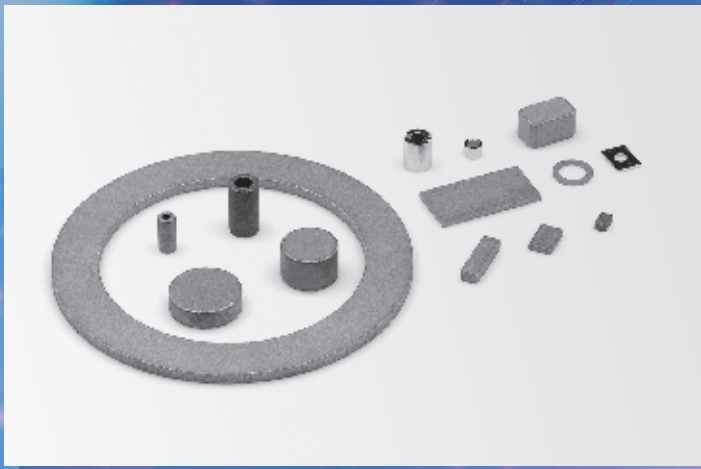


永久磁石

Permanent Magnets



ご使用に際して

1. 安全上の注意

- ① 磁化された大型磁石は磁石同士または鉄片などの磁性体との間に非常に強い吸引力（または磁石間の反発力）が生じます。運搬や組立の際に手などを挟まれたり、吸引力や反発力で体のバランスを崩し、思わぬ怪我をすることがありますので、適切な治具を使用するなど、磁石の取り扱いには十分にご注意下さい。
- ② 磁石のシャープなエッジで手や指などに怪我をすることがあります。取り扱いには十分にご注意下さい。
- ③ 空芯コイルを用いて着磁する場合は、磁石がコイルから急激に飛び出す事があり危険です。安全のため、磁石はコイルの中心部に置き、固定して着磁を行って下さい。
- ④ 磁石を誤って飲み込まないよう、幼児の手の届かないところに保管して下さい。万一飲み込んだ場合は医師にご相談下さい。
- ⑤ 金属に敏感に反応するアレルギー体質の方は、磁石に触れると皮膚が荒れたり赤くなったりする場合があります。このような症状が現われた場合には磁石に触れる作業はお避け下さい。
- ⑥ ペースメーカーなど電子医療機器を装着した人へ磁石を近づけると、正常な作動を損なう事があり、大変危険ですので十分にご注意下さい。
- ⑦ 磁石は一般に割れやすく、破片が目に入ったり、破片で怪我をすることがありますのでご注意ください。磁石は吸引力が強いため、手を挟まれないようご注意ください。

2. 取り扱いの注意

- ① 着磁された磁石同士を直接重ねると、磁石が離れにくくなったり、欠けることがあります。磁石間にボール紙などをスペーサとして挟み込んでご使用下さい。
- ② 着磁された磁石を鉄板に吸引させたり、磁石同士を吸引・反発させると減磁することがありますのでご注意ください。
- ③ 着磁された磁石を交流・直流磁界に近づけると、減磁することがあります。
- ④ 着磁された磁石は鉄粉などのゴミを吸着しますので、梱包ケースから取り出す場合はホコリのない環境で行って下さい。
- ⑤ 磁石は、着磁されていないものでも微少な磁性体が付着する場合がありますので、取り扱いに注意して下さい。また、精密モータに使用する場合は、組み付け後洗浄してからご使用下さい。
- ⑥ 磁石はそれぞれの材質に特有のキュリー温度があります。キュリー温度近くに加熱すると磁力を失います。組立などで加熱せざるを得ない場合は弊社へご相談下さい。
- ⑦ ヨークなどに接着する場合は、接着後に機械的な歪みが残らないような接着材及び接着方法を選んで下さい。残留応力が加わったまま使用されますと、わずかの衝撃で磁石が割れることがあります。
- ⑧ 磁石は衝撃に弱く、割れや欠けが発生しやすいので取り扱いにご注意下さい。割れや欠けは特性劣化の原因となります。

3. その他の注意事項

- ① 磁石を磁気テープ、プリペイドカード、切符、電子時計などに近づけないで下さい。磁気記録媒体が破壊されたり、磁化されて使用できなくなることがあります。
- ② 磁石を電子機器に近づけないで下さい。計器板・制御盤に影響し、故障や事故につながる場合があります。
- ③ 切り出し用磁石の加工時に、切り粉が発火する恐れがありますので、火気及び可燃物には近づけないで下さい。また、万一発火した場合に備え、粉末消火器、砂などを用意して下さい。また、電気掃除機のご使用は避けて下さい。

