

磁気回路

$$V=IR$$

$$NI = \Phi \cdot R_m$$

今日はこれが概念的に理解できればOK

その前に,,,

10cm²×10cm²の面積を持つ電磁石で1Tの磁力が発生してたとします。
この電磁石は理論上最大, 何kgの鉄を持ち上げることができるでしょう

- 1 4ton
- 2 400kg
- 3 40kg



“1T≒4気圧, 磁束密度の2乗に比例”
覚えておきましょう

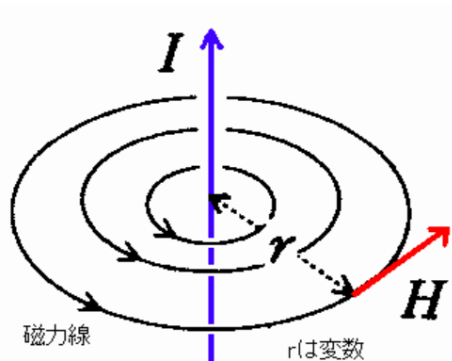
ついでに鉄の比重も
覚えておきましょう
 $1\text{cm}^3 = 1\text{cc} = 7.8\text{g}$
 $1\text{m}^3 = 7.8\text{t}$

$$\nabla \times H = i + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\int_c H \cdot ds = \int_s i \cdot n ds$$



アンペール-マクスウェルの式 銅線に電流が流れる電気機械では通常は変位電流は忘れておきます
(ただし絶縁において, 放電やインバータスイッチングサージの場合では考慮が必要です)



$$B = \mu H$$

H 磁界 : A/m

B 磁束密度 : T (テスラ)

μ 透磁率 : H/m (ヘンリー)

$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ μ_r 比透磁率, μ_0 真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

問 1

1000A 電流が 1cm 離れた場所につくる磁場は何Tあるでしょうか？

$$B = 4 \pi \times 10^{-7} \times \frac{1000}{2\pi \cdot 0.01}$$

$$= 2 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$B = \mu H \quad H = \frac{I}{2\pi r}$$

$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ μ_r 比透磁率, μ_0 真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$

問2

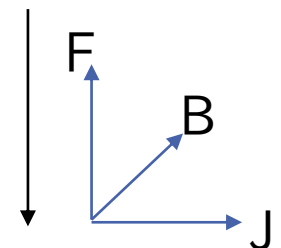
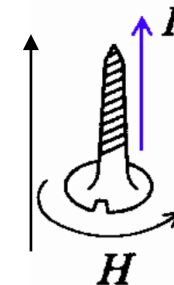
1000A 1mの長さの往復電流が 1cm 離れておかれたときの電磁力は？

$$F = IBL$$

$$= 1000 \times 2 \times 10^{-2} \times 1$$

$$= 20 \text{ N 反発力} \quad (\text{反対は反発と覚える})$$

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (\text{ジェイ クロス ビー と覚える})$$



$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_r H$$

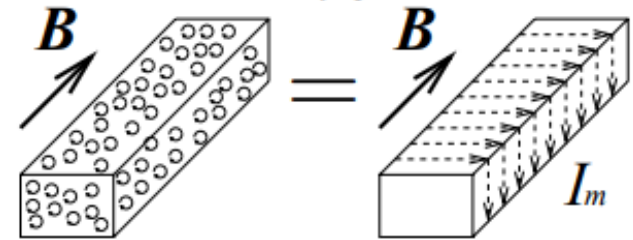
Bは磁束密度、 μ は真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) Hは磁界、Mは磁化

$1 + \chi$ を比透磁率 μ_r と呼び

$M = \chi H$ 磁界Hで物質に電流が流れたようにふるまう

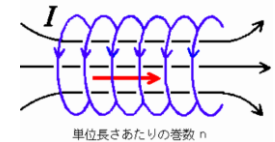
これを**磁化電流**と呼ぶ

永久磁石は 着磁されることで、 $H = 0$ でもMが残る



バラバラの向きに流れる

外部磁場が加わると
向きが揃う



鉄の比透磁率 μ_r は印加磁界で変わるが 数百～1万

比透磁率は1とみてモータ工学的には問題ないですが、実際は

空気はほぼ 1

厳密には1.00000037

銅 もほぼ 1

0.999994 (反磁性)

アルミもほぼ 1

1.000022

水 もほぼ 1

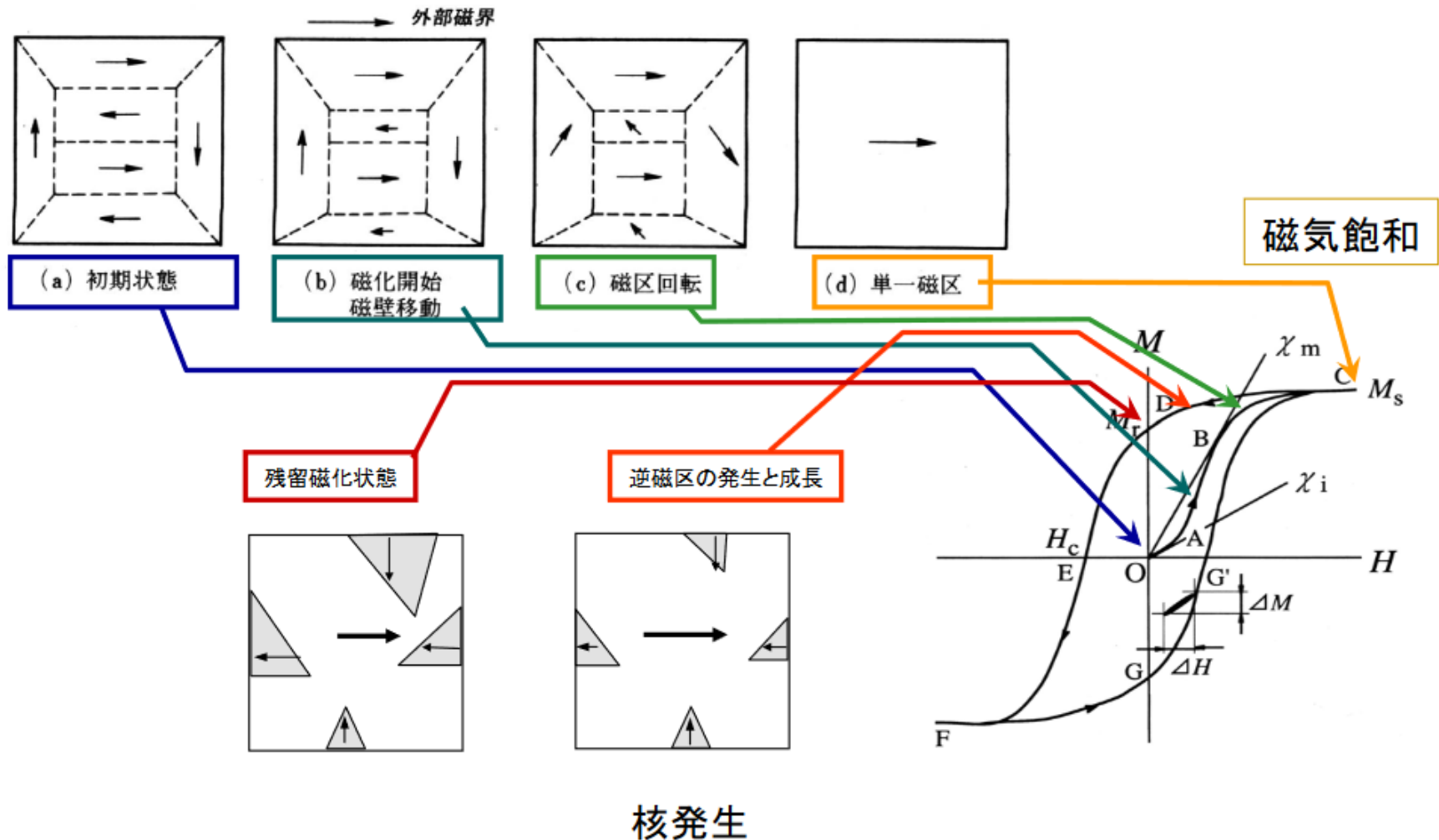
0.999992 (反磁性)

