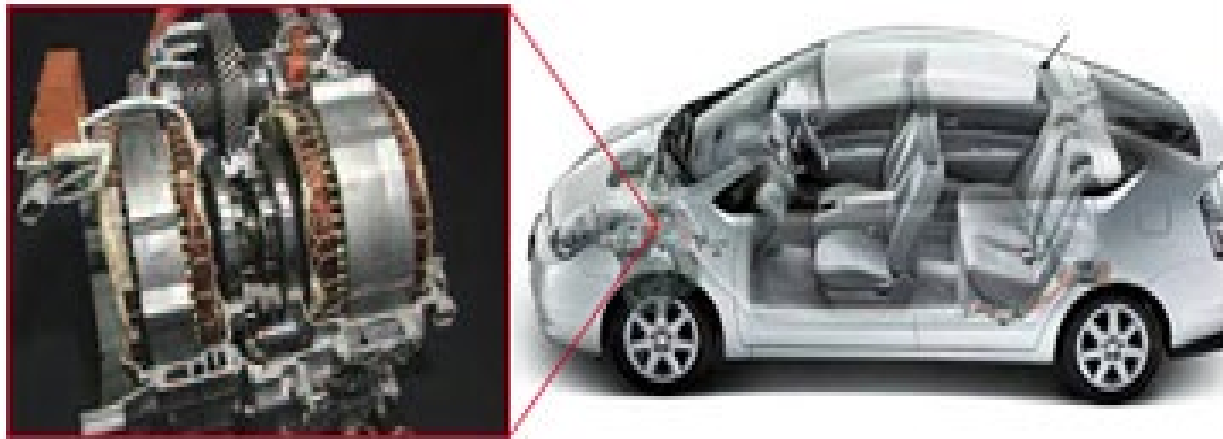


EVにおける磁気応用

—NdFeB磁石について—



ネオジム磁石



2023年6月8日

望月 晃

小林慎一郎

矢島健児

自己紹介

- 1970年 千葉工業大学電子工学科卒業
- 理化学研究所磁性研究室（旧武井武研究室）
- 1974年 三菱マテリアル 中央研究所
- 磁歪材料、希土類磁石、小型モータの開発研究
- 研究所 20年
- 本社研究開発マネージメント、執行役員 10年
- 2004年 三菱マテリアルCMI社 社長（モータ、電気接点）
- 2013年 退社（東京農工大学 大学院MOT入学）
- 企業顧問、技術コンサルタント

EVの市場動向

- 世界の乗用車市場

(年間販売台数：単位 千台)

地域	2019	2020	2025	2030	2035
日本	9685	8067	8782	8157	7364
欧州	18369	14064	17933	19602	20694
北米	16822	13375	16127	16568	17358
中国	25751	25225	30985	33719	34197
東南アジア	8363	6601	8871	10320	11868
その他	13604	10627	15091	17748	20747
合計	92594	77959	97789	106114	112,228

EVの市場動向

• 世界のEV市場

(年間販売台数：単位 千台)

地域	2019	2020	2025	2030	2035
日本	2297	2079	3822	5310	6532
欧州	1140	2381	10788	15756	20305
北米	965	985	3261	6601	9926
中国	1713	2101	11584	19196	27572
東南アジア	296	476	1324	2585	4689
その他	211	315	647	1219	1953
合計	6623	8337	31428	50669	70979

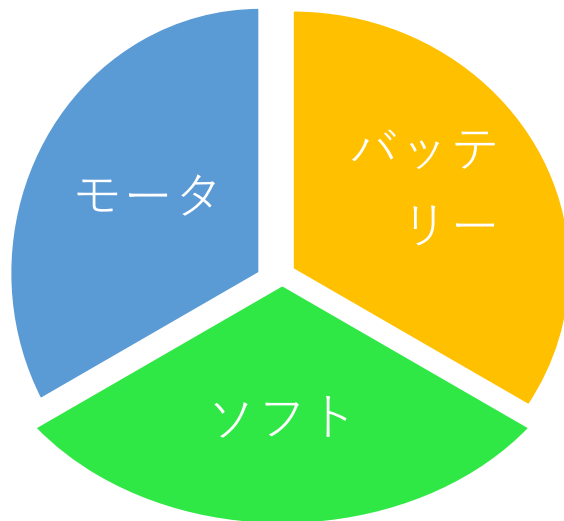
出典：富士経済、2021年7月 エネルギー、大型二次電池、材料の将来予測

EVの主な構成要素

EVの要求

低コスト
長距離ドライブ
短時間充電
どこでも充電
安全性
楽しいドライブ

EVの基幹要素 ーパワートレインー



パワートレイン

ソフト/制御D

安全確保
自動運転
エンターテイメント

バッテリー

大容量化
安全性
高速充電

モータ

高効率
小型化
高電圧化

モータ用途

DCモータ：エアコン、パワーステ、ウインドウ
ミラー、ヘッドライト
駆動モータ：IPMモータ

EVの構造

Low Position Lithium Ion Battery

リチウムイオンバッテリーを車体の重心点に低く配置し、前後の重量バランスと重心位置を最適化。優れた操縦安定性と広い居住空間の実現に貢献しています。



Electric Motor & Inverter

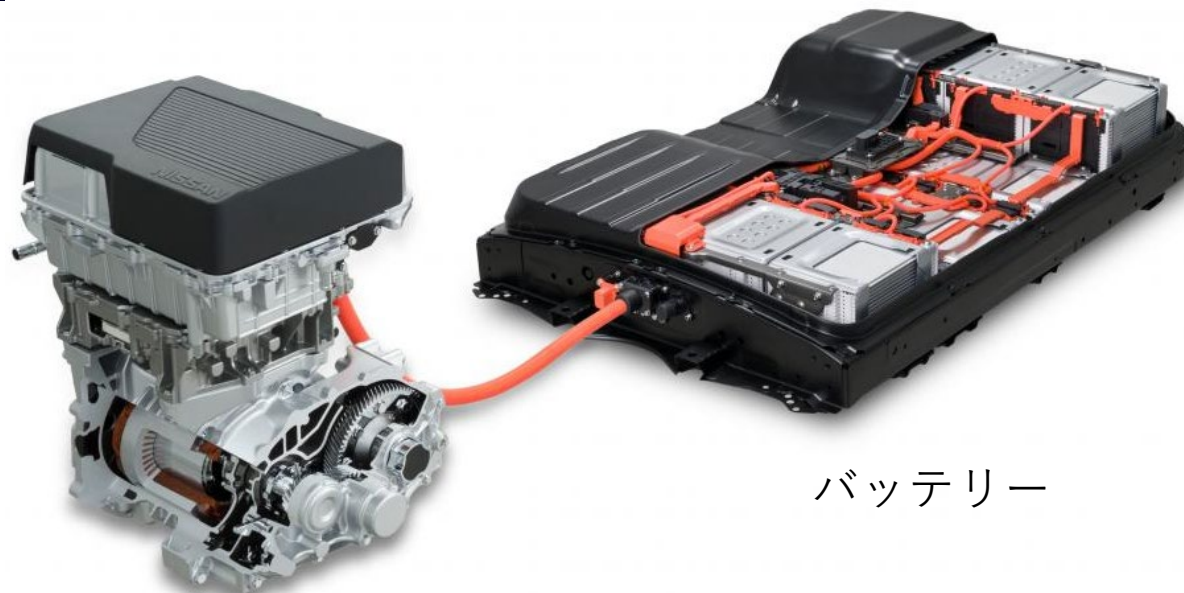
軽量・コンパクトでエネルギーロスが少ないモーター&インバーターをフロントに搭載しています。