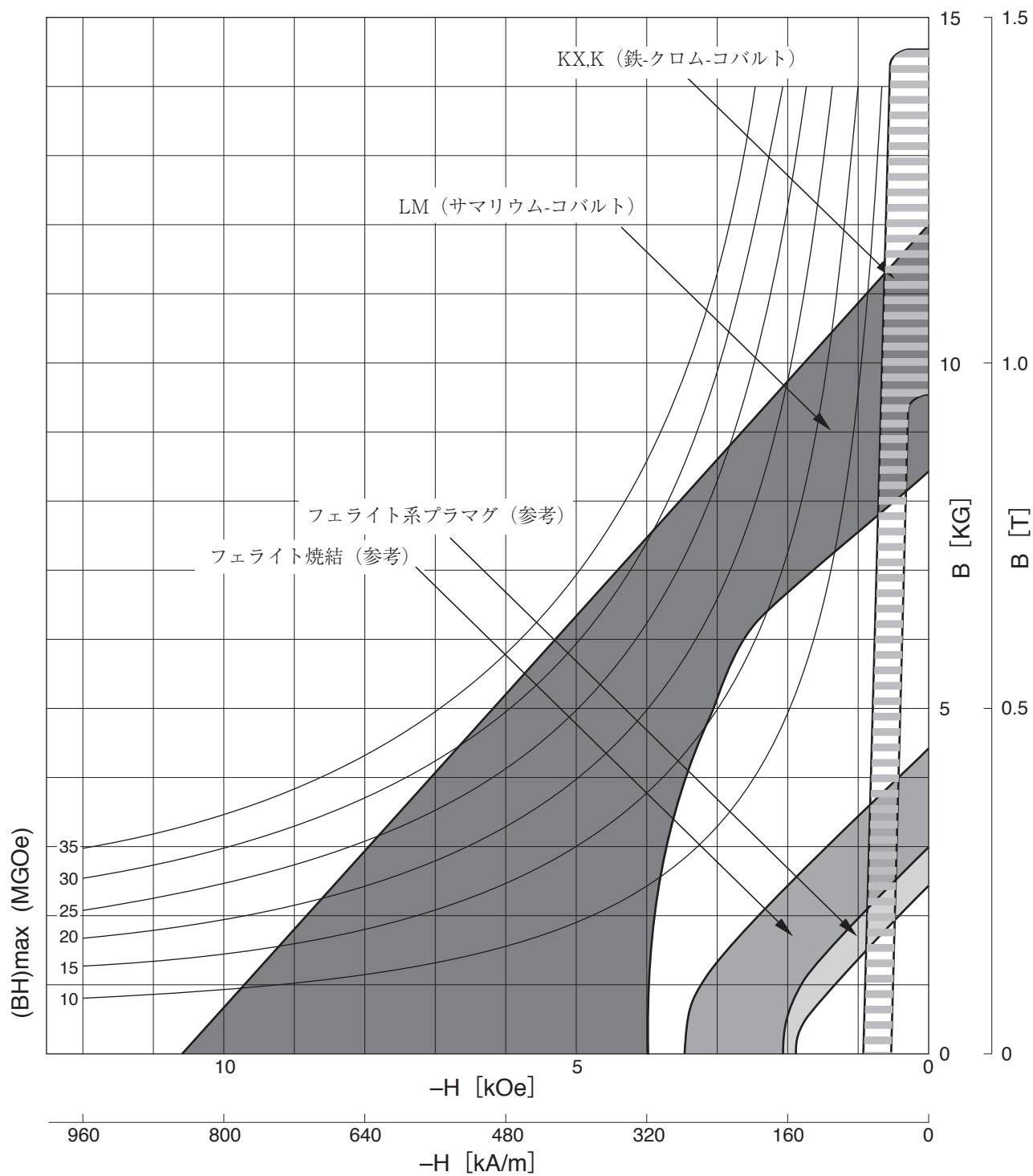
INTRODUCTION

磁性材料の総合メーカーとしてトーキンは、永く永久磁石の研究・開発を進め、アルニコ磁石“TMK”、サマリウム-コバルト磁石“ランタネット[®]”に代表される優れた製品を発表してきました。今日、これらの永久磁石は、これまで応用できなかった新分野にまで応用されるようになり、その用途はますます拡大されつつあります。

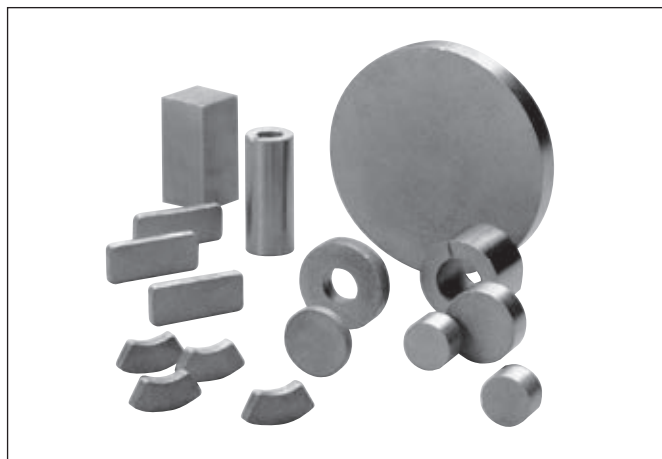
“ランタネット[®]”は、高エネルギー積を特長とするサマリウム-コバルト磁石で、電子時計・プリンタ・モータ・小型コアレスモータ・車載用等に優れた特性を発揮します。

CONTENTS

サマリウム - コバルト磁石 “ランタネット [®] ”	6
材質標準特性および用途	7
減磁曲線	8
磁気特性の熱的变化	13
着磁磁界、取り扱い上の注意、ご注文に際して	14
鉄 - クロム - コバルト磁石 (Fe-Cr-Co 磁石)	15
用語の解説	18
永久磁石の設計法	21
磁気に関する単位について	26



サマリウム-コバルト磁石“ランタネット[®]”



特 長

ランタネット[®]は、高エネルギー積、耐熱性、耐放射線性を特長とするサマリウム-コバルト磁石で、電子時計・プリンタ・モータ・小型コアレスモータ・磁気センサ検知用等の電子産業機器、車載用及び、放射線環境下等において優れた特性を発揮します。

