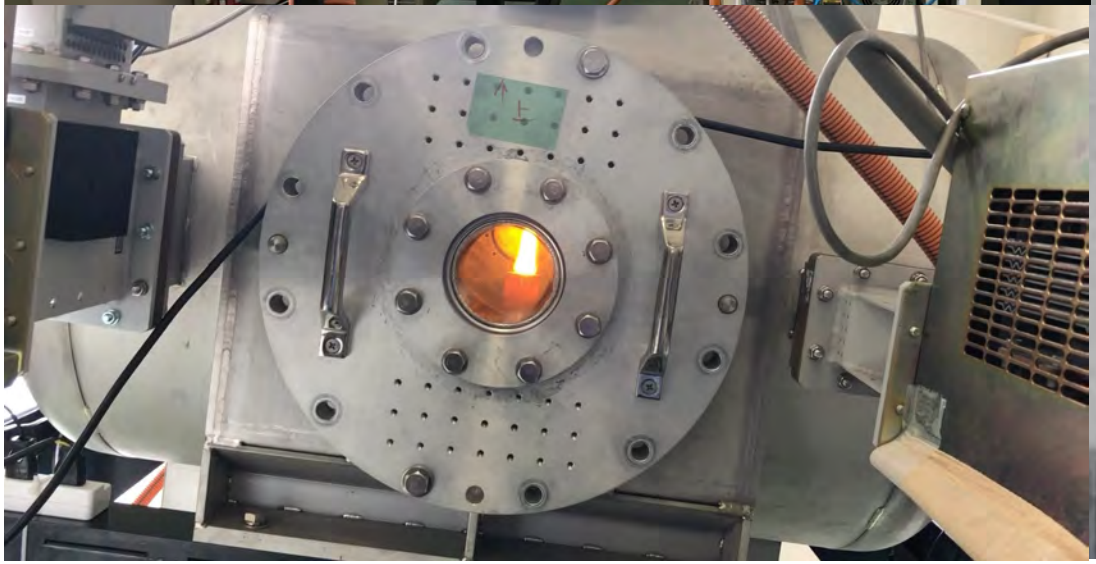
自己紹介：専門の変遷



Technological Approaches (Microwave metallurgy)



Mn recycling from EoL batteries in several 10 sec

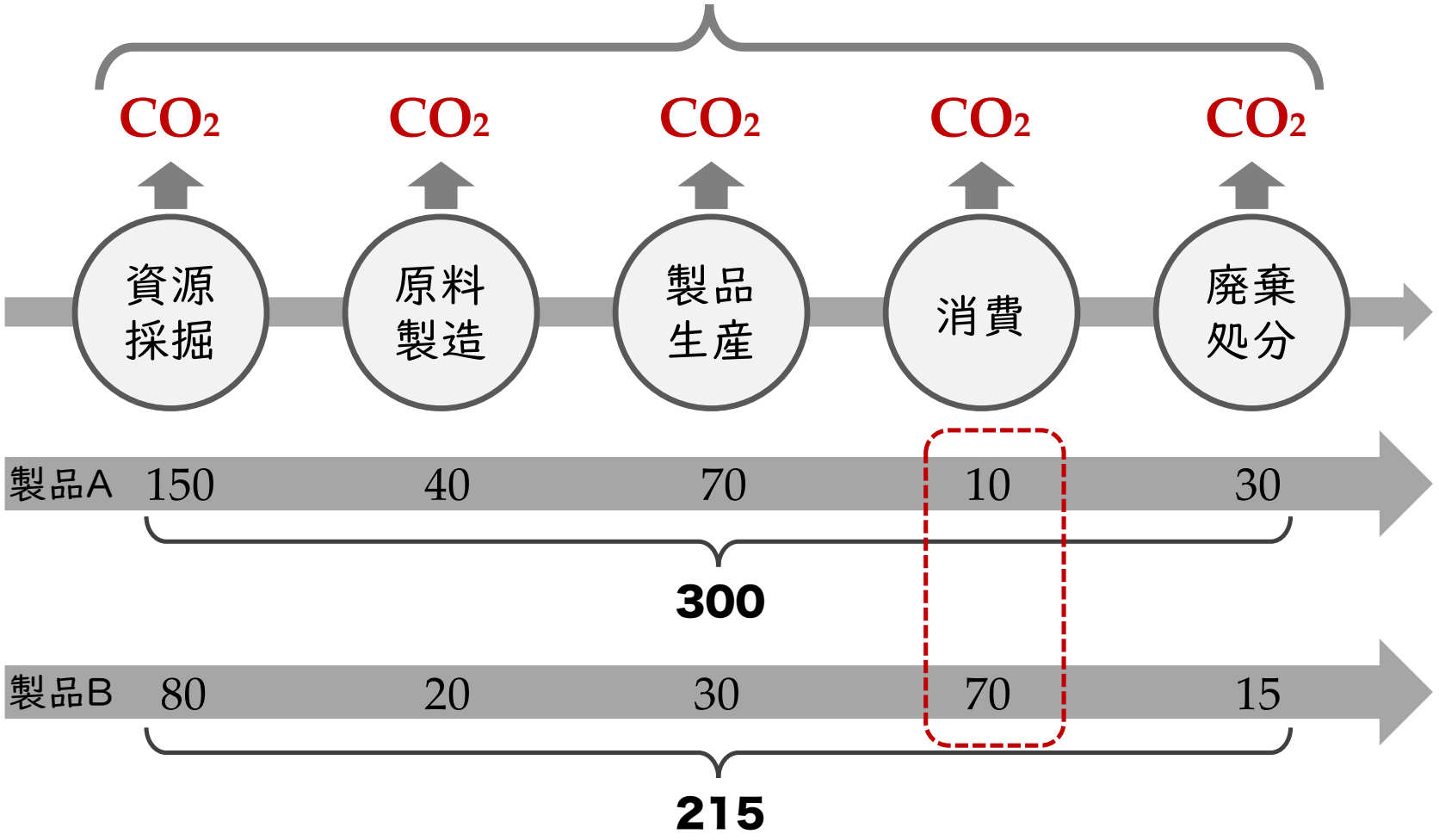


Co/Ni from EoL Lib
in several 10 sec

Advantages;
- Different reaction pathways and rapid reaction
- Higher energy efficiency in small scales system

ライフサイクル全体で考える事の重要性

全てのプロセスの環境負荷を原料採取から処分段階まで含めて評価



現代社会の抱える問題

2050年温室効果ガス排出をネットでゼロ

THE YOMIURI SHIMBUN

読賣新聞

2020年(令和2年) 10月27日 火曜日

菅首相「温室ガス2050年ゼロ」

初の所信表明「産業・社会に変革」

温室ガス「ゼロ」で成長

所信表明 50年に実現 宣言

朝日新聞

2020年(令和2年) 10月27日 火曜日

毎日新聞

10月27日(火) 2020年(令和2年)

