

モータの損失と定格出力

電気機器を駆動すると損失のために温度が上昇する。機器各部の温度と周囲温度との差を、その部分の温度上昇という。(改訂2,3版共通p10)

温度上昇限度値は、絶縁種別やその部位により異なり、定格出力とは、連続運転において各部位が温度上昇限度内を維持できる最大出力をいう。

例えばEVモータの最大効率は97%に達する現状において、損失を低減する目的は、例えば1%の効率向上により、97→98%の出力を得ることより、発熱を2/3に低減してより大きな入力を可能にする意味が大きいと考える。

モータの損失

モータの損失と温度上昇

モータ内部の熱伝導とコイルの温度上昇

温度上昇を低減するには

CASE1 (経験的な例)

銅損 + 漂遊負荷損 + 鉄損 + 機械損 = 100%

50% 15% 20% 15%

⇒ 極端に大きな損失の計算間違いを疑う。

CASE2 (過度な小形化)

$\theta_s = W_i / (\kappa \cdot O_s) + 15 \Rightarrow O_s$ (表面積) を増大する。

⇒ サイズ (D, Li) を増大する。

CASE2 (銅損対策)

$W_c = 3I^2R \Rightarrow R$ (抵抗) を下げる。

⇒ 占積率50%に近づける, さらに短節巻にする。

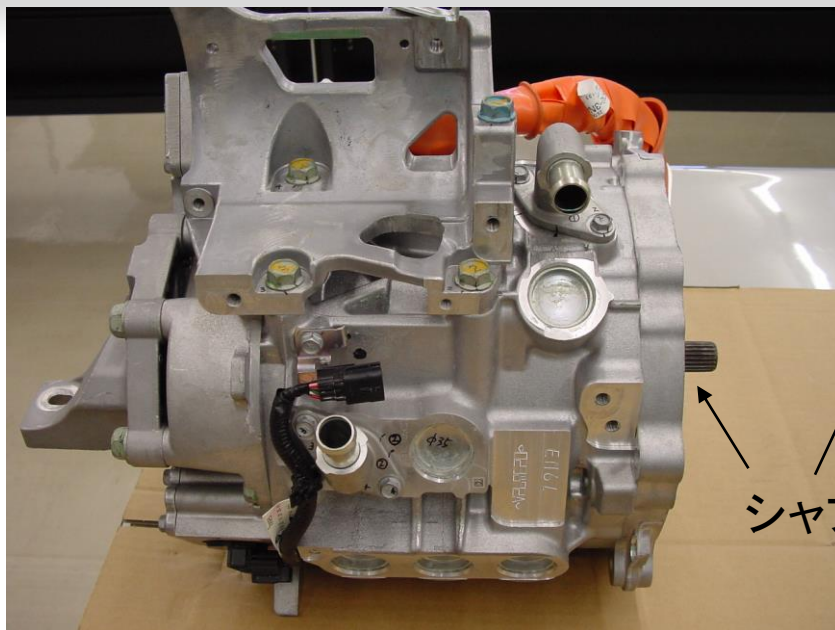
CASE2 (鉄損対策)