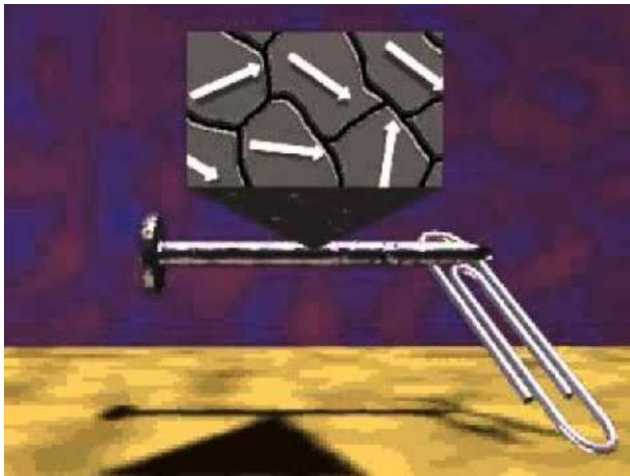
工学上はどれもほぼ1ですが、意外とそうでもない？

https://www.youtube.com/watch?v=Ks_o-ELuNHk

“磁石から逃げる果物”でYOUTUBEで検索

強磁性体：鉄, ニッケル, コバルト の実際の挙動は複雑





<https://youtu.be/MhhHIdAkzZQ?si=KZwS31gGvmGKcXikx>



https://youtu.be/qE_WoV2dYBY?si=3do-3qvaYxzyogFy&t=4

さらに詳しい量子力学的な解説

https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/74/12/74_1598/_pdf

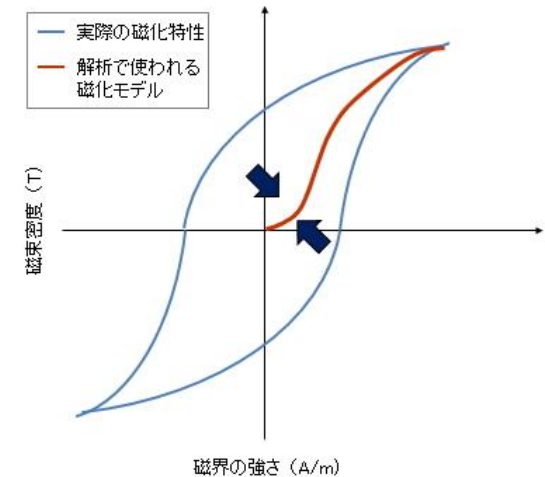
本当の姿

外部磁界に対する挙動は 磁壁移動, スピンの反転と複雑
磁壁移動にはロスがありヒステリシスロスとなる

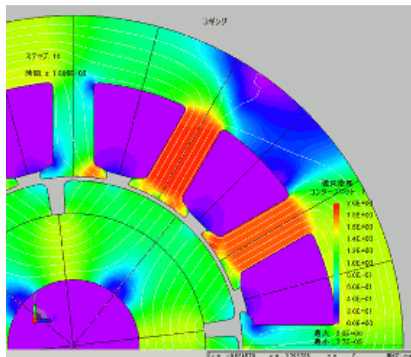
磁界解析

B-Hカーブもヒステリシスを無視している

鉄損解析は磁界分布に応じた材料別の損失データを割り
付けている

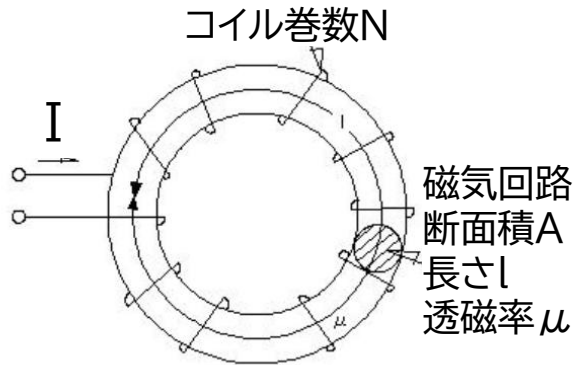


磁界解析では磁束密度分布
までしかでてこない

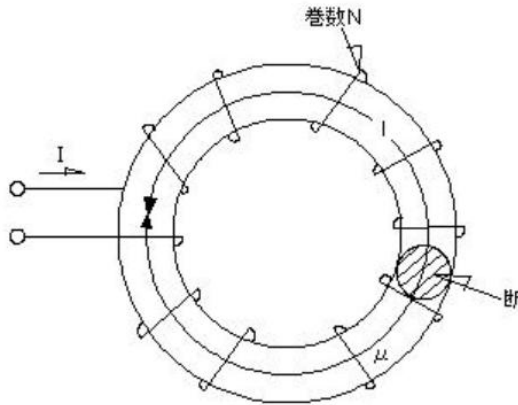


磁束密度と損失の関係をデータベース化
損失係数Kは素材, 加工方法など加味して
実態に合うよう各社が経験的にチューニング

$$p_{ber} = K_{hys} f |B|^{\alpha} + K_{edd} f^2 |B|^2 + K_{exc} f^{1.5} |B|^{1.5}$$



磁気回路のオームの法則 $\Phi = NI / R_m$	電気回路のオームの法則 $I = V / R$
起磁力 NI [AT, アンペアターン] 磁界 H [A/m]	電圧 V [Volt] 電界 E [V/m]
磁束 ϕ [Wb]	電流 I [A]
磁気抵抗 $R_m = \frac{l}{\mu A} [H^{-1}]$	電気抵抗 $R = \frac{l}{\sigma A} [\Omega]$
透磁率 $\mu [H/m]$	導電率 $\sigma [S/m]$



