

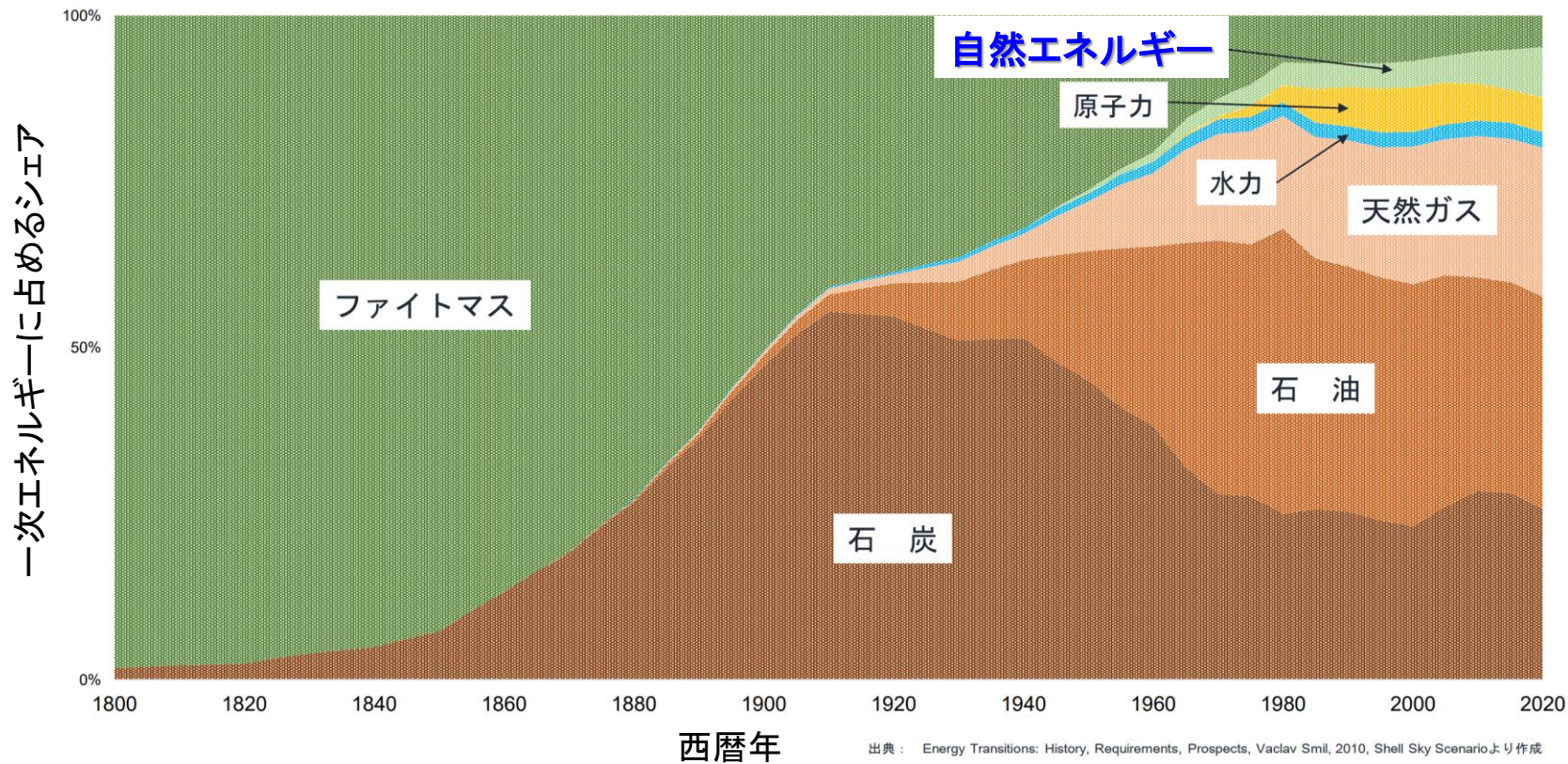
# 風力発電設備の解体とリサイクル

ふくしまエネルギー・環境・リサイクル関連産業研究会  
令和4年度第2回ふくしまエネルギー・環境・リサイクル関連産業研究会  
2023年2月15日@ホテルプリシード郡山

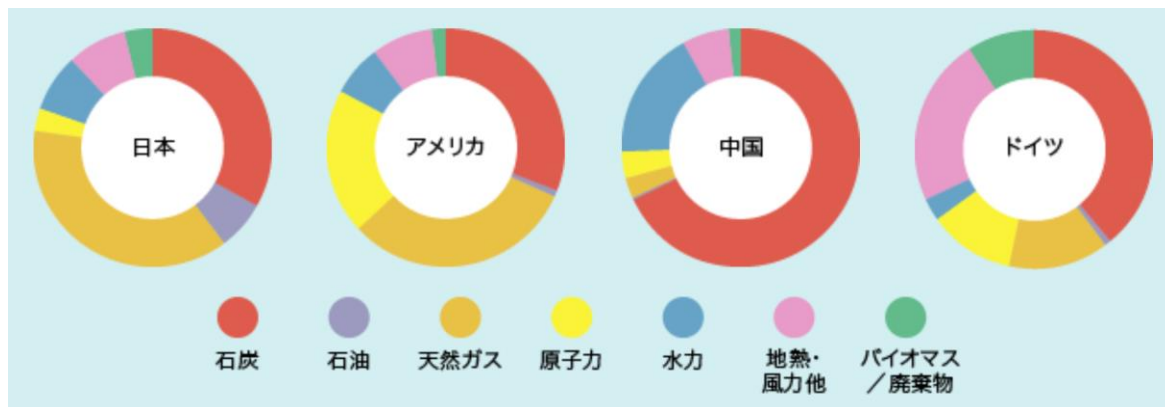
早稲田大学理工学術院(創造理工学部環境資源工学科)

大和田 秀二

# 世界の一次エネルギー構成



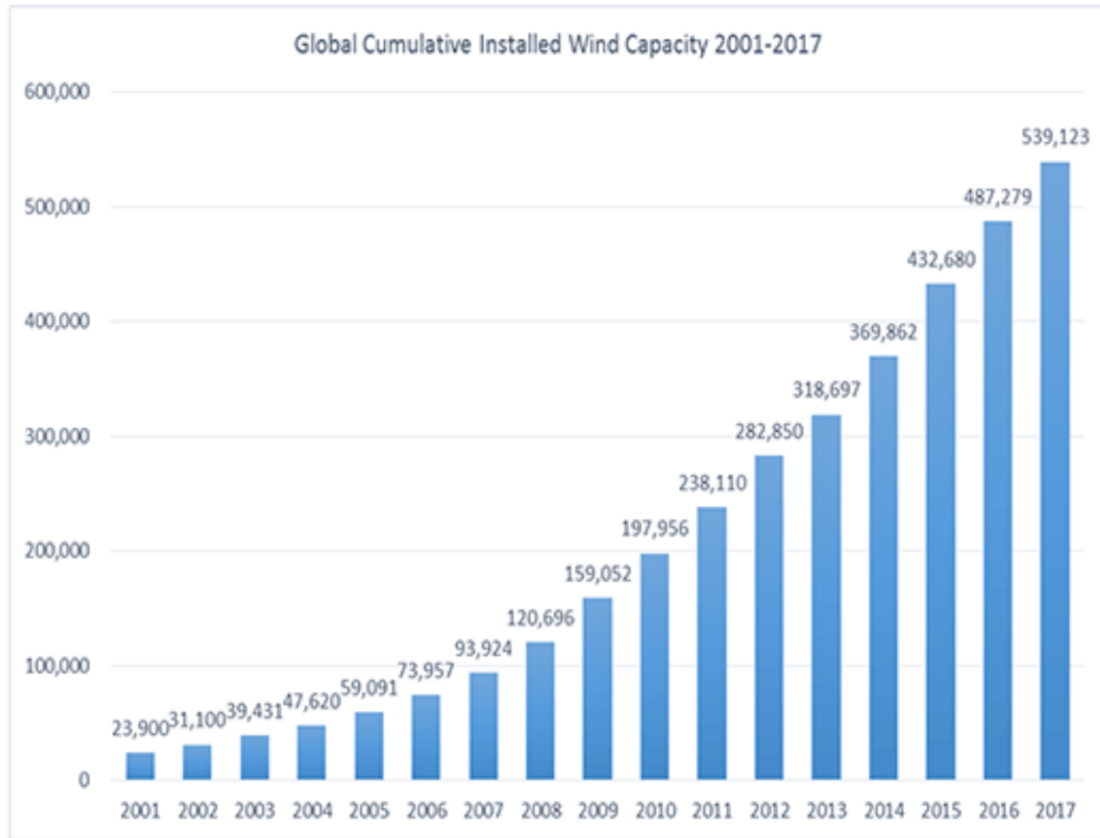
世界の一次エネルギー構成



各国のエネルギー構成

(日本エネルギー経済研究所,  
EDMC/エネルギー・経済統計要覧 2020)

# 風力発電の導入推移

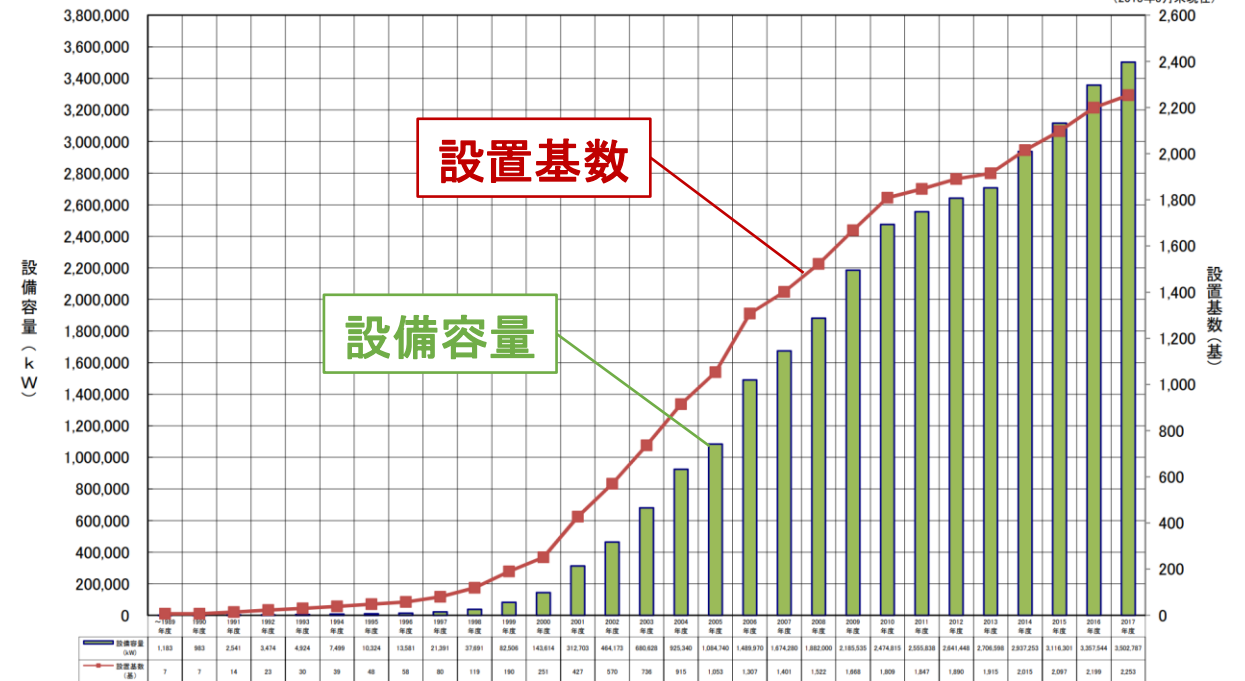


出典: GWEC Global Wind 2017Report

## 世界の風力発電設備容量の推移

## 日本における風力発電導入量の推移

国立研究開発法人  
新エネルギー・産業技術総合開発機構  
(2018年3月末現在)