「温室ガス2050年ゼロ」宣言

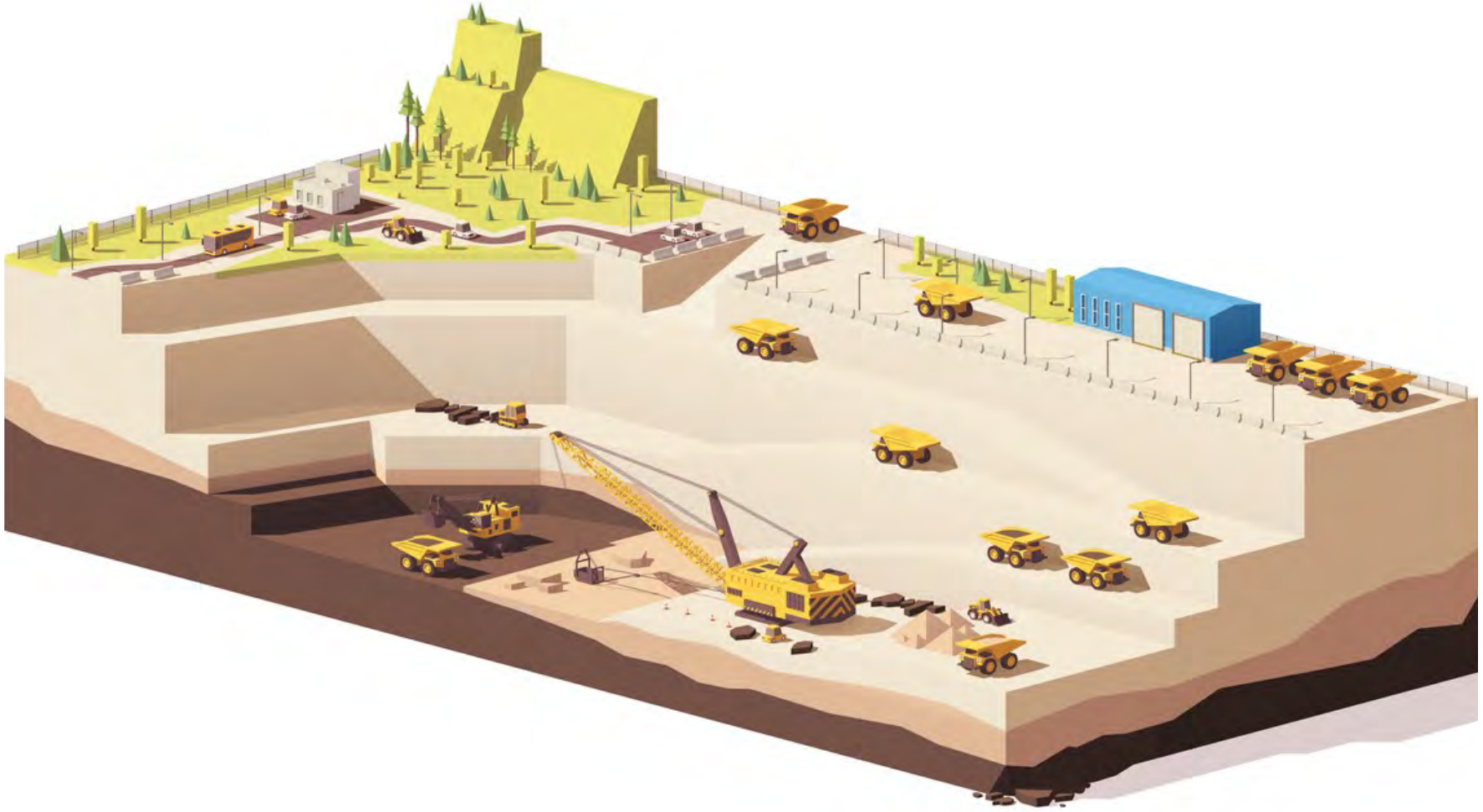
MAINICHI

注目するのは炭素だけでいいのか？

二酸化炭素は経済活動の結果，排出される（事後）
では，経済活動を行うために必要なものは？（事前）

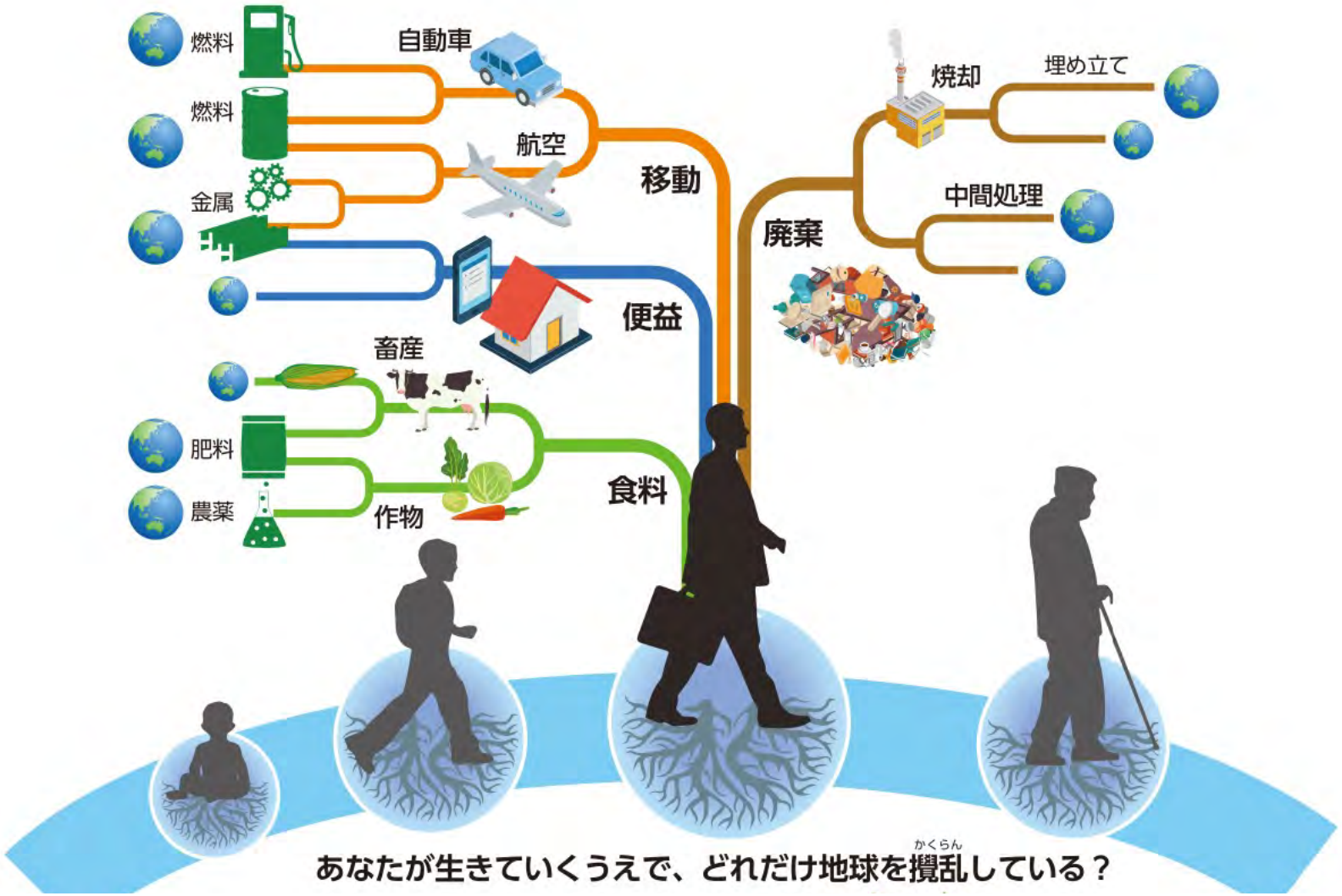
その必要なものに注目しなくていいのか？

資源利用：採掘活動の視点から



採掘活動は資源利用を評価する指標の1つ

我々の生活と資源採掘活動



採掘活動がもたらす影響

セルビアの銅鉱山

採掘活動がもたらす影響：ニューカレドニアのニッケル鉱山

採掘活動がもたらす影響：ニューカレドニアの固有種（カグー）

鉱山ダムの決壊