各種ランタネット[®]の特長および用途例を第1表に示します。ランタネットは高Br、高エネルギー積磁石です。

各々の特長を生かし、用途に応じて材質をお選びください。

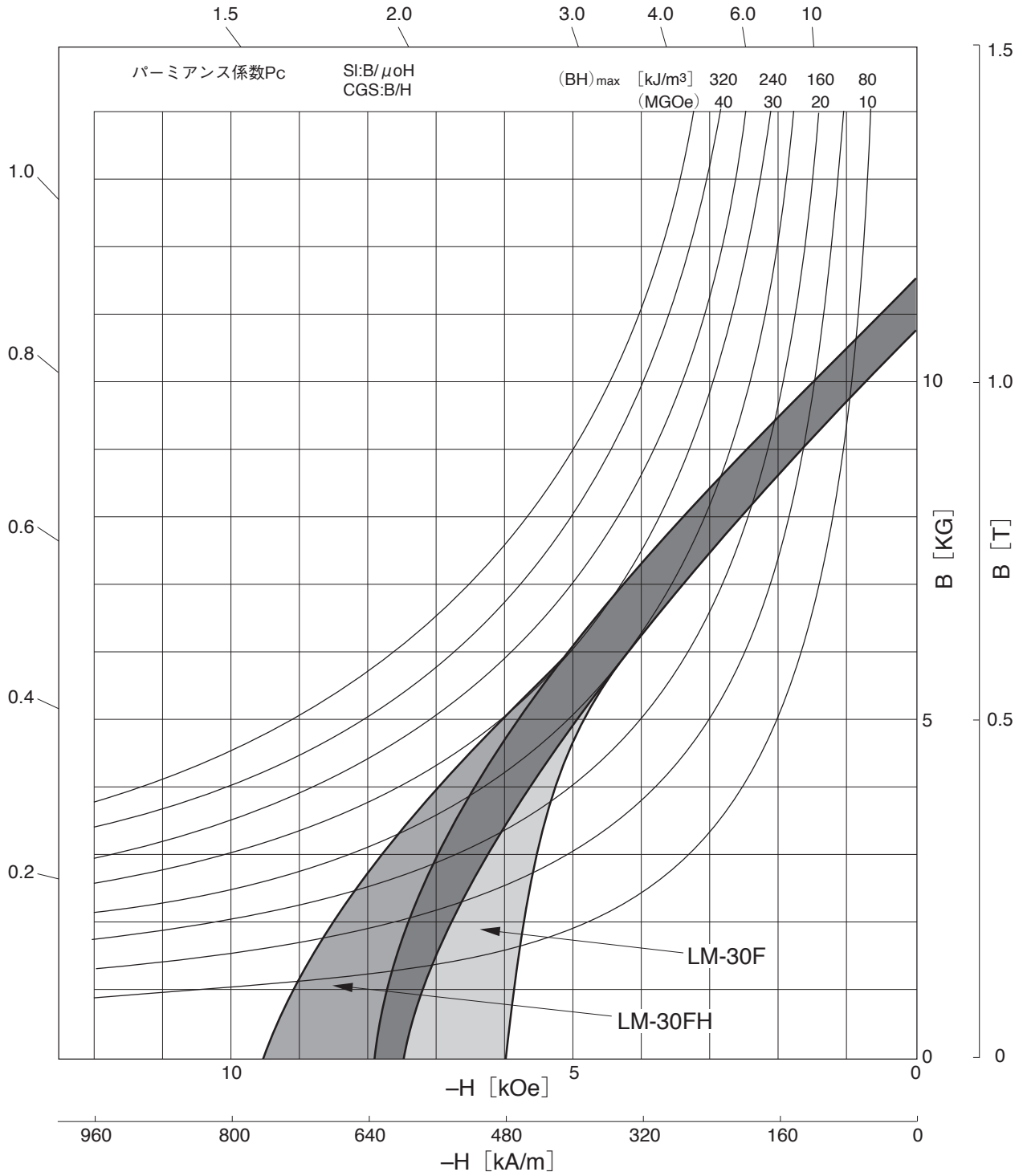
材質標準特性および用途

第1表 サマリウム-コバルト磁石“ランタネット[®]”標準特性

材質名	タイプ	残留磁束密度 Br Tesla (kG)	保磁力 HCB kA/m (kOe)	最大エネルギー積 (BH)max kJ/m ³ (MGOe)	保磁力 HcJ kA/m (kOe)	密度 D kg/m ³	温度係数 △Bd/Bd %/°C	電気抵抗率 ρ Ω-m	用途
LM-30F	2-17系	1.07~1.15 (10.7~11.5)	477~716 (6.0~9.0)	199~247 (25.0~31.0)	517~875 (6.5~11.0)	8.2±0.15×10 ³	-0.03	9×10 ⁻⁷	リレー コアレスモータ CDアクチュエータ プリンタ 偏平モータ
LM-30FH	2-17系	1.07~1.15 (10.7~11.5)	597~836 (7.5~10.5)	199~247 (25.0~31.0)	637~1432 (8.0~18.0)	8.2±0.15×10 ³			
LM-30SH	2-17系	1.05~1.12 (10.5~11.2)	676~875 (8.5~11.0)	199~247 (25.0~31.0)	1592~ (20.0~)	8.2±0.15×10 ³	-0.03	9×10 ⁻⁷	車載センサ イグニッションコイル 表面実装部品
LM-32SH	2-17系	1.12~1.20 (11.2~12.0)	795~915 (10.0~11.5)	223~263 (28.0~33.0)	1592~ (20.0~)	8.2±0.15×10 ³	-0.04	9×10 ⁻⁷	車載センサ イグニッションコイル 表面実装部品