$$NI = \Phi \cdot \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{S}$$

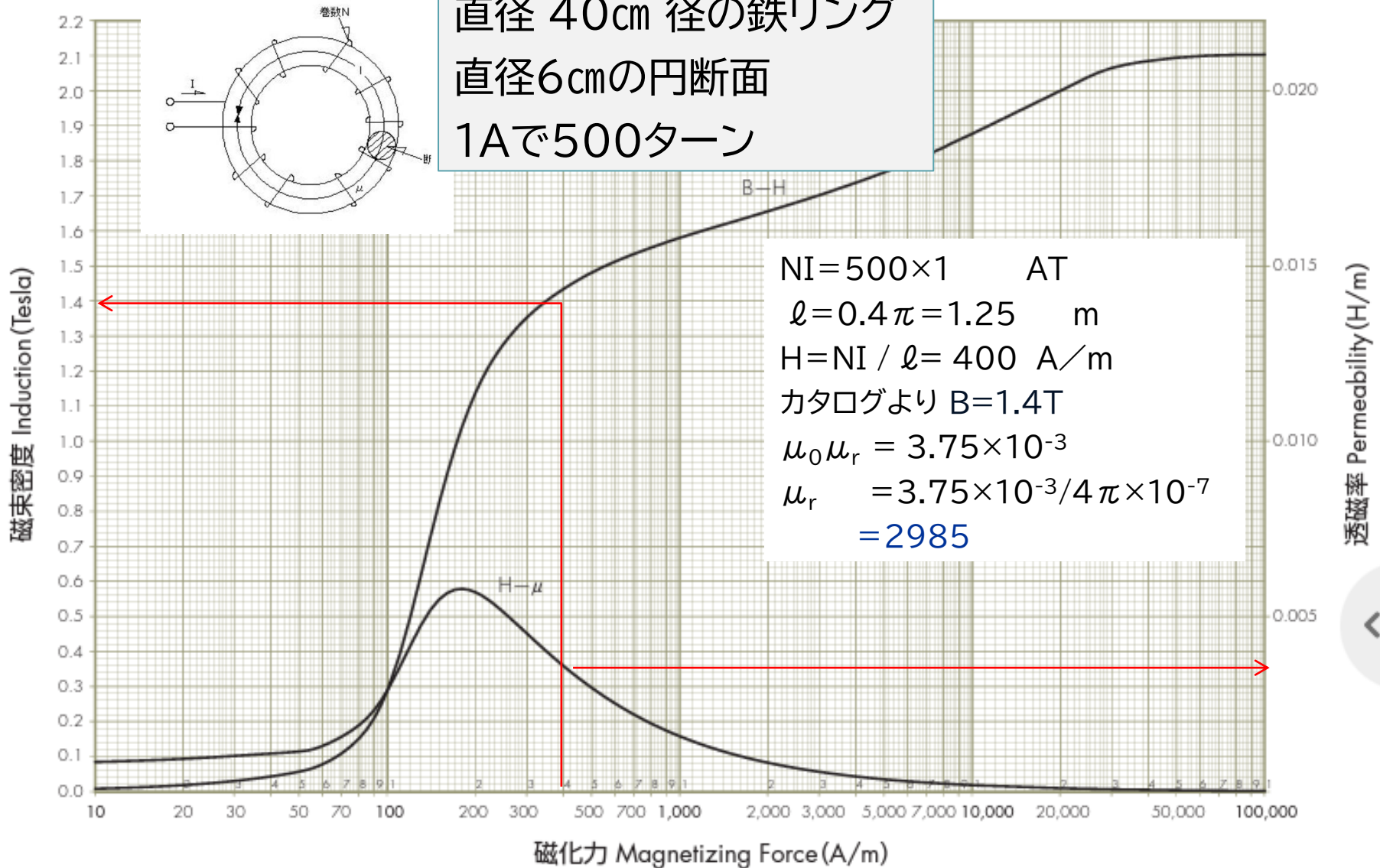
起磁力 = 磁束 × 磁気抵抗

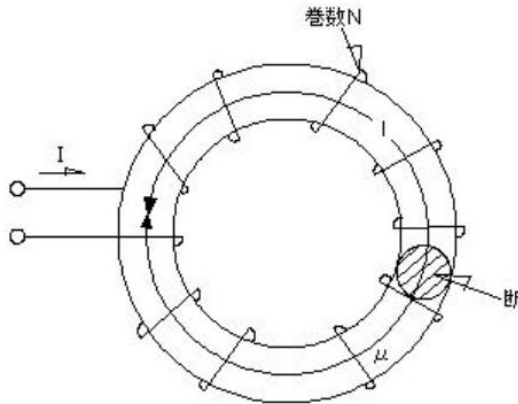
透磁率がわからないと, 求められない

直径 40cm 径の鉄リング
リングの断面は 直径6cmの円
1Aで500ターン
鉄の磁束密度B はいくつになりますか

$$B = \Phi / S$$

直径 40cm 径の鉄リング
直径6cmの円断面
1Aで500ターン





インダクタンス L(H): 1A流した時にコイルに鎖交する磁束

$$\Phi [\text{Wb}] = LI$$

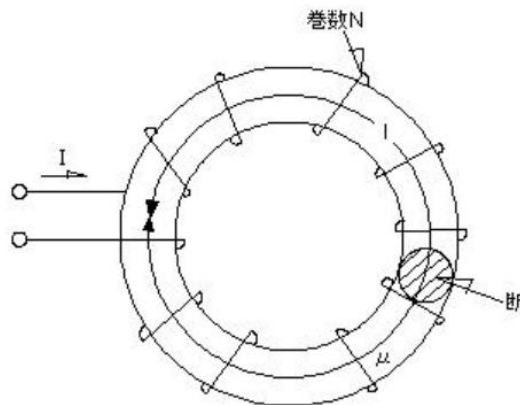
$$\phi = \frac{\mu_0 \mu_r S}{l} N I \quad (\text{鉄心の磁束})$$

$$NI = \phi \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{S}$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 \mu_r S}{l} N^2 I \quad (N\text{ターンのコイルに鎖交する磁束})$$

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r S}{l} N^2$$

インダクタンスをだしてみる(実務的に)



直径 40cm 径の鉄リング
リングの断面は 直径6cmの円
1Aで500ターン

磁束密度B(T)は単位面積あたりの磁束量(Wb/m²)

$$\phi/S=B$$

$$\phi = B \cdot S$$

先のカatalogよりB=1.4T

コアの面積は $\pi \cdot 0.03^2$ なので

$$\phi = 1.4 \times \pi \cdot 0.03^2$$

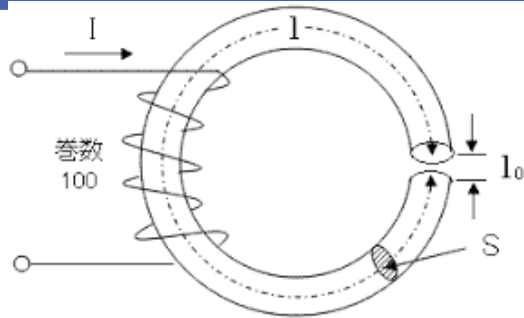
$$= 4.0 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

ターン数は500なので

$$\begin{aligned} \text{鎖交磁束 } \Phi &= 500 \times 4.0 \times 10^{-3} \\ &= 2(\text{H}) \end{aligned}$$