⇒ (特に歯の鉄損をさげるために、) 磁束密度を下げる。

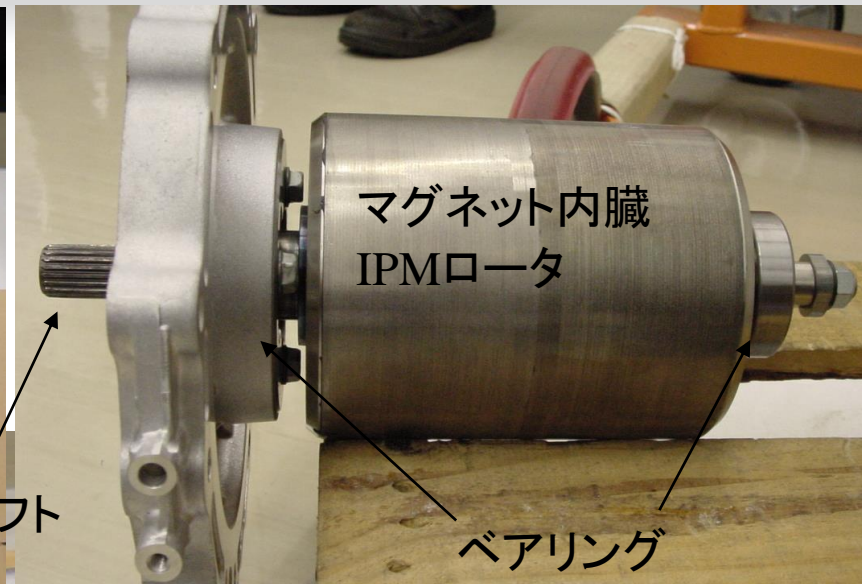
モータの実際：Φ16mm



モータの実際：Φ250mm

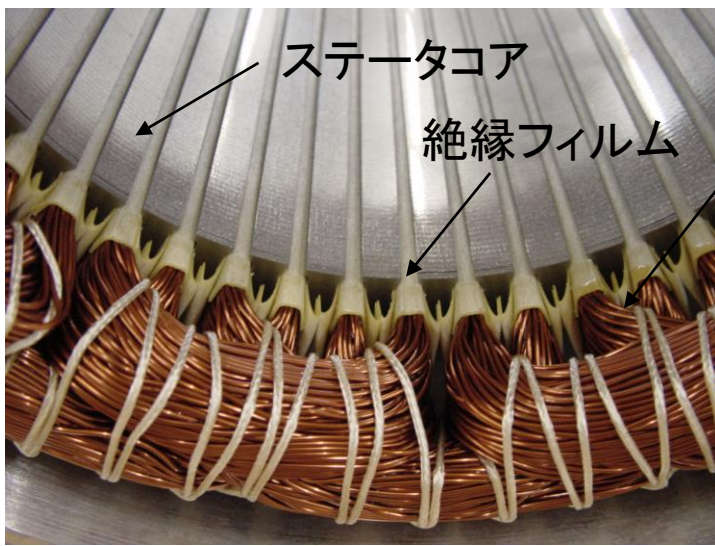


シャフト



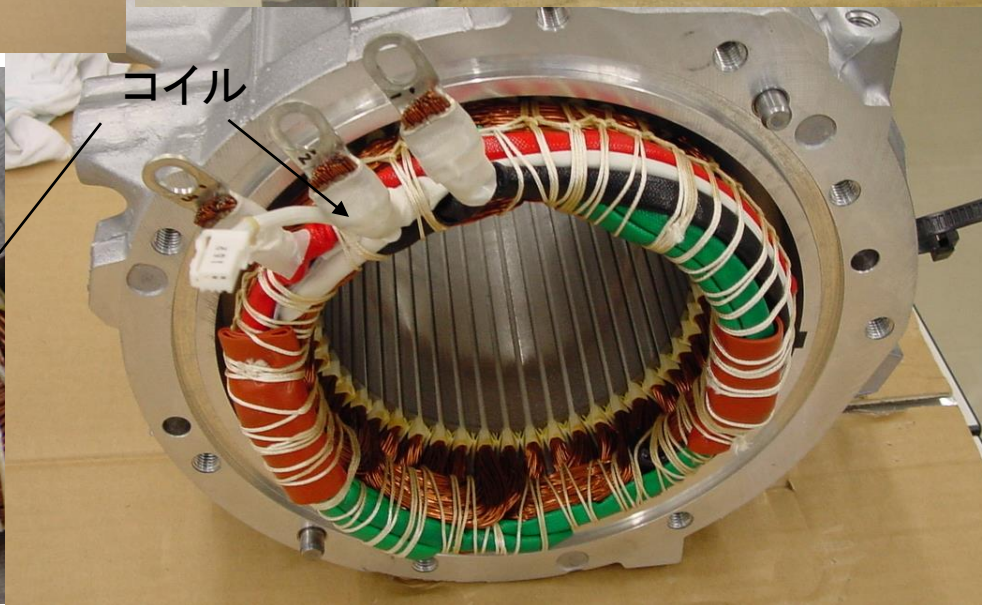
マグネット内臓
IPMロータ

ベアリング



ステータコア

絶縁フィルム



コイル

寸法と容量 (p2) p1 (改訂3版)

力機械と比べて著しく優れた特徴である。この特徴を発揮するためには、電気機器の設計に当たっては、用途に応じて、制御方式も含めて吟味することが大切である。

1・1 電気機器の寸法と容量の関係

まず、電気機器の寸法と容量の間には一般的にはどんな関係があるのか、きわめて大まかに考えてみることにする。

ある電気機器の各部分の寸法を、立体写真で引き伸ばしたようにすべて2倍にしたら、容量は何倍になるであろうか。

各部分の寸法が2倍になったのであるから電気回路の導線の寸法も2倍になるので、断面積は $2^2=4$ 倍になる。一般に電気機器では導線の電流密度は $3\text{A}/\text{mm}^2$ くらいにとるので、寸法が2倍の機器では4倍の電流を流しうることになる。

同様に磁気回路の寸法も2倍になるので、磁束の方向に直角な磁路の断面積は $2^2=4$ 倍になる。一般に鉄心の磁束密度は $1\text{T}(\text{Wb}/\text{m}^2)$ くらいにとり、これもだいたい一定であるとみることができるから、寸法が2倍の機器では磁束も4倍通すことができると考えてよい。したがってこの磁束によって生ずる起電力も4倍になる。
 $mv \propto \int \vec{v} \cdot d\vec{l}$ の関係より 16倍増える。

このように、電流、電圧ともに4倍になるのであるから、寸法が2倍の機器は元の機器の容量の $4 \times 4 = 16$ 倍になることになる。たとえば 100kW の電動機の各部分を2倍にして作った電動機は 1600kW の容量になるわけである。

ところで寸法が2倍になった機器の容積は $2^3=8$ 倍であり、各部分の材質を元と同じものとすれば重量も8倍である。言いかえれば8倍の材料を使って16倍の容量が得られるわけで、機器の容量が大きいほど単位容量当りの所要材料は減り、原価も安くなることになる。

次に、このように寸法が2倍になった機器の効率や温度上昇はどうなるであろうか。

寸法が2倍になると前記のように重量は8倍になる。電流密度と磁束密度は一定と考えたから単位重量当りの銅損と鉄損は一定であり、全体の銅損および鉄損は8倍になる。そして容量は16倍になるので単位容量当りの損失は $8/16=1/2$

倍になるから、容量の大きい機器ほど効率が高くなる。

ところが、損失による熱を大気中に放散する冷却面積すなわち機器の表面積は $2^2=4$ 倍である。機器の温度上昇は単位冷却面積当りの損失に比例するのであるから、2倍の寸法の機器は損失が8倍になるにもかかわらず冷却面積は4倍にしかならないので、温度上昇が2倍になることが予想される。

以上のことから、電気機器の寸法を相似形に拡大すると容量は4乗に比例して増大し、効率はよくなり材料費も割安になる利点はあるものの、温度上昇はかえって高まる欠点があることがわかった。

実際の機器についてみると、大容量のものは冷却面積を大きくするために種々の冷却機構が工夫されており、また機器の形も必ずしも相似形ではない。

たとえば、数kVAの柱上変圧器では本体を筒状のタンクに収めるだけであるが、数千kVAの変圧器ではタンクの外側に放熱器を付け、さらに大形のものには、ファンで空冷する放熱器に絶縁油をポンプで強制循環して冷却効果を高めている。また回転機の大形のものになると、風筒を作ってそこに冷却風を送るファンを設けたものや、風筒内を水素ガスで冷却するとか水冷のパイプを設けるなど、さらには導線の内部に油か水を通して冷却するなどいろいろな工夫をしている。