ブラジルミナス州ブルマジーニョの鉱山ダム決壊事故
（2019年1月25日）

採掘活動と生物多様性の関係（たたら製鉄）

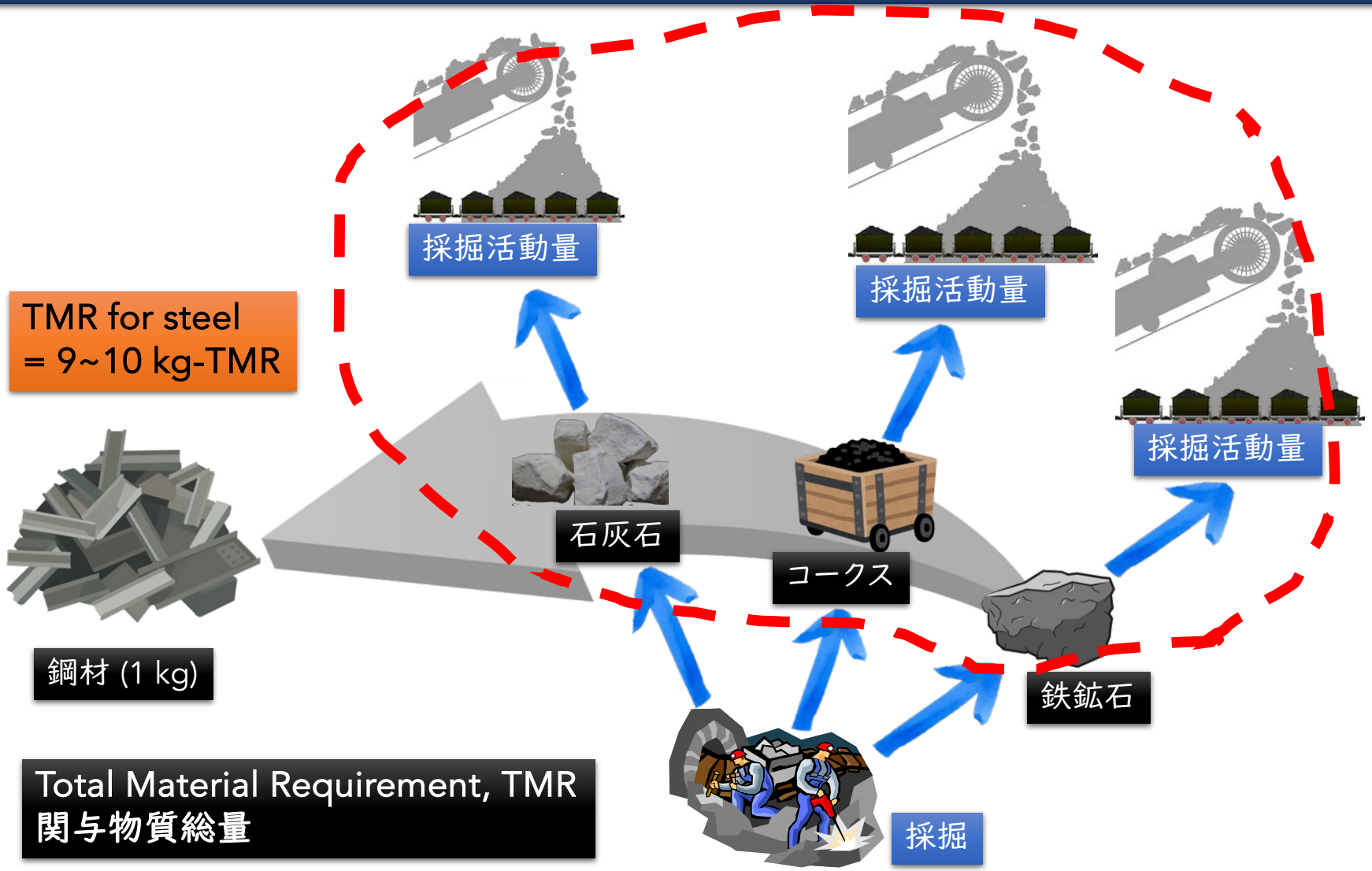
森林再生速度にあわせて移動しながら製鉄

ムササビのような小動物の生息地域

ムササビは大木に穴を空けて巣を作る

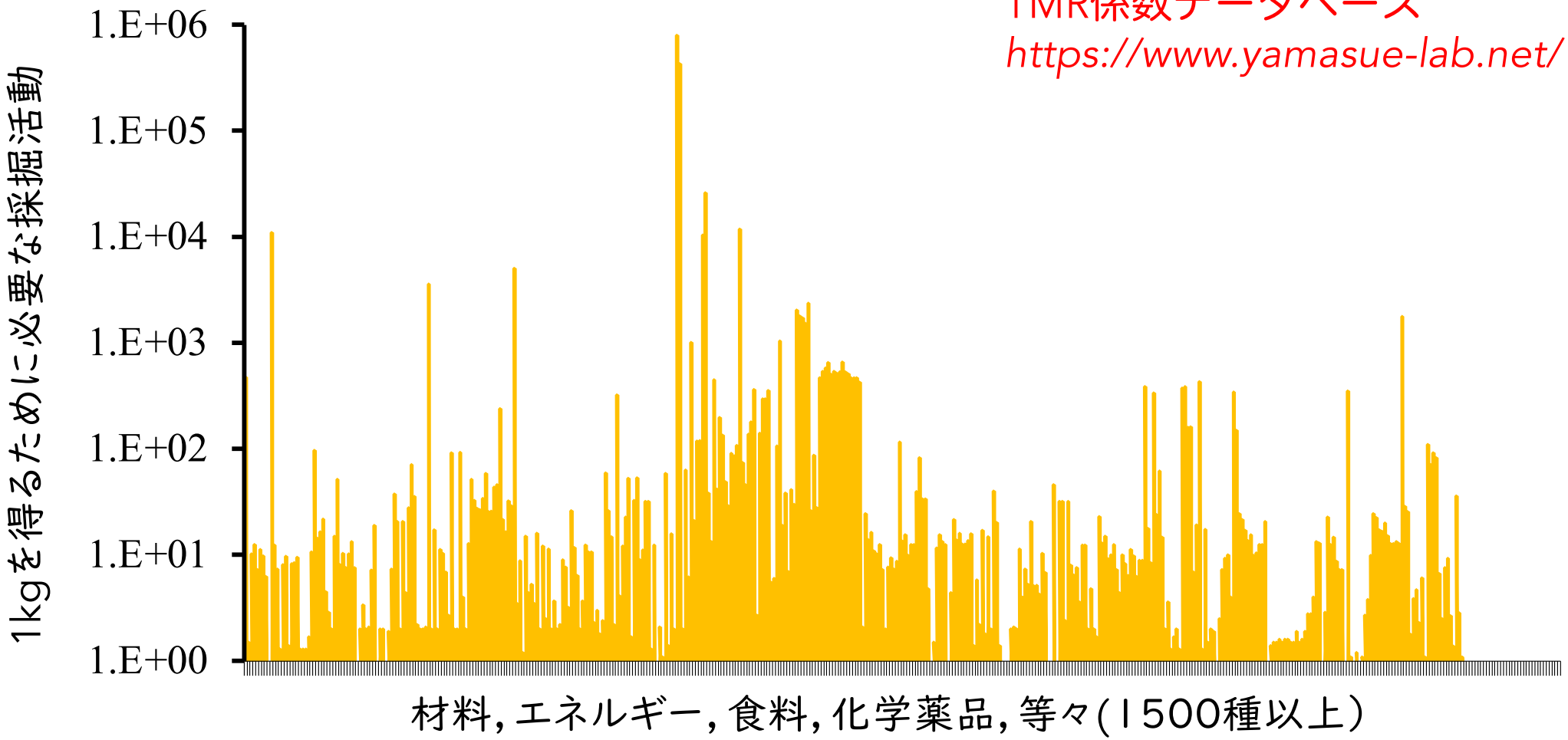
細い木々は炭素吸収するが巣にはならない

採掘活動の定量化


採掘活動量
採掘活動量
採掘活動量
TMR for steel
= 9~10 kg-TMR
石灰石
コークス
鉄鉱石
鋼材 (1 kg)
採掘
Total Material Requirement, TMR
関与物質総量

