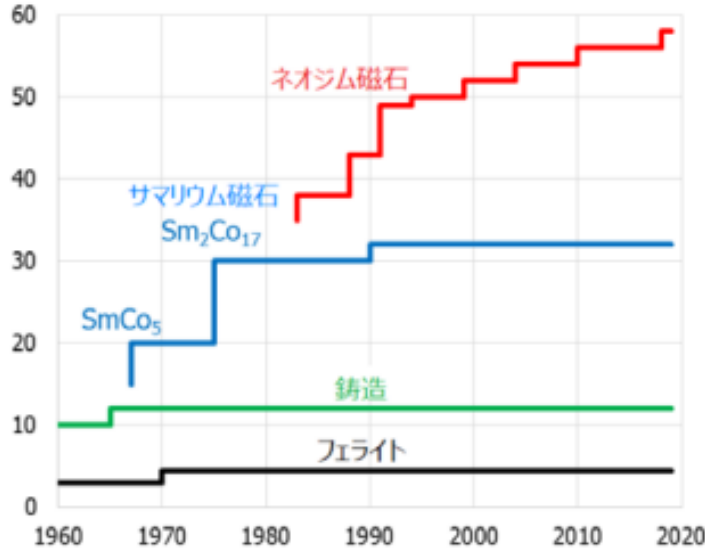


佐川真人さん エリザベス女王工学賞2022年受賞

https://scienceportal.jst.go.jp/explore/highlight/20120605_01/index.html より

最大エネルギー積 [MGOe]



前略) 私がヒントを得た1978年には、ネオジウム(Nd)-鉄(Fe)-ボロン(B)の組み合わせが磁石として有望であることを見つけていたのです。ところが「磁石の研究は終わりだ」と富士通研究所のトップから言われたのです。

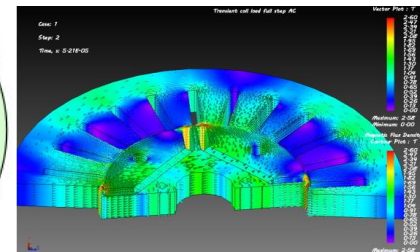
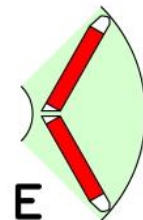
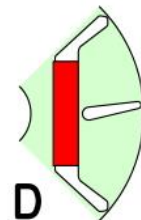
新しいNd-Fe-B磁石を作る研究は、公式テーマとして取り上げられることなく、1980年までに修了してしまいましたが、決してあきらめていた訳ではありません。頭の中で研究を進め、時には余ったサンプルで溶かしてみたりしていました。そうしているうちに、上司との決定的な事件が起きてしまいました。ふだんからよく怒る上司で、その人にもものすごい大声で怒鳴られたことを契機に私は辞表を出して、富士通研究所を退職しました。そして住友特殊金属に入社し、それからすぐの1982年5月に、住友特殊金属の実験室で、世界最強の磁気特性をもつ「ネオジウム磁石(Nd-Fe-B磁石)」ができたのです。

磁石モータが普及するようになった背景

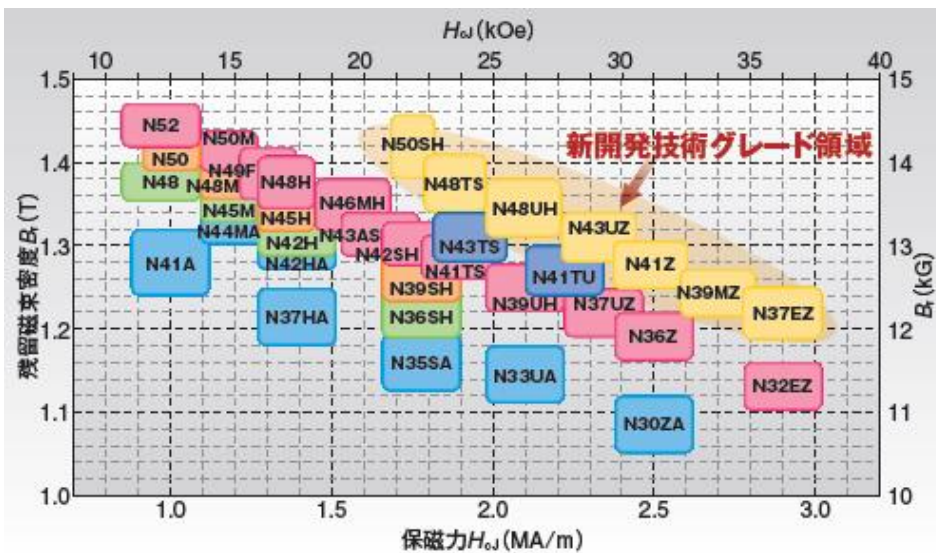
- 特許も切れ, 中国内競争もあり磁石が安くなった 20円/g → 半額以下に!
- 重希土類添加による耐熱性向上した (粒界拡散で重希土削減)
- 磁界解析技術進化によるロータ形状最適化
- マイコン進化による高周波駆動対応
- パワー半導体進化による高周波駆動対応
- 安価なセンサとノイズ処理技術
- 電磁鋼板の素材改良・薄板化による鉄損低減
- 薄板化した電磁鋼板に対応した積層・プレス技術の進化