50Hzで

$$\begin{aligned} \omega L &= 2\pi fL \\ &= 628\Omega \end{aligned}$$



直径 40cm 径の鉄リング 直径6cmの円断面
1Aで500ターン 鉄の透磁率は3000とすると
エアギャップ1mm入れたときには
何Tの磁束密度になる？

$NI = \Phi \cdot (R_m + R_g)$ R_m 鉄の磁気抵抗、 R_g 空隙の磁気抵抗

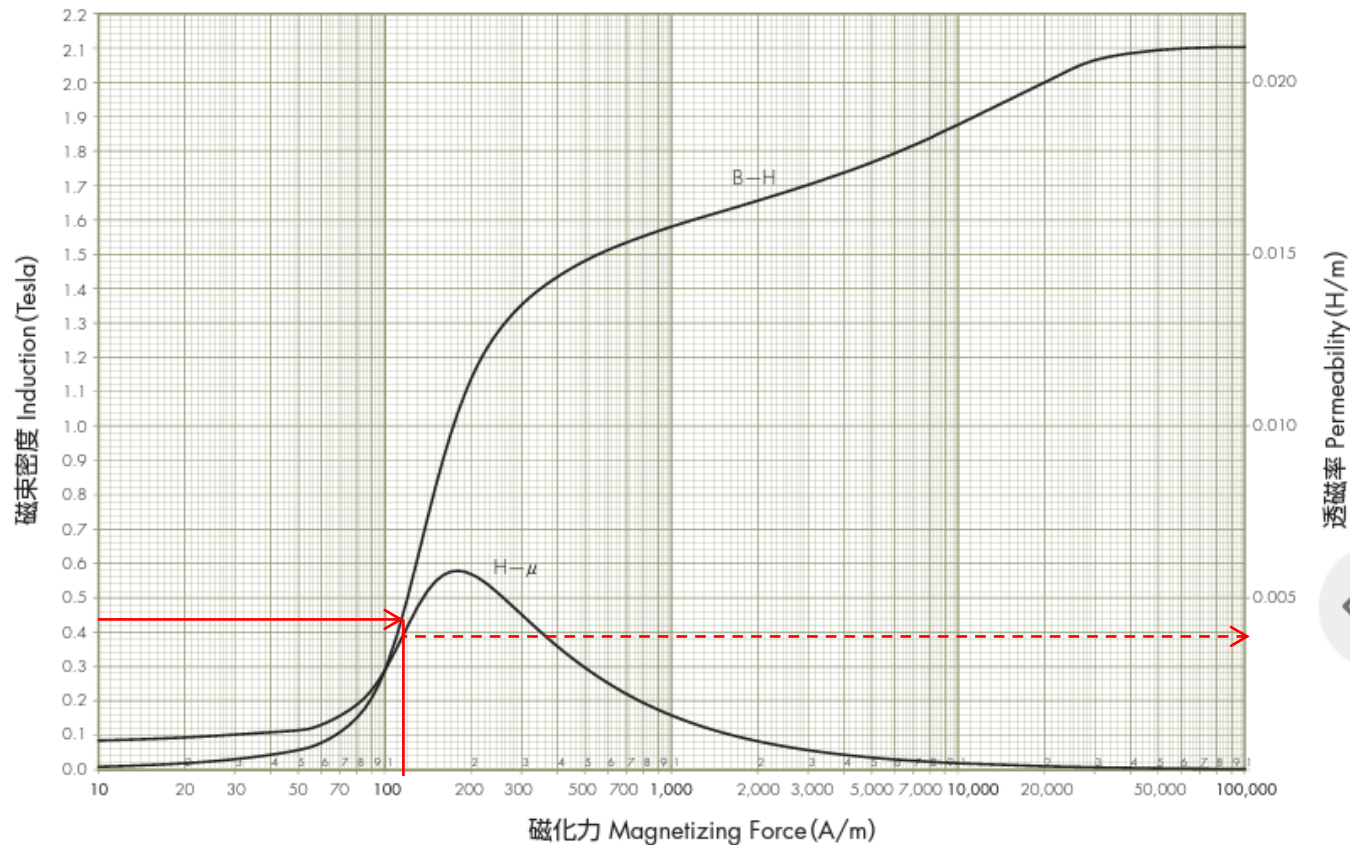
$$NI = \Phi \cdot \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_m}{S} + \frac{1}{\mu_0} \frac{l_g}{S} \right)$$

$$500 = \Phi / S \cdot 1 / \mu_0 \cdot (l_m / \mu_r + l_g)$$

$$B = \mu_0 \cdot 500 / (0.4 \pi / 3000 + 0.001)$$

$$= \mu_0 \cdot 500 / (0.000418 + 0.001)$$

$$= 0.44 \text{ T}$$



B=0.44Tの時の透磁率は
3000でよいのか？

μ -Hカーブを見ると

$$\mu_r = 0.004 / (4\pi \times 10^{-7})$$

$$= 3184$$

$\mu_r = 3184$ で再計算
B=0.45T

これを繰り返し計算する
=収束計算が必要

磁界解析に時間がかかる

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

直径 40cm 径の鉄リング 円断面 6 cmで
エアギャップ1mm入れたときには 0.45Tとすると
その時に空隙に働く力は？

問題と関係なく, , $B=1\text{T}$, $S=1\text{m}^2$ を説明する

$$F=1^2/2\mu_0 = 1 / (2 \cdot 4\pi \times 10^{-7}) = 398089 \approx 400 \text{ k N/m}^2$$

1気圧 = 101.3 kPa なので

1 Tあれば 4気圧相当の力が発生する

定義より 電磁力は B の2乗と面積に比例する

力 = 圧力 $\times$ 面積

$$400\text{kPa} \times 0.45\text{T}^2 \times \pi \cdot 0.03^2 \text{ m}^2 = 229 \text{ N}$$

ここまでの話は、与えられた電磁石の力を求めていたが、 , ,

必要な力から、電磁石を設計したい

①必要な力から空隙磁束密度と面積を決める

ただし 磁気飽和の影響を避けて1~1.5Tくらいで留め置く

② 与えられたエアギャップと鉄のサイズから磁化電流から電流と巻数決める

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

$$NI = \Phi \cdot \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_m}{S} + \frac{1}{\mu_0} \frac{l_g}{S} \right)$$

$$NI = B \cdot \left(\frac{l_m}{\mu_0 \mu_r} + \frac{l_g}{\mu_0} \right)$$

$B = \mu_0 \mu_r H$ なので

$$NI = H_m l_m + H_g l_g$$

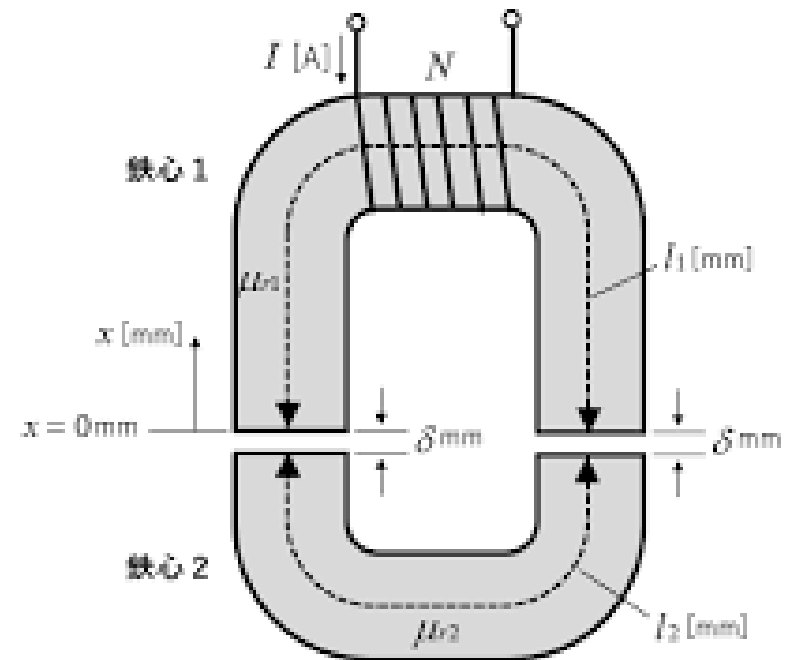


図1

磁界×距離が必要なアンペアターンになるのです！

1mmのギャップで 200kgの吸引力の電磁石を作ろう！

↓

余力みて1T で設計

↓

$$F = 200\text{kgf} \times 9.8 = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

$$S = 200 \times 9.8 \times 2 \times 4\pi \times 10^{-7}$$

$$= 4.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$= 7\text{cm} \times 7\text{cm} \quad \text{の断面積が必要}$$