色々な物質の背後にある採掘活動データベース

TMR係数データベース
https://www.yamasue-lab.net/



素材1kgを得るための採掘活動

鋼材: 10~40 kg

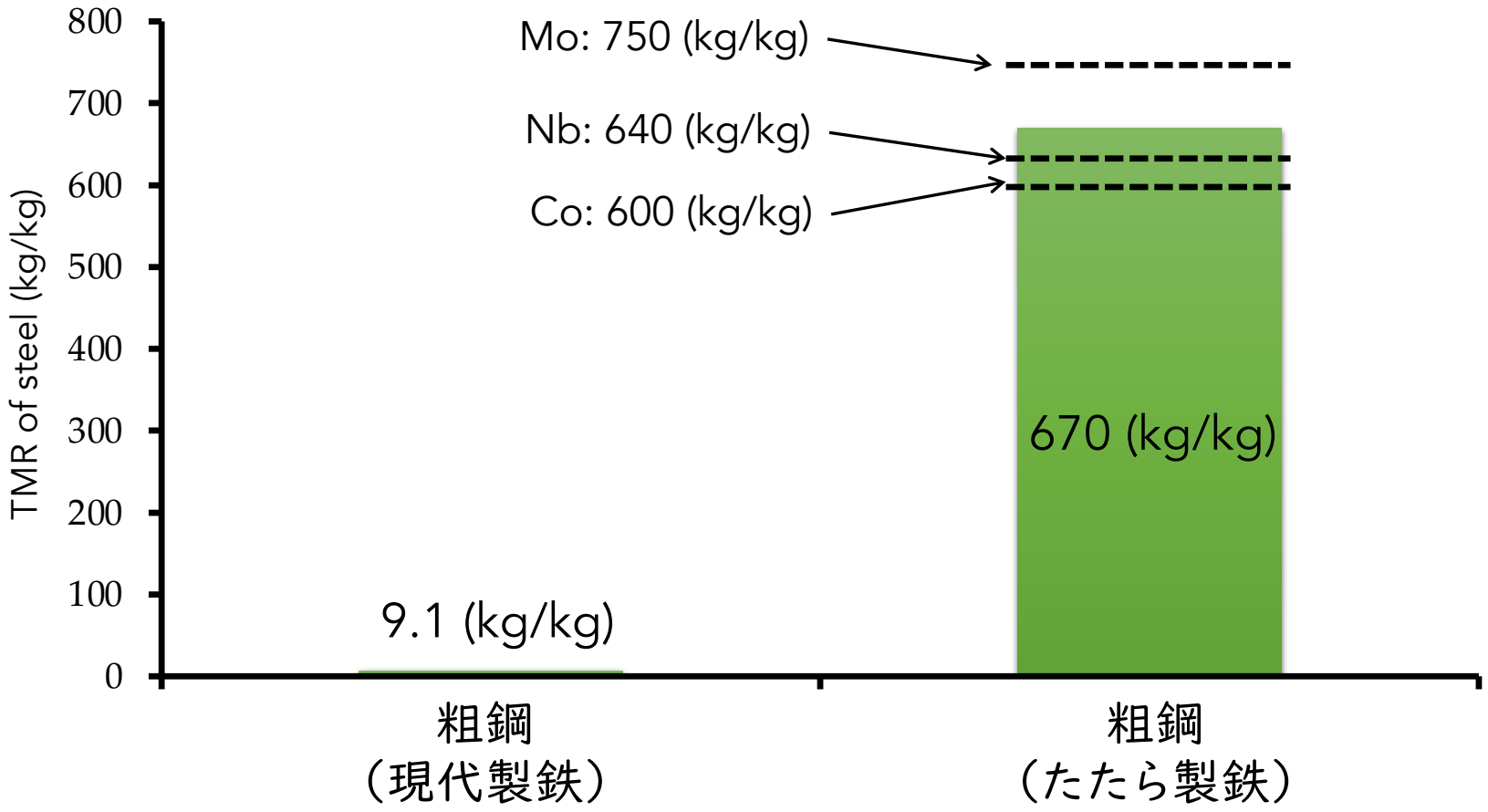
プラスチック: 10-70 kg

アルミニウム: 55-70 kg

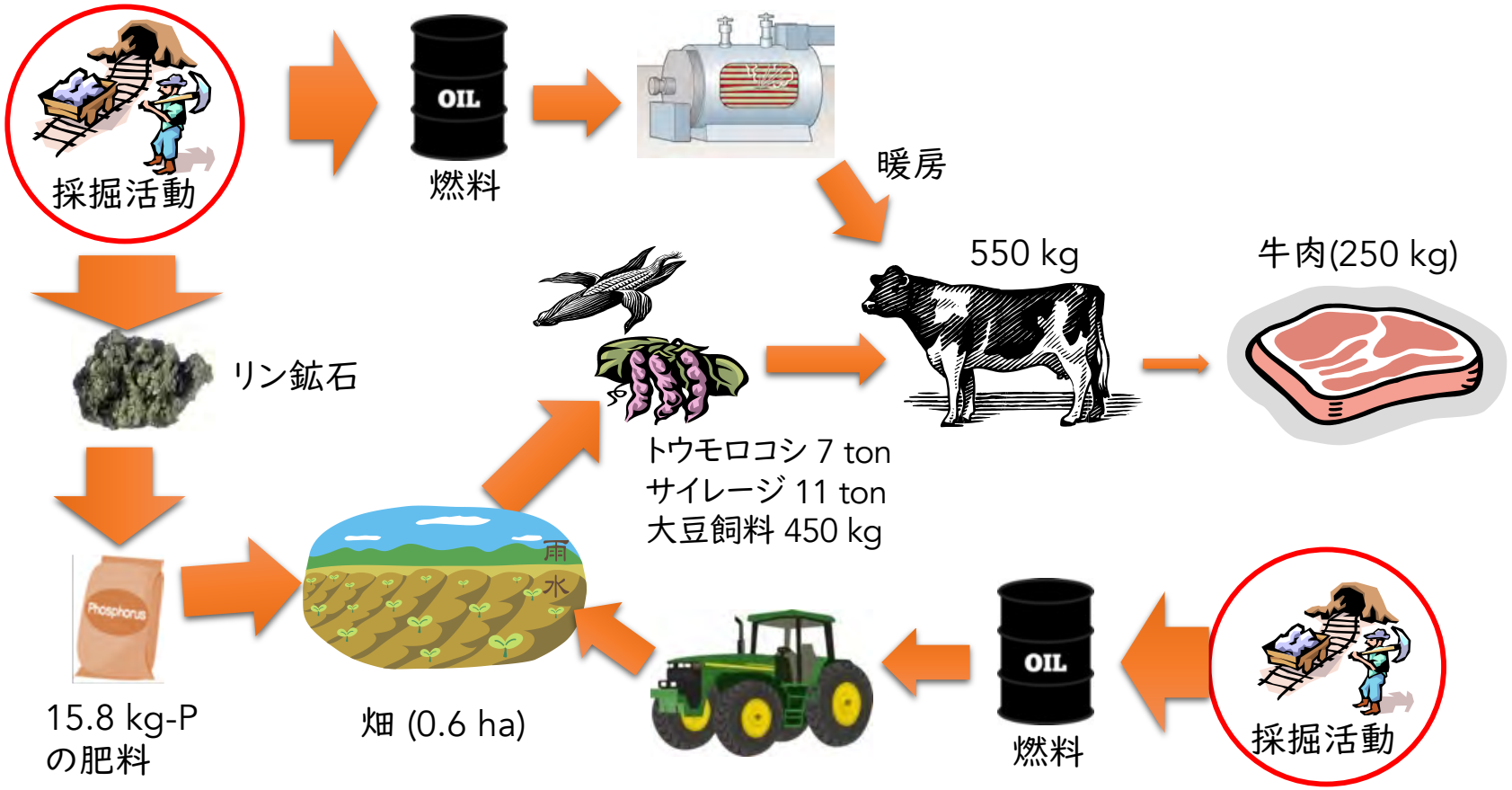
銅: 400~ kg

金: 1,000,000 kg

たたら製鉄の背後にある採掘活動量



食料と資源



牛肉の背後にある採掘活動量
= 50 kg-TMR/kg-beef = アルミと同じくらい

スマートフォンの背後にある採掘活動量

およその重さ：

120~200 グラム

プラの量：

50~100 グラム

金の量：

約0.003 グラム

採掘量：

約20~30 キログラム

資源パラドックス問題

低炭素・脱物質

↓

グリーンイノベーション

↓

追加的な資源

↓

新たな採掘活動

次世代自動車

↓

Nd, Dy, Li, Ni, etc.