No Tailpipe

日産リーフにはテールパイプがありません。走行中の排出ガスはゼロ。CO₂はもちろん、窒素酸化物も一切出しません。

出典：日産カタログ

パワートレイン



バッテリー

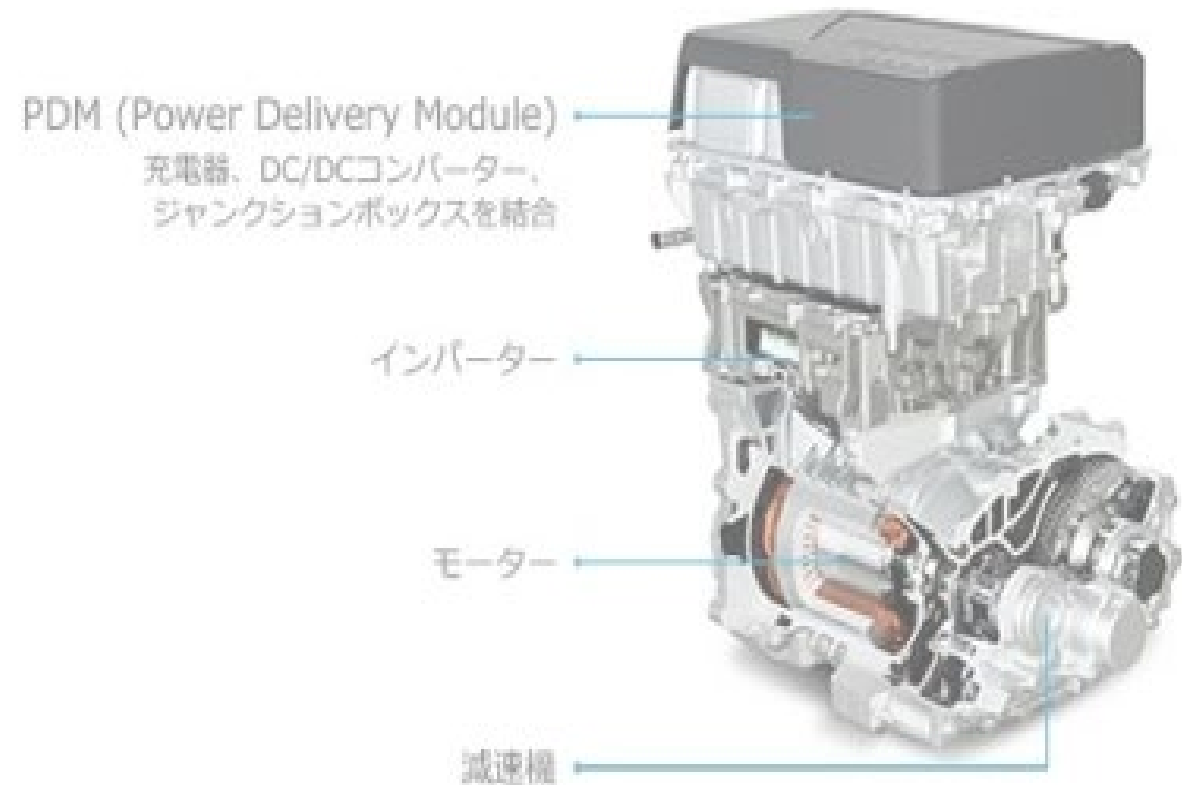
EVのパワートレインの動向

• パワートレインの要求

- 高効率 走行距離を伸ばす
- 発熱を減らす
- 高信頼性
- 小型化/軽量化/高周波化
- コスト
- 短時間充電

モータ要求

パワーアップ 80KWモータ→160KW
高電圧化 バッテリー電圧DC350V
→モータ電圧AC650V/800V
大電流化 AC250A



性能：450 km/チャージ 60分急速充電

出典：日産リーフカタログ

EVのパワートレインを支える磁性材料

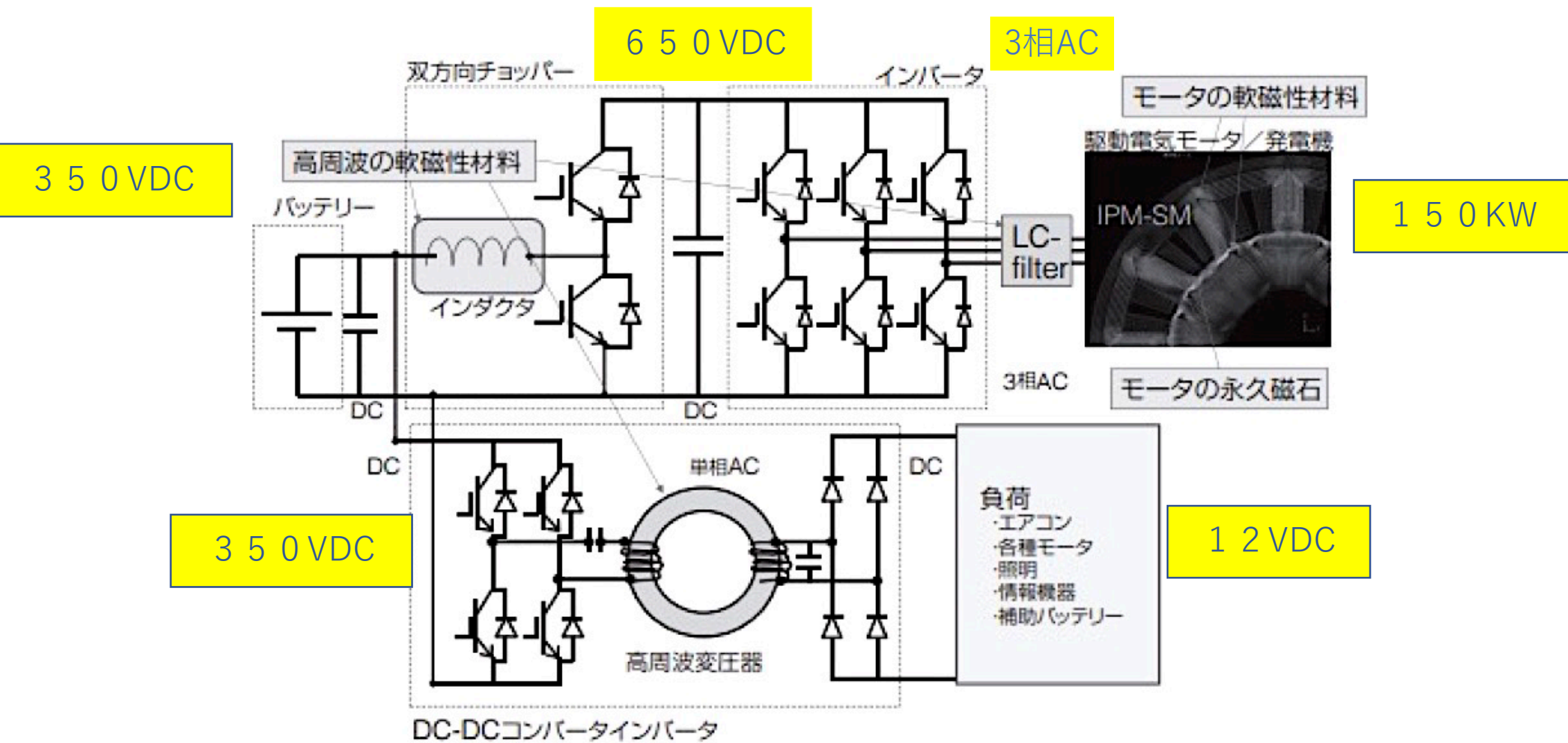
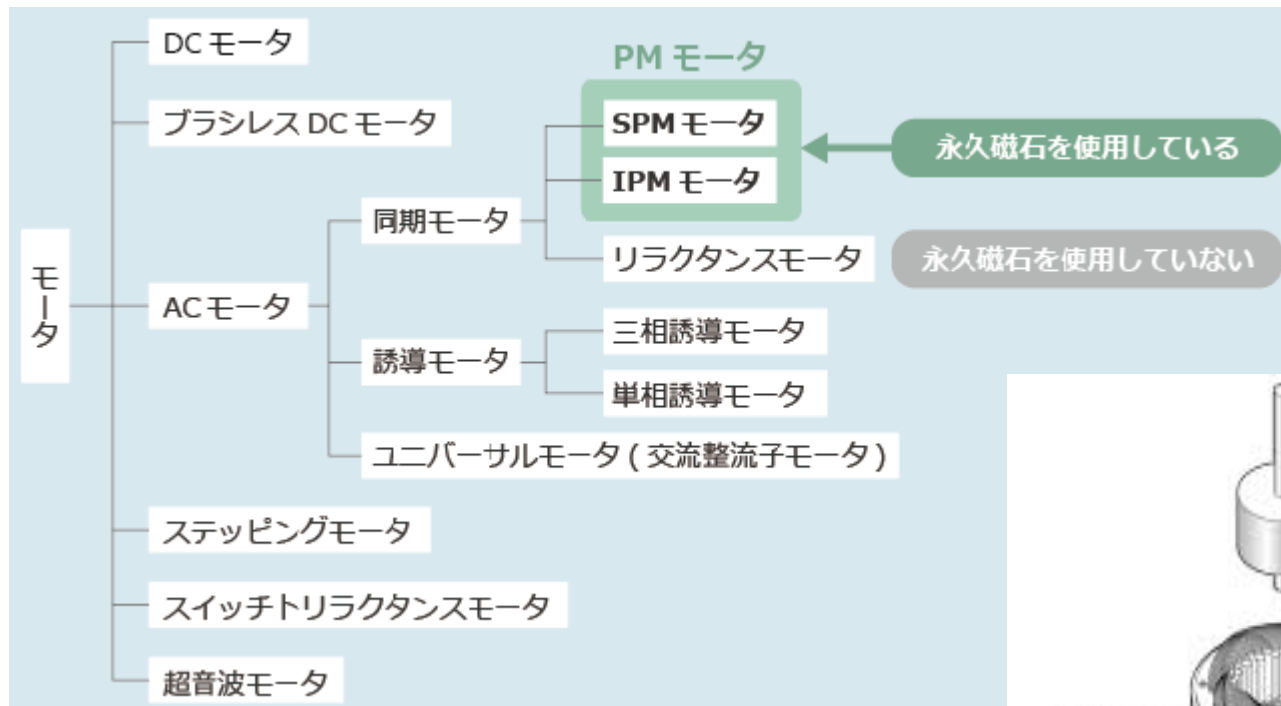
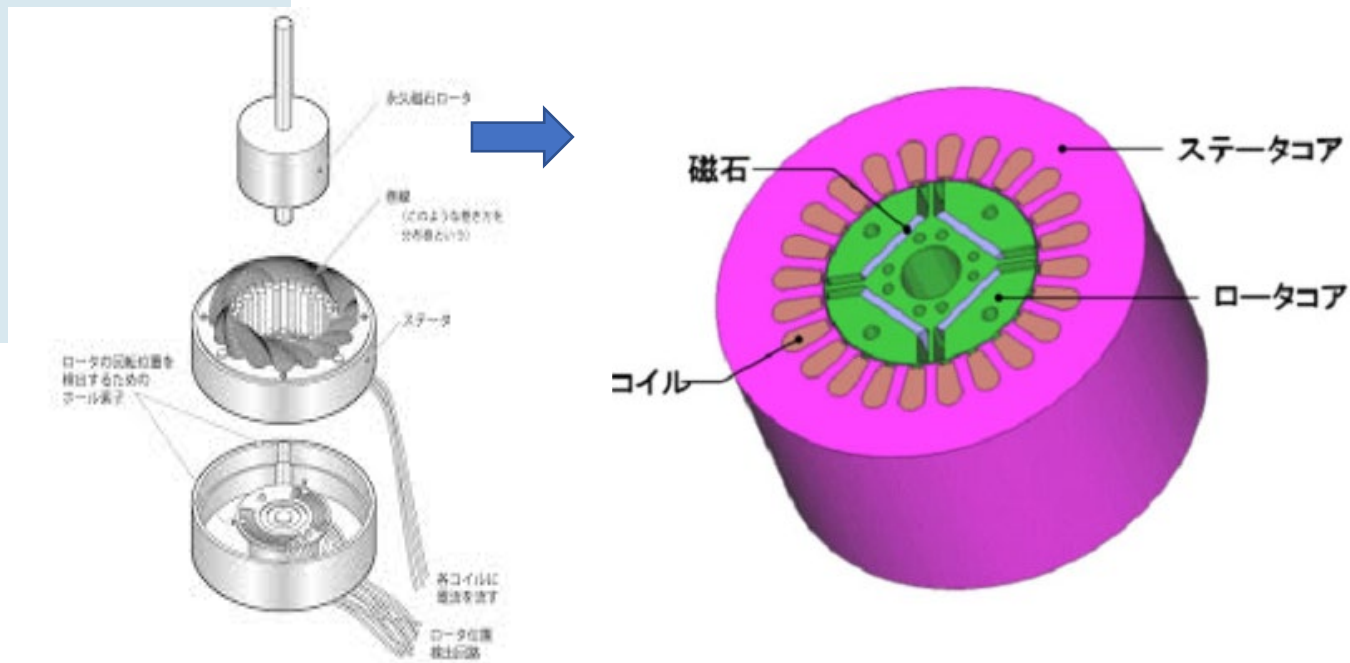


図1 電気自動車のモータ駆動システムにおける磁性材料の利用⁷⁾

モータの種類



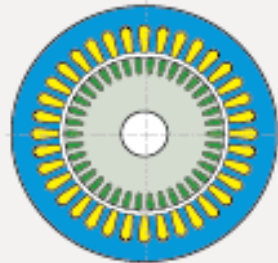
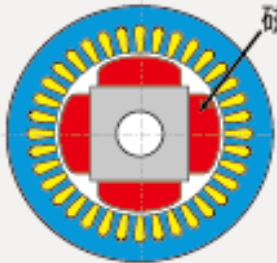
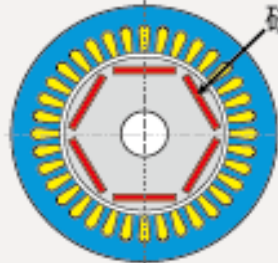
モータ構造 - IPMローター