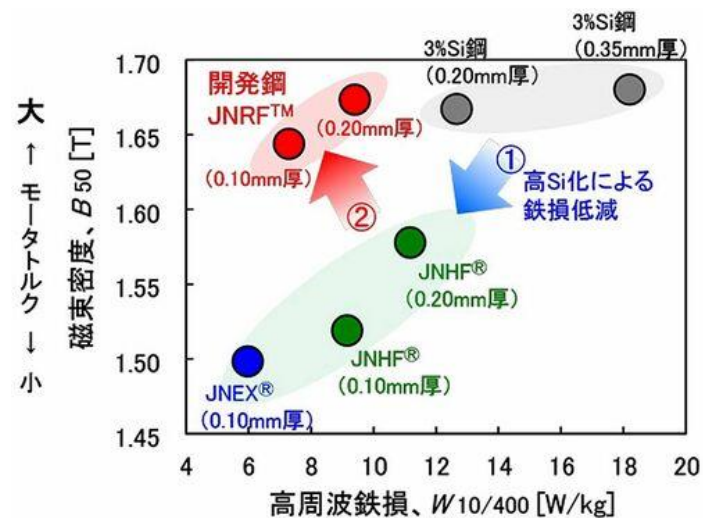
<https://www.tamagawa-seiki.co.jp/>



https://www.jmag-international.com/jp/engineers_diary/012/



信越磁石カタログより



JFEカタログより

永久磁石でモータを小型化！！



https://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Ranger_EV

4極 : TRV=88



4極 : TRV=78

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03304650/document>

多極設計でロータを大きくできる = 小型高トルク
(TRV: Torque per Rotor Volume)