また電流密度、磁束密度も機器の大きさや冷却装置に応じて変えるようにしていることに注意すべきである。

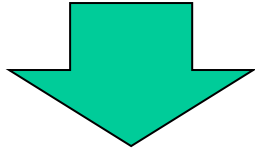
1・2 電気機器の損失

損失という言葉から考えるとむだ、無益であるからないほうがよいとも思われるが、電気機器について考えると損失は必ずしも無益なものではないといえる。

たとえば絶縁物が吸湿すると絶縁性能が低下して困るのであるが、損失による熱は幸いに機器を乾燥させるのに役立っているわけである。また回転機の回転子では風損を生じているが、これによって機械は冷却され、絶縁物が許容温度以上にならないよう効果をあげている。ファンを付けると風損が増えるものの冷却風量を増やすことができるので、これによって機器の容量を増加することもできるのである。

寸法と容量(要約)

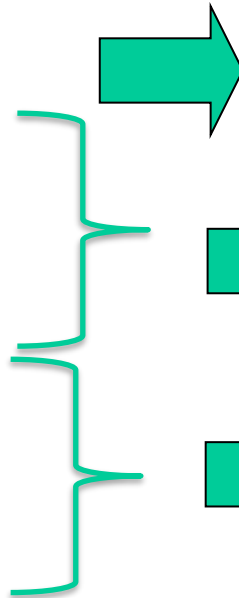
モータの寸法が2倍になると、



容量は16倍

損失は 8倍

表面積は4倍



単位容量当り、材料費が軽減

効率向上

温度上昇し易い

マグネットモータの構造と損失(1)

それぞれの損失の発生場所を、図3の電動機内部構造図をもとに示す。

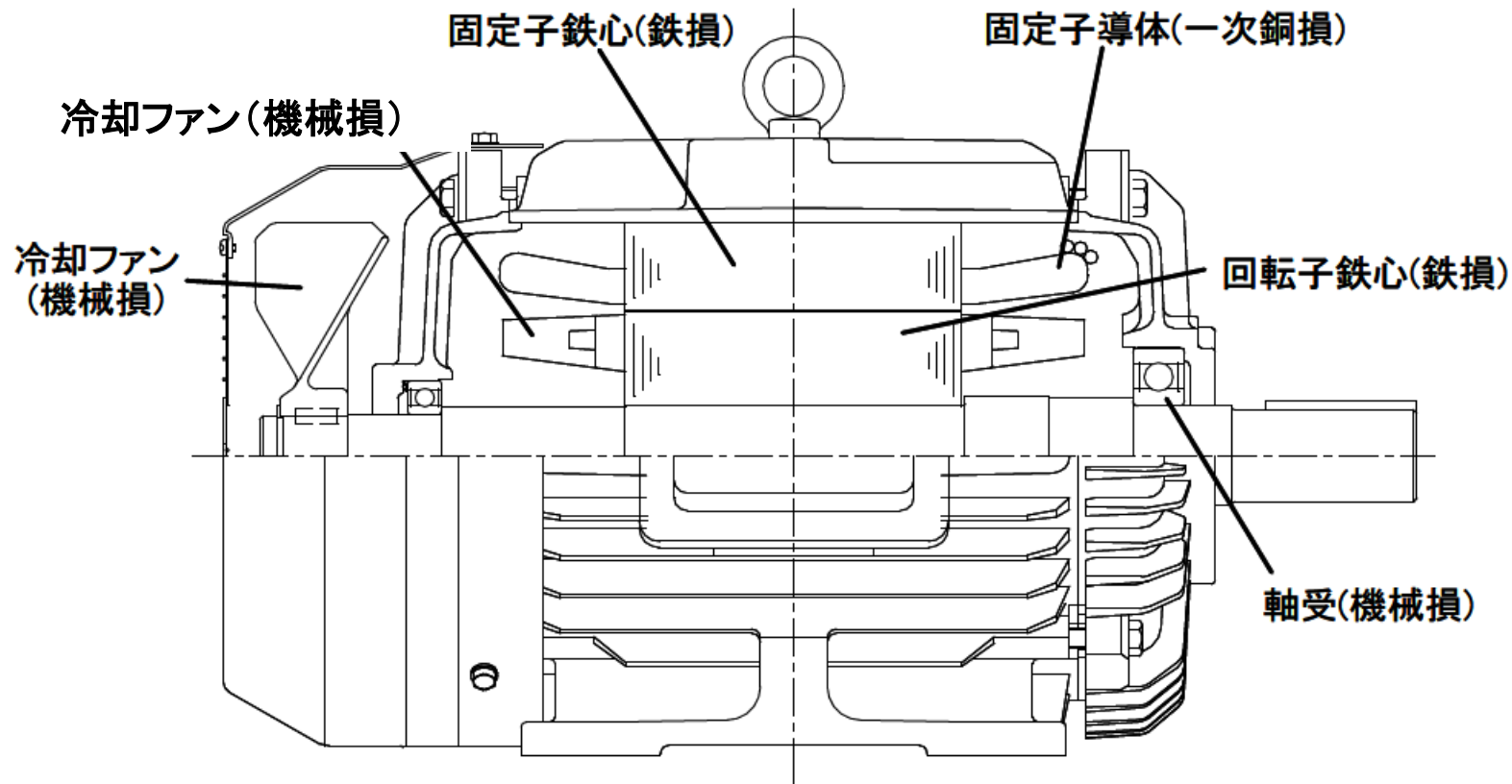
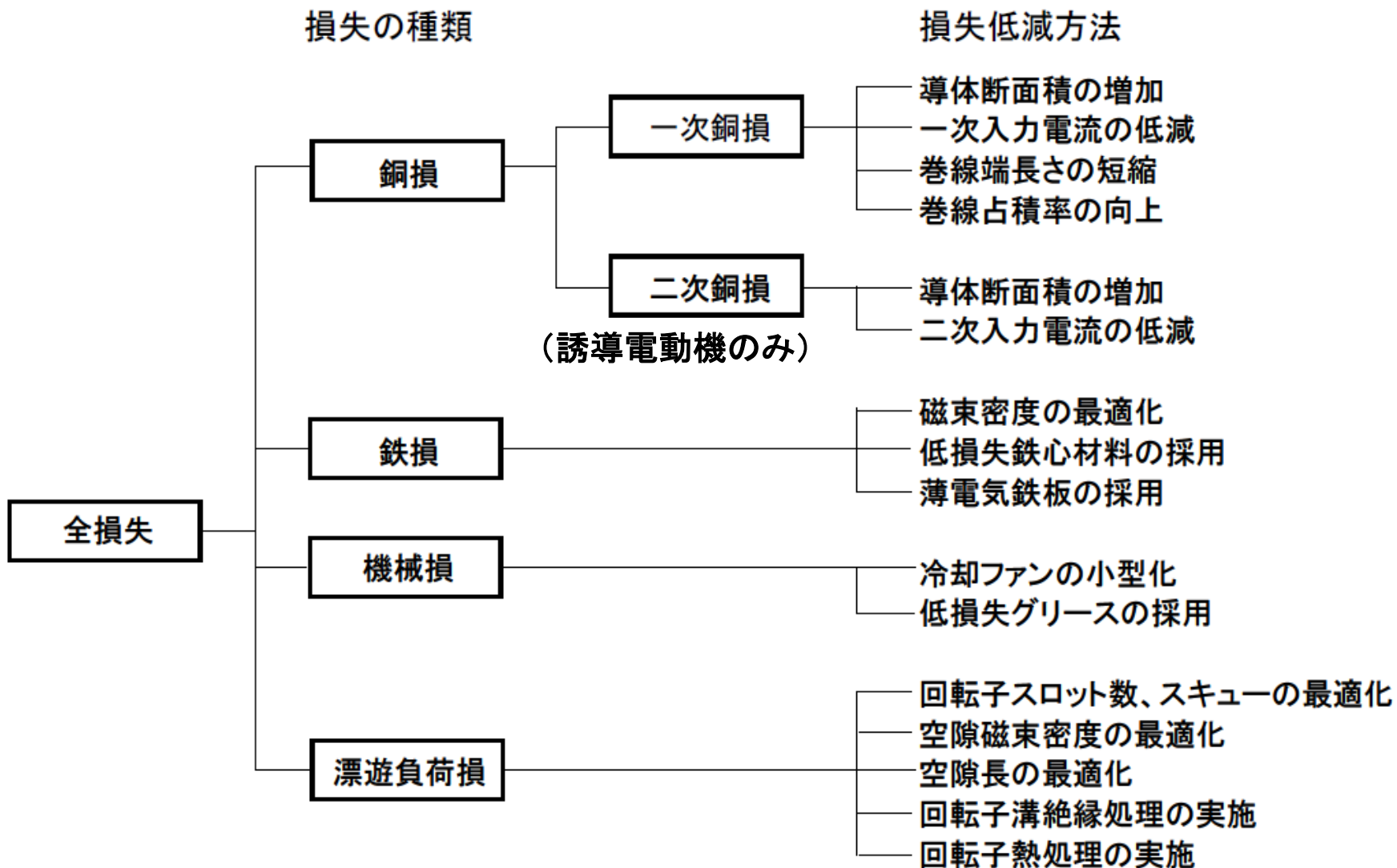
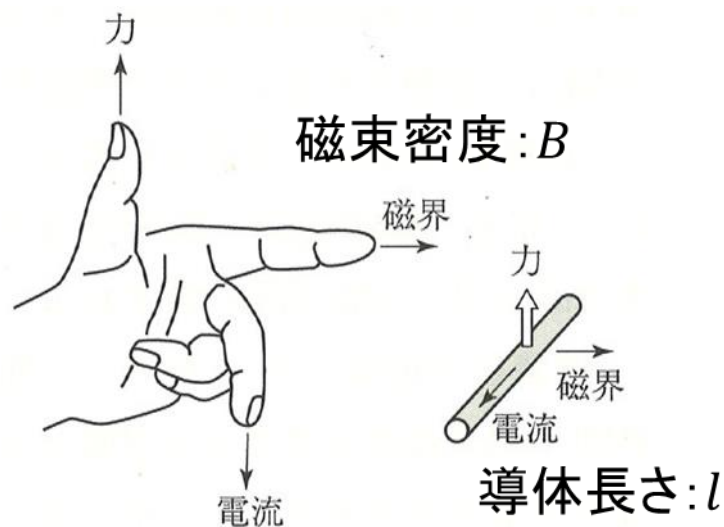