参考 ; 安川電機HP

<https://www.e-mechatronics.com/mailmgzn/backnumber/201904/mame.html#cate07>

EVのメインモータ

	誘導モータ	PMモータ	
		SPMモータ	IPMモータ
回転子構造 (断面図)		 磁石	 磁石
		回転子の表面に 磁石を貼り付ける	回転子の中に 磁石を埋め込む
原理	回転子に電流が流れ、 回転磁界速度よりス リップ速度だけ遅れて 回転。	磁石トルクだけが発生 し、回転子は回転磁界 と同一速度で回転。	磁石トルクとリラクタ ンストルクが発生し、 回転子は回転磁界と同 一速度で回転。
体積	同期モータより 2~3 枠以上大	超小	小
効率・力率	○	◎	◎
高速	◎	○(サーボの場合は◎)	◎
最大トルク	◎	○(サーボの場合は◎)	○
トルク成分	誘導	磁石	磁石とリラクタンス

E V用モーター用途

内容	仕様	適用	モーター種類	数量
モーター関連	メインモータ	パワートレイン（高効率）	I P M S M S P M S M 他	1
	重要な補助モータ	カーエアコン用ポンプ	IPM,DC	1
		オイルポンプ、冷却用ポンプ	DC	数個
		パワーステアリング	DC、I P M	1
		ステアリングロック	DC	1
	その他	ドアウィンドウ/ドアクローザ	DC	4 / 2
		サイドミラー	DC	2
		シート駆動	DC	4
		エアコンダンパー ルーバー	D C、ステッピング	4
		ヘッドライドアップ、ダウン	ステッピング、D C	2
		ヘッドライトカーブ	ステッピング、D C	2
		ウィンドウオッシャーポンプ	D C、ステッピング	1

NdFeB磁石について



磁石と日本人

つよい磁石は日本人の発明だよ！

- ・ 1917 **KS鋼** (磁鉄鉱の3倍)

発明者：東北大学 本多光太郎



- ・ 1930 **フェライト磁石** (磁鉄鉱の8倍)

発明者：東京工業大学 加藤 与五郎
武井 武

鉄・クロムコバルト磁石 本間基文



- ・ 1983 **ネオジウム磁石** (磁鉄鉱の30倍)

発明者：(元)住友特 佐川真人

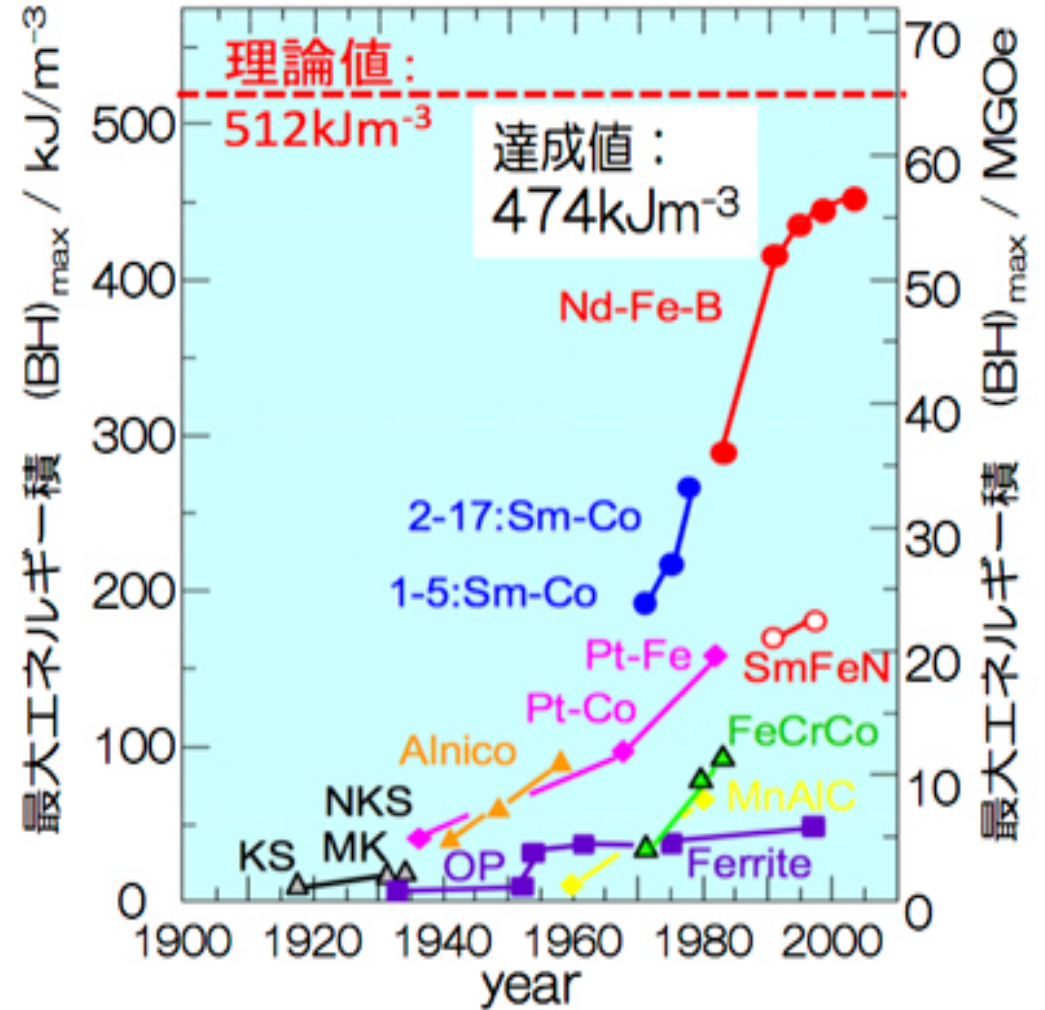
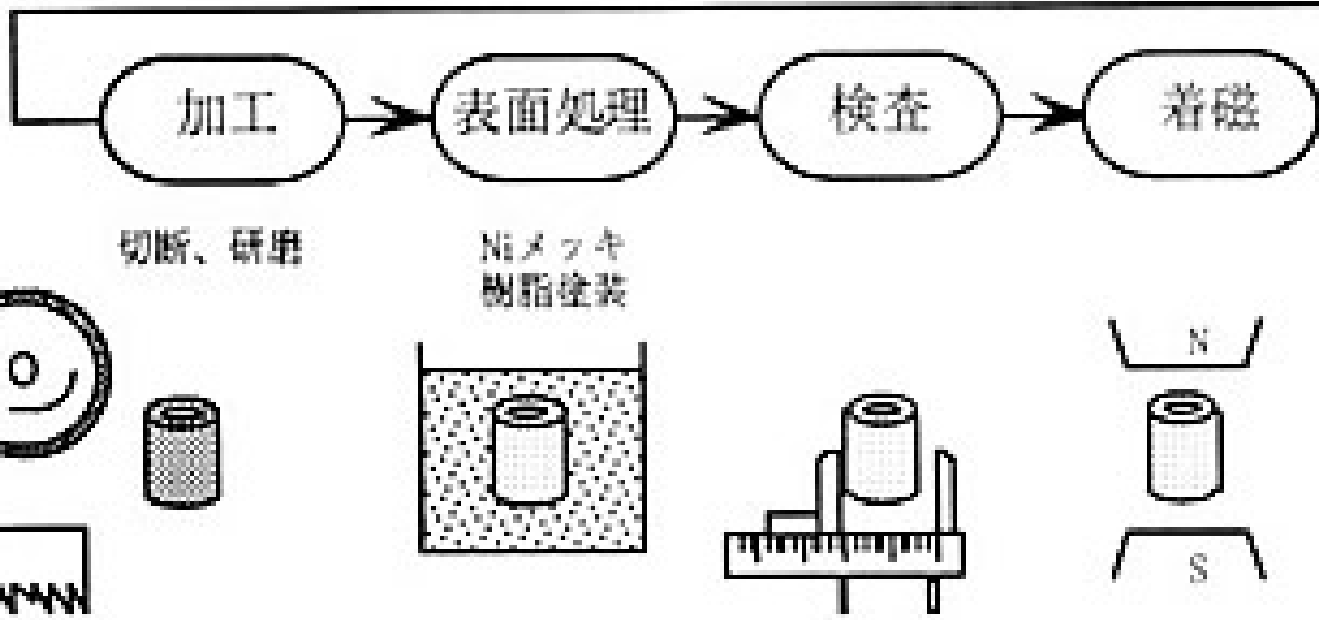
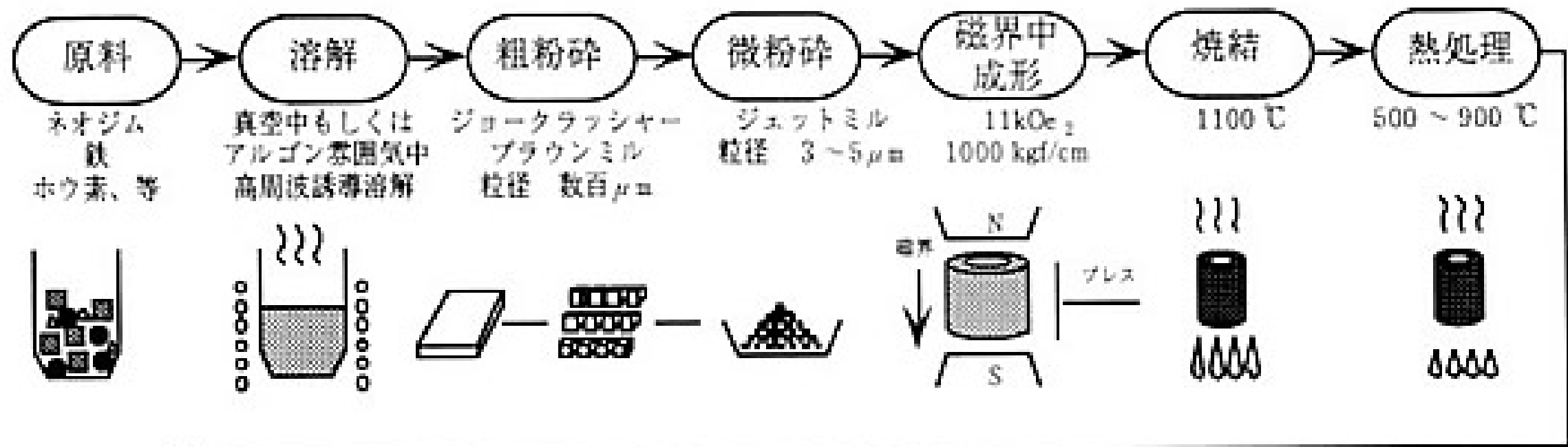