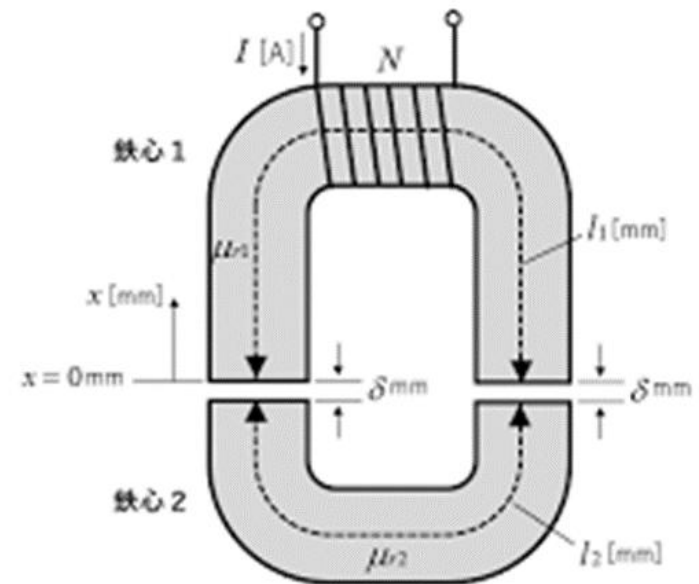
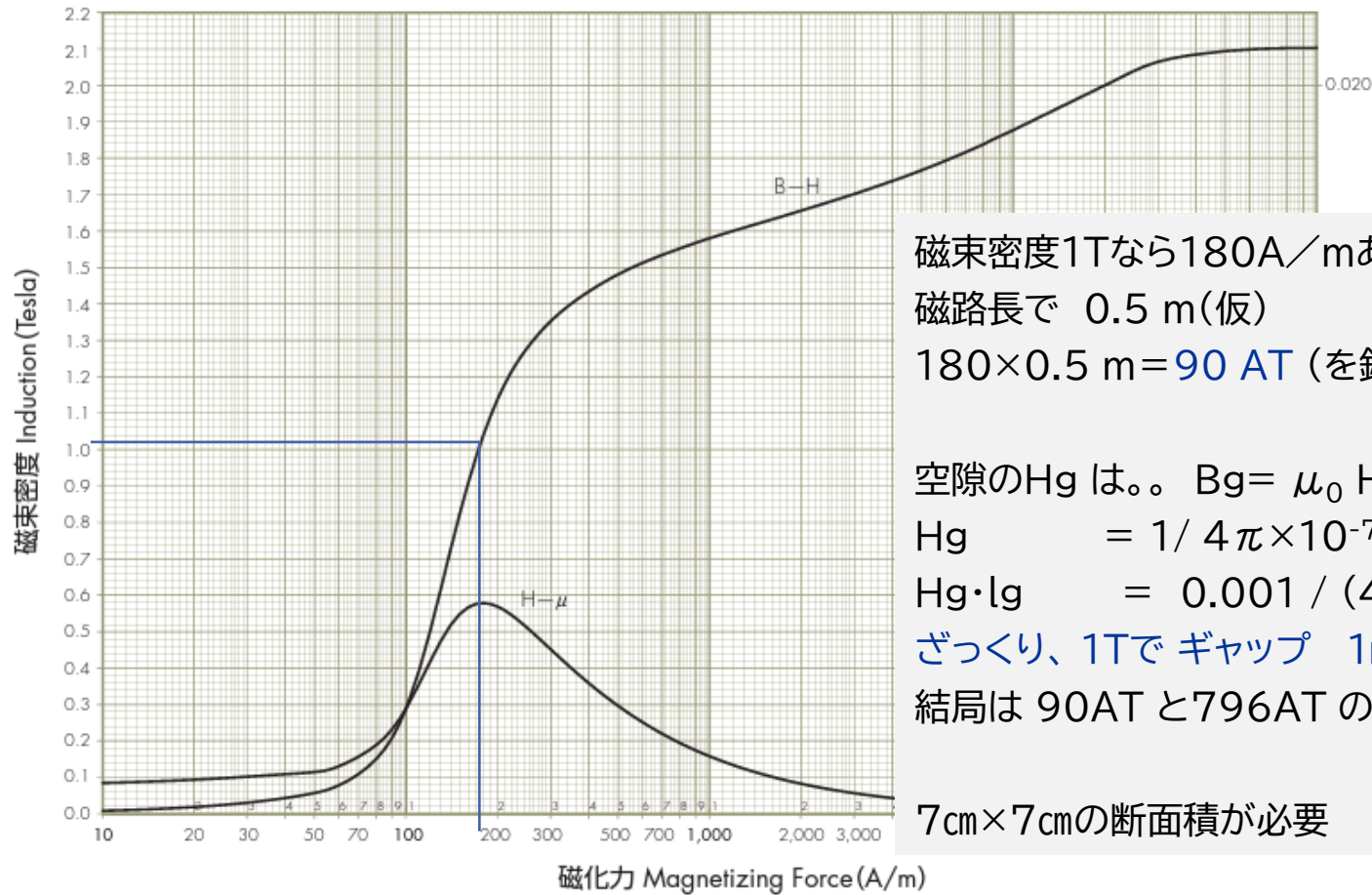


図 1



磁束密度1Tなら180A/mあれば可
磁路長で 0.5 m(仮)
 $180 \times 0.5 \text{ m} = 90 \text{ AT}$ (を鉄に食われる、と言います)

空隙のH_g は。。 $B_g = \mu_0 H_g$ で磁路長で1mm

$$H_g = 1 / 4\pi \times 10^{-7}$$

$$H_g \cdot l_g = 0.001 / (4\pi \times 10^{-7}) = 796 \text{ AT}$$

ざっくり、1Tでギャップ 1mmだと 800AT

結局は 90AT と796AT の 合計 = 886ATのコイルと

7cm×7cmの断面積が必要

- 886ATのコイル≒1000ATすると。。。電源は？(設計仕様として電流を与えられることが多い)
- 2A 500ターンで設計
- **電流密度は1~5A/mm²** (空冷、小型機) とりあえず2A/mm² でみて 1mm² とする
- 1mm² は 直径 1.13の電線
- 鉄心を□ 7×7 とすると。。。□10cmでコイルを巻いて、、、
- 10行×50列でコイルサイズは およそ1cm×5cm で成立
- $R = \rho \cdot l / S$
- $2 \times 10^{-8} \times 0.4 / 10^{-6} \times 500 \text{ 回}$
- $= 4 \Omega$ (温度上昇、加工劣化みて5Ω程度として)
- $V = 2A \times 5\Omega = 10V$
- $VI = 2A \times 10V = 20W$
- $\phi = 49\text{cm}^2 \times 1T = 4.9\text{mWb}$
- $L = \Phi / I$ なので $500\text{ターン} \times 4.9\text{mWb} / 2A = 1.225 \text{ (H)}$
- $L / R = 1.225\text{H} / 4\Omega = 0.306 \text{ (時定数)}$