図3 電動機構造と損失

マグネットモータの構造と損失(2)



電気伝導材料:



(a) フレミングの左手の法則

$$F = B * l * i$$

大きな動力を得るには、

- 大きな磁束密度
 - 大きなサイズ
 - 大きな電流
- 電流を流れ易くする

| 特性項目 | | 銅線 | アルミ線 |
|-------|---------------------------------|---------|--------|
| 導電率 | % | 100 | 62 |
| 比電気抵抗 | $\times 10^{-8} \Omega \cdot m$ | 1.724 | 2.781 |
| 比重 | -- | 8.89 | 2.70 |
| 引張り強さ | N/mm^2 | 215~264 | 68~107 |

銀 : 105%
 鉄 : 17%
 亜鉛 : 28%
 スズ : 15%
 金 : 71%

銅損式

1・2 電気機器の損失

7

機器の特性算出は巻線がこの温度にあるとして行う。ただし、これは A 種、E 種、B 種絶縁の場合で、F 種、H 種絶縁の機器では 115°C とする) で、断面積 1 mm²、長さ 1 m のときの抵抗 ρ は $\rho=0.021$ [Ω] であるから、断面積 q [mm²]、長さ l [m] の銅線の電気抵抗 R_d は

$$R_d = 0.021 \frac{l}{q} \quad [\Omega] \quad \boxed{\text{改訂3版でも同じ式を用いる}} \quad (1 \cdot 7)$$