図 永久磁石材料開発の歴史と最大エネルギー積(BH)_{max}



小林様 希土類磁石の原料と課題

NdFeB磁石の課題

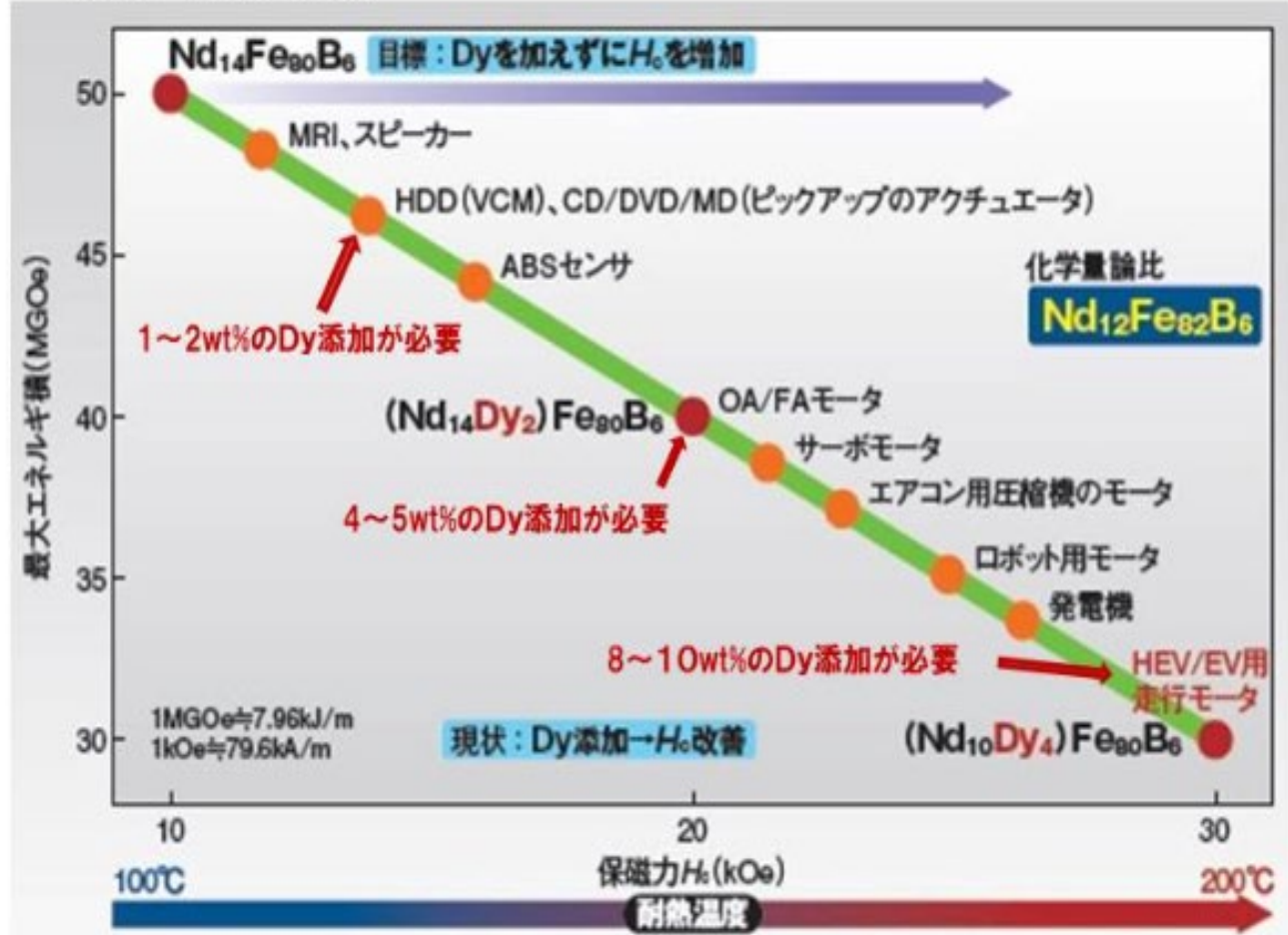
1, 温度特性の改良
NdFeB + **Dy** (EVは200°C)

2, 資源問題
Dy, Nd, など希土類元素
資源問題 (国家安全保障)

3, 高性能磁石の開発
SmFeN系の可能性

ネオジム磁石の保磁力とジスプロシウム(Dy)含有量

2012~2013年当時



MRI: 磁気共鳴画像装置
HDD: ハードディスク装置
VCM: ボイス・コイル・モータ
CD: Compact Disc

MD: MiniDisc
ABS: Antilock Brake System
OA: オフィス・オートメーション
FA: ファクトリー・オートメーション

HEV: ハイブリット車
EV: 電動自動車

NdFeB磁石—温度特性の改良—

省Dy技術開発

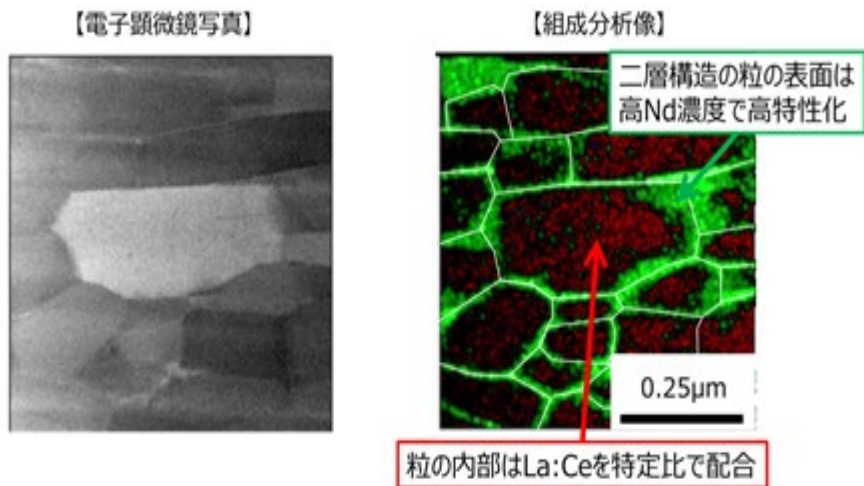


図4 電子顕微鏡像と組成分析像

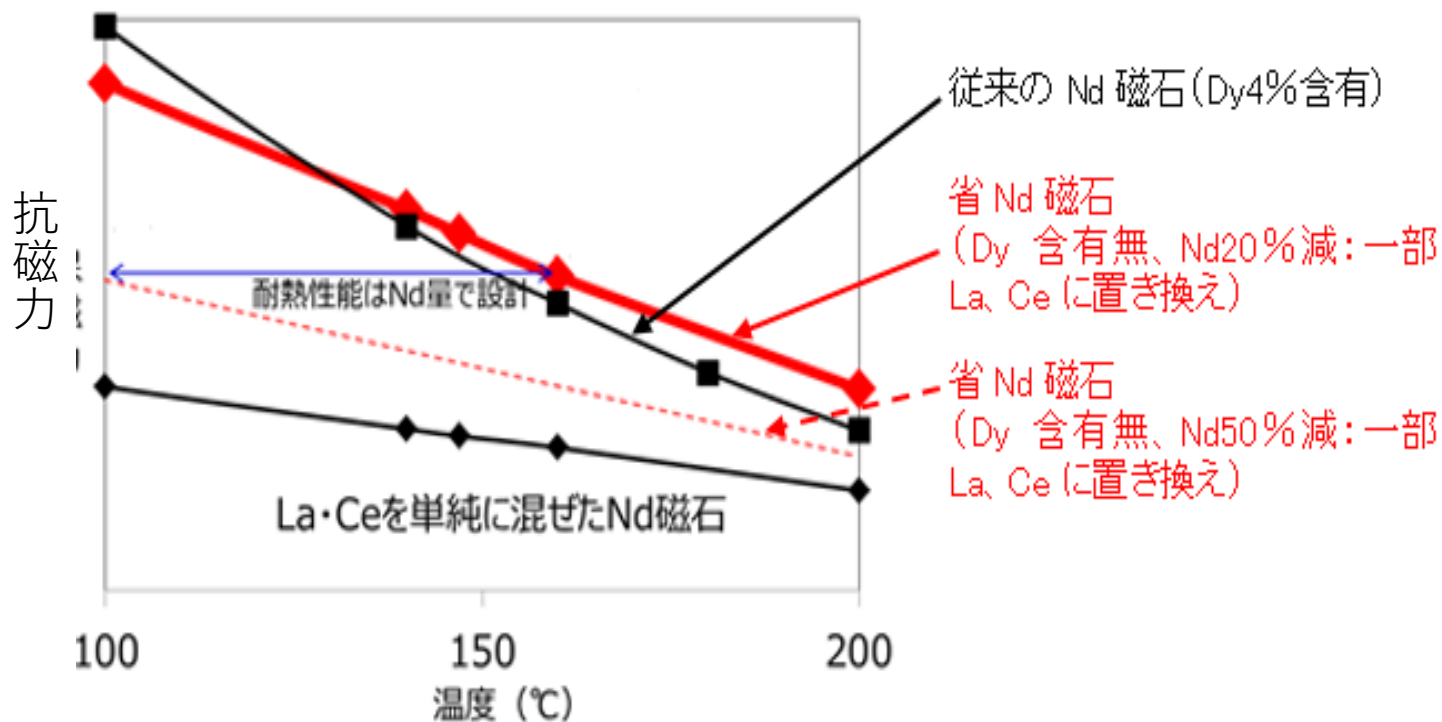


図5 従来と省Nd磁石の耐熱性能比較

モータの効率化 (例：日産リーフのモータのロータ部分)

IPMSモータロータ
磁気トルク
リラクタンストルク



NdFeB磁石

EVモーター — —磁石の比較—

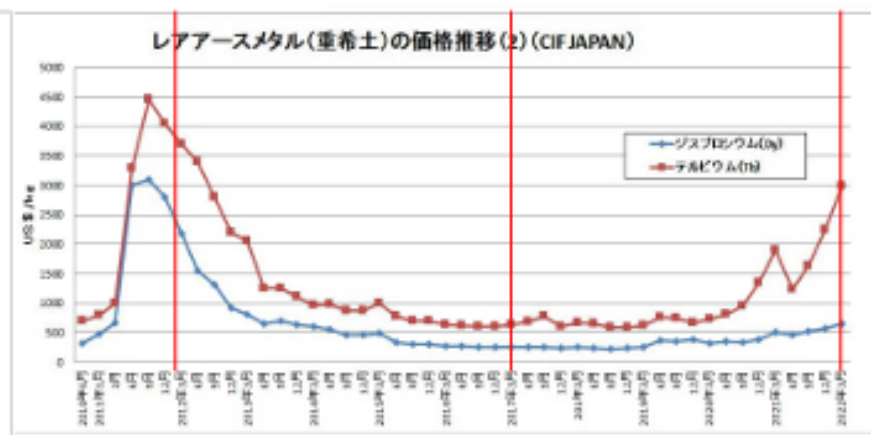
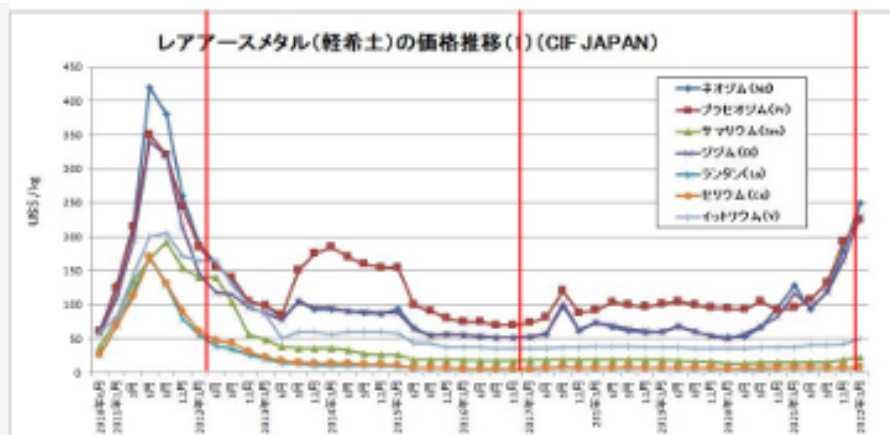
xEV 駆動用モーターの設計例