## 日本の風力発電導入量の推移

# 風力発電のエネルギー変換効率

風の運動エネルギー： 風の受容面積に比例，風速の 3 乗に比例。  
風速が 2 倍になると風力エネルギーは 8 倍になる。

風力発電の電気エネルギーへの変換効率： 最高30～40 %程度。

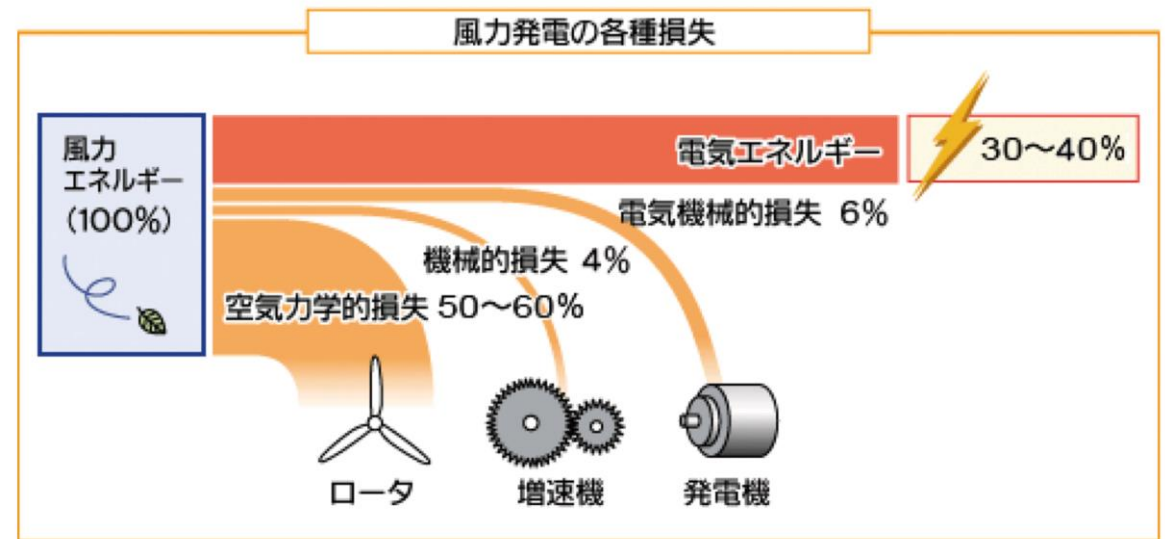
因みに，

水力発電： 80 %

火力発電(LNG)： 55 %

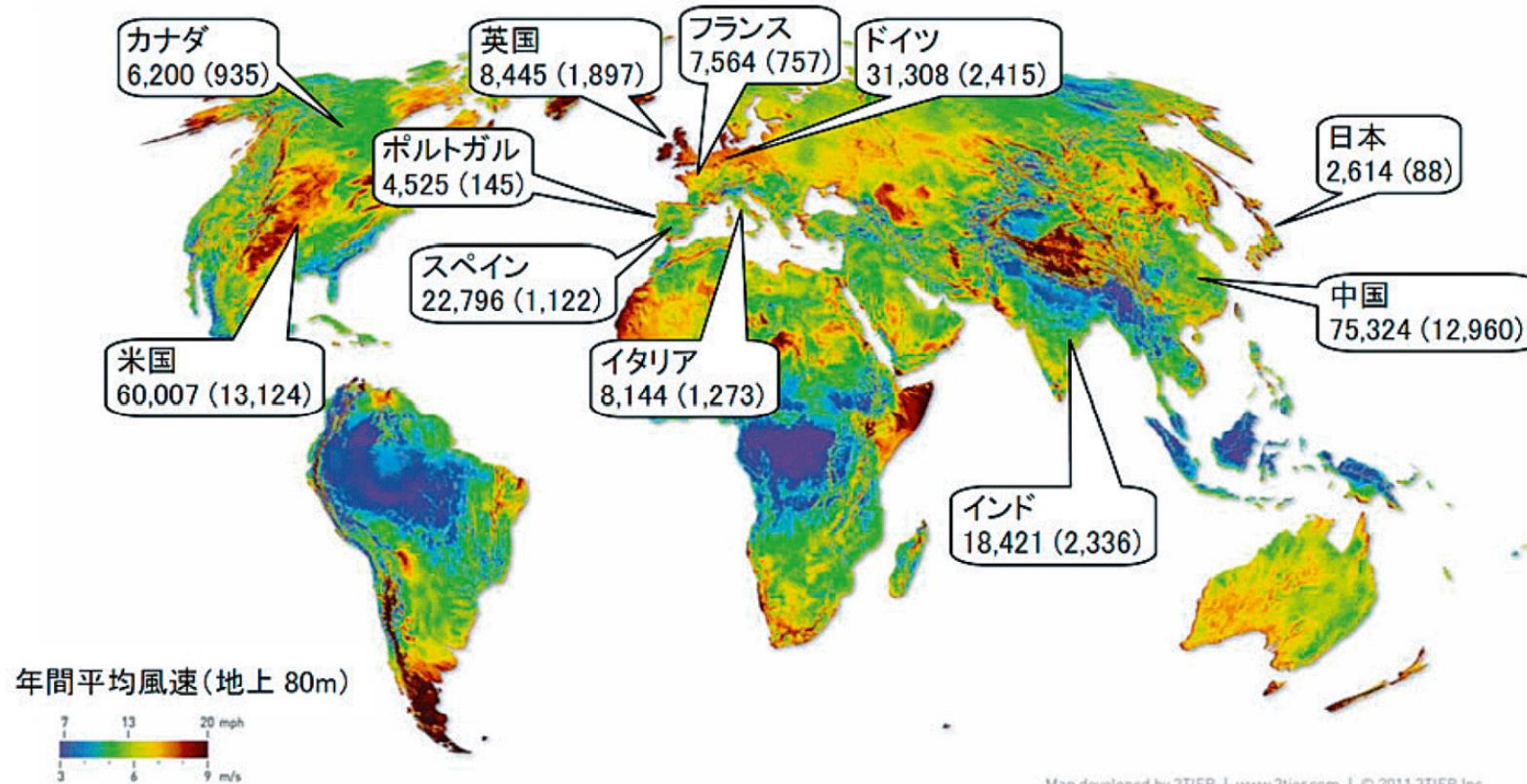
太陽光発電(結晶Si)： 14～20 %

(理論限界は29 %， CISでは最高37 %)



風力発電の各種損失と効率 (NEDO HP)

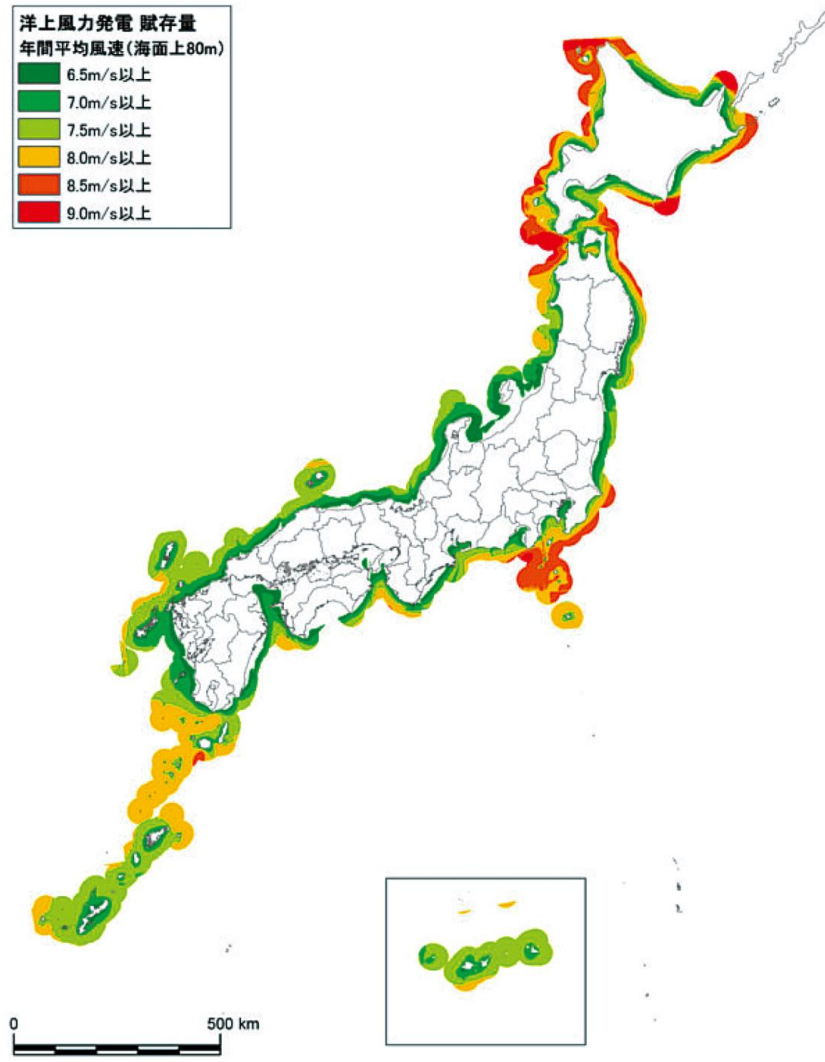
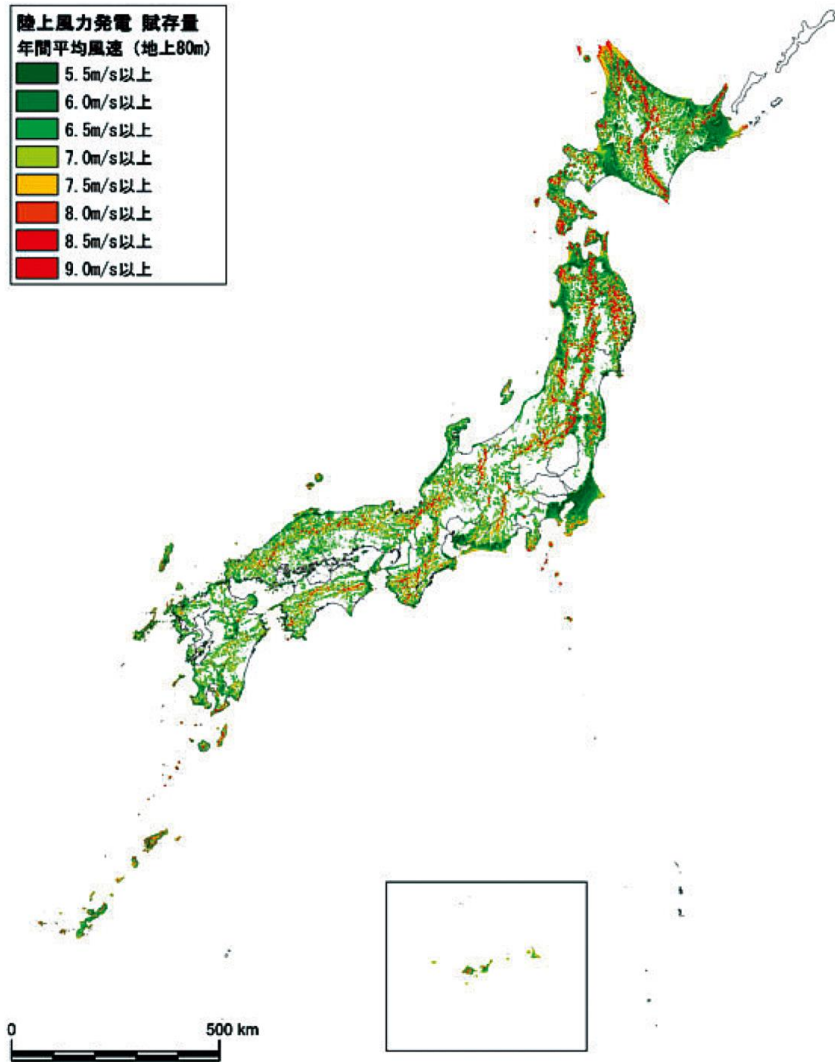
# 世界の年間平均風速分布[MW]