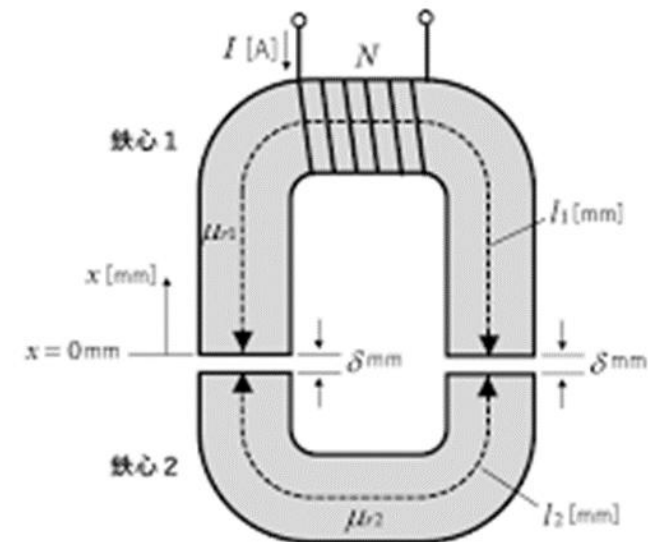


図1

断熱温度上昇

• 電流密度 j (A/m²) 抵抗率 ρ (Ωm) 断面積 s

• 比重 d 比熱 c (J/kg · K)

発熱 $(j \cdot s)^2 \cdot \rho \cdot L/s = j^2 s \rho L$

熱容量 $s L d c$

∴ 断熱温度上昇 $j^2 \rho / d c$

銅線 @10A/mm² 抵抗率 2×10^{-8} 比熱 380 比重8900
=0.6 °C/秒

短時間過渡では、温度差で熱が伝導して逃げる量 < 発熱量
高温になるにしたいが、実際は熱伝導で熱が逃げるが、熱モデルが必要
一旦は発熱がすべて温度上昇に費やされるワースト条件で見積もると

10A/mm² で0.6°C/秒

30A/mm² で5.4°C/秒

→ 5秒で27°C上昇（意外と少ない）→ 30秒で162°C上昇（この辺が限界）

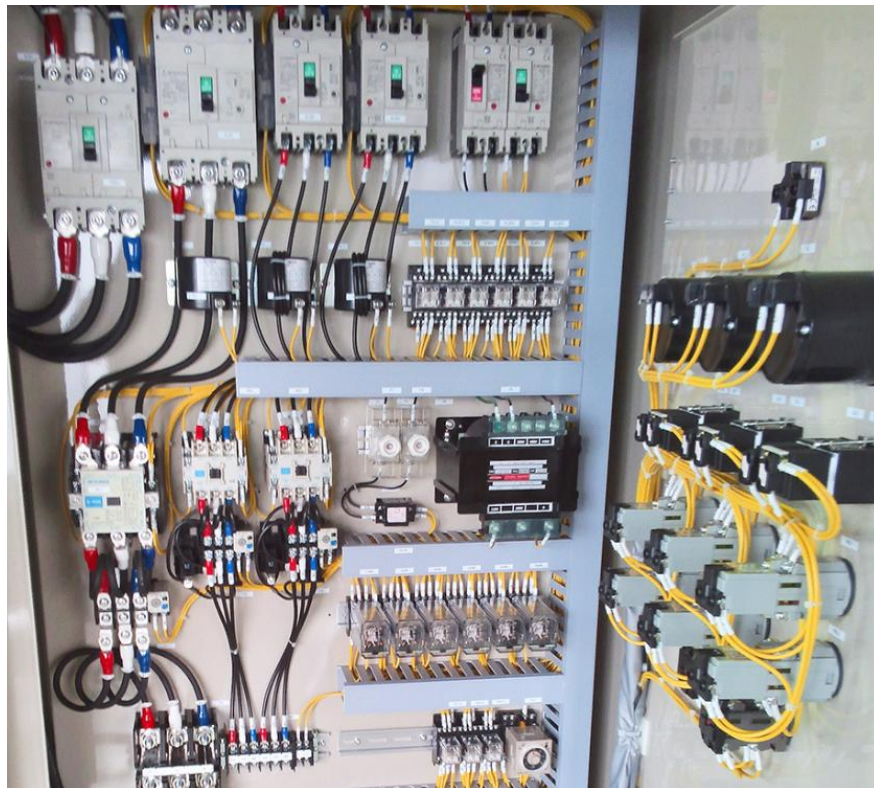
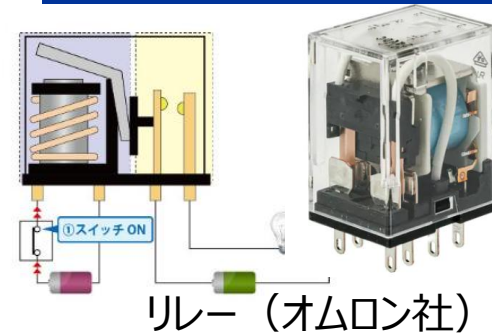
電磁石をつかった製品ってあるの？