	希土類磁石使用 (比較基準)	高性能フェライト磁石使用 ① (モーター性能同等)	高性能フェライト磁石使用 ② (モーターサイズ同等・高速回転化)
モーター：“1/8モデル” ■ ネオジム磁石 ■ 高性能フェライト磁石 NMF®-15G			
最大出力	110 kW	110 kW	105 kW
最高回転速度	10,000 rpm	10,000 rpm	15,000 rpm
軸方向積厚	1 (ref.)	1.4	1.0
磁石 B_r	1 (ref.)	0.37	0.37
磁石重量	1 (ref.)	1.7	1.2
モータ重量	1 (ref.)	1.3	1.0

小型化
高トルク
高効率
軽量化

*ローター・ステーター径は固定、運転温度や高速回転時の強度確保などを考慮して設計

希土類資源問題



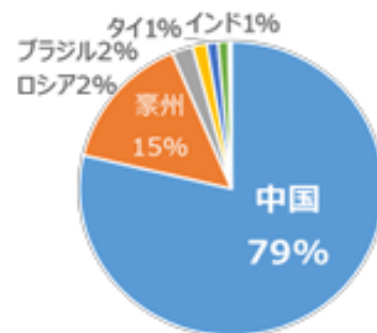
ネオマグ株式会社ホームページより転載許可をいただいて引用 https://www.neomag.jp/mag_navi/statistics/rare_earth_newprice2.html

■レアアースの価格は特定国の政策により2011年に高騰。その後沈静化した。安定時でも**2005年の4~6倍程度の高値**。最近の国際情勢により再度上昇

- **地政学的にも資源リスクが高い。**
 - 特にディスプロシウム(Dy)。

レアアース(Dy, Nd)の使用量を削減、あるいは使用しない高性能磁石の開発が必要

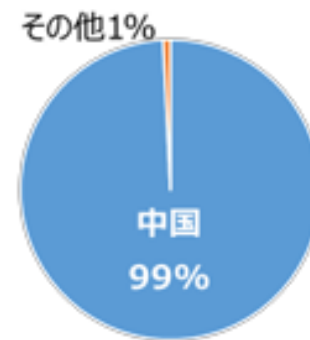
世界のレアアースの生産量 (酸化物換算、2017)



総生産量134,000t

JOGMEC「鉱物資源マテリアルフロー2018 8.レアアース」を基に作成

ディスプロシウム (Dy) の生産量 (酸化物換算、2017)



総生産量2,300t

「工業レアメタル2018」を基に作成

NeFeB磁石—資源問題—

Nd,Dy削減

プロセスの検討

粒界拡散法→Te (粒界)

プレスレスプロセス

ストリップキャスト

熱間加工

組成の検討

重希土類省の検討

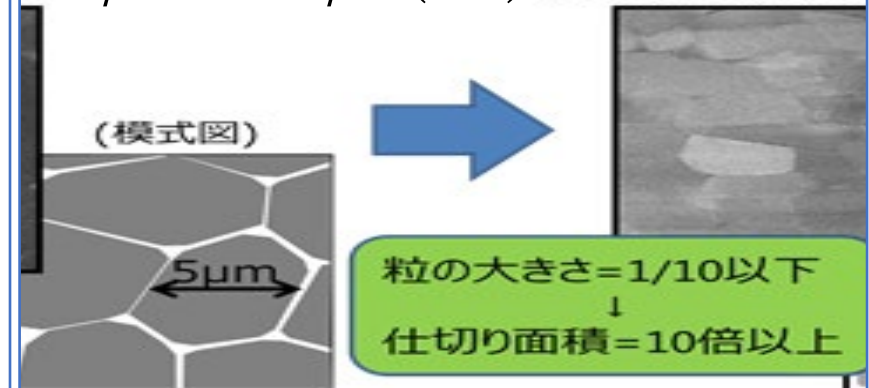
Nd→La,Ceミックス

(20%減)

Dy8~9%→5.3%

粒径の検討

5 μ → サブ μ (0.8) 【粒を微細化したNd



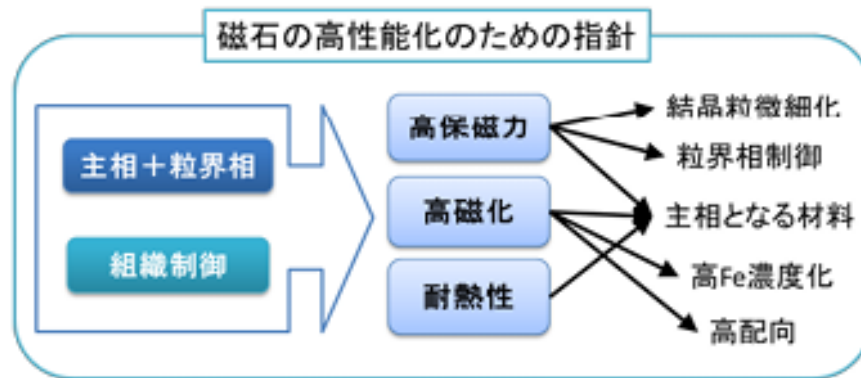
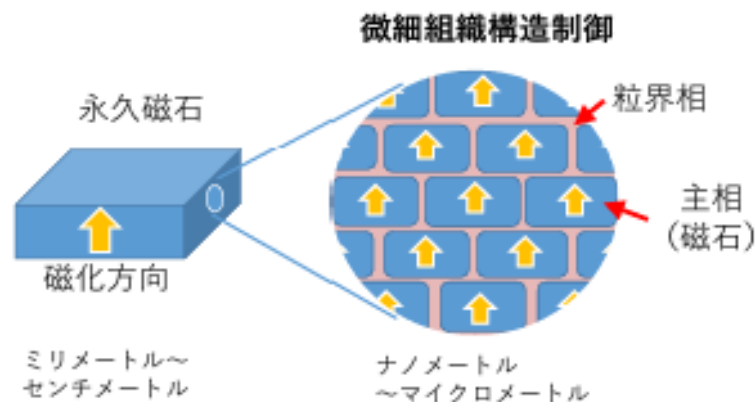
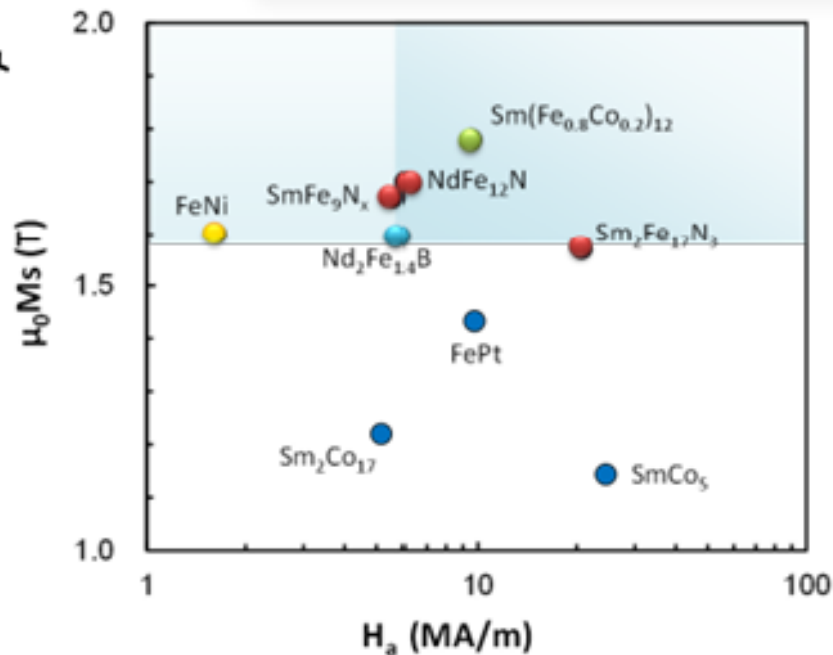
従来と開発したNd磁石を構成する粒の比

希土類磁石の開発最前線

①-2 新規高性能磁石の開発

(BH)_{max} = 50MGOe@180°Cに向けた取り組み

- ① ナノコンポジット磁石
 - ② TbCu7型Sm-Fe-N
 - ③ 1-12系(Nd-Fe-N他)
 - ④ Sm₂Fe₁₇N₃系
 - ⑤ 超Nd磁石
- 中間報告までの成果



出典：NEDO

高性能磁石の開発

Table 1 Magnetic properties of some intermetallic compounds for permanent magnets.

Compounds	T_c (K)	M_s (T)	$\mu_0 H_a$ (T)
SmCo_5	1000	1.14	28
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	1193	1.25	6.0
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	588	1.60	8.0
$\text{NdFe}_{11}\text{TiN}$	729	1.45	12
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$	749	1.54	26

矢島様 希土類原料とリサイクル

資源確保

EVから見た原料戦略

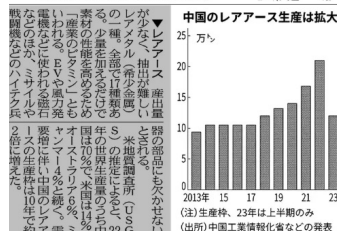
2023.4.26 日経

レアアース 中国大手増産



中国国有企業が建設するレアアースの精練・加工工場（雲南省保山市）

ミャンマーと供給網 米中対立進行に備え



レアアースはハイテク産業に欠かせない

用途	必要レアアース
EVのモーター、駆力発電のタービン	ネオジム、ジスプロシウム
高性能磁石	
液晶パネルなど	セリウム
研磨剤	
光ファイバー	エルビウム、ツリウム
LED	ユウロピウム
蛍光体	イットリウム

生産枠2割増 EV需要対応

【北京】多額巨額 中国国有大手がレアアース（希土類）を増産する。中国北稀土集団は、高純度のレアアースを生産する。中国北稀土集団は、高純度のレアアースを生産する。中国北稀土集団は、高純度のレアアースを生産する。

中国のレアアース生産は拡大。レアアースはハイテク産業に欠かせない。EVのモーター、駆力発電のタービン、高性能磁石、液晶パネルなど、研磨剤、光ファイバー、LED、蛍光体などに必要。中国北稀土集団は、高純度のレアアースを生産する。中国北稀土集団は、高純度のレアアースを生産する。中国北稀土集団は、高純度のレアアースを生産する。

リチウム採掘・レアアース製錬、最大5割補助 経産省、脱中国依存めざす

2023年4月23日 2:00 [有料会員限定]

保存



経済産業省は日本企業による重要鉱物の鉱山開発や製錬事業を最大で半額補助する。電気自動車（EV）の電池、モーターの製造に欠かせないリチウムやレアアース（希土類）などの原材料を確保する。日本は重要鉱物の多くを中国など特定国に依存しており、供給網の多様化を急ぐ。

エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の基金を通じて支援する。既に予算措置した関係経費1058億円から資金を投じる。