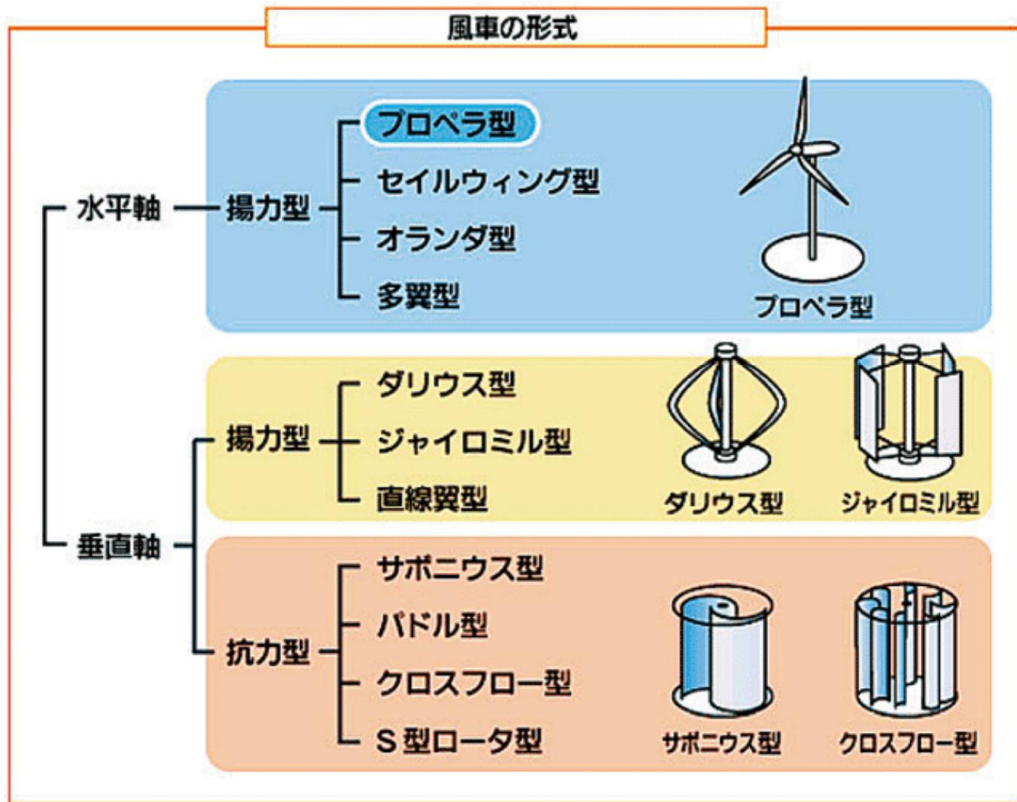
※2012 年末累積導入量 (括弧内は 2012 年単年導入量)

出典: 3TIER ホームページ及び“Global Wind Report Annual Market Update 2012”(2013, GWEC)より NEDO 作成 NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 3 章 風力発電 17 図 3-19 世界の風力エネルギー密度分布(洋上) (上: 6 月~8 月 下: 12 月~2 月) ※海上風(高度 10m)の平均風力エネルギー密度 出典: N

# 日本の風力ポテンシャルマップ(左:陸上, 右:洋上)



# 風力発電機の種類



風車の形式



(2.4 MW 機)

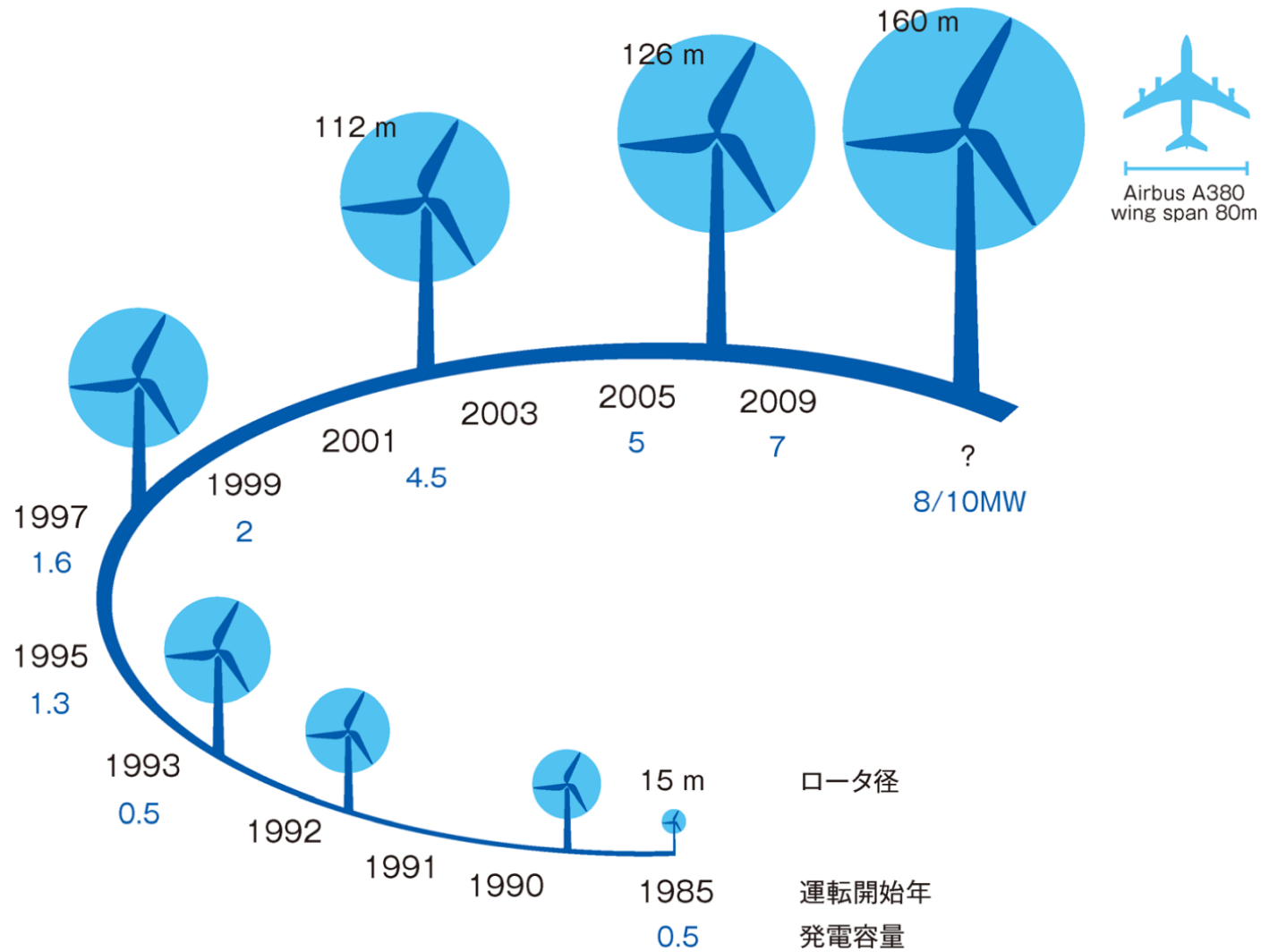
水平軸風車の例  
(三菱重工業HP)



(1.0 kW 機)

垂直軸風車の例  
(日本小形風力発電協会HP)

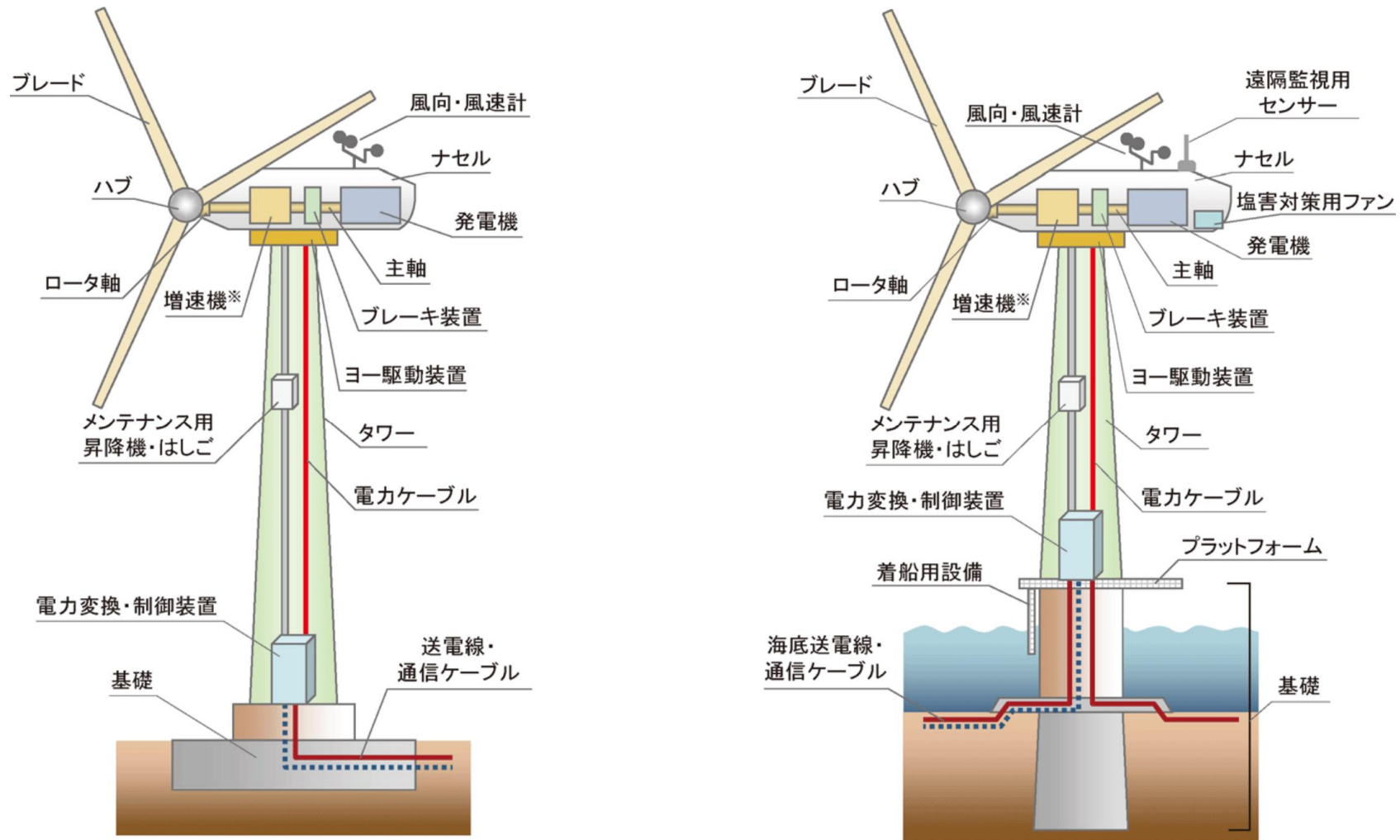
# 世界の風車の大型化の推移



出典：“Wind Energy Factsheets 2010” (2011, EWEA) より NEDO 作成



# 風力発電機の構成



風力発電機の主要な構成要素(左:陸上風力 右:洋上風力)  
(風力発電導入ガイドブック(NEDO), 2008)