https://www.marklines.com/ja/report_all/rep1830_201903

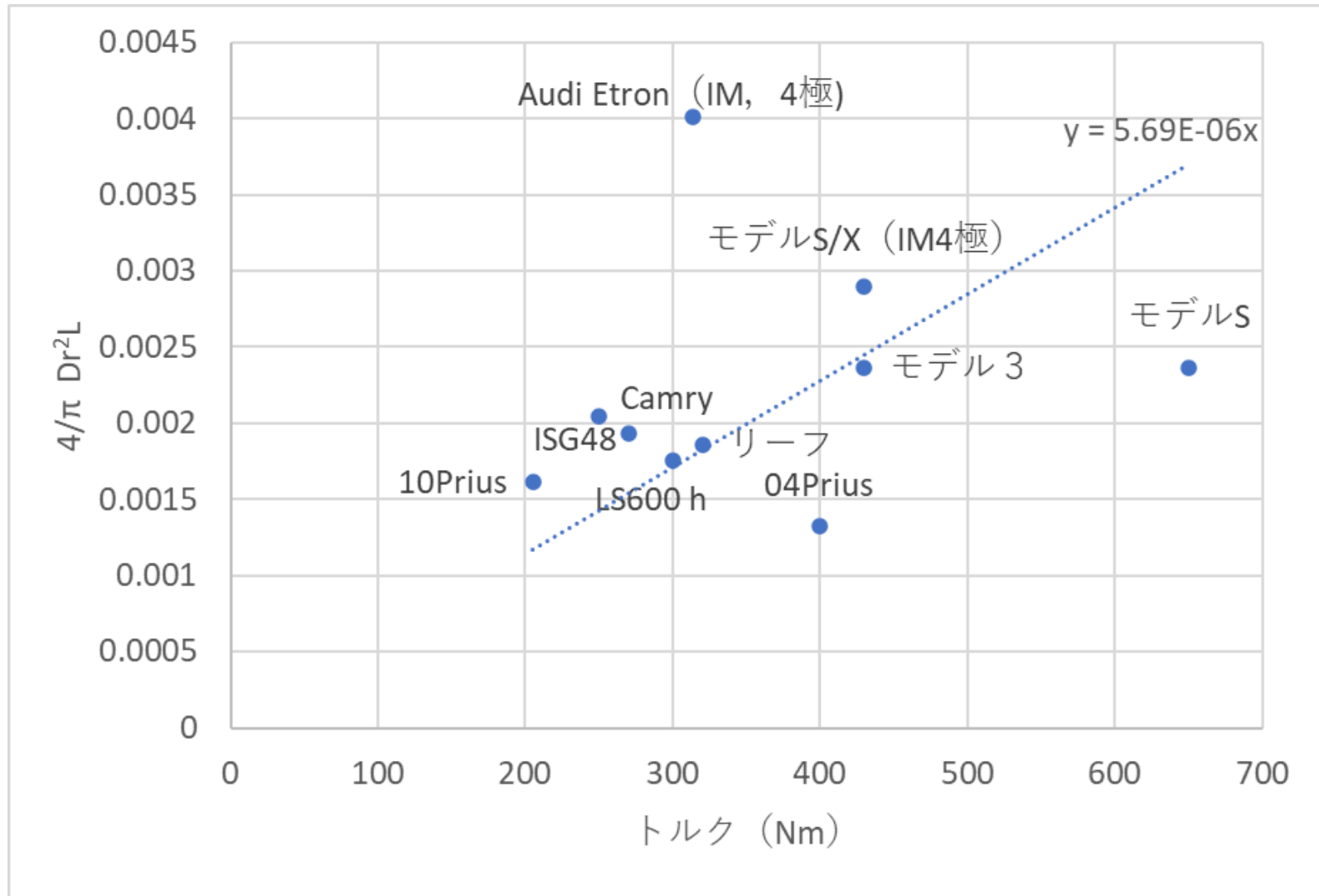
8極 : TRV=182



https://www.marklines.com/ja/report_all/rep1779_201811

8極 : TRV=172

TRV: Torque per Rotor Volume



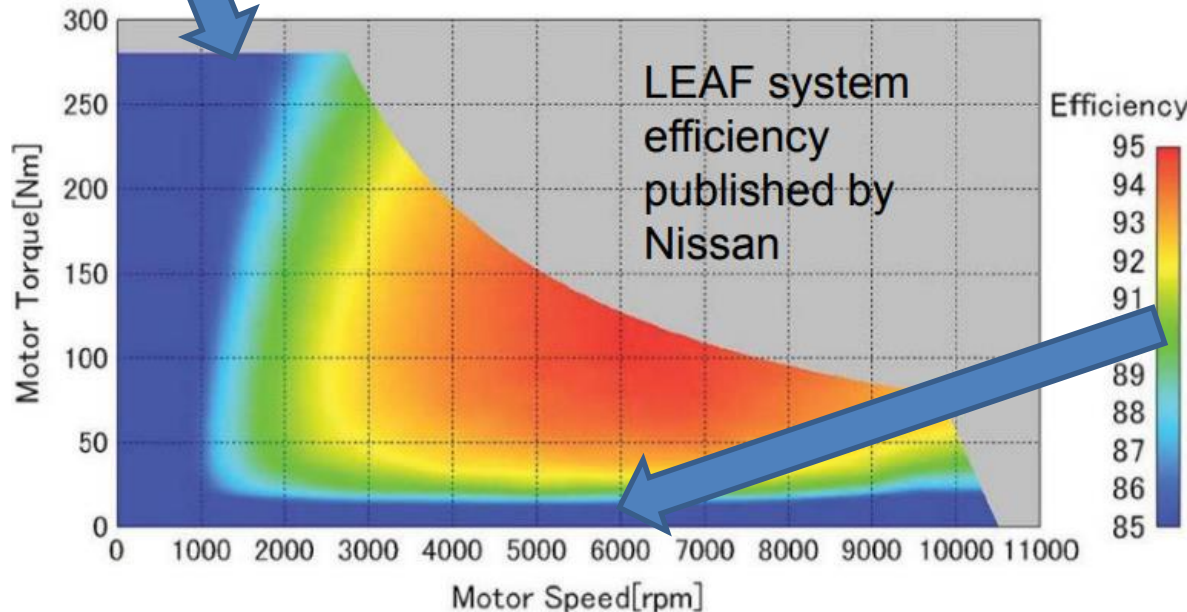
永久磁石式モータの弱点は高速低負荷の効率悪化

$$\text{モータ効率} = \frac{\omega I K_t}{I^2 R + N L_{loss} + \omega I K_t}$$

ω 機械角速度
 $N L_{loss}$ 無負荷損 (メカ損, 鉄損)
 K_t トルク定数

トルクはほぼ電流×磁力、銅損 $I^2 R$ は電流の2乗に比例
磁力が大きいほど電流が減る = 銅損が減る

高速は鉄損が損失の主要因
磁力が大きいほど鉄損が大きい



80 k m/h で巡航しているとき6000rpm, 10Nm程度
80kW出せるモータの1/10程度も使っていない

"Power from Within", Nissan LEAF Special Edition of SAE Vehicle Electrification, p. 17, Feb. 23, 2011.

"Efficiency Maps of Electrical Machines", AMahmoudi, Wen L. Soong . et Al
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7310051>