技術流出

- 産業の流出
磁石産業が、技術とともに
海外に移転、
国内産業の疲弊、
生産技術の疲弊、
世界市場での競争力の低下

出典：NEDO

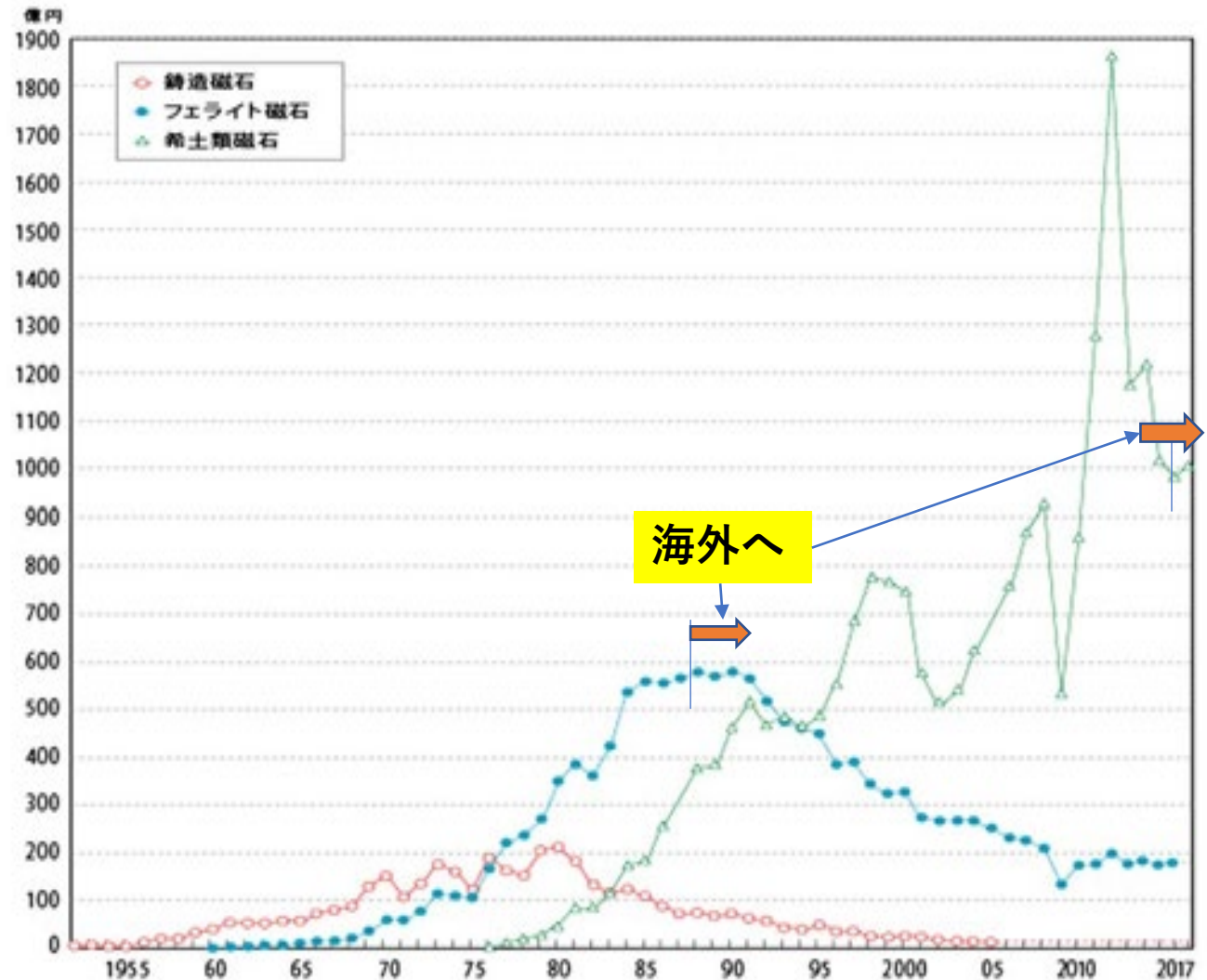


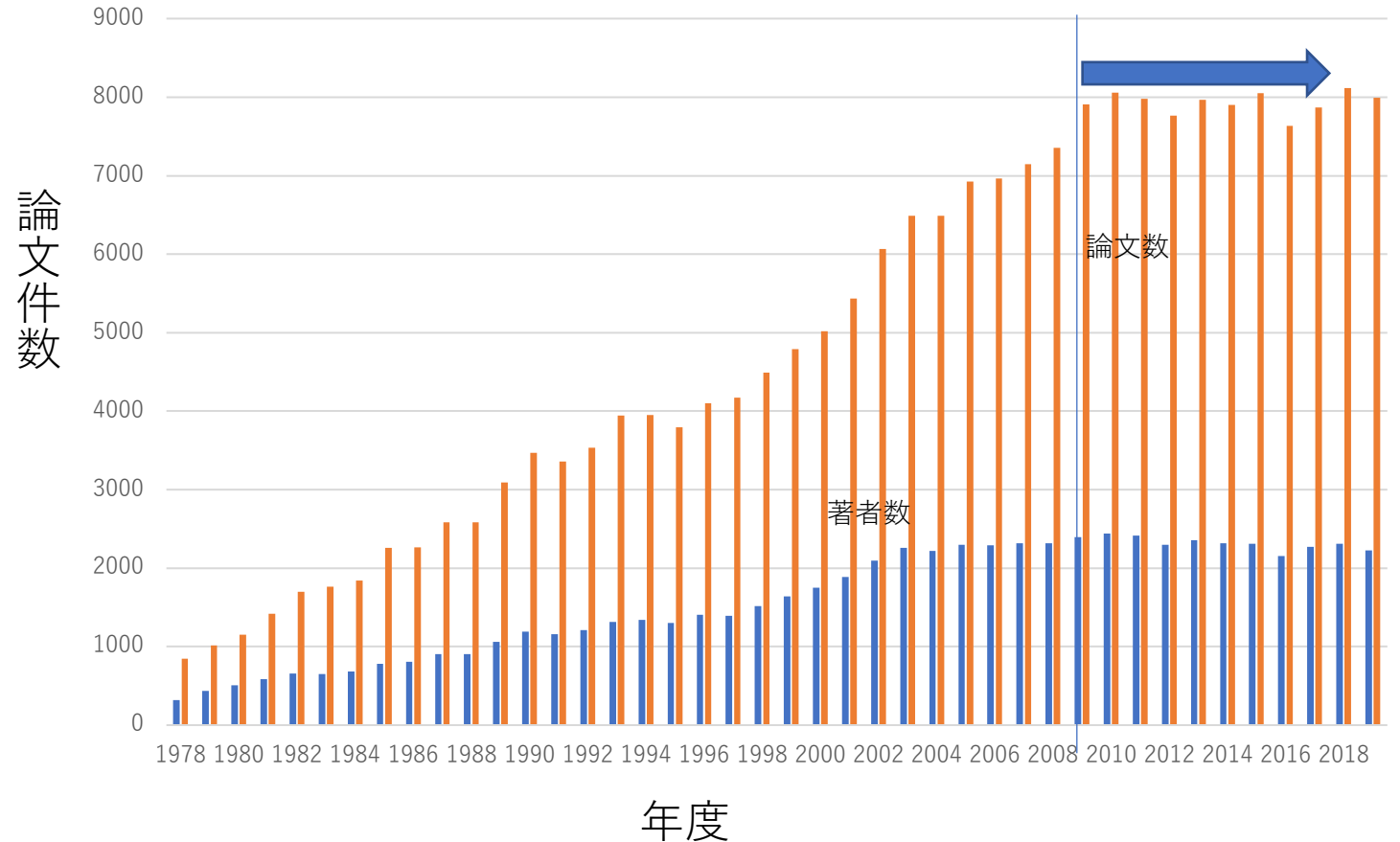
図 2.1.3 日本国内における主な永久磁石の生産金額の推移⁽⁴⁾

議論 どうする日本の技術？

人材育成

- 人材の確保
- 大学の講座の減少
- 論文の件数横這い
- 技術者の減少

磁性材料関係推移



* チャットGPT使用

ご清聴と有益な議論に感謝申し上げます。

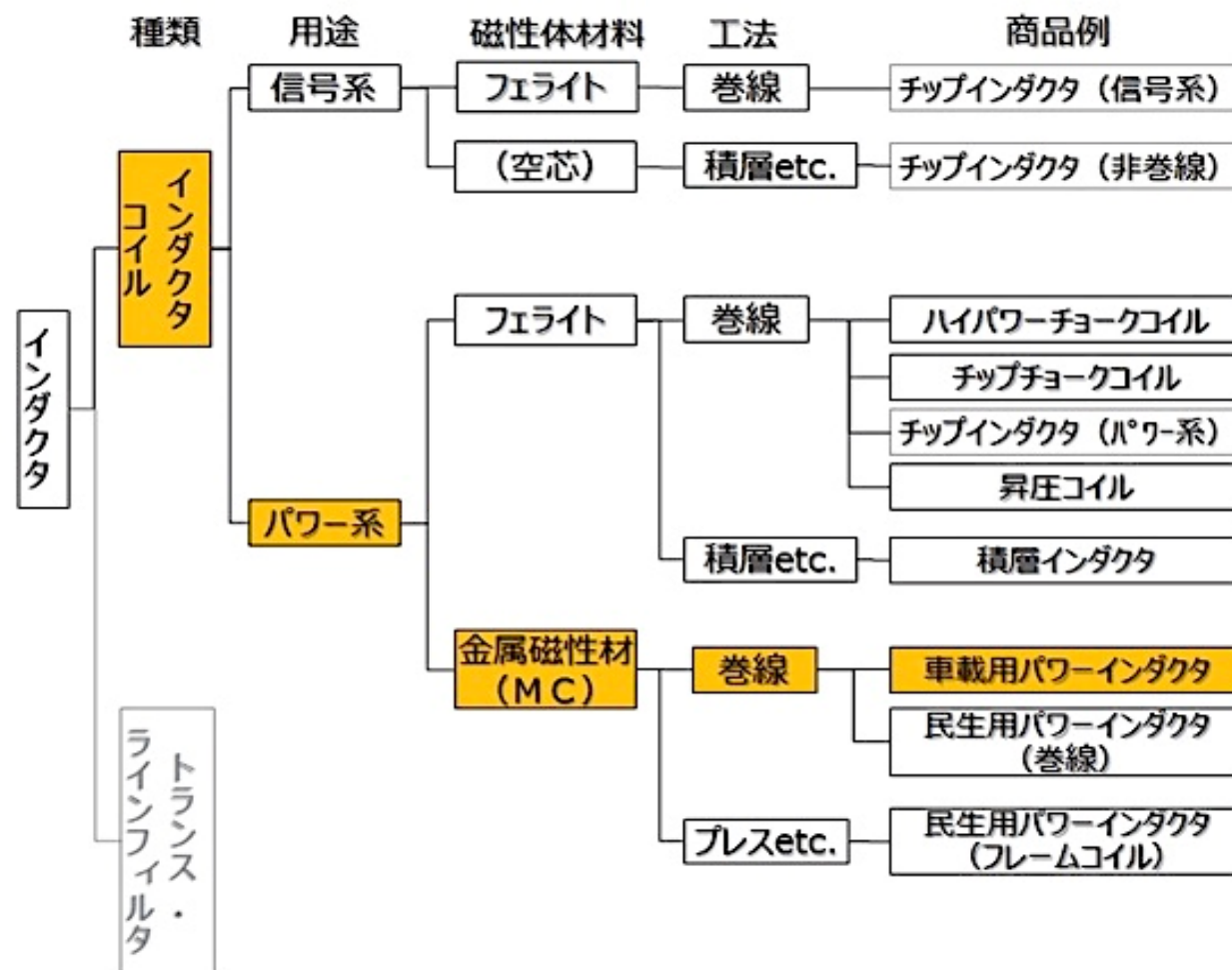
EVのインダクタの状況

- パワーインダクタの位置付け

磁性体にコイルを巻き付けたデバイス

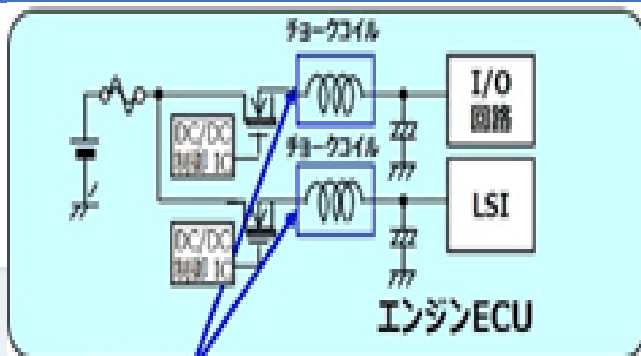
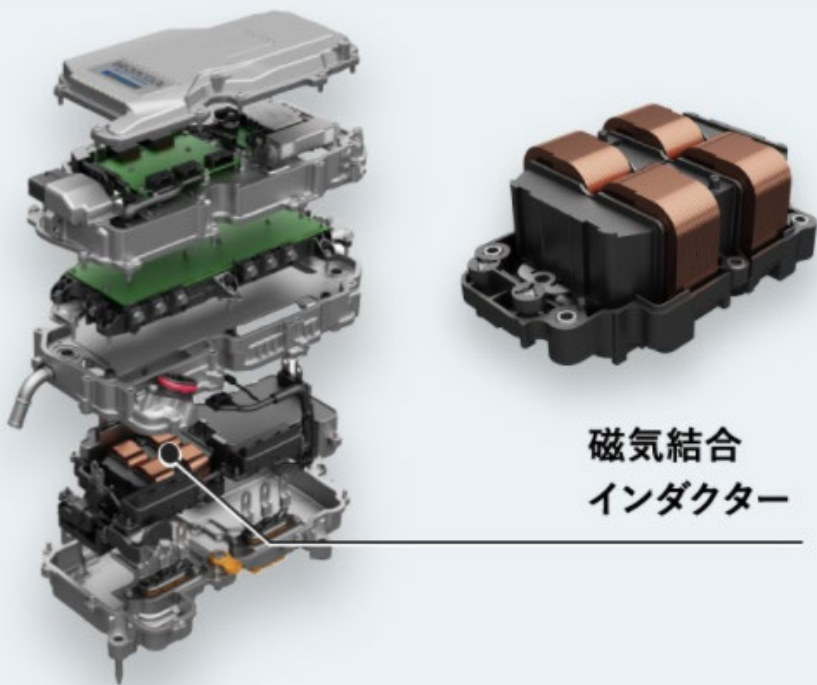
直流電圧を交流電圧に変換 (DC→AC)
 直流電圧を昇圧、減圧を図る (350V→650V)
 (350V→12V)

磁性材料に求められる特性
 高飽和磁束
 高抵抗
 高周波数での透磁率



EVにおけるパワートレイン

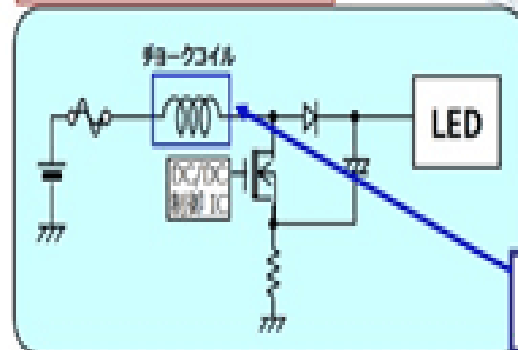
Hondaの
パワートレイン技術



エンジンECU
トランスミッション ECU

ABS ECU
ABS VSC システム

LED ヘッドランプ
LED DRL

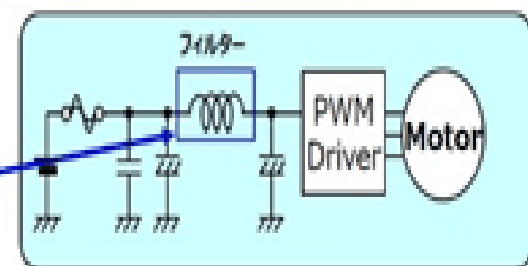


その他 環境が高温、多湿、
高振動にさらされる電子回路

インストゥルメント
ライティング

EPS ECU

モーター系アプリ(EPS/FPC/RFC/BMC/...)
ディーゼル車 コモンレール EDU



EVのインダクタ材料

- 珪素鋼板は商業周波数帯の軟磁性材料としては圧倒的なボリュームを持つ
- 大電流が要求される高周波帯では圧粉磁心の優位性が発揮されている
- 圧粉磁心の材料の種類は、揃ってきているが、価格と性能でどこまで応用が広がるか