# 風車における2種類の電動機： 同期電動機と誘導電動機

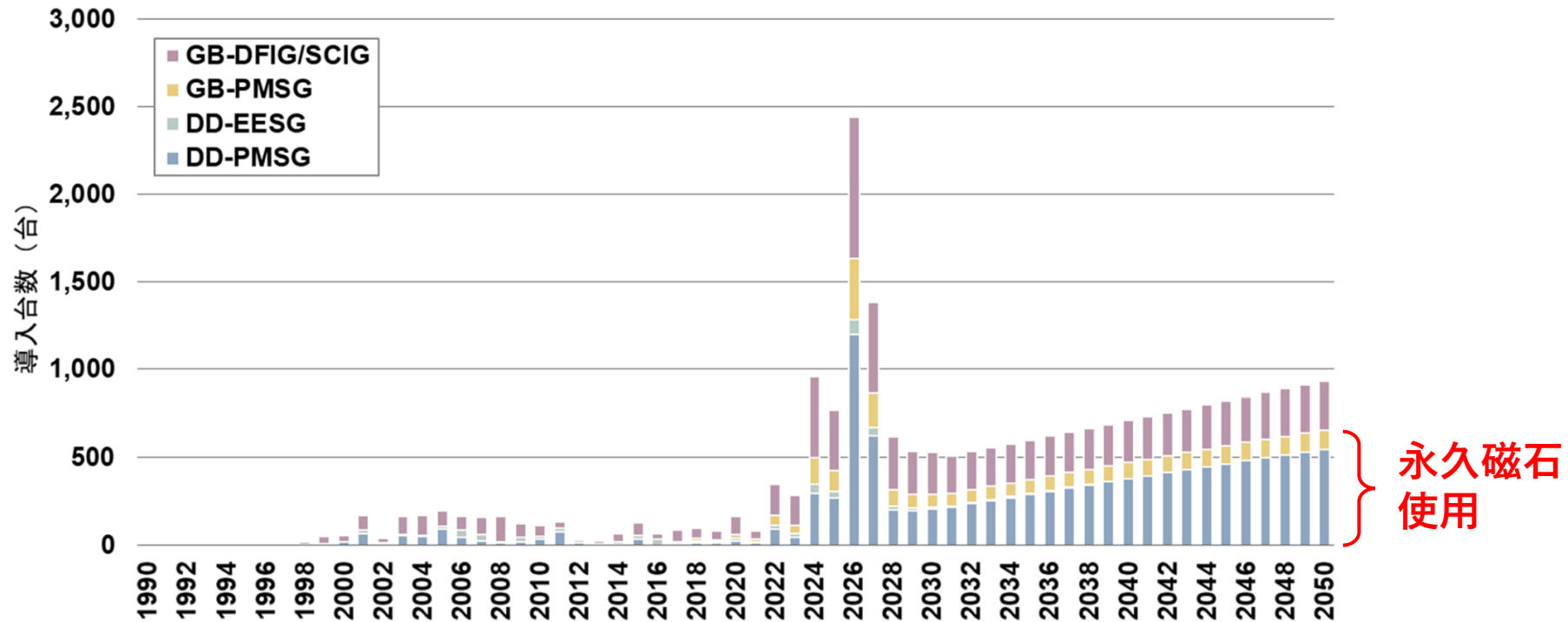
## 同期電動機の特徴

- 風車によって**永久磁石**を回転させ、電磁誘導によって電流を発生させる（図1参照）。
- レアアース磁石の開発によって大きな電流発生が可能となった。

## 誘導電動機の特徴

- 与えられた励磁電流下で、風車によって導体を回転させ、電磁誘導によって電流を発生させる。
- 比較的構造が簡単でメンテナンスが容易だが、外部からの励磁電流の供給が必要。