この問題はいろいろなレベルでおきている

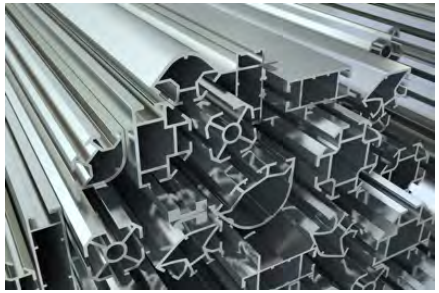
“資源パラドックス問題”
の具体的な事例をいくつか紹介します

Nation　Electric devices　Vehicles　Electricity　Foods　Materials

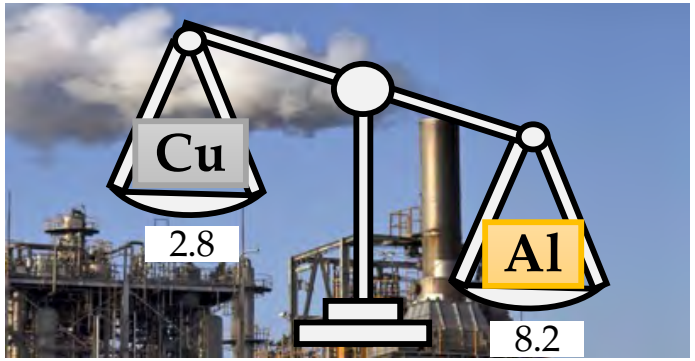
素材代替で起こる資源パラドックス問題

Cu 低品位 還元容易

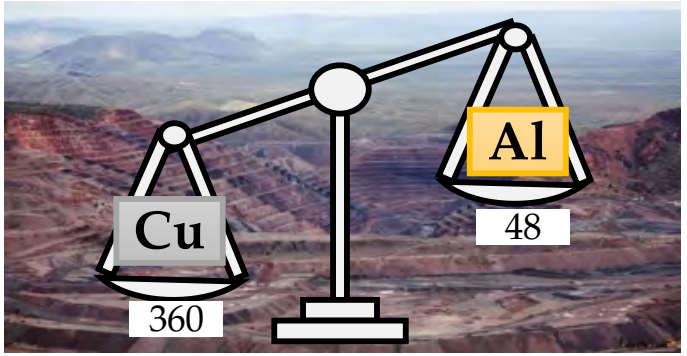
Al 高品位 還元困難



地球温暖化



採掘活動量



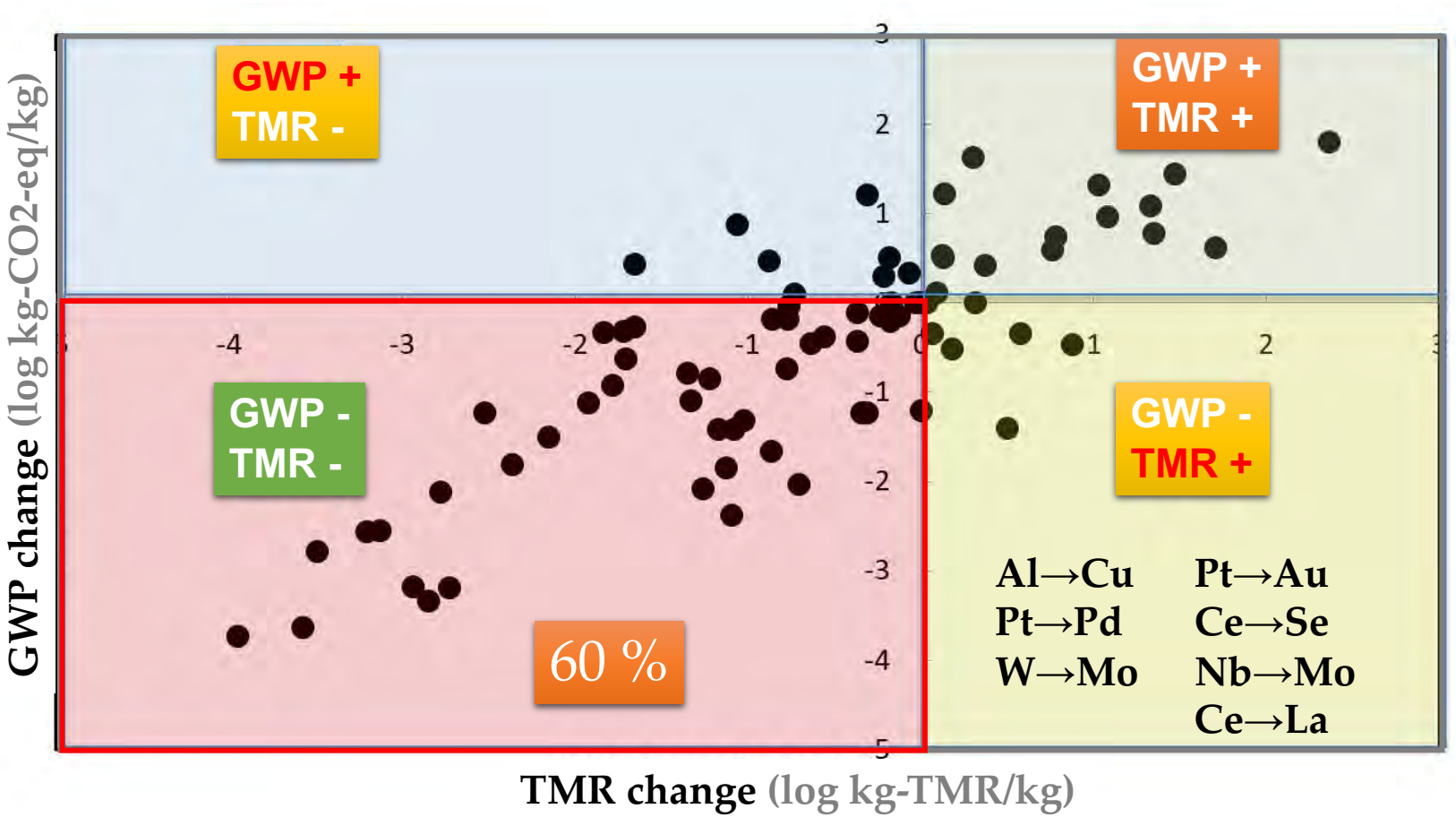
今まではこのような問題は薄々気づかれていたが定量的に議論されていなかった

材料代替例

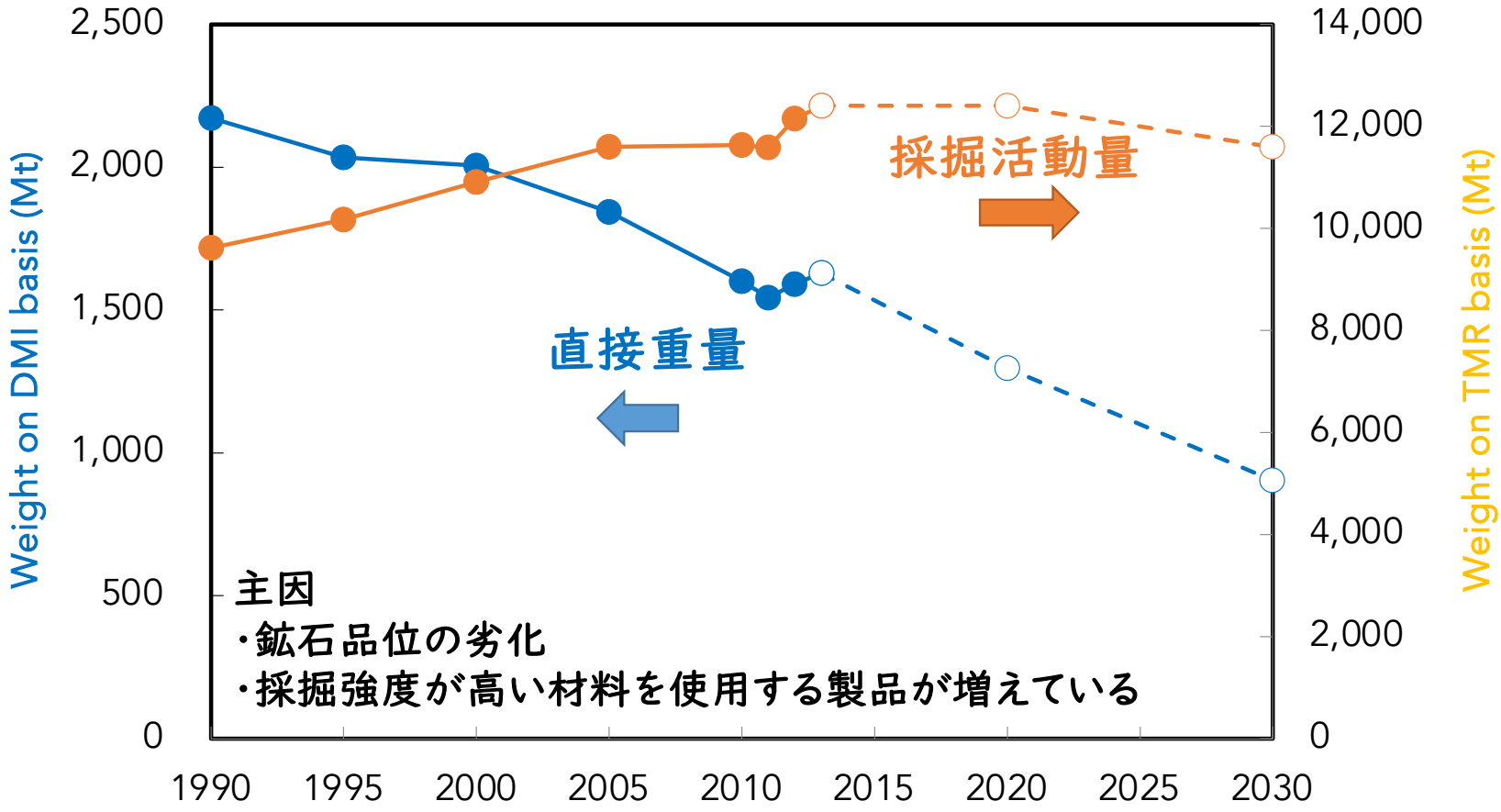
- Ti-Al, La-Gd, La-Y, La-Be, Ce-Gd, Ce-Y, Ce-Be, Sm-Gd, Sm-Y, Sm-Be, Er-Gd, Er -Y, Er -Be, Pr-Yb, Nd-Yb, Nd-Ge, Ge-Ag, Ga-Ta
- Cr-Cu, Cd-Zn, Sr-Se, Mg-Ni, Mo-Ni, Mo-Li, Ni-Ti, Li-Co, W-Sb, Sn-Sb, Te-V, In-Be, Gd-Y, Y-Be, Gd-Hf, Y-Hf, Be-Hf, Hf-Pr, Hf-Yb, Pr-Ge, Yb-Ge, Ge-Ga, Ag-Ga, Tl-Re
- Ba-As, Mn-Ca, Zr-Mn, Zr-Ca, Zr-Fe, B-Fe, Cd-Cu, Sr-Zn, Mg-Mo, Ni-Li, Li-Ti, Li-Al, Ti-Co, Al-Co, Hg-Nb, Hg-W, Hg-Sb, Nb-W, Nb-Sb, W-Sb, Sn-Sb, Sb-Te, Sn-Te, Te-V, La-Ce, La-Sm, La-Er, Ce-Sm, Ce-Er, Sm-Er, La-In, Ce-In, Sm-In, Er-In, In-Gd, In-Y, Hf-Nd, Pr-Nd

T. E. Graedel, E. M. Harper, N. T. Nassar and B. K. Reck, "On the materials basis of modern society," PNAS, 112 (20), pp.6295-6300, 2015.