ランタネット®の減磁曲線

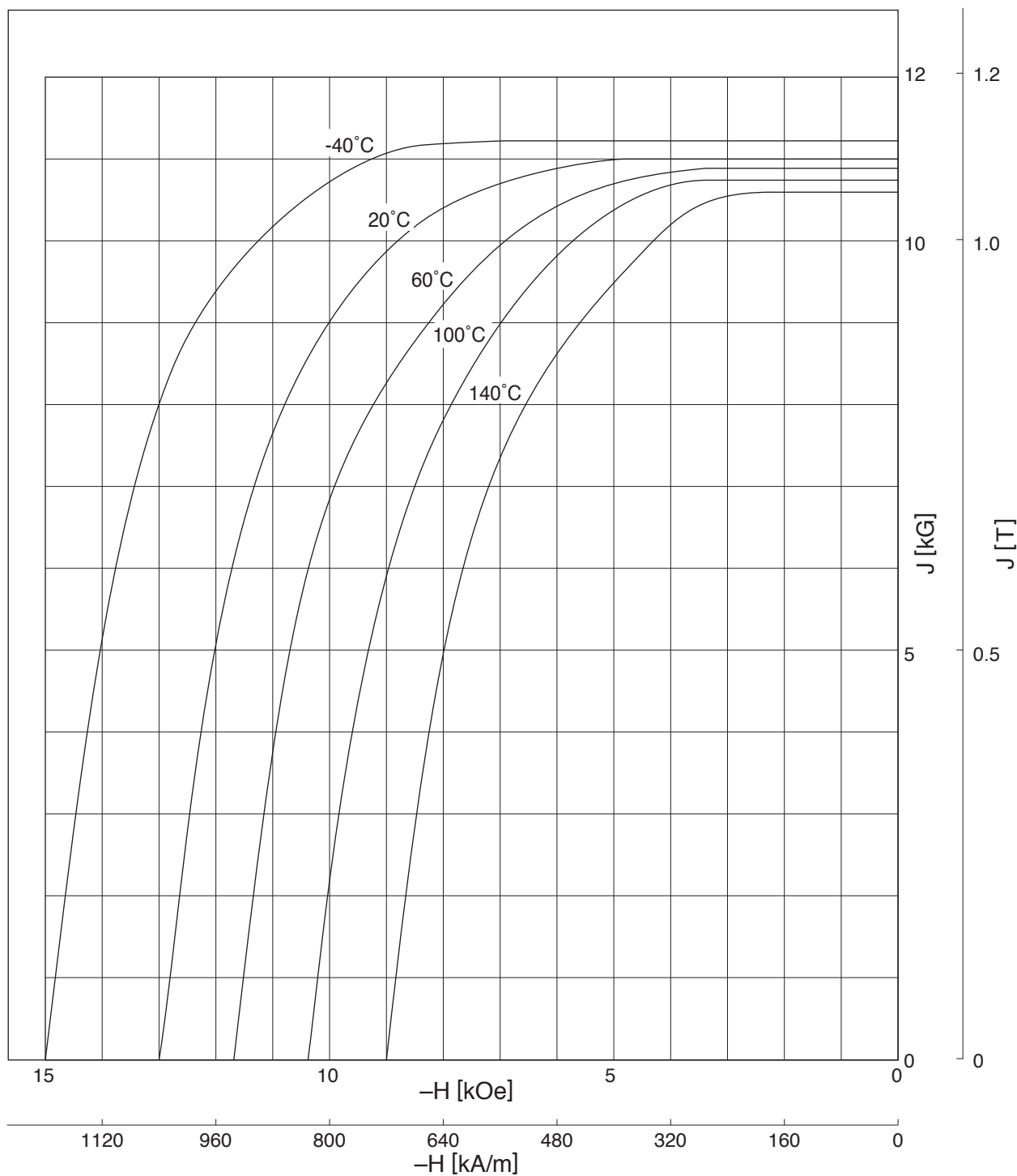
LM-30F/LM-30FH



第1図

ランタネット®の減磁曲線

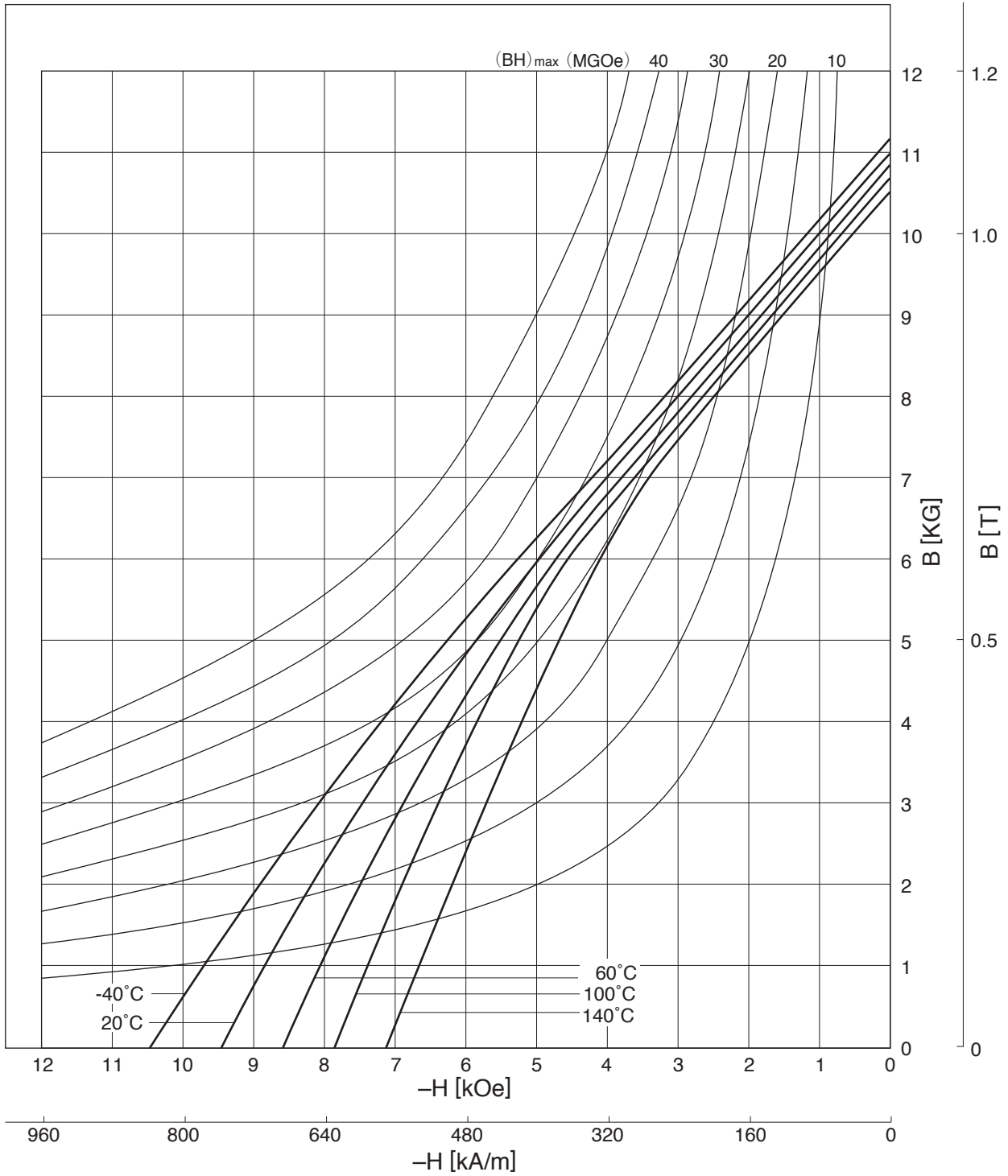
LM-30FH



第2図

ランタネット®の減磁曲線

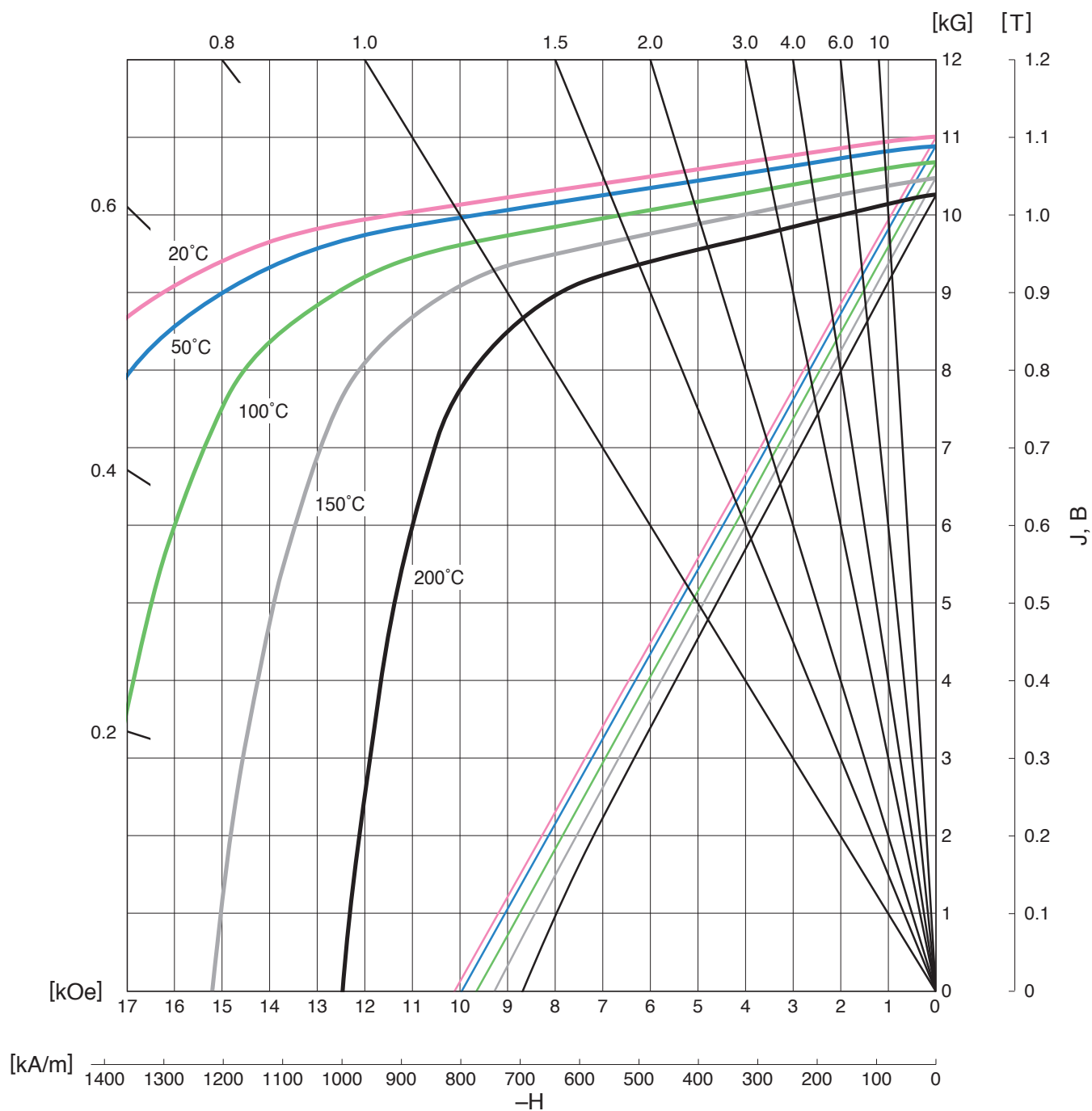
LM-30FH



第3図

ランタネット®の減磁曲線

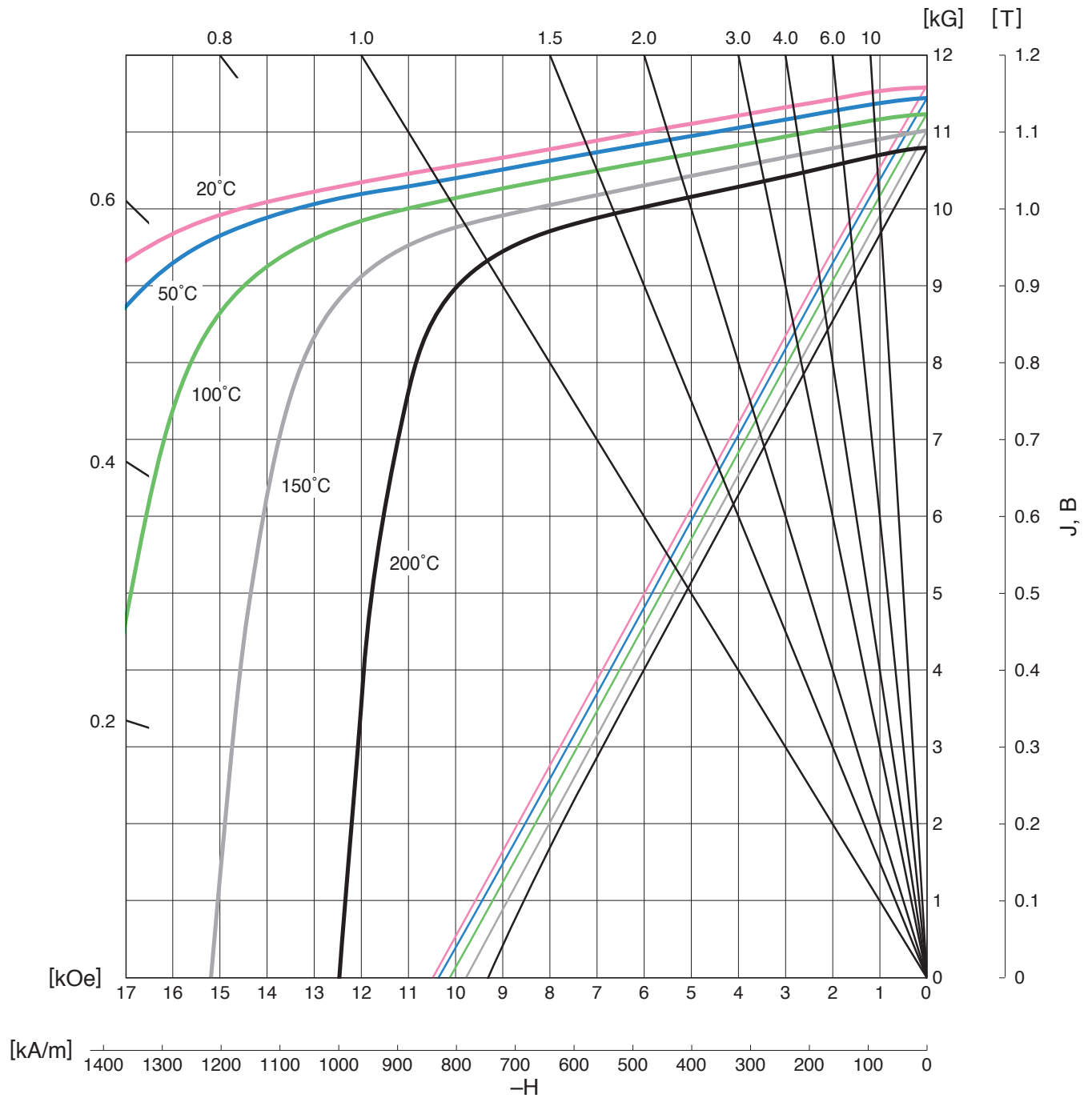
LM-30SH



第4図

ランタネット®の減磁曲線

LM-32SH



第5図

磁気特性の熱的变化

不可逆温度変化