# 風車発電機導入量の推移



(注1) DD-PMSG：ダイレクトドライブ-永久磁石式発電機

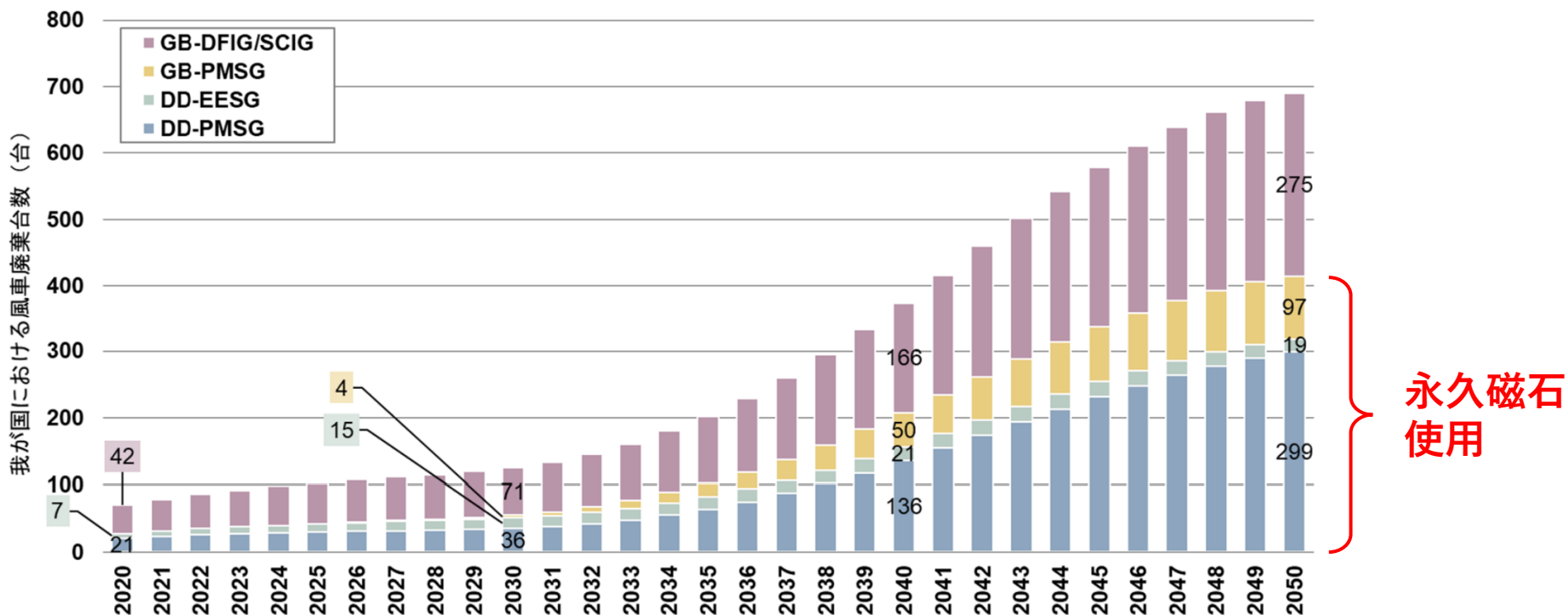
(注2) DD-EESG：ダイレクトドライブ-誘導励磁同期発電機

(注3) GM-PMSG：ギアボックス-永久磁石式発電機

(注4) GB-DFIG/SCIG：ギアボックス-二重給電誘導発電機／かご型誘導発電機

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

# 使用済み風力発電機発生量の推計



(注1) DD-PMSG：ダイレクトドライブ-永久磁石式発電機

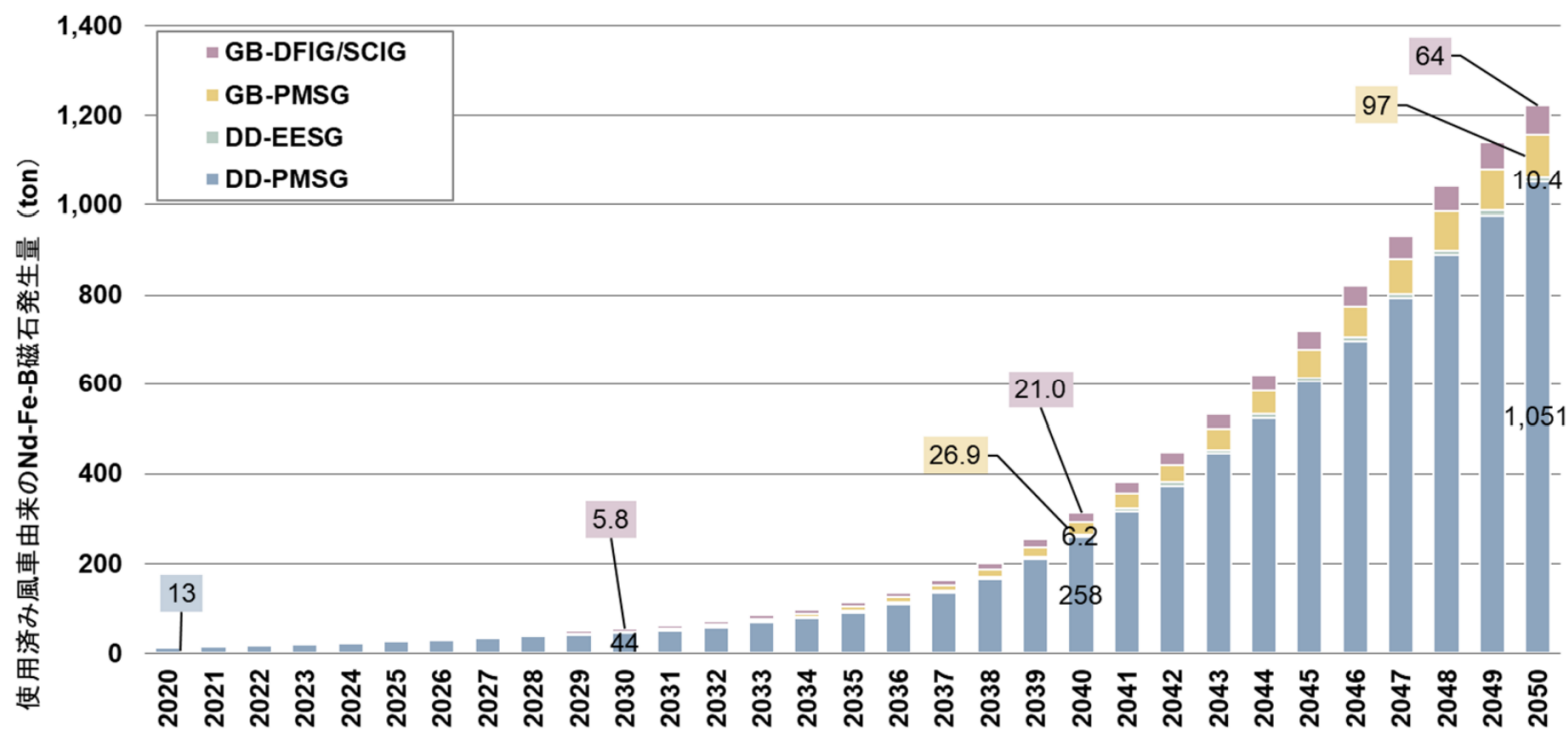
(注2) DD-EESG：ダイレクトドライブ-誘導励磁同期発電機

(注3) GM-PMSG：ギアボックス-永久磁石式発電機

(注4) GB-DFIG/SCIG：ギアボックス-二重給電誘導発電機／かご型誘導発電機

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

# 使用済み風力発電機由来の磁石発生量の推計



(注1) DD-PMSG：ダイレクトドライブ-永久磁石式発電機

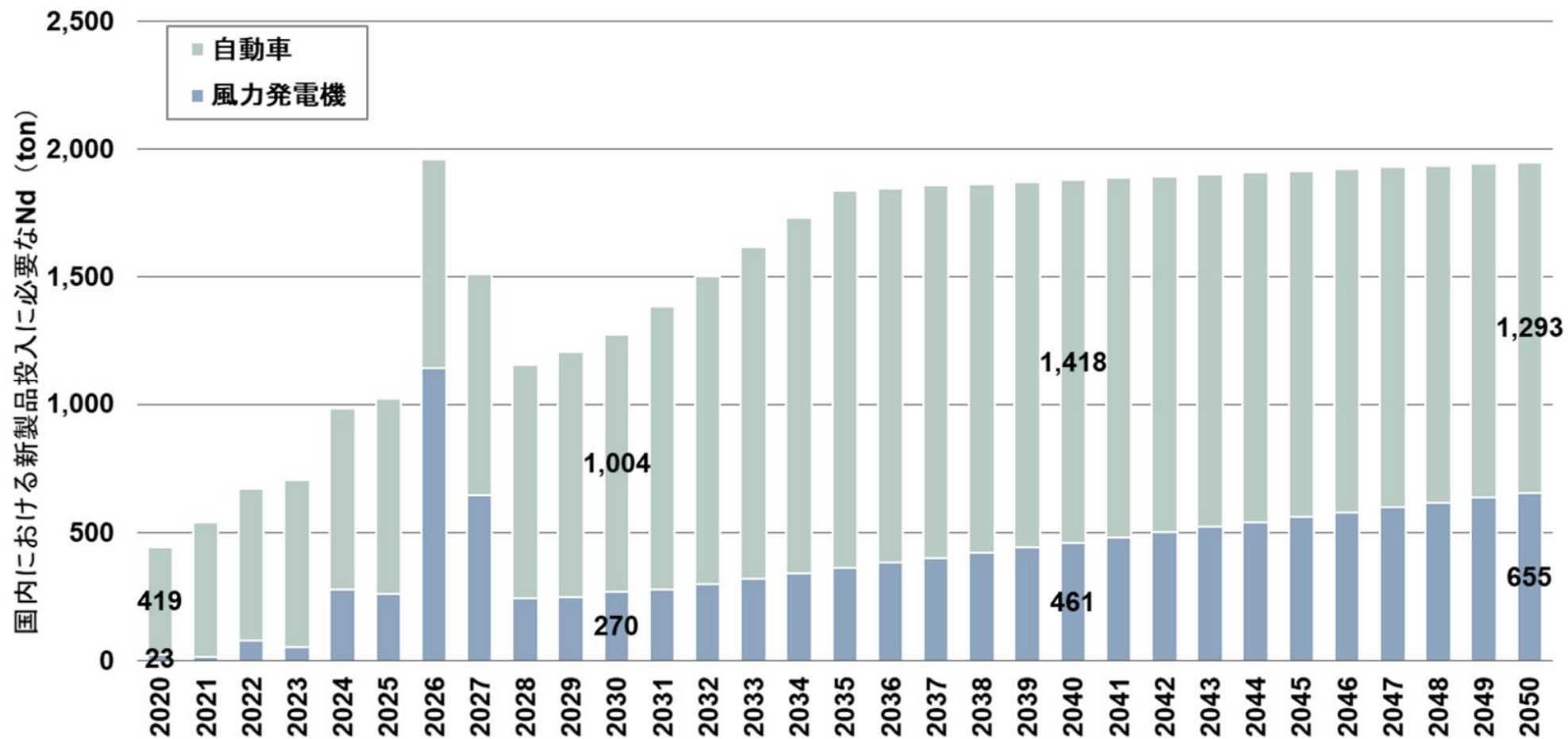
(注2) DD-EESG：ダイレクトドライブ-誘導励磁同期発電機

(注3) GM-PMSG：ギアボックス-永久磁石式発電機

(注4) GB-DFIG/SCIG：ギアボックス-二重給電誘導発電機／かご型誘導発電機

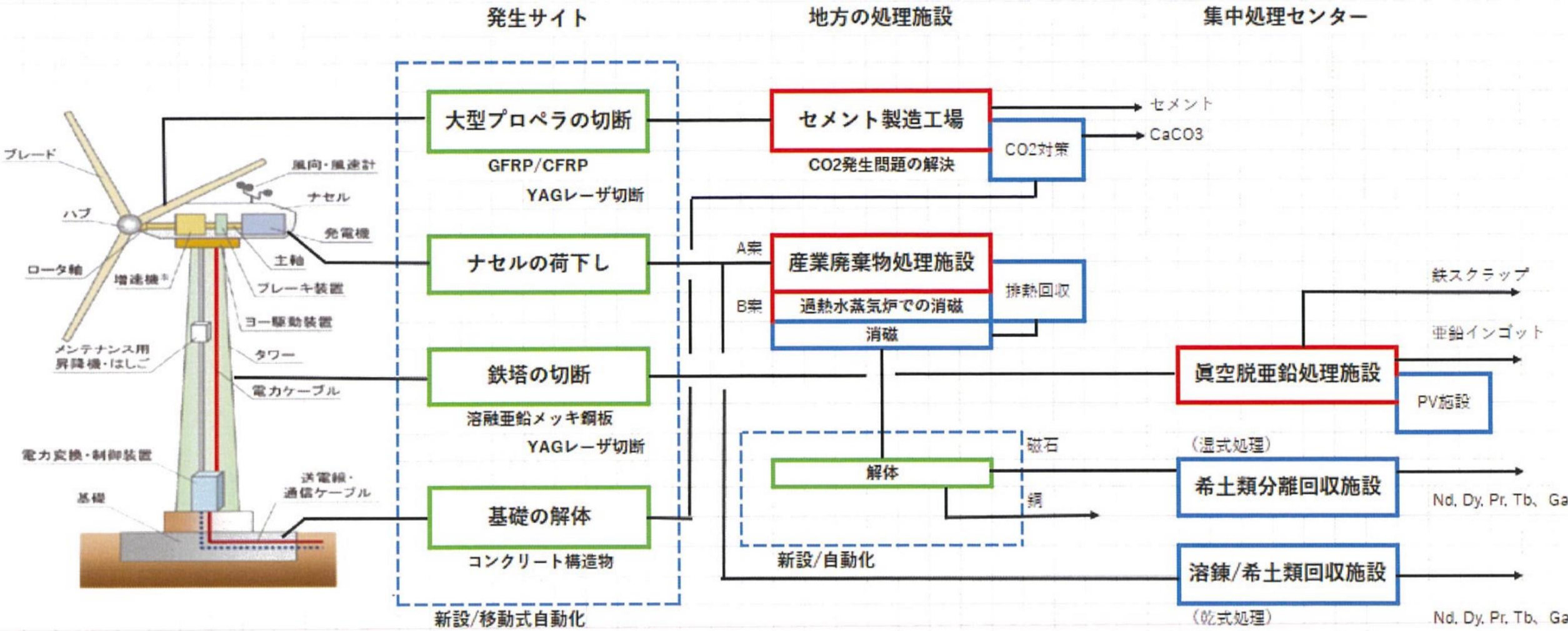
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

# 国内で新製品（風力発電機・自動車）に使用されるNd推計量



(出所) 三菱UFJリサーチ & コンサルティング作成

# 風力発電機のリサイクルフロー(案)



# 風力発電機の解体, 1



- 事前にクレーンでブレード・ナセル・ハブ等を降ろす。
- 従来よりも安全・簡易かつ正確に塔型建造物を倒す工法の開発を進めており、特許を出願中。
- タワー基礎部(コンクリート部分)を切断・転倒する工法では、転倒軸を明確にできるため、転倒方向をコントロールでき、高い安全性の確保が可能。
- 秋田県および長崎県五島列島で実証実験を行い、業界を問わず多方面から注目を集めている。
- 環境に配慮した再生可能エネルギー事業の拡大を背景に、他社からの引き合いが急増している。



- 従来の工法では、強風等の事前環境に左右され、工期遅延による重機コストの増加を招いていた。
- 強風等の影響を受けず、大型重機を使用しないため、工期を遵守することが可能。
- タワー内部にアップダウンジャッキ等の上部ダウンシステムを設置し、降下と撤去を繰り返し行うことで、ロシア人形のマトリョーシカのようにコンパクトに収めていく。



# 風力発電機の解体, 2



① 《整地・鉄板敷設》

重機般入の為、進入路を確保。



② 《メインクレーン組立》

550tクレーンを80tクレーンで組立。



③ 《ローター下架》

治具スリングを使用し下架、サブクレーンにて6時方向のブレードを支持し横倒しの状態にして下架します。



④ 《ナセル下架》

ナセル内部から玉掛けしたうえで、接続ナットを取り外し下架させます。



⑤ 《タワートップ下架》

フランジ部の接続ボルト及びナットを外し下架します。



⑧ 《タワー裁断》

サイズ・重量を搬出可能な物にする為ガス溶断します。



⑥ 《タワーミドル・ボトム下架》

タワー下部を相番クレーンにて支持し横倒しの状態にして下架します。



⑨ 《産廃(ブレード)搬出》

重機を使用し車両へ積込、搬出します。(搬出計画によるサイズ・重量)



⑦ 《ブレード裁断》

重機のカッターを使用しブレードをトラックスケールに裁断します。



⑩ 《スクラップ搬出》

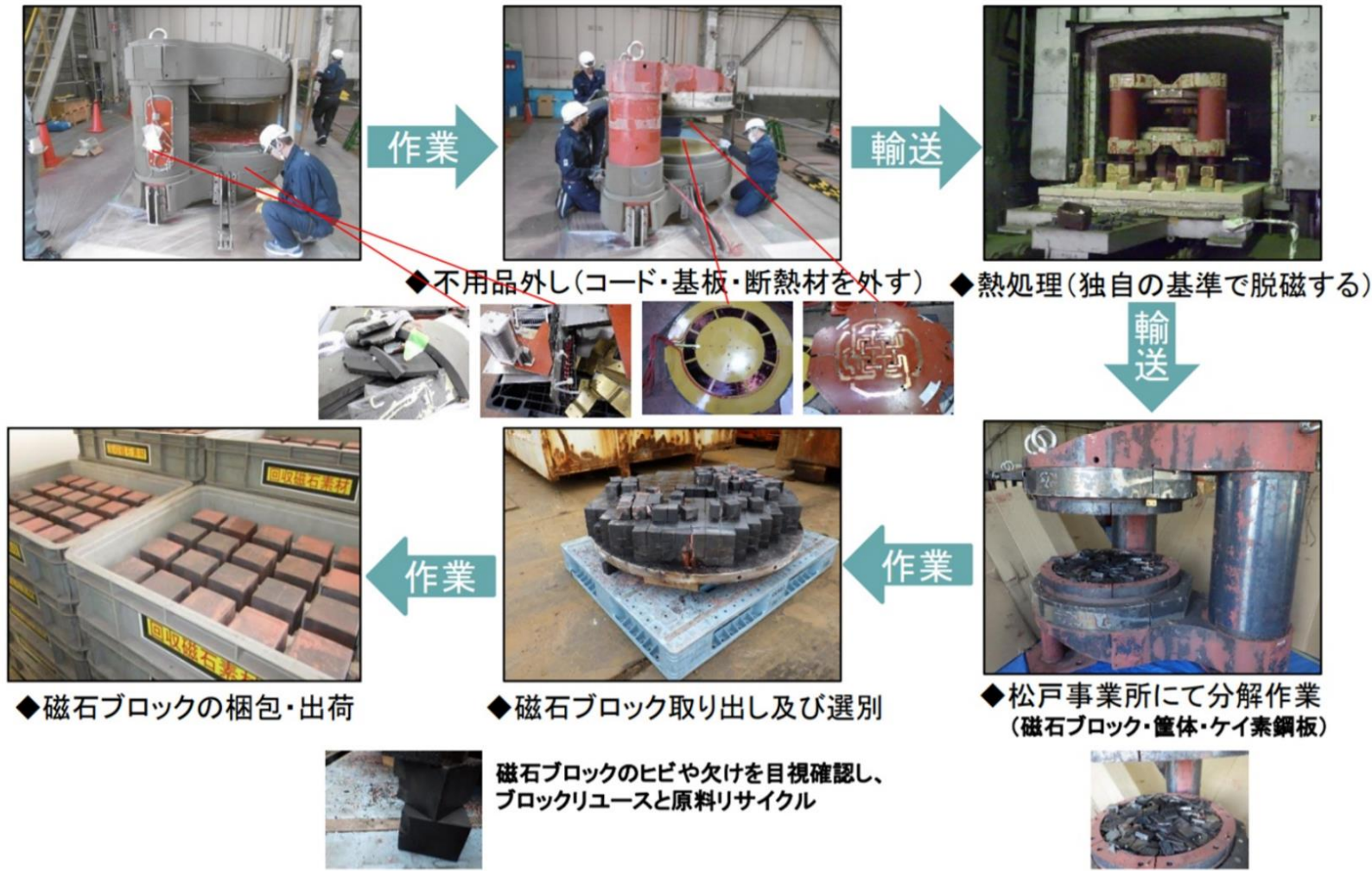
重機を使用し車両へ積込。

# 風力発電機の解体現場，鈴木商会，220614



# MRIからのNdFeB磁石の回収フローの例(東京エコリサイクルほか)

【実用化段階(MRIの場合。風力発電機を対象にした場合は実証等が必要)】

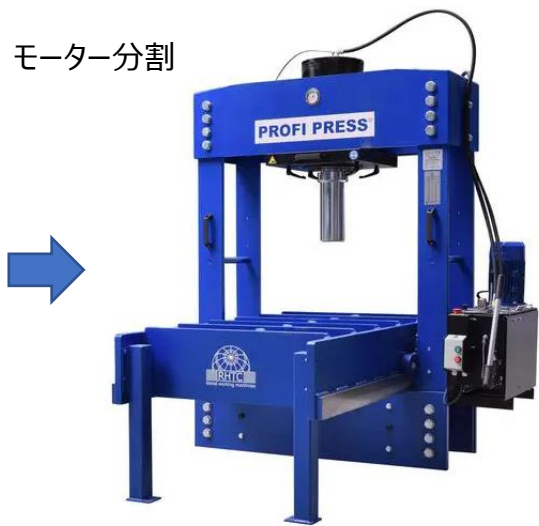


(出所)東京エコリサイクル株式会社, 日和サービス株式会社, NEOMAXエンジニアリング株式会社「レアアース磁石におけるサーキュラーエコノミーの推進」(令和元年資源循環技術・システム表彰)より引用