周波数	50Hz/60Hz	500Hz	1kHz	50kHz	100kHz	500kHz	1MHz	50MHz	100MHz	1GHz	10GHz
応用	トランス (商用)						通信機用 コイル			マイクロ波用	ミリ波、レーダー
			チョークコイル								
			リアクトル								
	モータ/アクチュエータ										
磁心材料											
ケイ素鋼板	◎	◎									
パーマロイ			◎								
アモルファス			◎	◎	◎						
フェライト			◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
空芯											◎ ◎
圧粉磁心											
* カーボニル			→								
* センダスト			→								
* Mo-パーマロイ			→								
* フェライト					→						
** アモルファス			→								
** 純Fe	注3	→									
** Fe-Si		→									

* 周波数による使用区分/磁性材料粉末冶金応用製品

** 新製品 注3 試作(モータ等)

EVパワーインダクタ (磁心材料)

出展：住友電工

圧粉磁心はナノオーダーの絶縁皮膜で覆われた鉄粉を成形・加熱処理した材料。

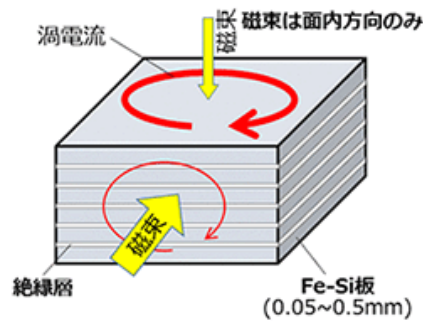
<https://sei.co.jp/pmp/products/seihin02.html>

圧粉磁心の特長は、

- ・方向性がないこと
- ・薄型、小型化が可能

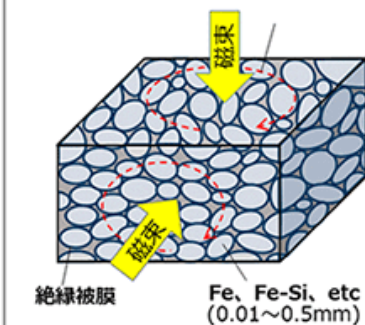
電磁鋼板

絶縁コートされた板を積層
板面内と磁界が直交⇒発熱大

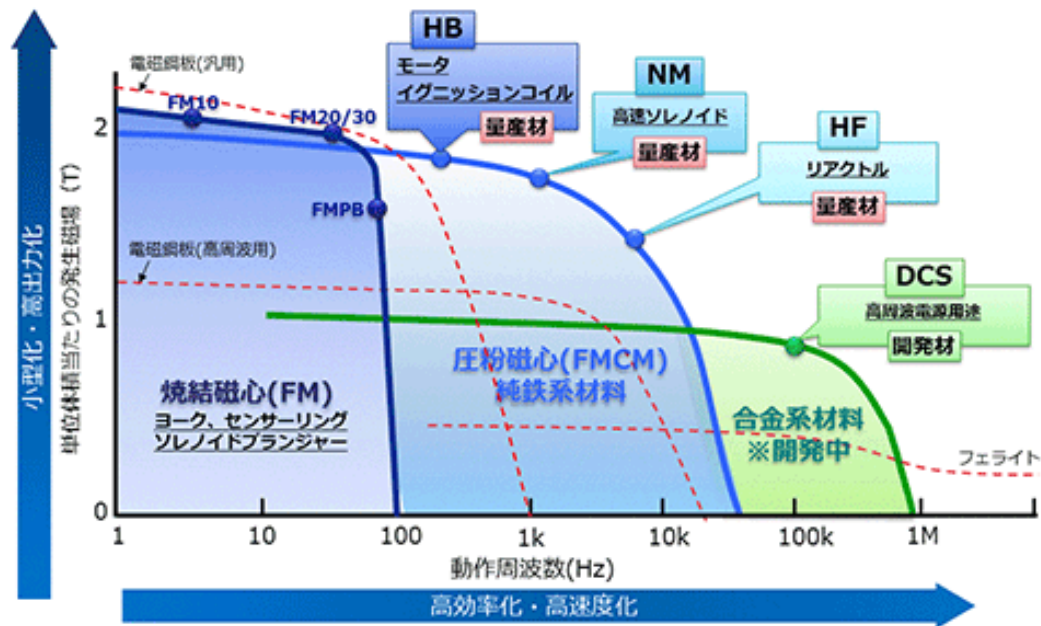


圧粉磁心

個々の金属軟磁性粒子を絶縁被覆し、
圧粉成形
どの方向も発熱小



技術動向：高周波数化

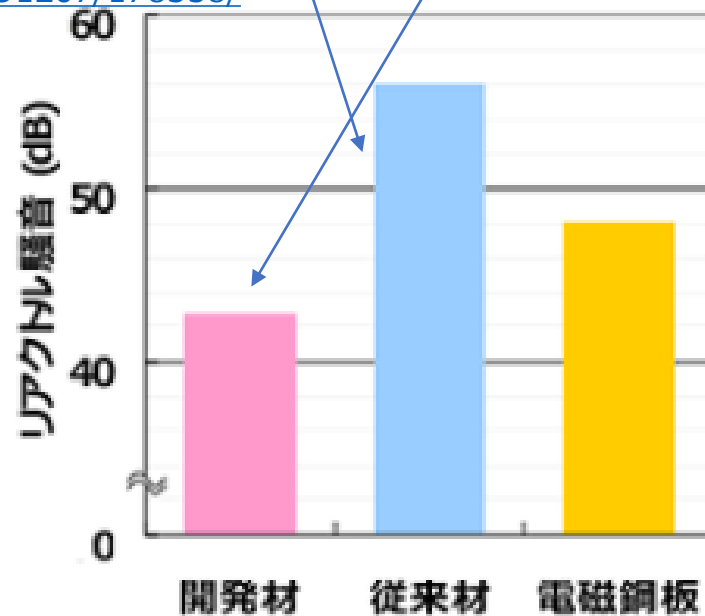


EVパワーインダクタ (例：リアクトル)