最大効率とは銅損 = 鉄損の原則

$$\text{モータ効率} = \frac{\omega I K_t}{I^2 R + N L_{loss} + \omega I K_t}$$

$$\text{モータ効率} = \frac{\omega K_t}{I R + N L_{loss} / I + \omega K_t}$$

分子をIに関して微分して 最小となる点が最大効率

$$df/dI = R - N L_{loss} / I^2 = 0$$

$$I^2 R = N L_{loss}$$

無負荷損 $N L_{loss}$ = 銅損 $I^2 R$ でモータは最大効率

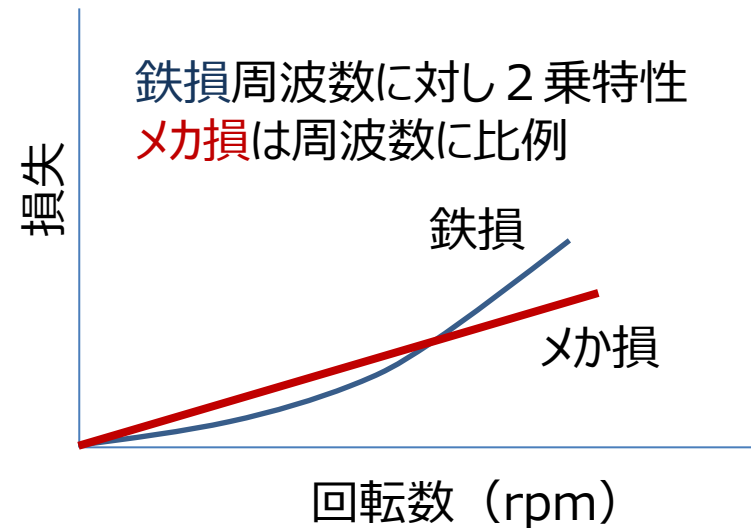
高速では最大出力の数%の鉄損が発生する, 鉄損があると低負荷の効率を高められない、

例: 100kWのモータで 2kWの鉄損がでると, 銅損が2kWの時に最大効率となるので
その時の最大効率は 4 kWの損失があるので
最大効率 = $100 / (100 + 4) = 96\%$

ω 機械角速度
 $N L_{loss}$ 無負荷損 (メカ損, 鉄損)
 K_t トルク定数

$$\text{銅損} = I^2 R$$

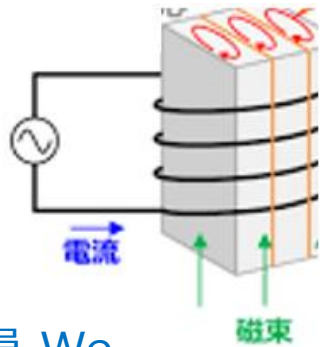
$$\begin{aligned} \text{出力} &= \omega T \quad (\omega \text{角速度、} T \text{トルク}) \\ &\doteq \omega I \cdot K_t \quad (K_t \text{はトルク定数}) \end{aligned}$$