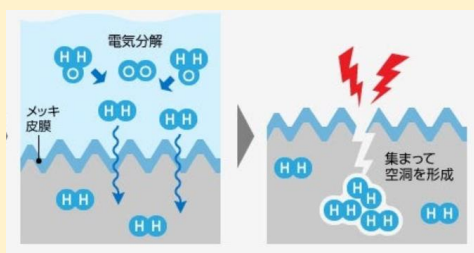
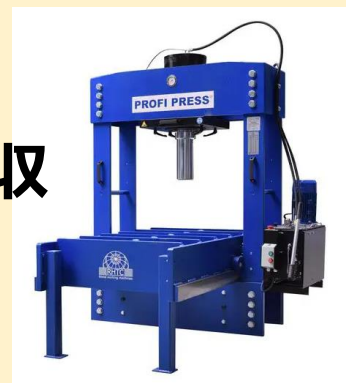
# 磁石処理システム概念図(一例)

クリーンルーム内作業

モーター分割



磁石回収



ローター切断

水素脆化 (微細クラック)



ピンミル粉碎

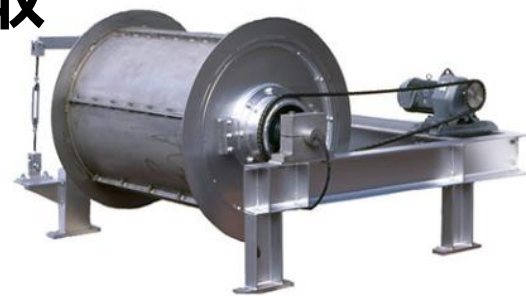


消磁検査+袋詰め+出荷

ステーター一次破碎



鉄回収



磁気選別機



テーブル振動分級機

銅回収  
プラスチック回収



# 過熱水蒸気焙焼法

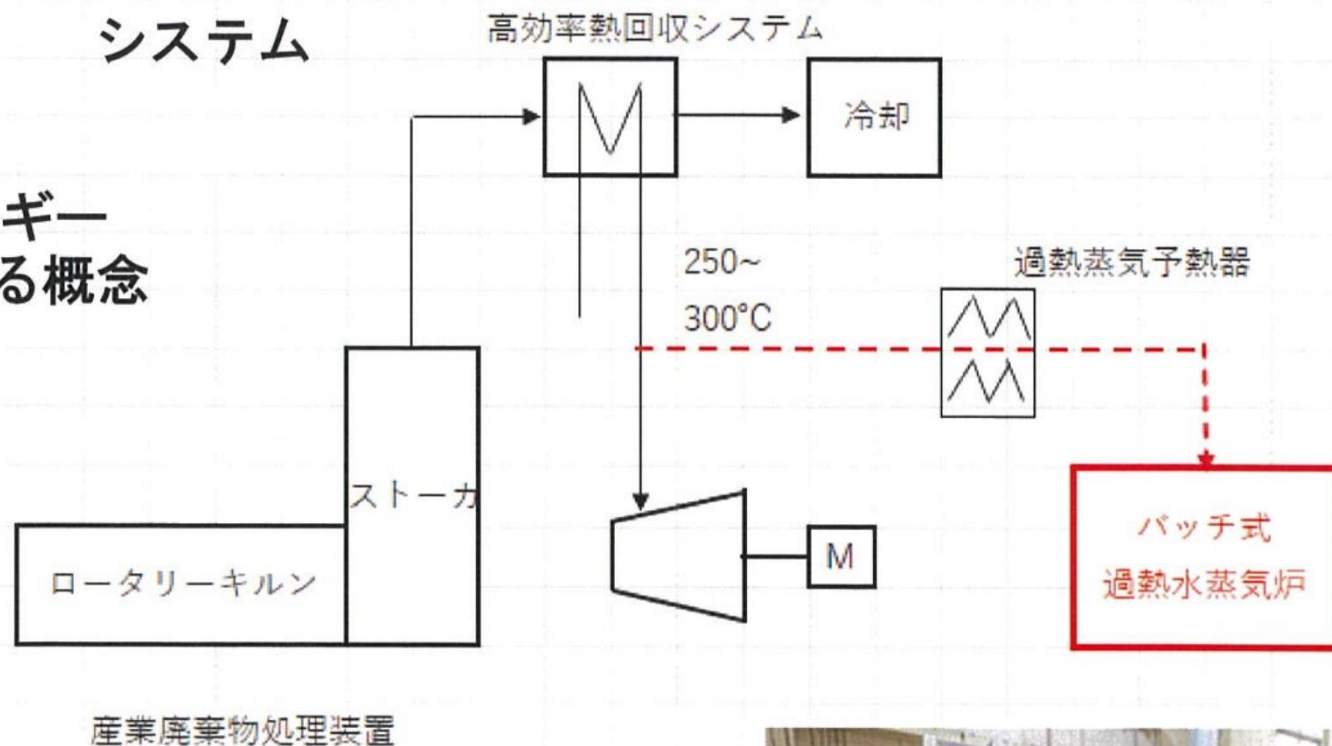
既存の産業廃棄物処理設備の排ガスエネルギーを利用してナセルを400°Cで焼き消磁させる概念

概念の検討/実証が必要。

ネオジム磁石のキューリー点（一例）： >400°C

| Magnet type      | Max. Working Temperature (deg. C) | Curie Temperature (deg. C) |
|------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| <b>NdFeB-s</b>   |                                   |                            |
| N                | 80                                | 310                        |
| M                | 100                               | 340                        |
| H                | 120                               | 340                        |
| SH               | 150                               | 340                        |
| UH               | 180                               | 350                        |
| EH               | 200                               | 350                        |
| AH               | 230                               | 350                        |
| <b>SmCo-s</b>    |                                   |                            |
| SmCo5            | 250                               | 750                        |
| Sm2Co17          | 250-350                           | 800                        |
| <b>AlNiCo</b>    |                                   |                            |
| Sintered         | 450                               | 760-890                    |
| Cast             | 450-550                           | 810-890                    |
| <b>Ferrite-s</b> |                                   |                            |
|                  | 250                               | 450                        |

システム



過熱水蒸気炉の一例

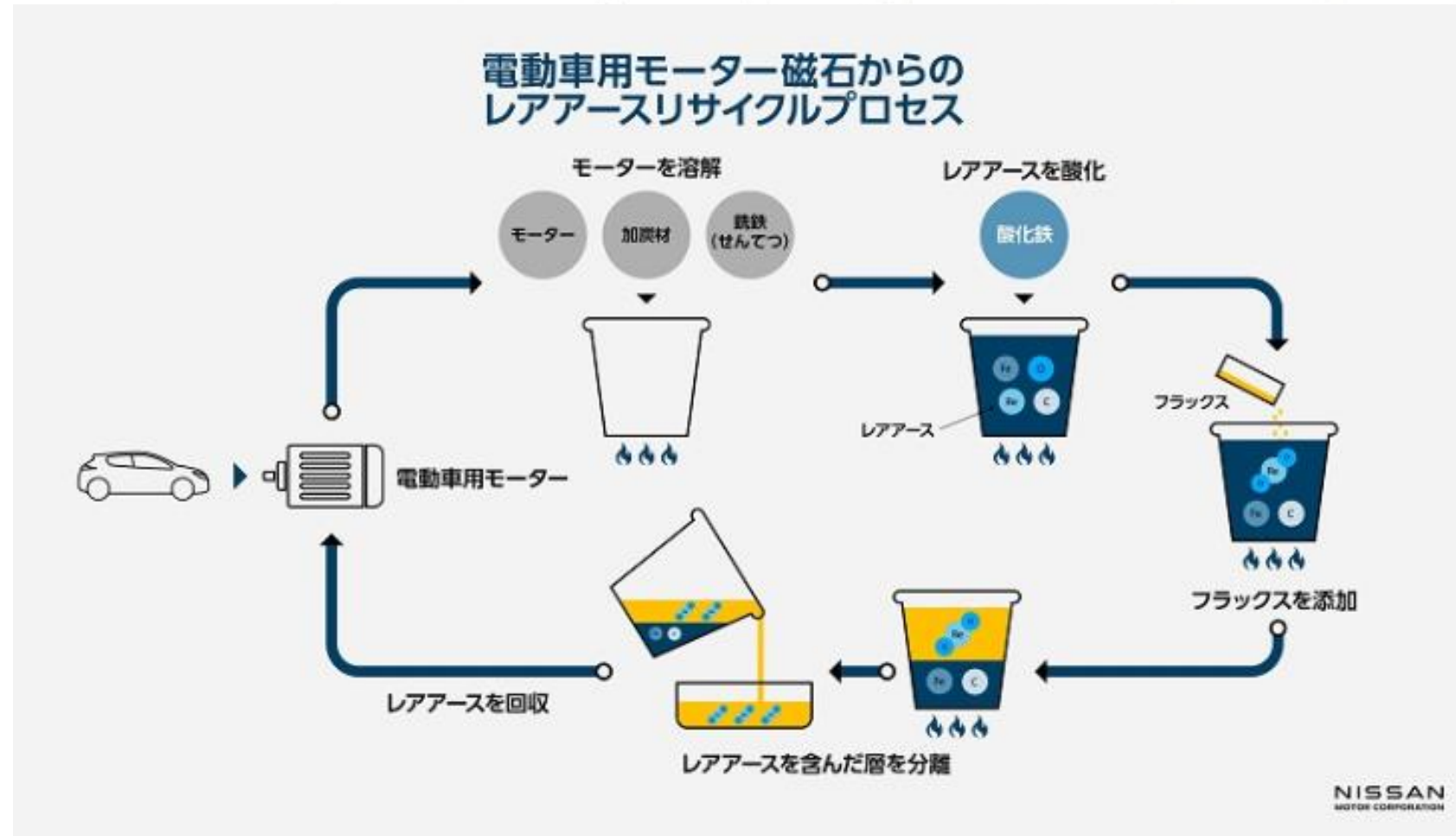
**高砂工業**  
Takasago Industry Co., Ltd.