出展：ダイアメット

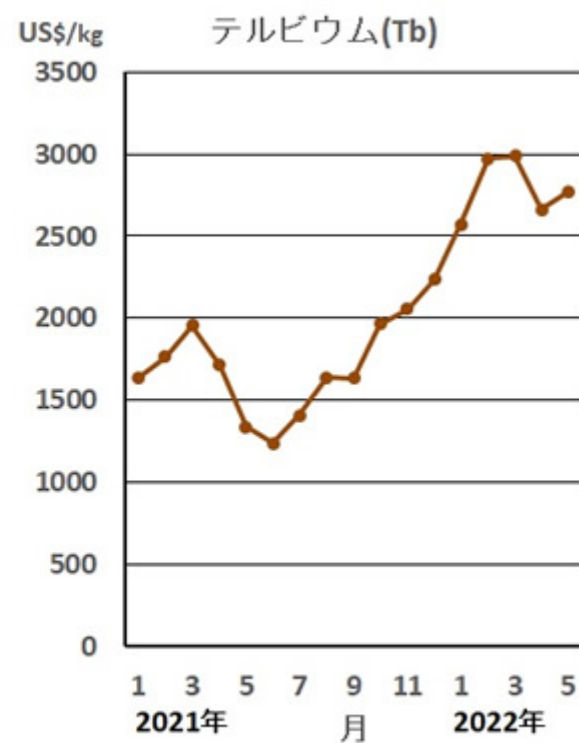
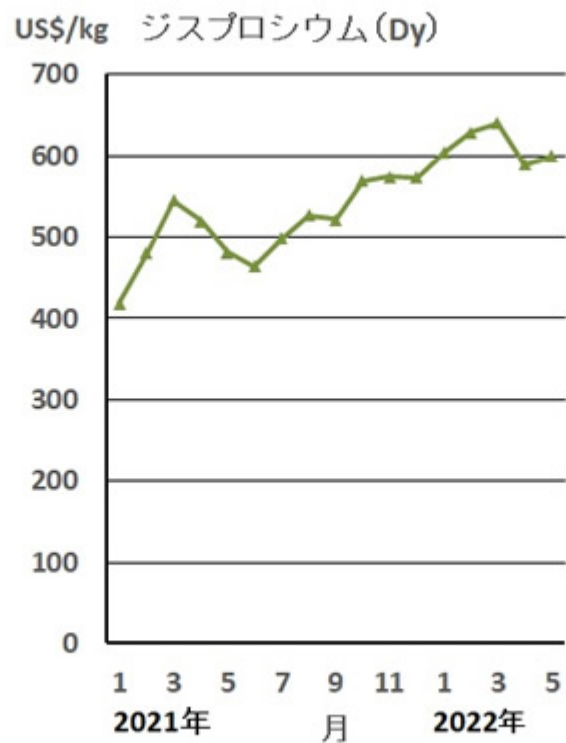
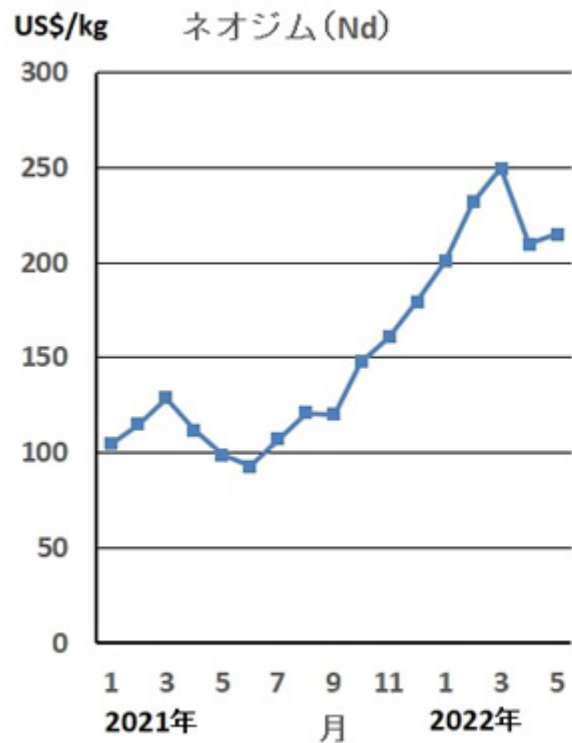
2009年発表のMBS-R
電磁鋼板と比べて鉄損は同等、飽
和磁束密度は10%高いとしている
騒音が大きという問題あり
<https://xtech.nikkei.com/dm/article/NEWS/20091207/178358/>

2013年発表の低騒音コア材
低磁歪材料を使用することで従来コ
アに比較して騒音を13dB低下した
<https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/news/press/2013/13-0213.html>



(ご参照2) DC/DCコンバータ
運転時のリアクトル騒音評価例

希土類原料の価格推移



希土類金属（レアアースメタル）の輸入価格(CIF JAPAN)の推移（ネオマグ磁石ナビ）

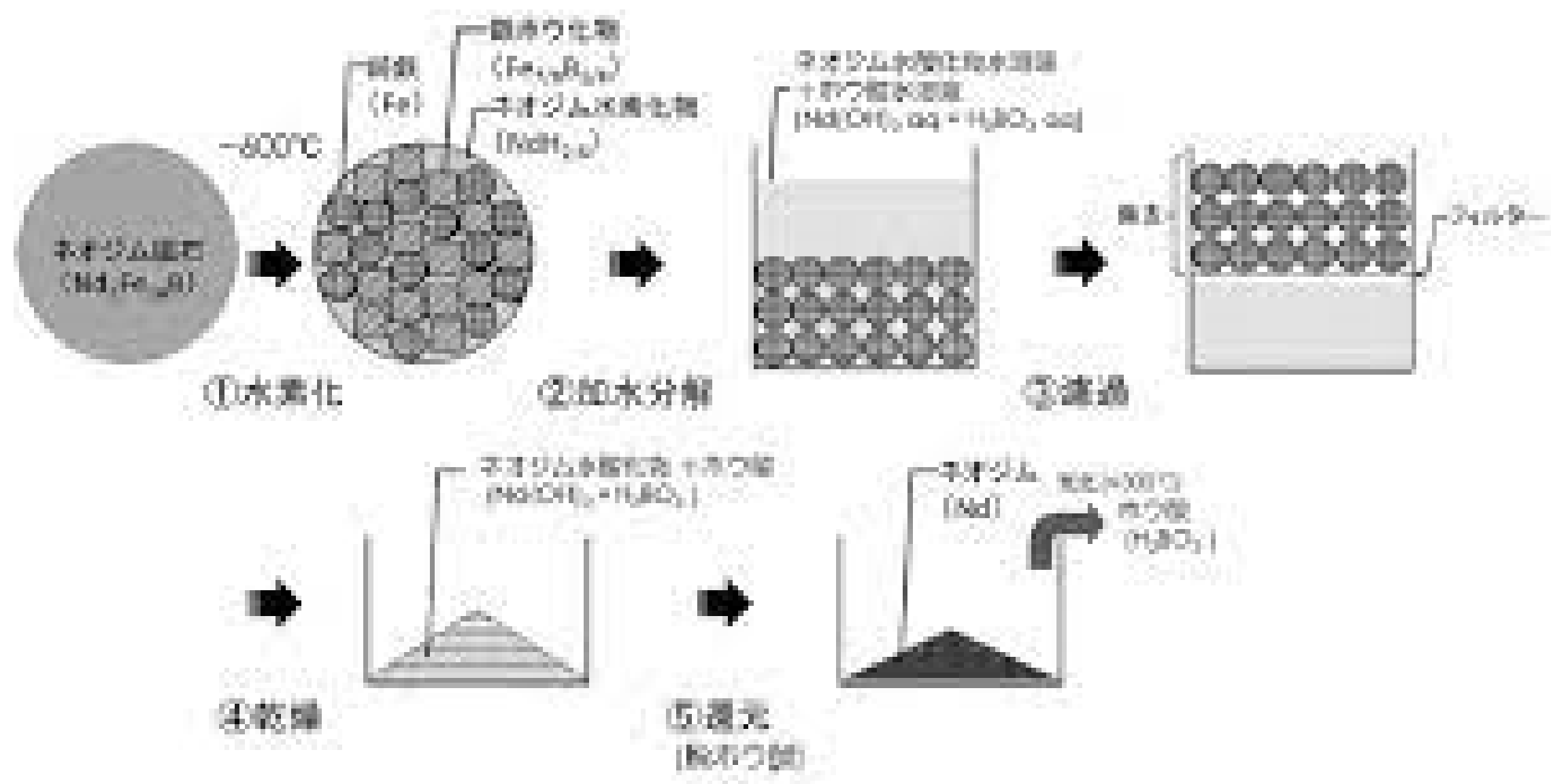


図1 プロセスの概要

Co リサイクルーEV需要ー

コバルト効率生産

三菱マテ EV需要へ調達多様化

三菱マテリアルは電気自動車（EV）に欠かせない希少金属（レアメタル）、コバルトの生産に乗り出す。コバルト含有率が低い鉱石からでも効率的に取り出せる技術を開発し、2023年度からチリの鉱山で実証試験を開始する。27年度の事業化を目指しており、産地が偏在するコバルトの供給網の多様化につながる。

コバルトはEVなどに

使うリチウムイオン電池の中核部材「正極材」の原料。世界的なEV化の流れで需要が伸びているが、銅やニッケルの副産物のため急な増産が難しい。エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）によると、自動車の電動化が大きく進む場合は20年代半ばにも需要が供給を上回る見通しだ。

コバルトはEVなどに

国は紛争リスクなどの懸念があり、EVの普及に向けては調達先の多様化が不可欠となっている。コバルトは鉱石を硫酸に浸して銅を取り出した後、残った液から抽出するのが一般的な生産方法の一つ。コバルトの含有率が0・150・4%と比較的高い鉱石が採算性が良いとされる。三菱マテは硫酸を使うのは同様だが、抽出技術を工夫した独自手法を開発し、コ

バルト産出の7割を占めていることも課題だ。同

バルトの含有率が従来比30分の1程度の鉱石でも採算が取れるという。三菱マテが権益を一部持つチリのマントベルデ銅鉱山で23年度から現場実証を始める。新手法でのコバルト生産の課題などを確認し、27年度にも商業生産を目指す。生産規模は年間200ト程度になる可能性がある。産出量はEV2万台弱の規模に相当する。コバルトの含有率が低い鉱石を産出する鉱山はチリのほか、オーストラリアなどにもある。同社は他の鉱山でも同様の手法でコバルトを生産できないか検討する。

バルトの含有率が従来比30分の1程度の鉱石でも採算が取れるという。