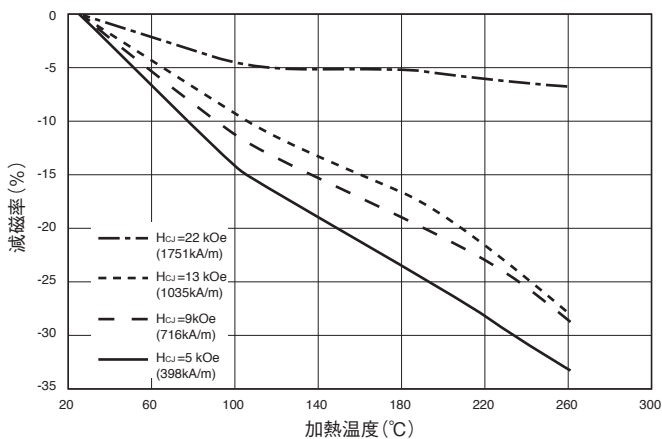
永久磁石を高温にさらし、再び常温に戻すと、材質に変化がなくとも永久磁石の作る磁束密度は減少します。このような磁束密度の変化率は、高温にさらす時間とともに次第に減少し、比較的短時間（30分～4時間）で飽和に達し変化は止まります。この時の始めの磁束密度に対する変化率を不可逆温度変化率と呼び、その変化の大きさは、保持温度と磁石の動作点の位置により大幅に異なります。

第6図～第8図はランタネット[®]の保磁力に対する不可逆温度変化のおよその大きさを示したものです。永久磁石の動作点、即ちパーミアンス係数(P)によっても変えることを示しています。一般にH_{CJ}が大きいほど、またパーミアンス係数が大きいほど不可逆変化は小さくなります。