事故・地絡や過電流の時に電源を遮断する

小電流の信号をON-OFFする

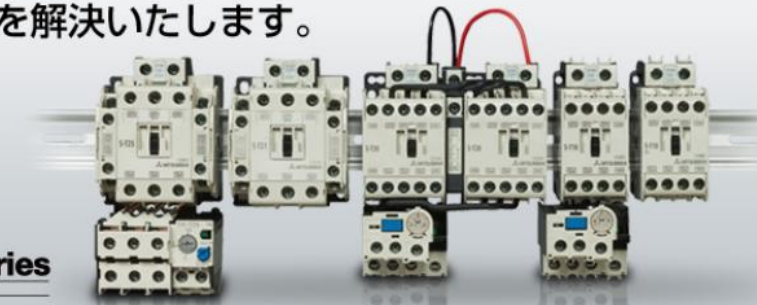


ノーヒューズブレーカー
漏電遮断器



新形MS-Tシリーズで
お客様の悩みを解決いたします。

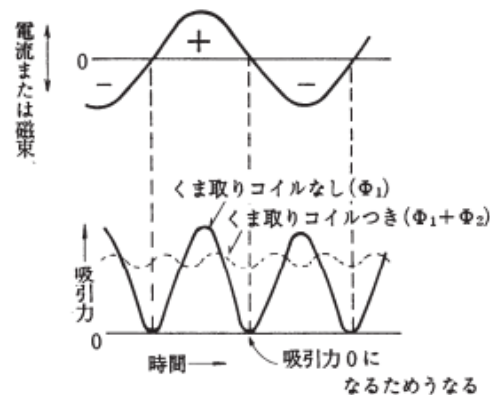
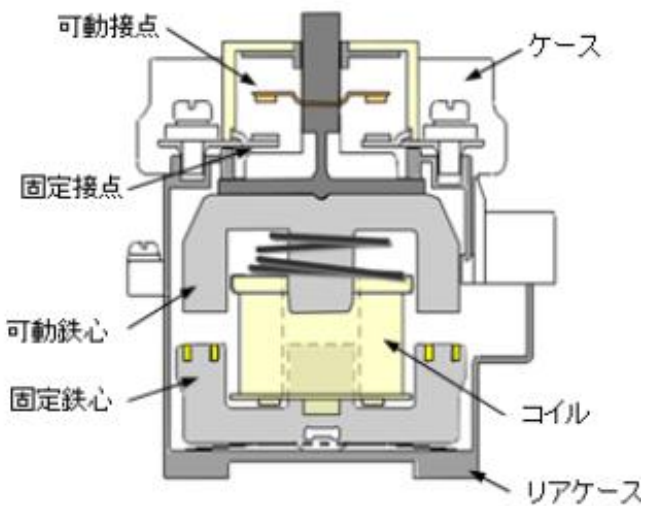
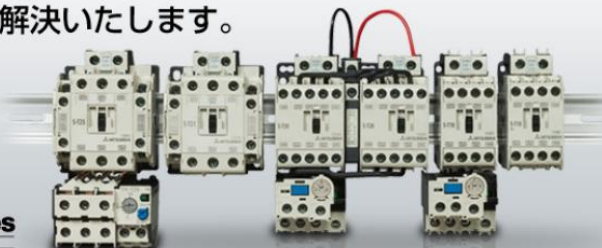
MS-T Series
三菱電機 漏電遮断器



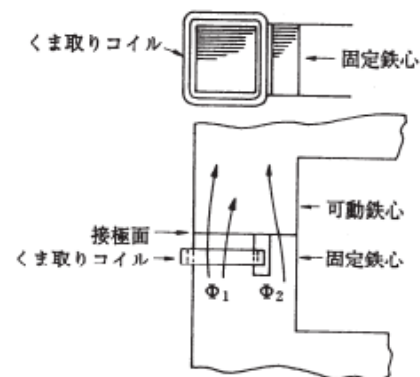
モータや装置のスイッチを操作する

- ・電磁接触器 (コンタクタ)
- ・電磁開閉器 (マグネットスイッチ)
= コンタクタ + サーマルリレー

MS-T Series



交流電磁石の吸引力



くま取りコイル

一般技術

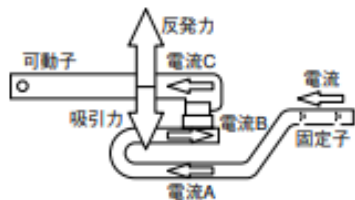


図 5.54 従来方式Uターン固定子

● 消弧装置

遮断時に発生するアークを消弧します。
アーク抵抗を高める対向グリッドなど三菱NFB独自の工夫がされております。

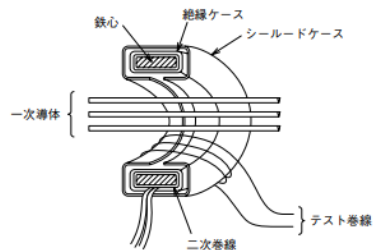


図 5.14 ZCT部の構造



独自開発技術

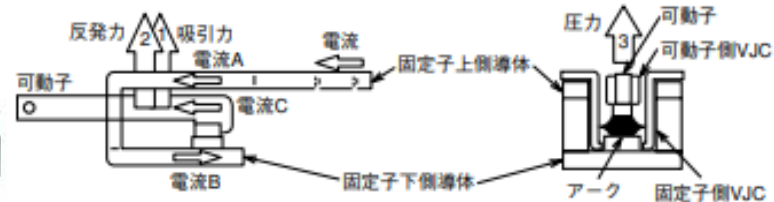


図 5.55 ISTACの構造

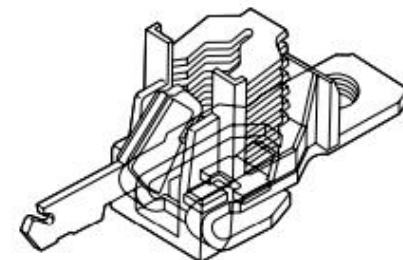


図 5.56 ISTAC細隙構造

切りにくい直流の遮断技術(太陽光発電を陰で支える)

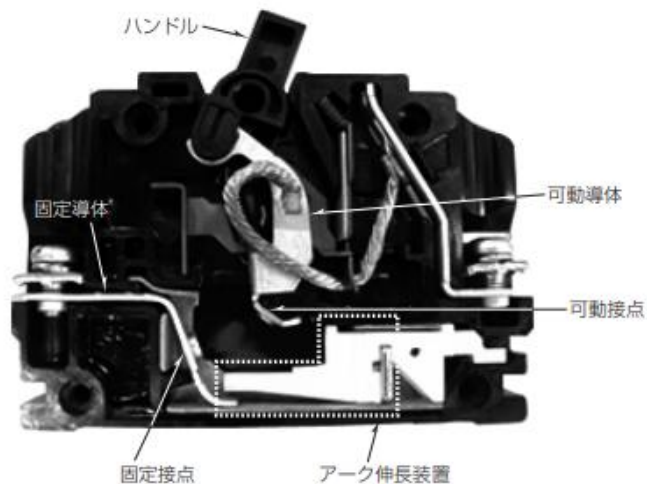


図 2. 太陽光発電システム向け直流開閉器の内部構造

50A以下の小電流の場合、アークが発生する電磁力が小さく消弧装置のダイオン効果が十分得られない。そのため高電圧化した場合、遮断器はTRIP動作するが、電流を遮断できない問題が発生する。この状態を回避すべく固定接点と可動接点間の距離が小さい小形遮断器では接点から離れた位置に1個の永久磁石を配置し磁性体の端子やアークランナで図2. 37のように固定接点近傍まで50Aを駆動するのに必要な磁場(数mT)を発生させている。