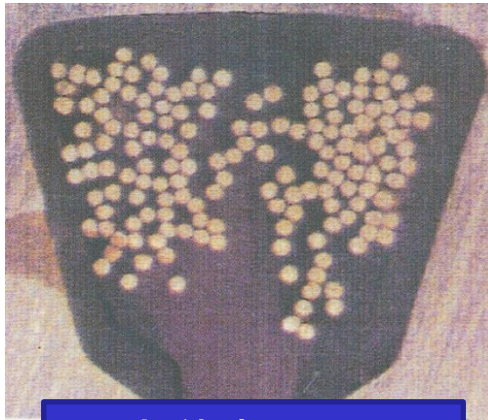
として表される。

この銅線に I [A] が流れるときの電流密度は $\Delta = I/q$ [A/mm²] であり、銅損 W_{cd} は

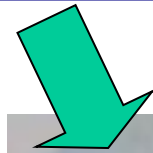
$$W_{cd} = I^2 R_d = (q\Delta)^2 \times 0.021 \frac{l}{q} = 0.021 \Delta^2 q l \quad [\text{W}] \quad (1 \cdot 8)$$

銅損の低減(導体断面積の増加、占積率の向上)

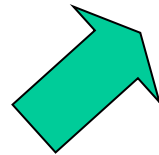
$$\text{占積率} = \frac{\text{巻線断面積}}{\text{コイル有効断面積}}$$