ランタネット[®]の不可逆温度変化 第6図～第8図

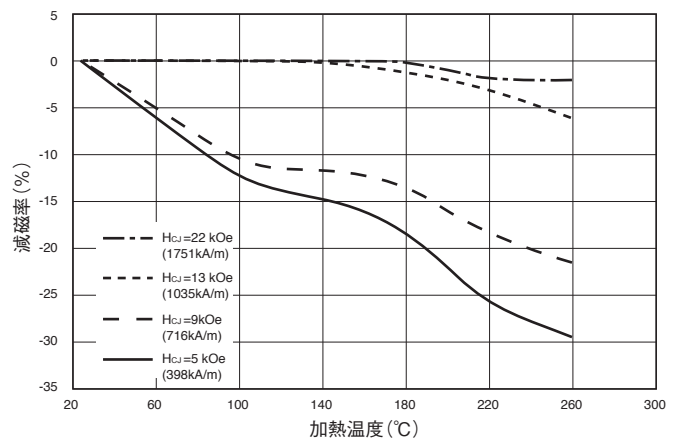
LM30F, 30FH, 30SH, 32SH

p=0.5の時の加熱温度と減磁率



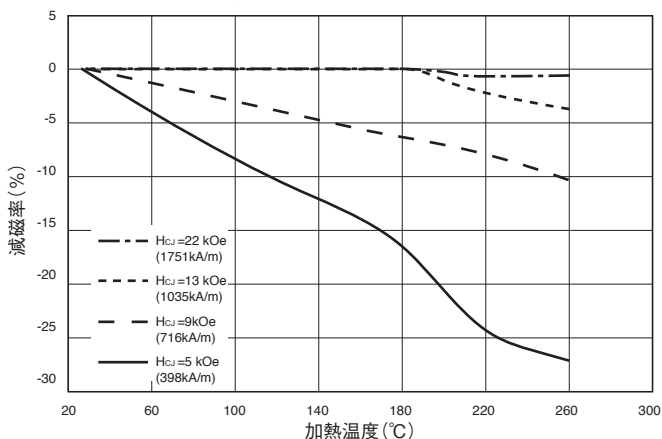
第6図

p=1.2の時の加熱温度と減磁率



第7図

p=2.2の時の加熱温度と減磁率



第8図

可逆温度変化

材料固有なもので、温度変化による磁気特性の可逆的な変化を可逆温度変化といい、1℃あたりの磁束密度の変化率を可逆温度変化率(温度係数)といいます。この可逆温度変化は、各温度での不可逆温度変化が完了してから測定します。

第1表に示されている温度係数はこの可逆温度変化を示したものです。

着磁磁界

ランタネット®の着磁磁界は、アルニコ磁石やフェライト磁石に比較し高磁界が必要です。着磁磁界には十分にご留意ください。ランタネットの必要着磁磁界を第2表に示します。

なお、着磁の方法、着磁機等についてはご相談下さい。

第2表 ランタネット®の必要着磁磁界

材質名	着磁磁界 kA/m(kOe)
LM-30F	1592(20)以上
LM-30FH	1989(25)以上
LM-30SH、32SH	3183(40)以上

なお、永久磁石に加わる反磁界が大きい場合は、反磁界を加味しますと、第2表より大きな磁界を必要とする場合があります。

取り扱い上の注意

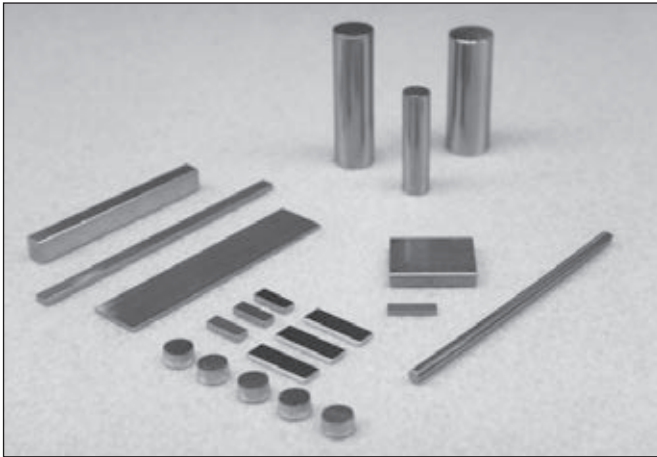
着磁したランタネット®を取り扱う際は、吸着力が大きいため、不用意にランタネット®同士を着脱させたり、金属片に吸着させたりしますと、かどが欠けるなど破損することがありますのでご留意下さい。

ご注文に際して

ご注文の際は下記の点をご明示下さい。

- 材質または磁気特性
- 寸法および公差
- 着磁の要否、着磁方向の指定
- 使用目的
- 使用環境(温度、雰囲気等)

鉄-クロム-コバルト磁石 (Fe-Cr-Co 磁石)



概要

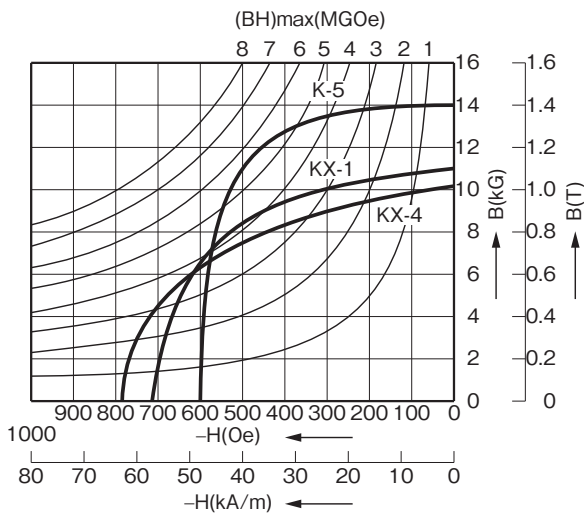
Fe-Cr-Co磁石は、東北大学・金子博士により開発されたFe-Cr-Co系磁石を基にトーキンが製品化した永久磁石です。

その最大の特長は、アルニコ系鋳造磁石とほぼ同じ磁石性能を持ち、その上機械加工も容易にできる低Co量の省資源形磁石であることですが、その他にも以下の特長があります。

1) 塑性加工ができるので薄板、細線の製造ができます。さらに切削、打ち抜き、穴明けなどの機械加工も容易にできますので、磁気回路の設計の自由度が増大し、新しい用途の開拓にも最適です。

2) 圧延、伸線の製造工程で造られたFe-Cr-Co磁石は巣、欠け、クラックがなく、また衝撃による割れ、欠けの発生もありません。

3) ハンダ付は可能で、作業時の温度上昇による磁性の変化は認められません。ただし、銀ローク作業のように500℃を超える高温に加熱されると磁気特性が劣化します。



第9図 Fe-Cr-Co 磁石の減磁曲線

材質標準特性

第3表 Fe-Cr-Co磁石の磁気特性

材 質	残留磁束密度 Br T (kG)	保磁力 Hc kA/m (Oe)	最大エネルギー積 (BH)max kJ/m ³ (MGOe)	最 適 動 作 点		
				Bd T (kG)	Hd kA/m (Oe)	パーミアンス係数 p
KX-1	1.05～1.25 (10.5～12.5)	47.7～59.7 (600～750)	25.5～41.4 (3.2～5.2)	0.85 (8.5)	39.8 (500)	17
KX-4	0.85～1.05 (8.5～10.5)	53.3～65.3 (670～820)	23.9～39.8 (3.0～5.0)	0.70 (7.0)	43.8 (550)	14
K-5	1.30～1.50 (13.0～15.0)	37.4～49.3 (470～620)	39.8～55.7 (5.0～7.0)	1.3 (13.0)	35.8 (450)	29

機械特性と物理特性

第4表に溶体化処理後と磁性熱処理後のFe-Cr-Co磁石の機械特性と物理特性を示しました。熱膨張係数は温度範囲(0～500℃)の平均値です。

第4表 Fe-Cr-Co磁石の機械特性と物理特性

	機 械 特 性			物 理 特 性			
	硬度 Hv	引張強さ N/mm ²	伸び (%)	密度 (kg/m ³)	電気抵抗率 (μΩ・m)	熱膨張係数 (/°C)	キュリー温度 (°C)
溶体化処理後	200～230	637～735	10～15				
熱処理終了後	450～500	441～490	0	7.8×10 ³	0.62	14×10 ⁻⁶	670