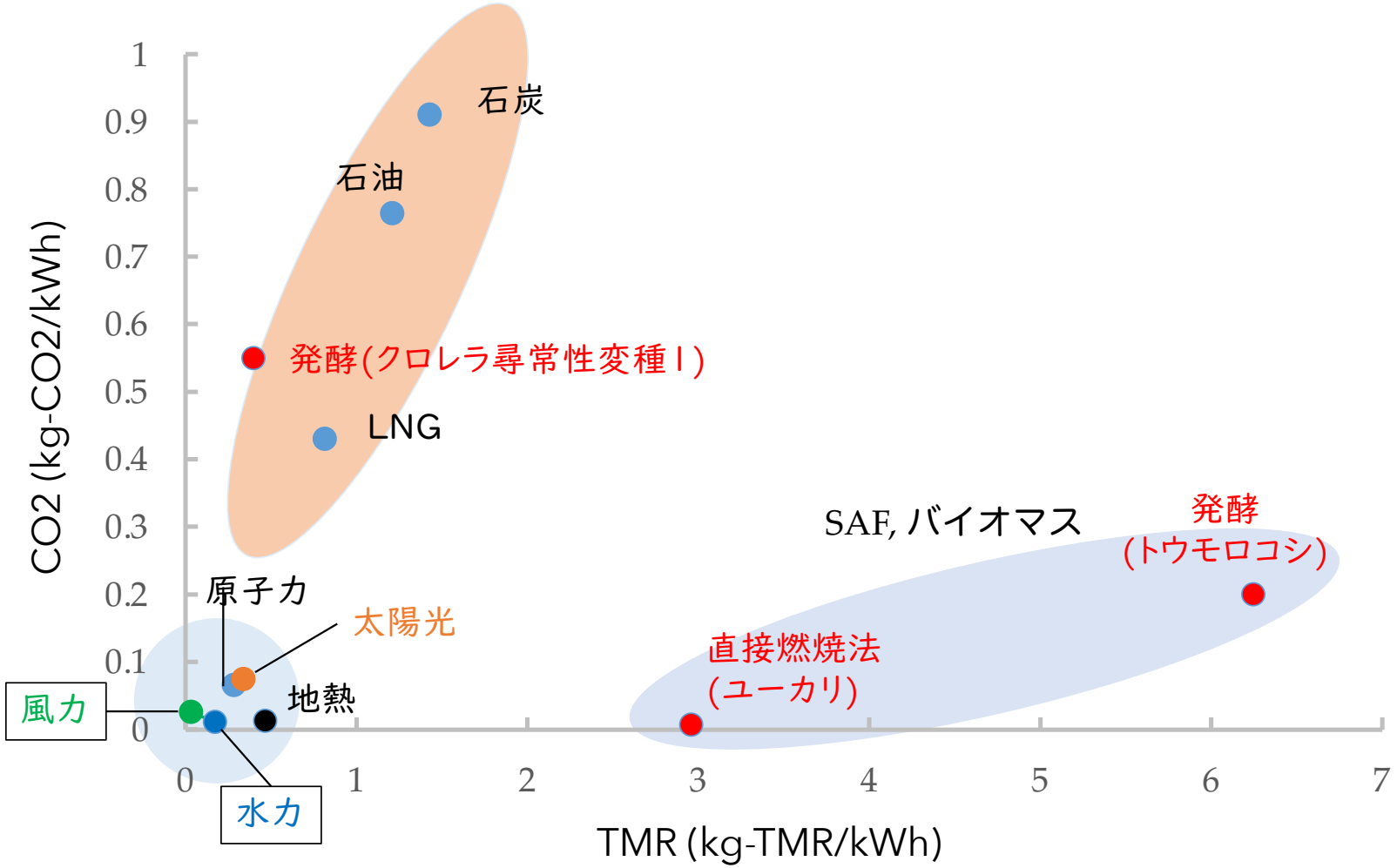
材料代替によるGWPとTMRの推移



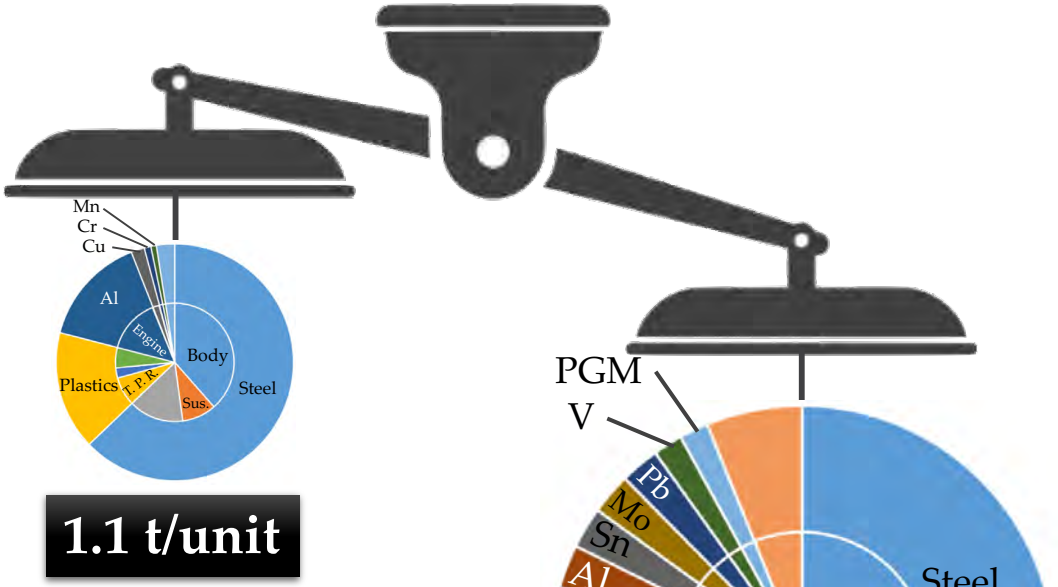
国レベルでの資源パラドックス問題



エネルギーの資源パラドックス問題



製品レベルでの資源パラドックス問題



従来型自動車 *(1992)*

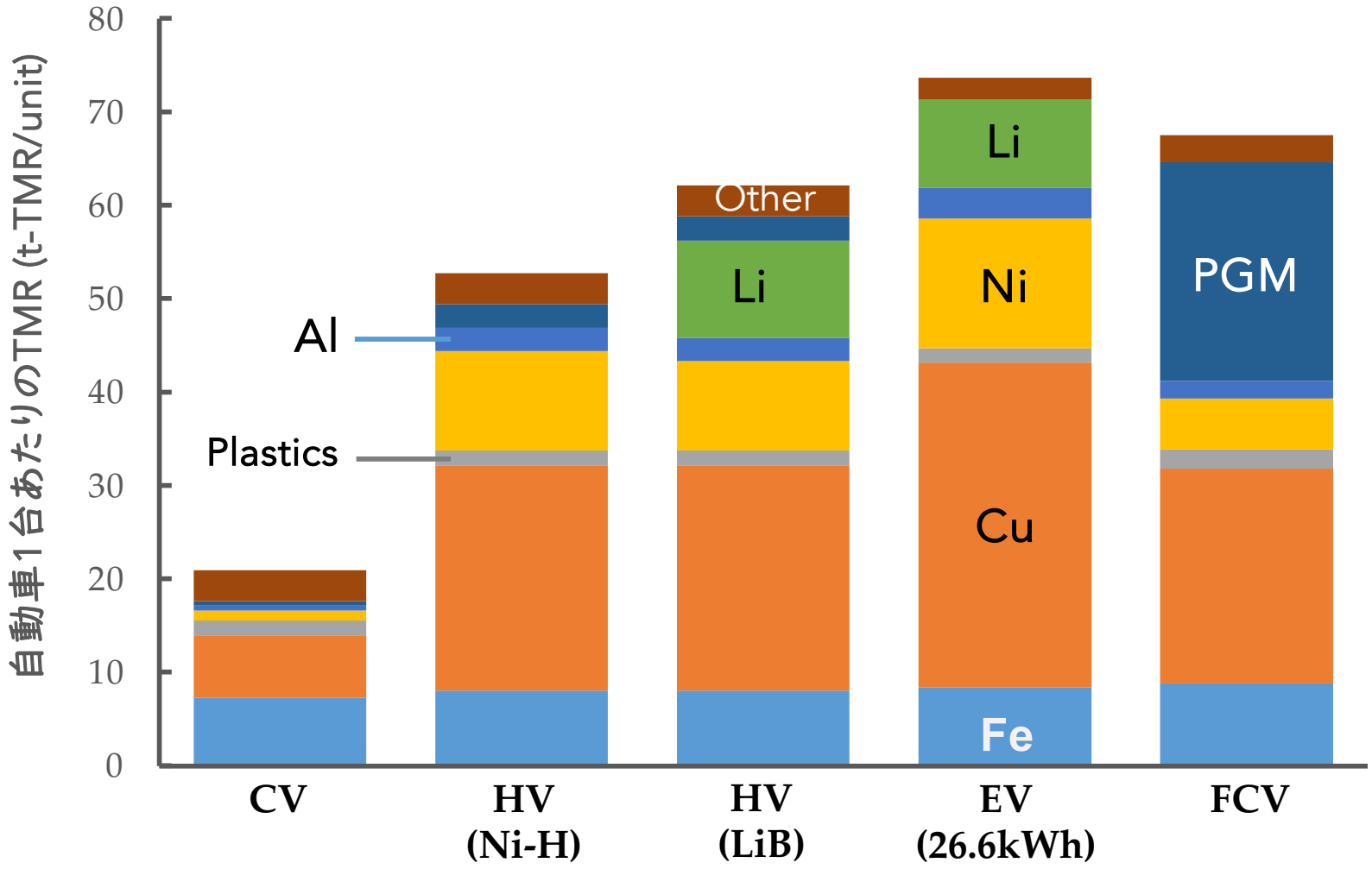
次世代自動車は高い採掘強度

HV & PHV　ニッケル, リチウム,　ミッシュメタル等

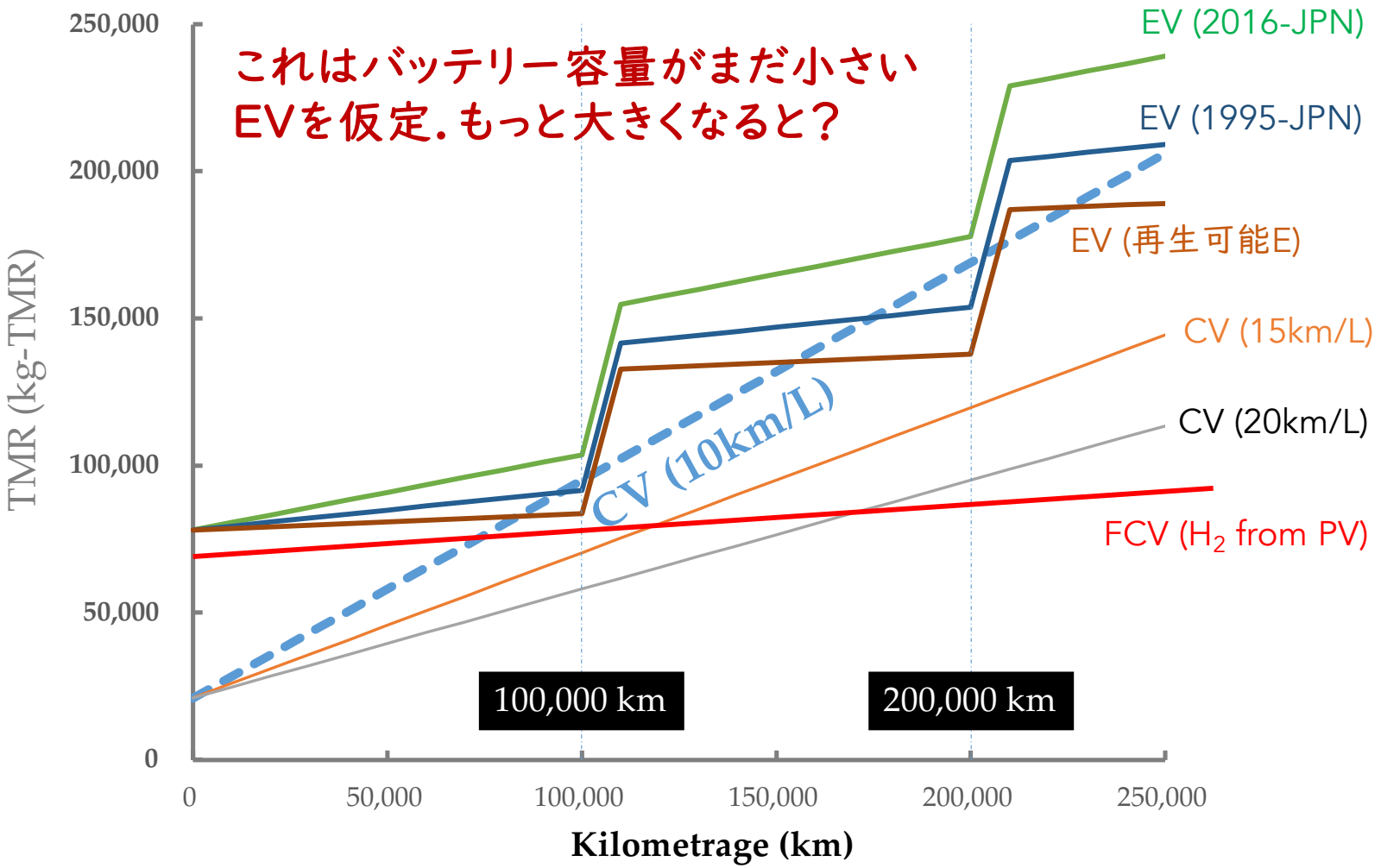
白金族

燃料電池車

次世代自動車の採掘活動量(TMR)