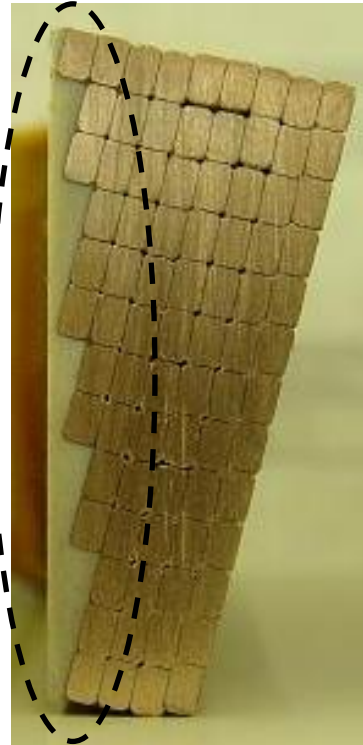
占積率: 40%



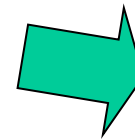
占積率: 64%



平角線コイル



占積率: max85%

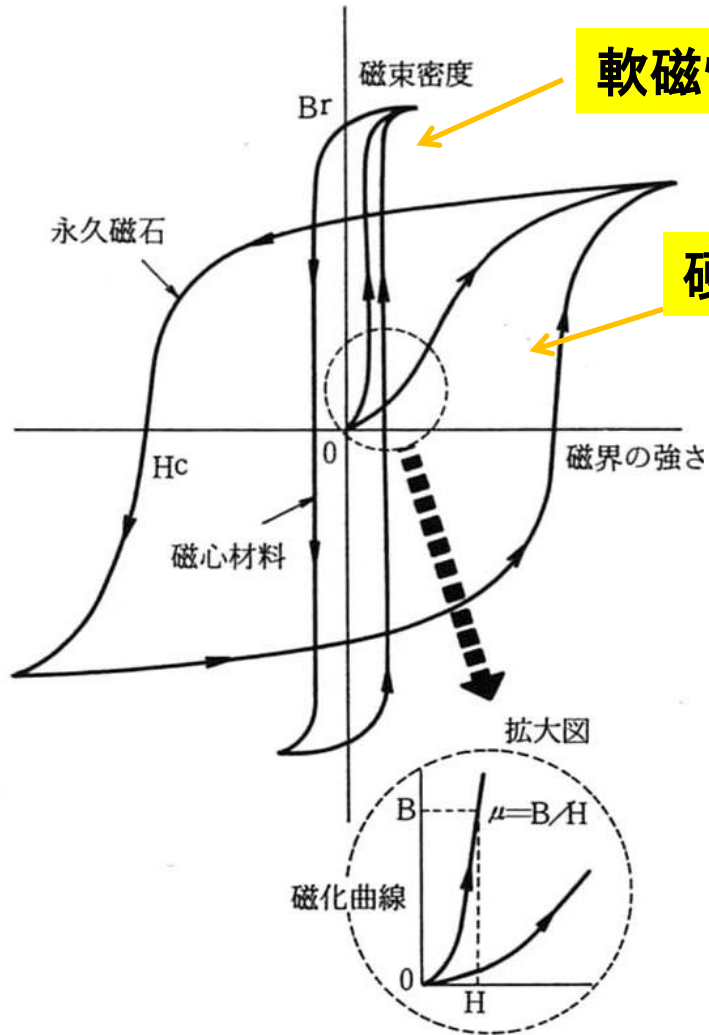


加圧成形コイル



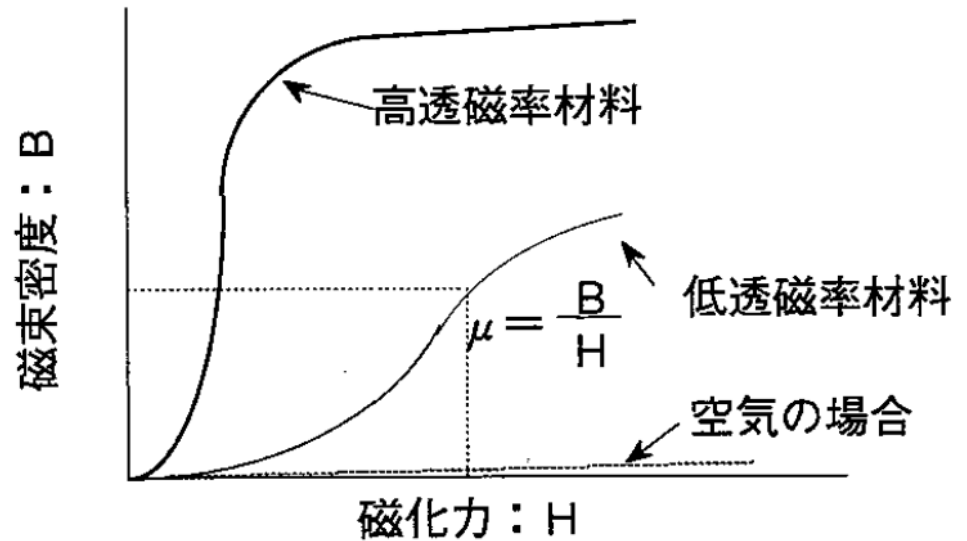
占積率: max95%

鉄心材料：ヒステリシス特性



ケイ素を添加することによる効果

- ・固有抵抗が大きくなる
- ・透磁率が大きくなる
- ・硬度が大きくなる
- ・飽和磁束密度が若干低くなる。



磁化曲線と物質の透磁率

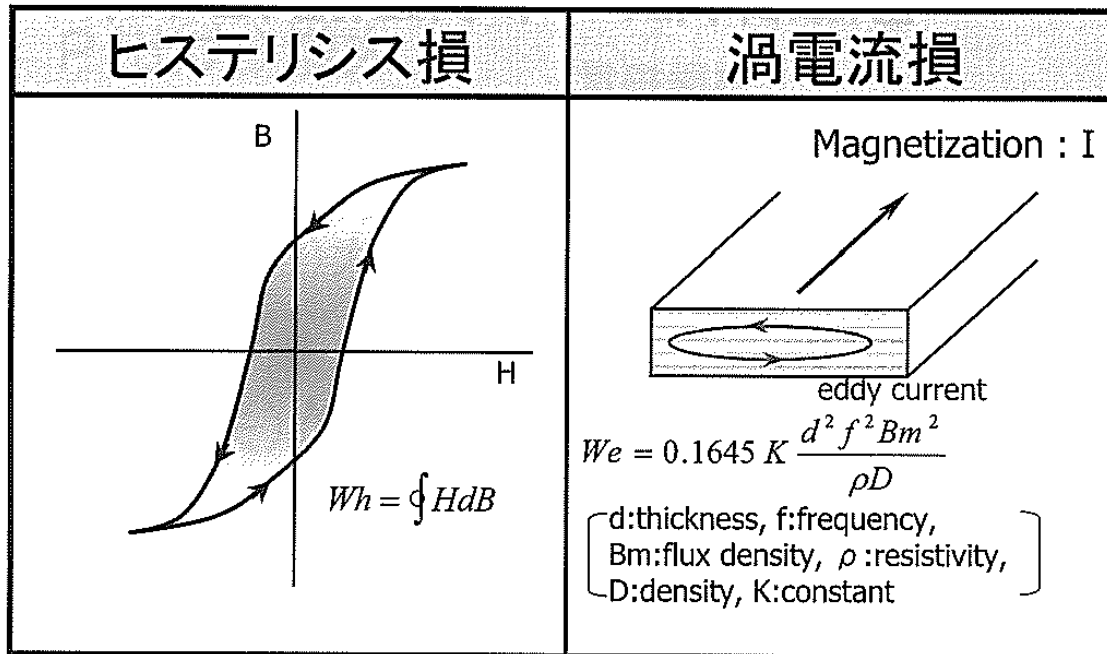
出典：わかる電磁鋼板(1985)

鉄心材料：鉄損

良い電磁鋼板とは、磁束密度が高く、鉄損の小さいものである。

渦電流損 $W_e \propto$ 周波数² × 磁束密度² × 板厚² / 固有抵抗

ヒステリシス損 $W_h \propto$ 周波数 × 磁束密度^{1.6~2}



出典：モータ技術フォーラム資料より抜粋 (2007.6.25).

鉄損式

ヒステリシス損係数

うず電流損係数

歯の部分の鉄損は

$$w_{ft} = B_t^2 \left\{ f_{ht} \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right) + f_{et} \sigma_e d^2 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right\}$$
$$= B_t^2 \left\{ \sigma_{Ht} \left(\frac{f}{100} \right) + \sigma_{Et} d^2 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right\} \quad [\text{W/kg}]$$

(改訂2,3版共通)

(1・5)

ここに、 B_t ：歯の部分の磁束密度 [T]， $f_{ht} \sigma_h = \sigma_{Ht}$ ， $f_{et} \sigma_e = \sigma_{Et}$ ($f_{ht} > 1$ ， $f_{et} > 1$) で表される。そして σ_{Ht} ， σ_{Et} の値は実際の機械の場合，第1・2表のような値である。

鉄心材料(材料としての特性)

ヒステリシス損係数

P4 (改訂3版)

1・2 電気機器の損失

5

(改訂2,3版共通)

第1・1表 鉄心用鋼帯の種類と損失および係数

うず電流損係数

| 名称 適用規格 | 用途 | 厚さ [mm] | 種類 記号 | σ_h | σ_e | w_0 [W/kg] | 密度 [kg/dm ³] | 従来相当 記号 |
|----------------------------------|-------|------------|----------|------------|------------|-----------------|-----------------------------|------------|
| 無方向性電磁鋼帯 JIS C 2552 (1986) | 回転機など | 0.5 | 50A290 | 1.45 | 8.7 | 2.9 | 7.60 | S09 |
| | | | 50A310 | 1.55 | 9.3 | 3.1 | 7.65 | S10 |
| | | | 50A350 | 1.75 | 10.5 | 3.5 | 7.65 | S12 |
| | | | 50A400 | 2.00 | 12.0 | 4.0 | 7.65 | S14 |
| | | | 50A470 | 2.35 | 14.1 | 4.7 | 7.70 | S18 |
| | | | 50A600 | 3.00 | 18.0 | 6.0 | 7.75 | S20/S23 |
| 方向性けい素鋼帯 JIS C 2553 (1986) | 変圧器など | 0.3 | 30G130 | 0.39 | 11.3 | 1.3 | 7.65 | G09 |
| | | | 30G140 | 0.42 | 12.2 | 1.4 | 7.65 | — |
| | | | 30G150 | 0.45 | 13.1 | 1.5 | 7.65 | G10 |

↑
ケイ素
増大

- [注] 1. w_0 は周波数50Hz, 最大磁束密度1.5T(JIS C 2552-1986), 1.7T(JIS C 2553-1986)における値である。
 2. 本表の厚み以外に C 2552では0.35mmおよび0.65mm, 0.35mmのものが規格化されている。