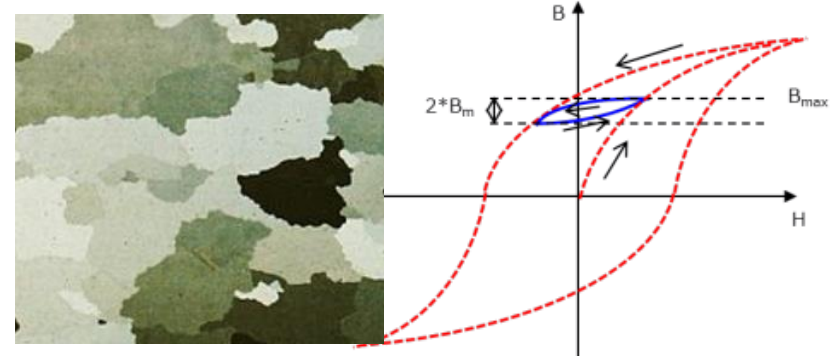
永久磁石式モータの弱点

□-タの磁石磁束が一定

- ① 高回転では誘起電圧を発生し、制御失効時（トラブル）に備えた保護回路・制御が必要
- ② 磁石磁束で無負荷でも、鉄損（渦電流損+ヒステリシス損）が発生し低負荷効率が悪い



+



渦電流損 W_e

(周波数の2乗, $1/\text{板厚}^2$)

$$\frac{\pi^2 d^2 B_m^2 f^2}{6\rho}$$

d : 板厚 ρ 導電率 B_m 磁束密度 f 周波数

$$W = W_h + W_e = af + bf^2$$

周波数が増える = 鉄損が増える

ヒステリシス損 W_h

(周波数, 磁束密度の1.6~2に乗比例)

電磁鋼板は結晶内の電流偏りから渦電流損が増える異常渦損 W_{exc} も発生

$$\begin{aligned} W &= W_h + W_{ce} + W_{exc} \\ &= W_h + \frac{\pi d^2 B_m^2 f^2}{6\rho} + A \cdot B_m^{1.5} f^{1.5} \end{aligned}$$

永久磁石式モータの弱点

Tesla Model 3



211kW (280ps)のPMモータ電池は54kWh
これでも既に過剰の大型モータで = 鉄損が大きい
が、、、

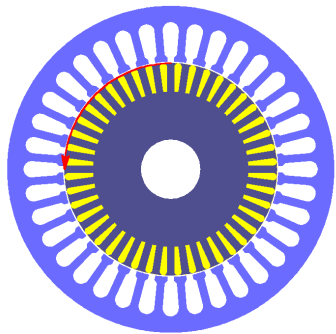
Tesla Model S Plaid



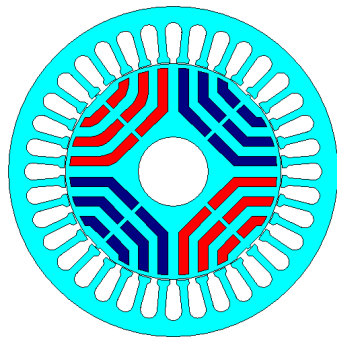
前輪 1、後輪 2 の3モータで 1020ps (約750kW)
モータがたくさんあって、鉄損も非常に大きく 燃費も悪いので
100kWh のおおきなバッテリーを積んでいる

鉄損低減へのアプローチ = 可変磁束

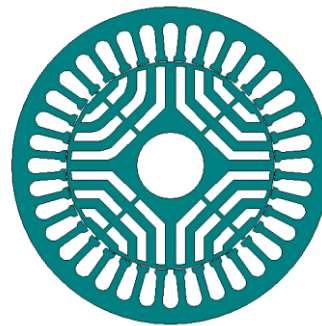
誘導モータ



磁石 + リラクタンس併用



リラクタンスマータ



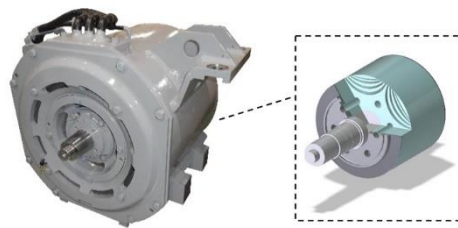
巻き線界磁
(電磁石) モータ



Audi E Tron GT Motor & Drivetrain Animation Youtube



Prius 3rd



東京メトロ実証試験



Prius 4th



GM Volt