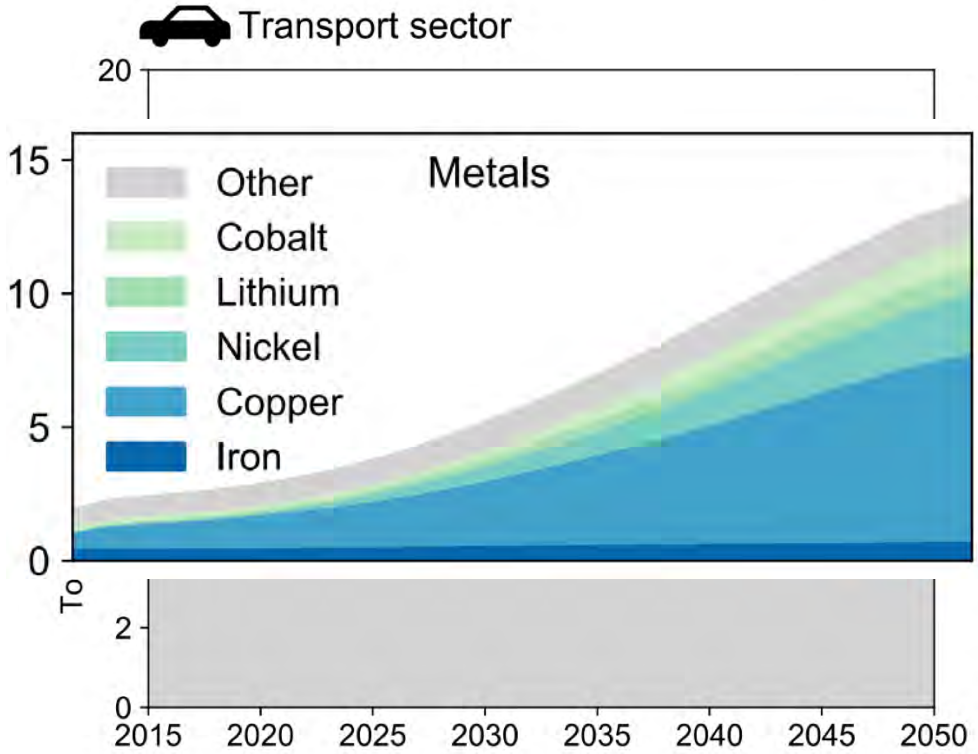


走行段階まで考慮したときの比較



2050年NET Zero達成に必要とされる資源採掘

世界の自動車部門が誘発する資源採掘量



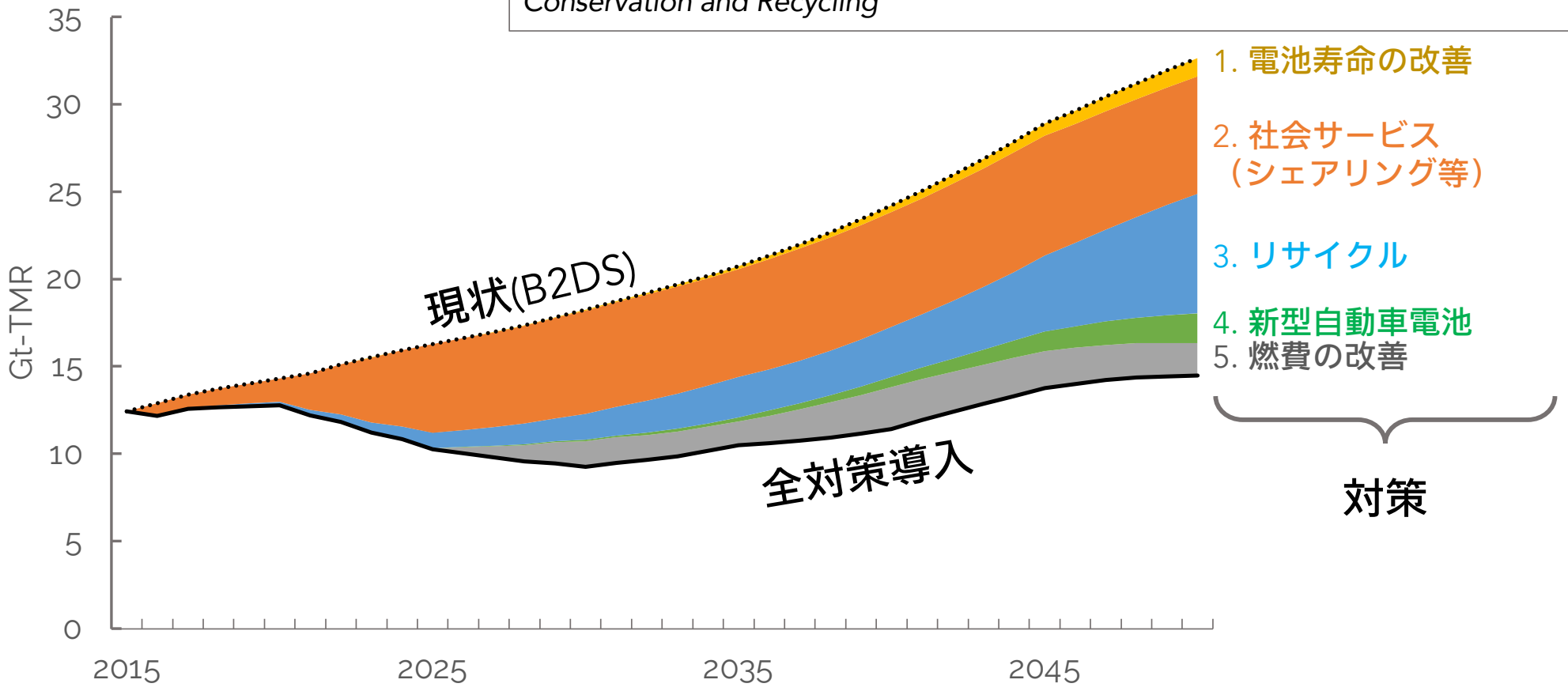
- ✓ 低炭素技術の背後で（金属）資源採掘量が増加．鉄鋼も大きく増加（**鉄鋼が他の金属利用量増加をさらに誘発**）
- ✓ 資源採掘増加の32-40%が資源ガバナンスの貧弱な国で発生
- ✓ 低炭素技術を支える資源をどこから調達するか，どのようにリスクを下げるかは経済安全保障に関わる問題

Takuma Watari, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Damien Giurco: “Sustainable energy transitions require enhanced resource governance”, Journal of Cleaner Production”, Volume 312, 20 August 2021, 127698

どうしたら良い？

次世代自動車の誘発する採掘活動と対策シナリオ

Shoki Kosai, Hibiki Takimoto, Takuma Watari, Eiji Yamasue: "Circular economy can mitigate rising mining demand from global vehicle electrification", *Resources, Conservation and Recycling*