ケイ素を添加すると
 ・固有抵抗が大きくなる
 ・飽和磁束密度が若干低くなる

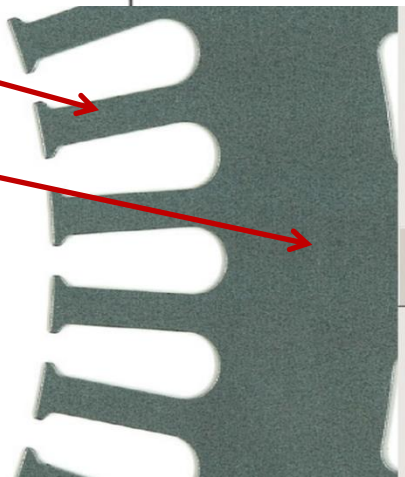
鉄心材料(部品としての特性)

6 P5 (改訂3版)

第1章 電気機器の本質とその内容

(改訂2,3版共通) 第1・2表 実際の機器のヒステリシス損およびうず電流損係数

| 鋼帯の の種類 | 回 転 機 | | | | 変 圧 器 | |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|------|
| | 継 鉄 部 分 | | 歯 の 部 分 | | — | — |
| | σ_{Hc} | σ_{Ec} | σ_{Ht} | σ_{Et} | | |
| 50A290 | 2.18 | 17.4 | 3.63 | 30.5 | — | — |
| 50A310 | 2.33 | 18.6 | 3.88 | 32.6 | — | — |
| 50A350 | 2.63 | 21.0 | 4.38 | 36.8 | — | — |
| 50A400 | 3.00 | 24.0 | 5.00 | 42.0 | — | — |
| 50A470 | 3.53 | 28.2 | 5.88 | 49.4 | — | — |
| 50A600 | 4.50 | 36.0 | 7.50 | 63.0 | — | — |
| 30G130 | — | — | — | — | 0.47 | 11.7 |
| 30G140 | — | — | — | — | 0.50 | 12.6 |
| 30G150 | — | — | — | — | 0.54 | 13.5 |



ヒステリシス損係数

うず電流損係数

機械損式 (p7)

(改訂2,3版共通)

1・2・3 機 械 損 機械損としては回転子の風損，軸受の摩擦損およびブラシの摩擦損があるが，このうち軸受損失は一般に小さいのでここでは省略する。

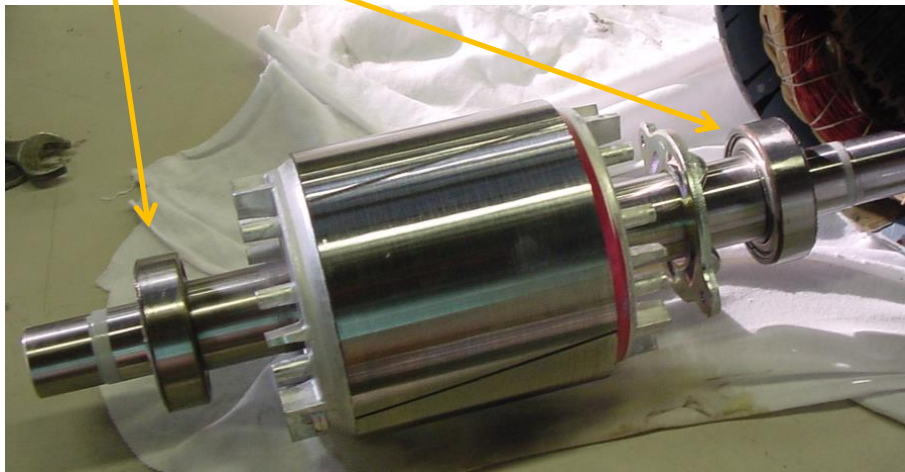
風損 W_m については次の近似式で計算できる。

(改訂2,3版共通)

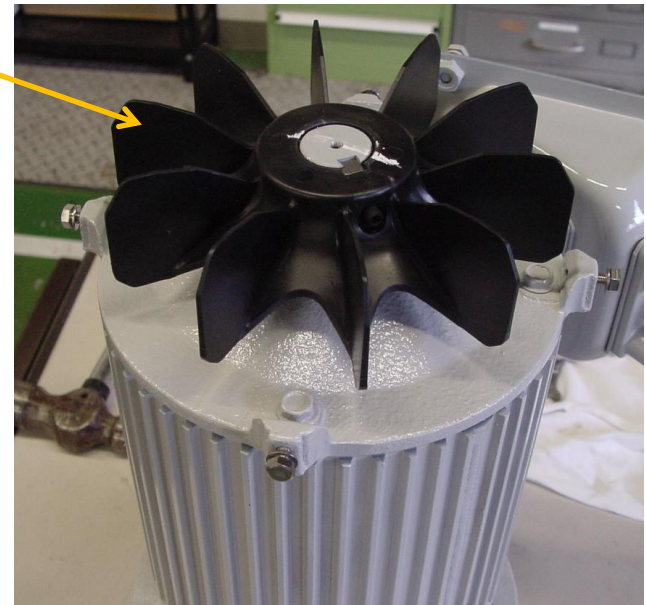
$$W_m = 8 D \times (l_1 + 15) \times v_a^2 \times 10^{-4} \quad [\text{W}] \quad (1 \cdot 11)$$

ここに， D ：回転子の外径 [cm]， l_1 ：成層鉄心の見かけの長さ [cm]， v_a ：回転子表面の周辺速度 [m/s] (改訂3ではmm表記)

軸受



冷却ファン



温度上昇 (p24, p110)

(改訂3版ではp24, p111)

2.4.2 温度上昇 次に機器の温度上昇について考えてみよう。機器の冷却に役立つ表面積 O 内に生ずる損失を W とすると、単位表面積当りの損失 W/O に比例する温度差が機器と外気との間に生ずる。すなわち、この機器の温度上昇 θ は

$$\theta = \frac{W}{\kappa O} = \frac{W}{\lambda}$$

ここに、 κ : 単位表面積当りの外気に対する熱の伝導度

110

第4章 三相誘導電動機の設計

O_s に包まれる損失は

(改訂3版では微妙に値が違う)

$$W_i = W_F + \frac{l_1}{l_a} W_G = 110 + \frac{10}{24.1} \times 282 = 227 \text{ [W]}$$