第5表 各永久磁石材料のBrの温度変化率(可逆変化)

材 料 名	Brの温度変化率 (%/°C)
アルニコ5	-0.021
Fe-Cr-Co磁石	-0.040
サマリウム・コバルト磁石	-0.03～-0.043
ネオジム・鉄・ボロン磁石	-0.09～-0.12
バリウムフェライト	-0.19

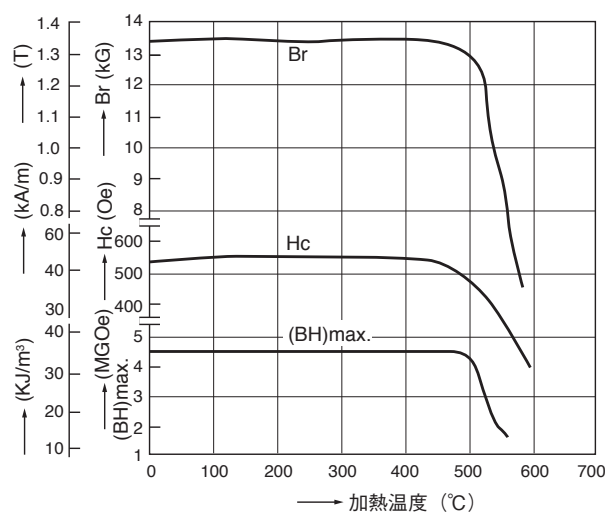
磁氣的安定性

温度変化

一般に、永久磁石を高温に加熱すると、磁石材料に不可逆的な減磁が生ずる他、温度変化とともに可逆的な減磁をも示します。使用温度以上で予め加熱し不可逆減磁を終了させた材料は、その後は温度係数に対応した可逆変化のみを考慮すればよいことになります。

Fe-Cr-Co磁石は、第10図に示すように500℃以下の温度に対して不可逆減磁は起きませんが、500℃以上で使用すると急激に磁束値の減少を示します。(各温度に1時間保持後、室温へ戻して測定) 従って、ハンダ付は可能ですが銀ロー付は磁性劣下をきたします。

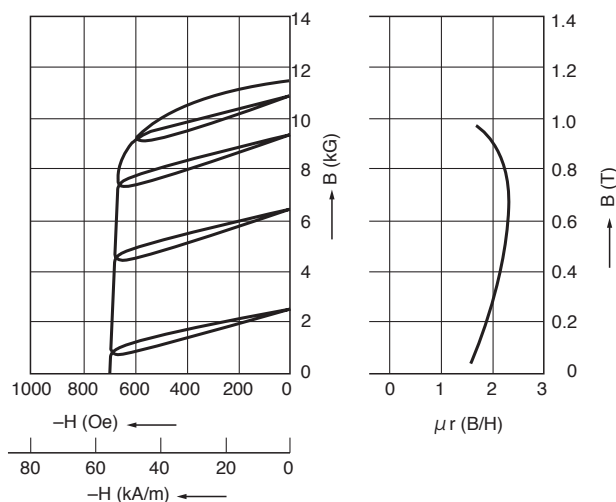
各永久磁石材料の不可逆特性劣下の生じない400℃以下でのBrの温度変化率を第5表に示します。Fe-Cr-Co磁石はアルニコ磁石より若干大きく、フェライト磁石よりはるかに小さい値です。多くの場合、これを無視しても実用上支障のない程度です。



第10図 Fe-Cr-Co磁石の不可逆的温度変化

磁気回路の磁気抵抗の変化

使用状態において磁気回路の磁気抵抗が変化した場合には動作点の磁束密度も変化しますが、この度合はリコイル透磁率と関係があるので、第11図にFe-Cr-Co磁石KX-1のリコイル曲線を示しました。この図によればアルニコ5より安定性に優れていることがわかります。(アルニコ5の μ_{rec} は最大で約3.7)



第11図 Fe-Cr-Co磁石KX-1のリコイル曲線

ご注文に際して

ご注文に際しては次の事項をご指定ください。

- 形状、寸法 (指定寸法にて加工します)
- 所要磁気特性
- 着磁方向
- 納入時の着磁の要否
- 使用環境 (温度、雰囲気等)
- その他 (メッキ、塗装、捺印などの有無)

第6表 一般的な形状、寸法

形状	寸法	その他
板状	t0.3~1.5	左記の形状か、打ち抜き、切削などの方法で成形された磁石製品の製造が可能です。
棒	φ10~	
線	φ0.5~8	

着磁・減磁

着磁

着磁品は、反磁界の影響や運搬時の取り扱いなどによっては減磁することがあり、また組立品は組み込まれた状態で着磁した方が性能上有利な場合が多くあります。従って普通製品は未着磁 (消磁状態) で納入しています。一般に飽和磁化に必要な磁界の強さはおよそ3kOeですが、この1/2で実用上可能な着磁ができます。

減磁

Fe-Cr-Co磁石は一般に接触減磁などにより数%程度の減磁が生じます。従って適当な減磁しろを考慮した設計を行い、予めこの分を強制減磁しておけば実用状態の磁気回路の性能を確保することが可能です。

用語の解説

永久磁石をご使用になる場合に必要、磁気的な量を表す用語をSI単位系でできるだけ容易に解説いたしました。

磁気特性 Magnetic Properties

磁界

地球上には磁界（磁場）があります。この磁界は永久磁石はもちろん、電流の流れる導線周辺にも存在します。

磁界の記号はH、SI単位系の場合A/m（CGS単位系でOe）で表します。たとえば、地球磁界はおよそ24A/m（0.30e）です。また1.6MA/m（20,000Oe）程度の磁界ならば電磁石によって比較的、簡単に作るができますが、これより強い磁界を作るには色々工夫が必要になります。

磁化

磁界の中に磁石の素材を置くと、その素材は磁気的な変化を起こします。この変化を磁化と呼びます。また、その変化の度合いを“磁化の強さ”で表わし、SI単位系ではその記号としてM、単位はT（CGS単位系では記号が $4\pi M$ または $4\pi I$ 、単位はG）を用います。

飽和磁化

磁石素材に加える磁界を増加していくと、素材は磁化を増し、やがて飽和状態になります。この量を飽和磁化といいます。たとえばバリウムフェライト磁石の飽和磁化 J_s はおよそ0.44T（4400G）、ランタネット〔LM-19〕の飽和磁化は、およそ0.86T（8600G）です。

着磁

磁石素材に磁化が飽和するまで充分磁界を加える作業を着磁と呼びます。そして着磁に要した磁界を取り去ると、磁石素材には磁化が残ったままの状態となり、ここで、はじめて、磁石素材が永久磁石と生まれ変わるわけです。