# 電炉法(早大方式)

早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科 山口研究室

モータを電気炉に入れ、鉄スクラップと加炭材を添加して、 $1400^{\circ}\text{C}$ で溶錬した後、レアアースを酸化させる為に酸化鉄を加え、さらにホウ酸塩のフラックスを加えてスラグ側にレアアースを抽出する方法。溶錬鉄とスラグを分離すると、スラグ側にレアアースの酸化物が得られる。



# 真空脱亜鉛法

既存の真空脱亜鉛設備で、熔融亜鉛メッキが施された鉄塔を、真空下で亜鉛をガス化し凝縮させて亜鉛インゴットとして回収する方法



(株)豊栄商会碧南工場  
リサイクルセンター



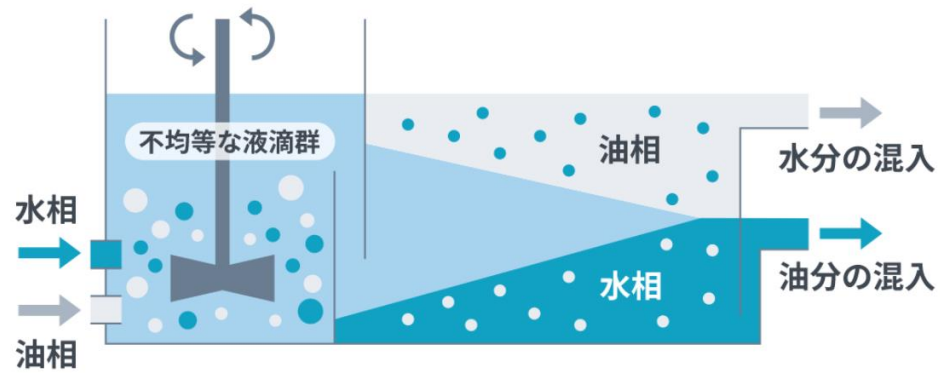
出所： 豊栄商会HP

# レアアース分離・精製技術, 1

従来技術

## Mixer-Settler

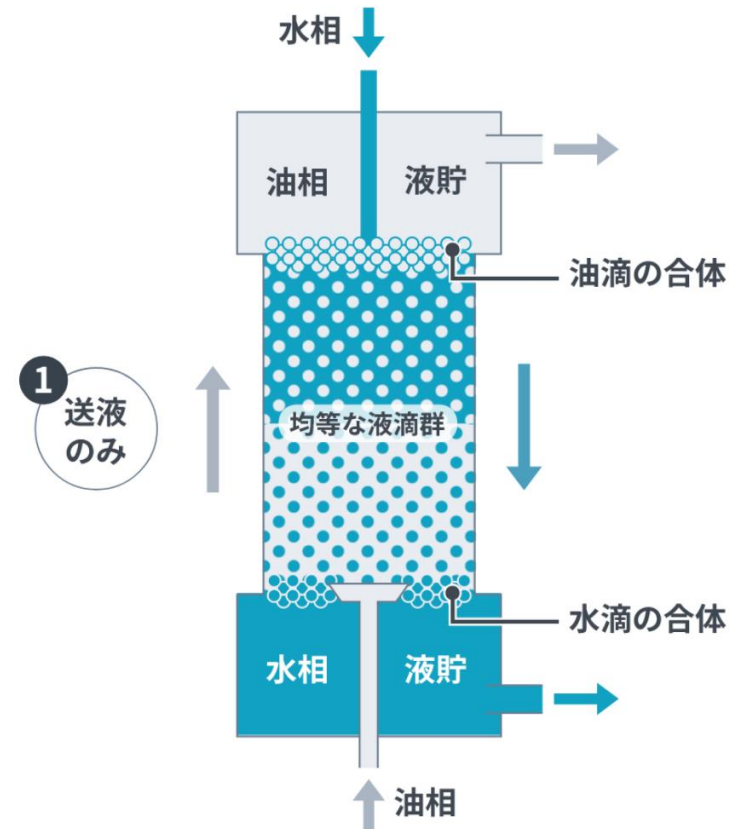
ミキサーセトラー



新技術

## Emulsion-Flow

エマルションフロー

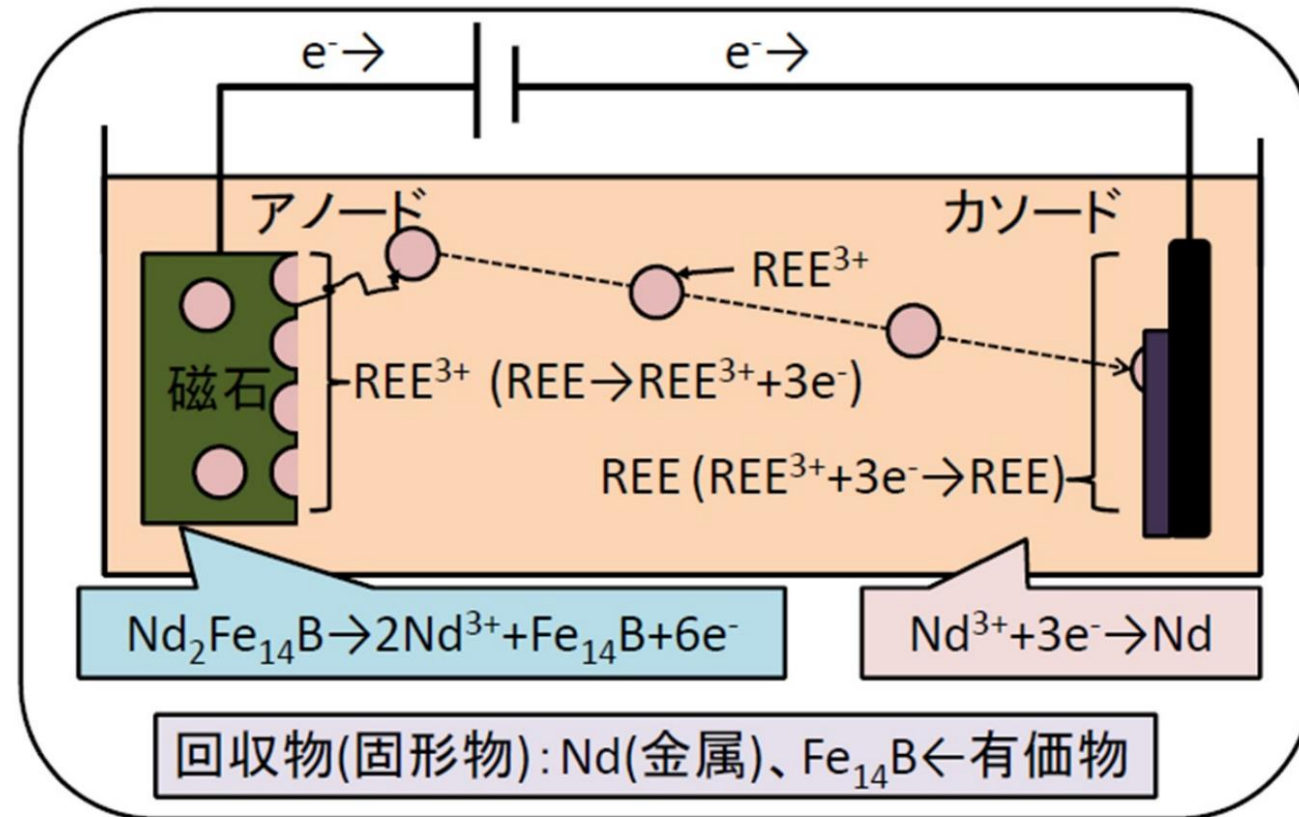




# レアアース分離・精製技術, 2

## 溶融塩電解

電極を用いた溶融塩電解法による選択的分離技術(名古屋大学)  
【基礎研究段階】

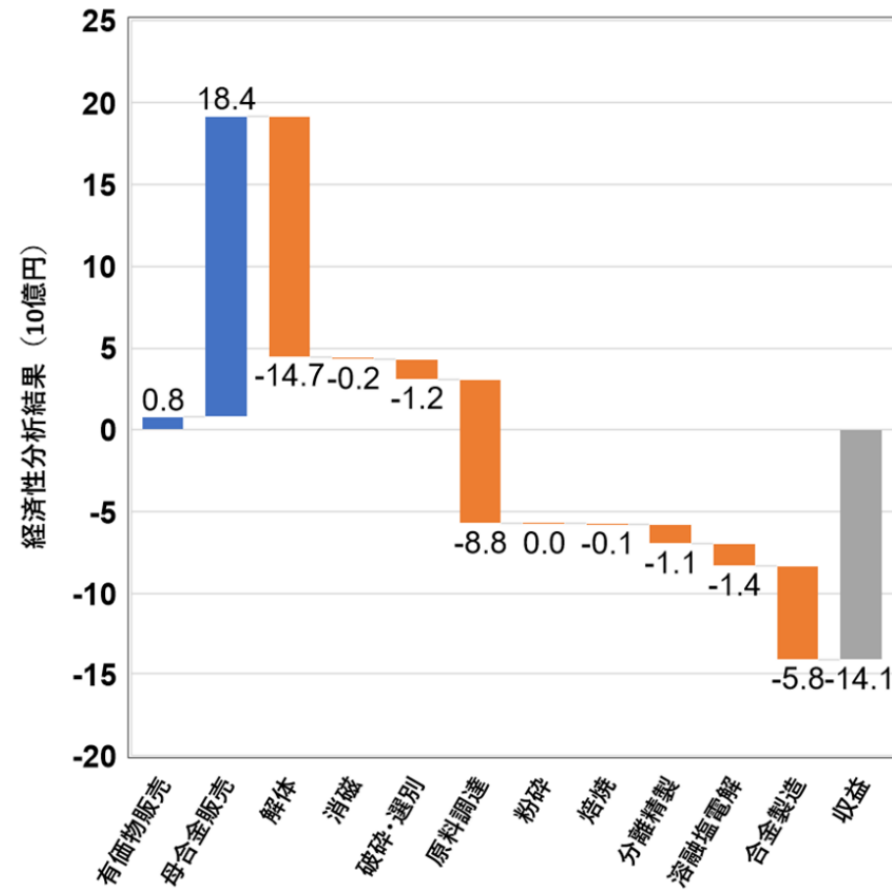
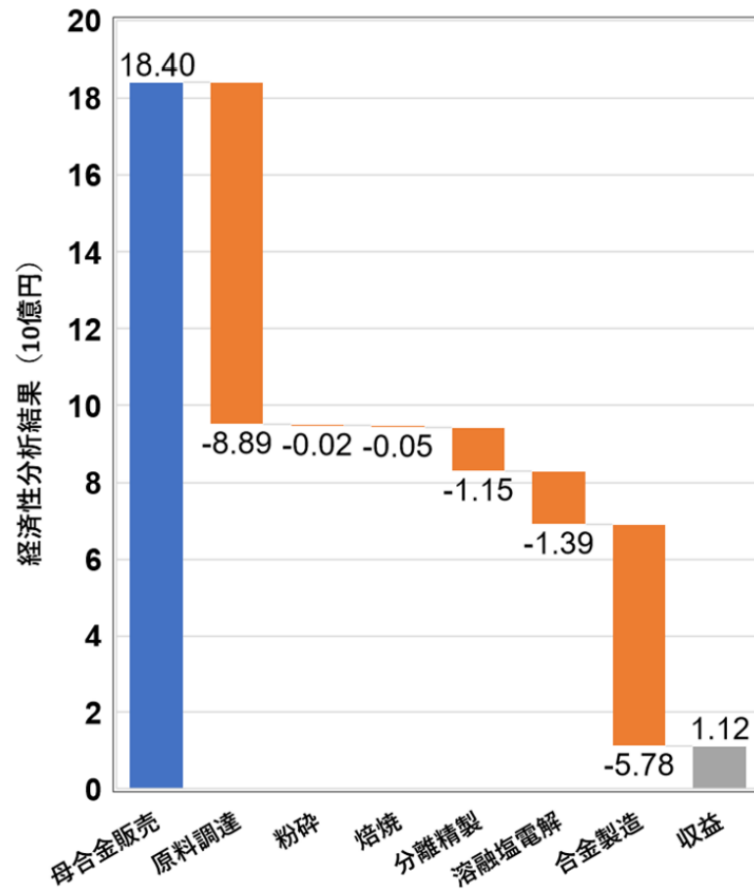