熱の比伝導度 $\kappa = 30 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$ として、温度上昇は

$$\theta_s = \frac{227}{30 \times 0.121} = 62.5 \text{ [°C]}$$

巻線の温度上昇はこれより 5°C 高いとみて、 68°C と推定される。

温度上昇限度(第1・4表)

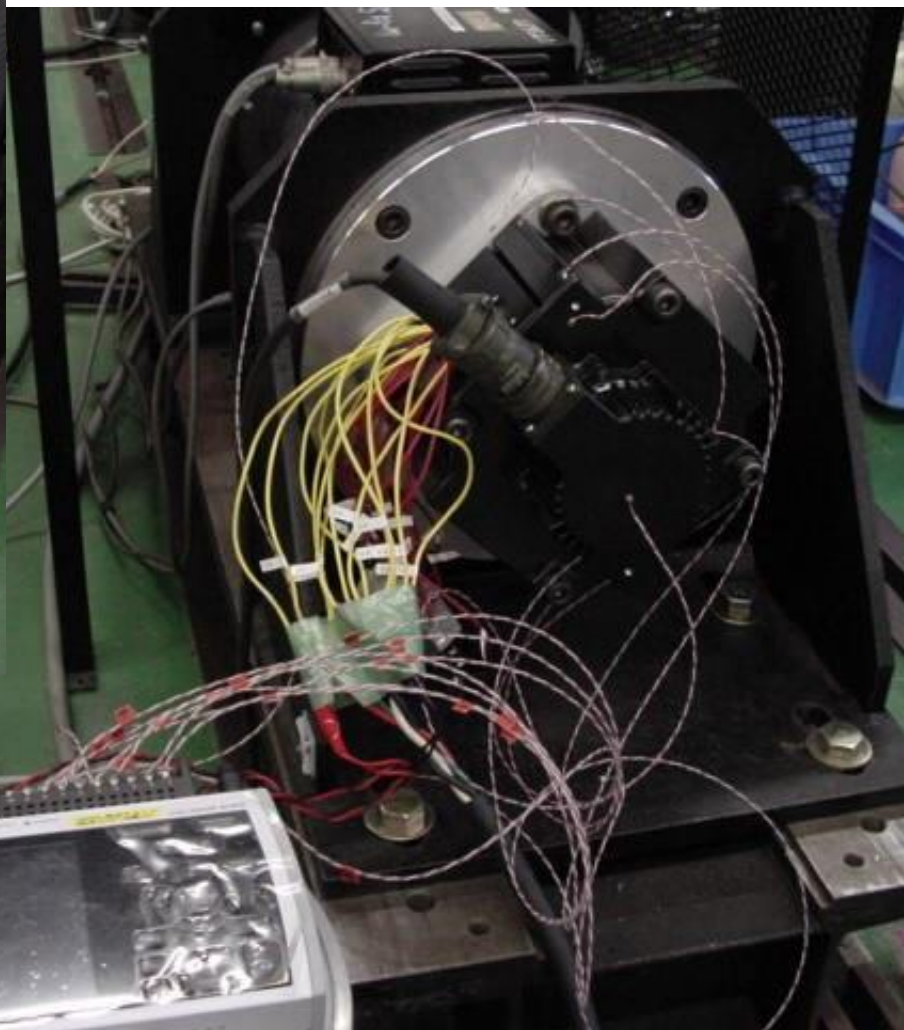
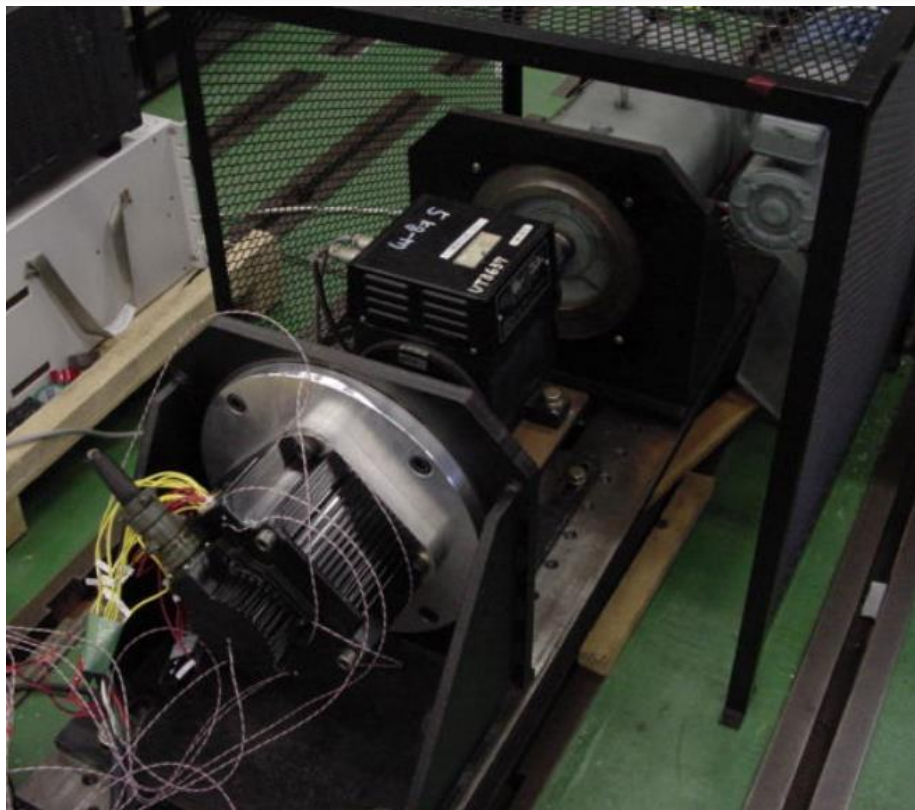
P9 (改訂3版)

(改訂2,3版共通)

ケイ素を添加すると

- ・固有抵抗が大きくなる
- ・飽和磁束密度が若干低くなる

モータの温度上昇限度評価例



モータの温度上昇限度評価例