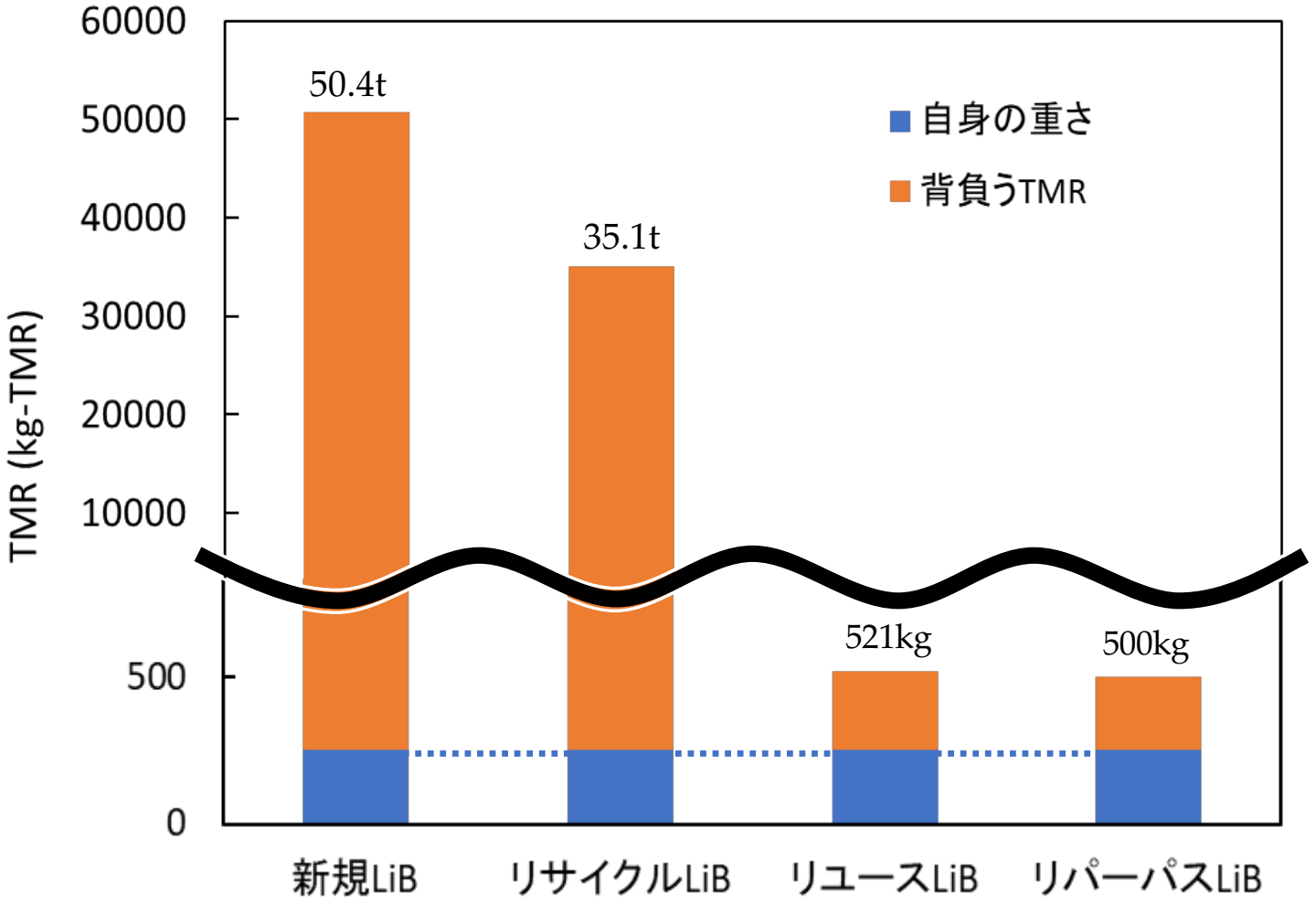


EVの急速な普及をコントロールしつつ，その間にリサイクル技術を確立する必要性

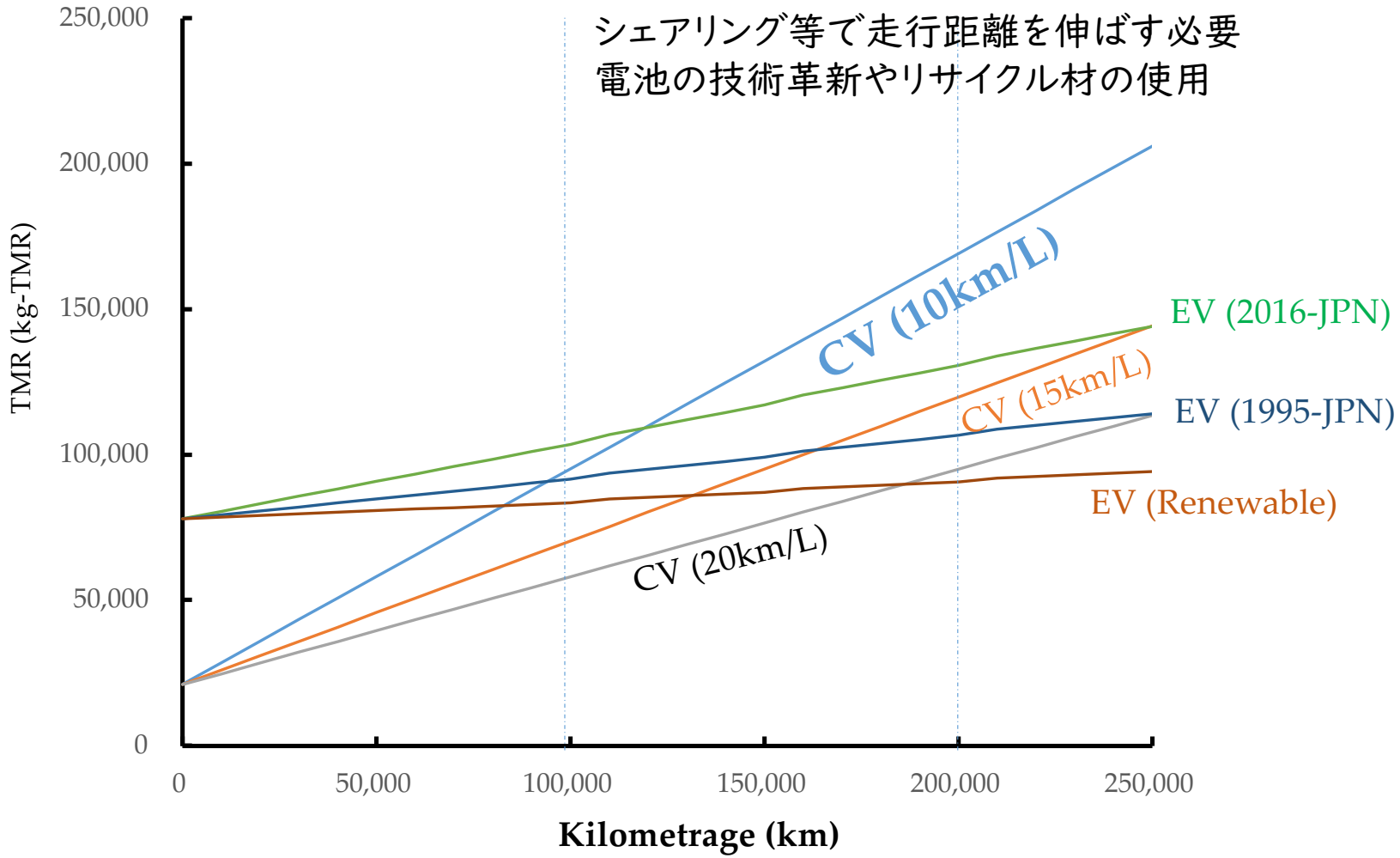
社会サービス

製品の提供からサービスの提供へ（カーシェアリング，シェアライド等）
CAR
SHARING
一度作った製品をとことん使い倒す

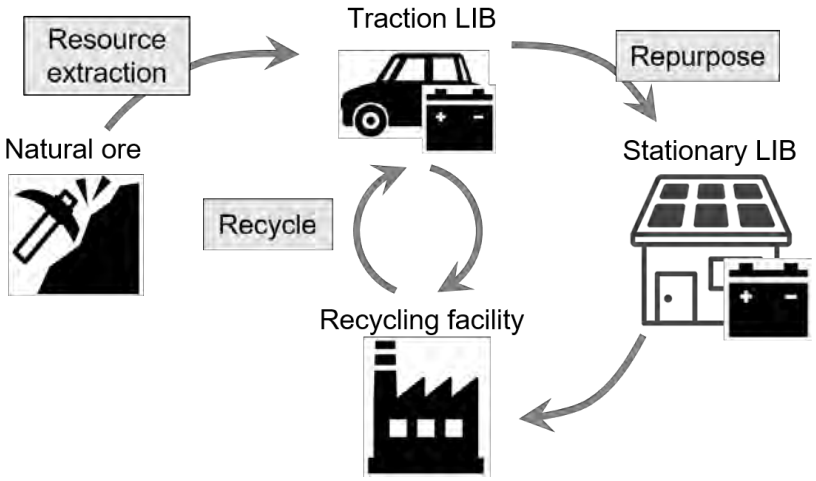
リサイクル・リユース：TMR削減効果



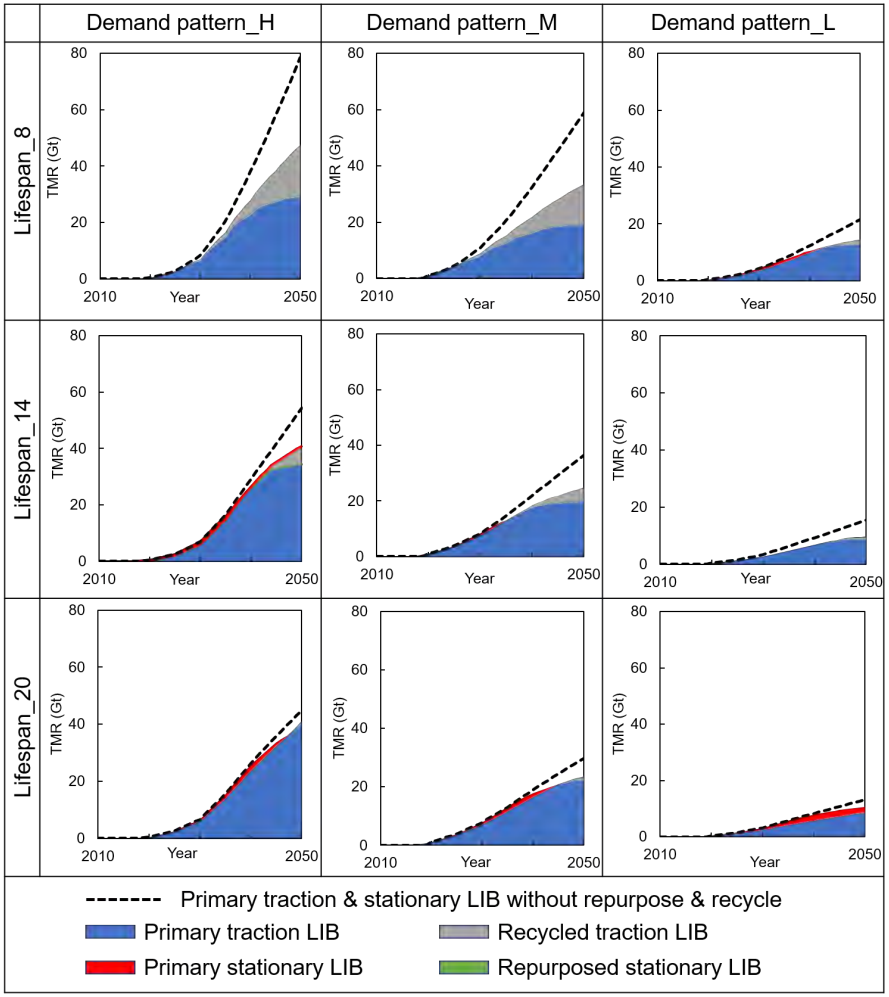
リユースケースを考慮しても・・・・



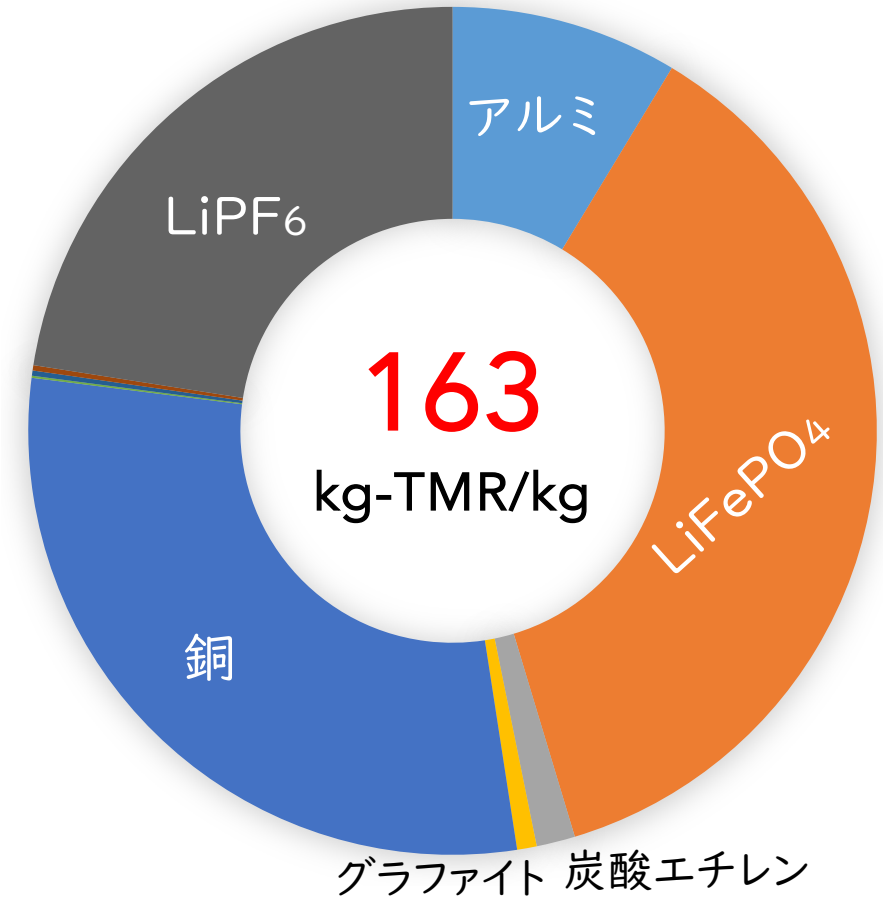
リパーパスとリサイクルの活用



効果は大きいが，2050年以前の過渡期（電気自動車が普及しきるまで）は新規電池の需要が大きすぎて，需要を支えきれない



リン酸鉄系リチウムイオン電池（LFP）のTMR係数



参考：LiB(NMC)のTMR係数
＝ 180 kg-TMR/kg

→資源という視点から見ると，根本的な解決策にならない．また，リンという新たな資源問題を誘発する可能性がある

急激な転換を避ける

ご清聴ありがとうございました
今後ともどうぞよろしくお願い致します

yamasue@fc.ritsumei.ac.jp
Ritsumeikan University
Eiji YAMASUE