# 解決すべき課題とその技術的解決策

| サプライチェーン       | 解決すべき課題                         | 技術開発・実証の具体例  |
|----------------|---------------------------------|--|
| 風車解体           | 正確な解体予定時期の把握                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>●その他技術開発</li> <li>・風車の劣化状況把握技術の開発</li> </ul>  |
|                | 風車解体の効率化                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A1：大型電力機器（風力発電用風車等）の解体実証</li> <li>・汎用的な解体治具の開発／大型クレーンが不要な工法の開発</li> <li>・気象条件による影響を受けにくい工法の開発</li> <li>・安全な解体工法の開発（油・グリース、残留ガス、粉塵等）</li> </ul> |
|                | 解体後の部品の円滑な取り扱い                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A1：大型電力機器（風力発電用風車等）の解体実証（再掲）</li> <li>・解体現場における消磁技術の開発・実証／磁気遮断容器の開発・実証</li> </ul>  |
| 消磁<br>破碎・選別    | 中間処理コストの削減                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A1：大型電力機器（風力発電用風車等）の解体実証（再掲）</li> <li>・解体工程の自動化検討</li> <li>・効率的な消磁技術の開発・実証</li> <li>・効率的な不純物等の分離、解体・破碎・選別プロセスの開発・実証</li> </ul>                 |
|                | 処理後の産物の品質確保                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A1：大型電力機器（風力発電用風車等）の解体実証（再掲）</li> <li>・めっきや不純物含有量の把握および影響調査</li> <li>・各素材産業の要求水準を満たす破碎・選別プロセスの開発・実証</li> </ul>                                 |
| 粉碎・酸溶解<br>分離精製 | 高効率な溶媒抽出工程の実現                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A2：高効率な分離・精製技術の実証</li> <li>・新規抽出剤・希釈剤の開発・実証／新規溶媒抽出プロセスの開発・実証</li> </ul>  |
|                | 環境対策コストの削減                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A2：高効率な分離・精製技術の実証</li> <li>・熱安定性の高い抽出剤・希釈剤の開発・実証</li> <li>●その他技術開発</li> <li>・効率的な廃水処理技術の開発・実証／鉄含有残渣の有効利用手法の検討</li> </ul>                       |
| 熔融塩電解          | 省CO <sub>2</sub> ・低コストな熔融塩電解の実現 | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A3：熔融塩電解技術の開発</li> <li>・HFガスの発生量の少ないプロセスの開発</li> <li>・電力消費の少ないプロセスの開発</li> <li>・安価な還元剤を用いたプロセスの開発</li> </ul>                                   |
| 全体             | トレーサビリティシステムの構築（再生資源由来であることの証明） | <ul style="list-style-type: none"> <li>●A4：「グリーンレアアース」証明システム（トレーサビリティ）実証</li> <li>・各工程における管理対象情報とこれら情報取得・呼出方法の検討</li> </ul>  |

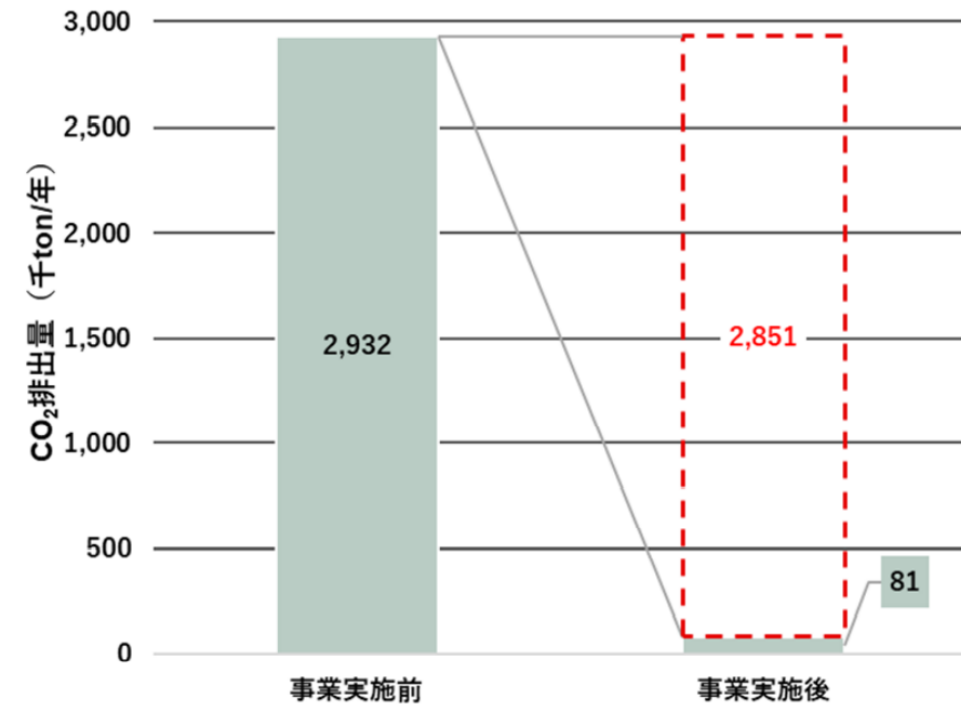
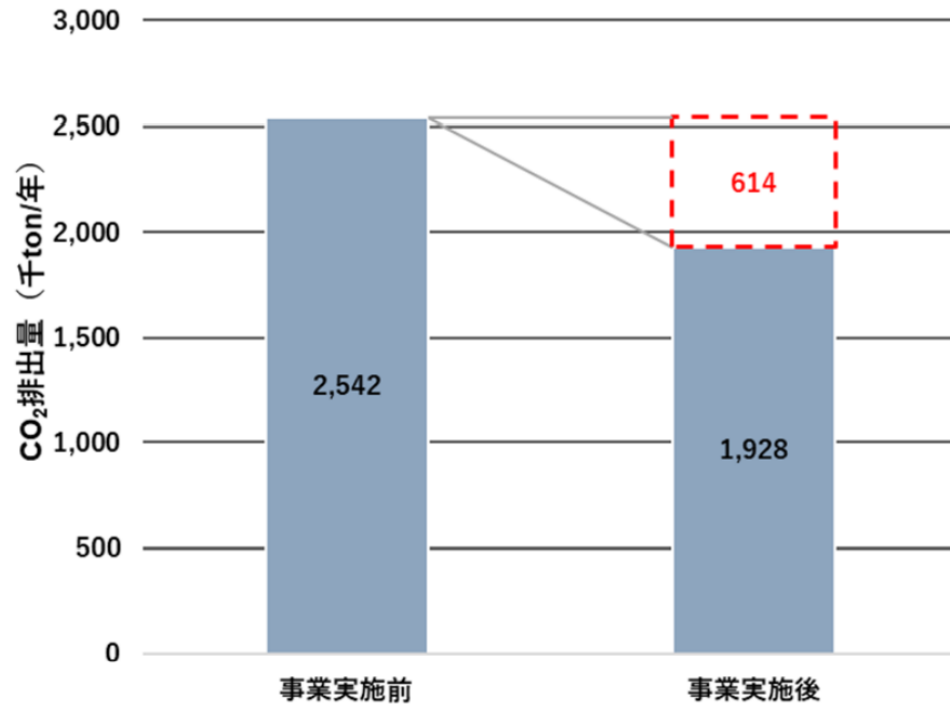
# 採算性分析結果(既存設備を活用した事業化・製錬事業単体)

(左)①製錬事業単体, (右)②解体から製錬事業



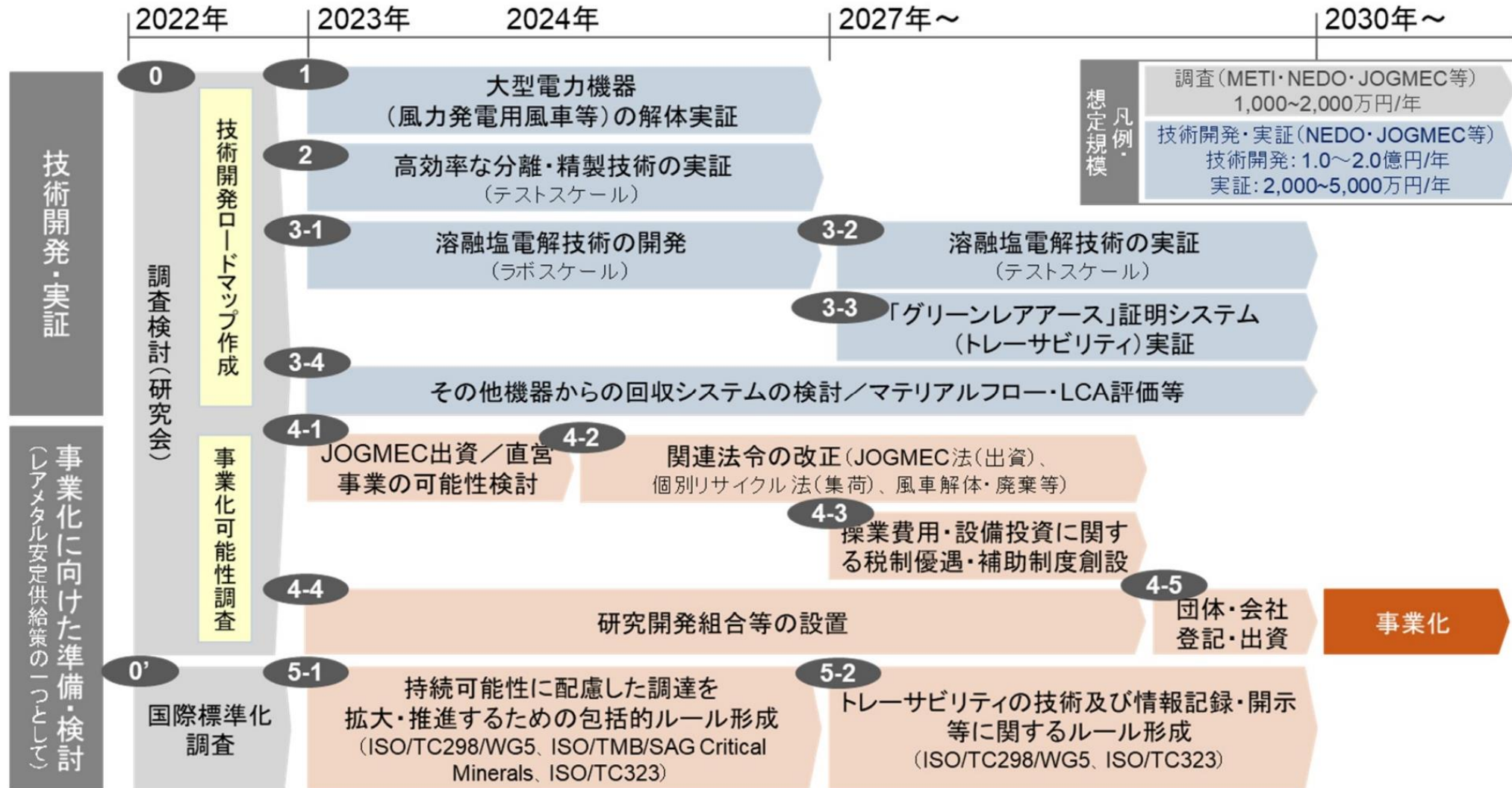
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

# リサイクルNdFeB磁石の普及によって期待される 温室効果ガス 排出量削減効果(左:次世代自動車, 右:風力発電機)



(出所) 三菱UFJリサーチ & コンサルティング作成

# 拠点整備に向けた想定スケジュール(案)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

**ご清聴ありがとうございました。**

**早稲田大学理工学術院  
(創造理工学部環境資源工学科)  
大和田 秀二**