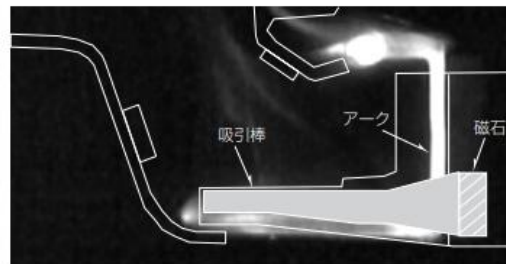


図 5. 新形アーク伸長装置適用時のアーク形態

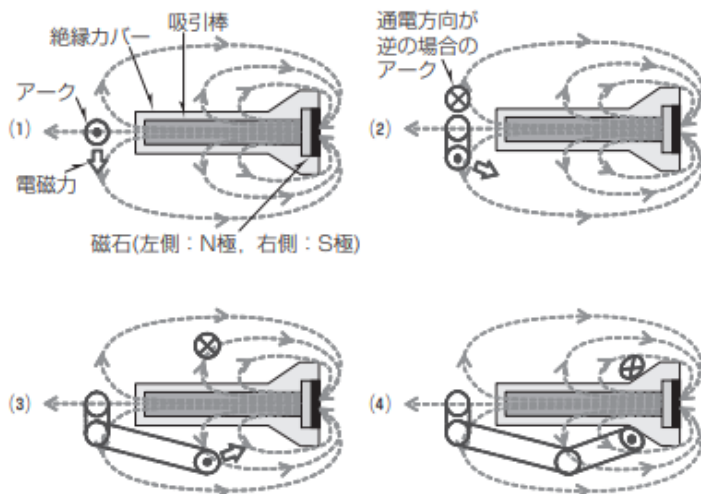


図 4. 無極性遮断原理

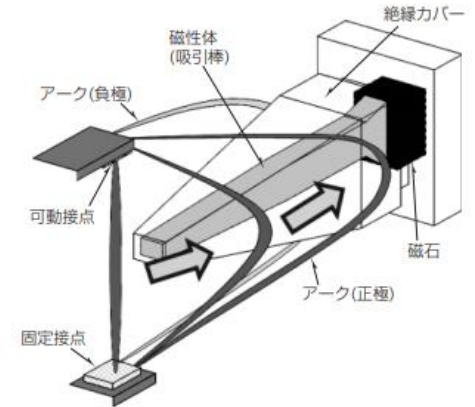


図 3. 新形アーク伸長装置

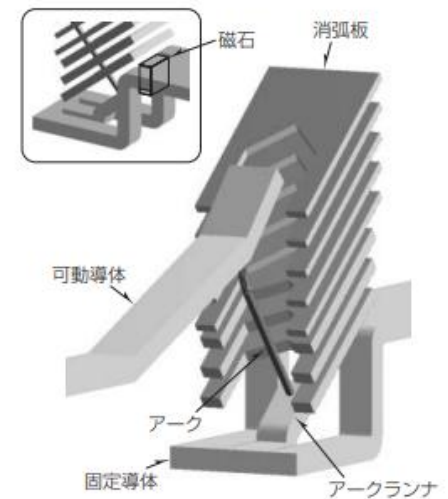


図 8. 三次元電磁界解析モデル

近く(福山)にブレーカの工場があります

**電子化
フレキシブル化**

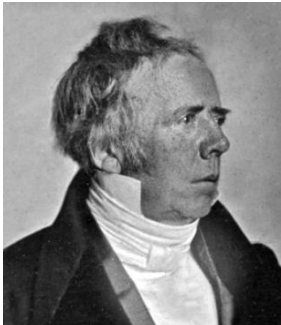
**大容量化
高容量化**

- 1977:SCRUMシリーズ発売、IC搭載漏電遮断器発売
- 選択協調形漏電リレー (NV-ZU) 発売
- 1976:電子式AE形低圧気中遮断器発売
- 1975:漏電遮断器シリーズ化
- 1974:電子式ノーヒューズ遮断器 (MELNIC) 発売
- 1973:3元ブレーカ、限流選択ブレーカ発売
- 4000Aフレームノーヒューズ遮断器発売
- 1971:SCHaT + RU/パーフェクトシリーズ発売
- 3200Aフレームノーヒューズ遮断器発売
- 1970:永久ヒューズ付遮断器発売
- 1969:SCHaTシリーズ発売、漏電遮断器発売
- 1968:短限時つきブレーカ発売船舶用気中遮断器発売
- 1967:2000Aフレームノーヒューズ遮断器発売
- 1965:トライバック遮断器発売
- 1964:1000Aフレームノーヒューズ遮断器発売
- 1961:協約寸法形ブレーカ発売
- 1959:モータブレーカ発売
- 1954:安全ブレーカ発売
- 1952:B4形電灯分電盤用遮断器発売
- 1943:テアイオン遮断器発売
- 1937:225Aフレームノーヒューズ遮断器発売
- 1936:100Aフレームノーヒューズ遮断器発売
- 1933:わが国初のノーヒューズ遮断器発売(昭和8年)



電力の「安全」に
イノベーションを起こすことは、
私が未来と交わした約束です

福山製作所
遮断機製造部 部長
竹内 敏恵



ハンス・クリスティアン・
エルステッド

デンマーク：1777年- 1851
年



アンドレ＝マリ・アンペール

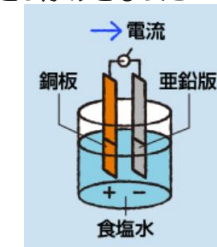
仏：1775年～1836年

1820年4月21日、H・C・エルステッドが実験器具のそばで電池（*）のスイッチで方位磁針が触れることを発見（ただし数学的な解釈にはたどり着かず）

当初彼は、導線に電流が流れるとき、光や熱のように磁気的効果が導線の周囲に放射されると解釈した。その3カ月後により集中的な研究を開始し、間もなく電流の流れる導線の周囲に円形の磁場が形成されるという発見を公表した。

エルステッドはこの現象について、十分な説明や数学的な解析を行わなかったが、彼の実験のレポートがアンペールらによる電磁気学の発展のきっかけとなった

（*）ちなみにボルタの電池の発明は1800年とされている



1820年9月11日にエルステッドの発見を耳にして、磁性と電気の関係进行研究。

磁針の振れる方向が電流の流れている方向に関係することを発見した。

一週間後の9月18日、アンペールはその現象を含む類似の現象についてより完全な解釈を含めた論文をアカデミーに提出。粒上の電荷の動きが電流であると予測（実際に電子が発見されるのは、その60年後）

パリのモンマルトル墓地に埋葬されている

偉人伝



ジェームズ・クラーク・マクスウェル
(英スコットランド :
1831–1879)

1855年12月10日には[マイケル・ファラデー](#)の提唱した磁気力線に関する論文を発表した。1861年には、[光の三原色](#)それぞれのフィルターを着けて撮影した3枚の写真を重ねることで史上初めて[カラー写真](#)の撮影に成功した。また同年、[気体](#)の[分子運動論](#)の論文を発表。[エーテル](#)の中で力線に沿って整列した渦流が敷き詰められ、その間に小さな歯車のような存在があって噛み合っているという力学モデルを提唱し、ここから正確な[アンペールの法則](#)が初めて導き出された。さらにエーテルを[弾性体](#)として電気・磁気の力によって伝播する波の速度を求めたところ、[光速度](#)とほぼ一致することが明らかになった。すなわち光は[横波](#)であり、かつ[電磁気](#)と一体の現象として捉えられることがわかった。これらを整理して渦流を用いずに説明できる電磁場のモデルである[マクスウェルの方程式](#)を導き、[1864年](#)に[王立協会](#)で発表した。1868年には論文の中で[電磁波](#)という言葉を使用し、[電気](#)と[磁気](#)の相関に触れた。

問題①

空隙が1mmのときの100kgfの電磁石を設計してみる
ただし鉄の比透磁率は3000として扱ってよい
考え方と数式を記載すること

問題②

コイル配置を仮定し, 直流で駆動するときの
電圧, 電流, 時定数を求めてみよ

問題③

空隙が2mmの場合に, 同じ力を発生させるとすると
どれくらい電流が増加するか?