磁束密度（磁気誘導）

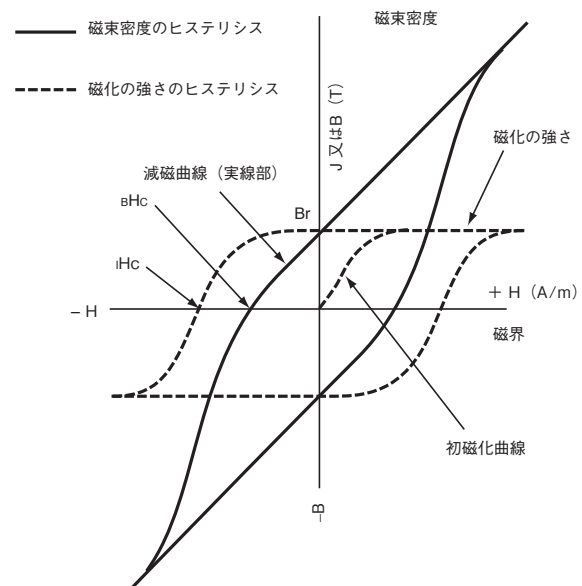
以上のように着磁によって磁石素材は磁化されますが、この時素材には一般に磁束が通るようになります。単位面積当たりの磁束を磁束密度（磁気誘導）と呼び記号は、Bで表します。単位は、磁化の強さの単位と同じガウス（G）です。この磁束密度は、 $B=J+\mu_0H$ で表すことができるので、ひとくちに言えば、素材に加わっている磁界とその時の磁化の強さを加えたものに等しくなっています。空気の磁化の強さは磁界の強さに無関係にほとんど零（つまり空気の $4\pi I$ はほぼ

零）なので、着磁に用いた磁界の外に磁石を取り出した後、その磁石のまわりの大きさが、そのままその場所での磁界となるわけです。応用上、最も大切なものは、この磁束密度の大きさです。

残留磁束密度、保磁力、ヒステリシス曲線

磁石素材に徐々に磁界を加えて行ったり、また磁界を減少させて逆の磁界を加えて行ったりした時に、磁石素材の磁化の強さや、磁束密度が、どの様に変化するかを述べてみましょう。

まず磁石素材に徐々に磁界を加えて行くと素材はしだいに磁化の強さを増し、ついに飽和磁化の点に達することは前に述べた通りで、ここまでの磁化過程を初磁化過程といいます。つぎに磁界を減少させ、磁石素材に加わる外部磁界を零にした時、磁石素材が持っている磁束密度を残留磁束密度 B_r （残留磁気誘導）と呼びます。さらに外部磁界のない状態から今までと逆方向に磁界をかけて行くと、磁化も磁束密度も減少を始めます。そしてまず磁石素材に磁束が通らなくなる状態がきます。この時かかっている磁界の大きさを保磁力 H_{cB} と呼びます。さらに逆方向磁界を増して行くと、磁束は今までと逆方向に流れはじめ、ある所で磁化もなくなります。この時の磁界の大きさを保磁力 H_{cJ} と呼びます。つまり、保磁力には、2つあって、1つは磁束密度Bを零にする磁界 H_{cB} 、1つは磁化の強さJを零にする磁界 H_{cJ} です。



第12図 永久磁石のヒステリシス曲線

さて保磁力 H_{cJ} の点を超えて逆磁界を増加させてゆくと、磁化は、はじめの向きと逆になり、逆磁界の向きと一致し、やがて磁化は飽和に達します。このくり返しにより描かれる曲線がヒステリシス曲線といわれるものです。（第12図参照）

反磁界

永久磁石は、自分で作るN極S極によって外部に磁界を作る一方、磁石内部にも同じN極S極によって磁界が生じています。これを反磁界（減磁界）とよび、その大きさも向きも磁石内部の磁束密度とは異なっております。反磁界は自分自身の磁化を減少させるように作用し、N極S極が近づくほど、すなわち磁石の長さ（寸法比：長さ／直径）が小さい程、大きくなります。

減磁曲線

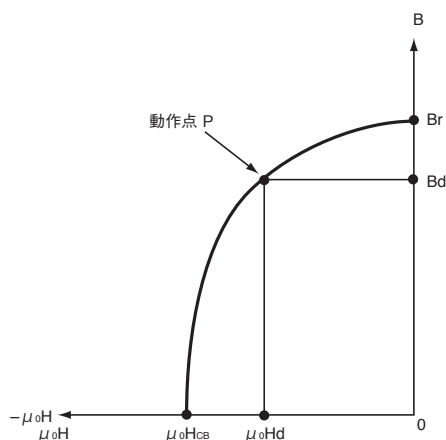
磁束密度の項で述べたように、永久磁石は磁化された結果残る磁束を利用しますから、反磁界が大きくても磁束密度が消滅せずに残っている程、永久磁石の特質をよく備えているといえます。従ってひとくちについて残留磁束密度と保磁力 $B_H C$ が大きいことがすぐれた永久磁石の必要条件です。逆磁界の大きさにより磁束密度がどう変化するかを知るために減磁曲線を用います。この曲線は、とりもなおさず磁束密度と磁界の関係を示したヒステリシス曲線の第2象限そのものです。

（第12図参照）

永久磁石の真の評価の第一歩はこの減磁曲線を見ることです。

動作点

永久磁石に加わる反磁界 H_d であるとき、永久磁石は減磁曲線上 B_d に相当する磁束密度（磁気誘導）を出していることとなります。このように $H_d \cdot B_d$ で示される点をその永久磁石の動作点と呼びます。（第13図参照）しかし実際の使用にあたっては、この動作点は周囲の状況によって変化します。たとえば着磁した直後の磁石の動作点が第13図のP点であったとしても、その磁石に鉄片をつけると、磁石の反磁界が減少し磁束密度がさらに増加する所に動作点は移動します。



第13図 永久磁石の動作点

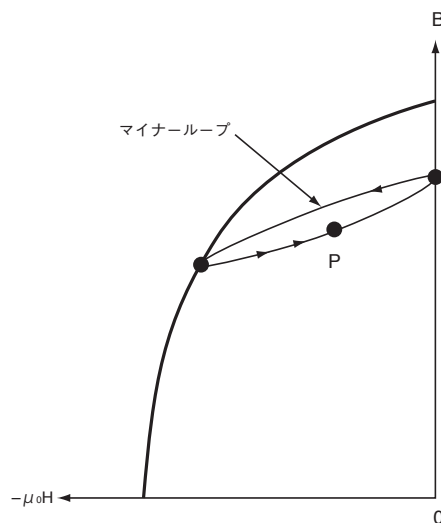
最大エネルギー積

減磁曲線の項で述べたように、永久磁石の磁気特性の判定の基準は、まず減磁曲線を見ることです。つまり、ある反磁界 H_d があるときに、磁束密度 B_d がいくら出せるかを知ることができればよいわけです。そこでもっと簡単に永久磁石の磁気特性を判定する方法として動作点上の $H_d \times B_d$ の積の最大値を用います。 $H_d \times B_d$ は磁石が外部の空間に出すことのできる磁石単位体積あたりのエネルギーに比例した量であるために、その最大値を最大エネルギー積と呼んでいます。最大エネルギー積の単位は、SI単位系で J/m^3 、CGS単位系でGOeです。

永久磁石の最適設計は、動作点がこの最大エネルギー積の点に来るようにした場合であるといわれます。その理由は必要エネルギーを取り出すのに永久磁石の体積を最少にすることができるからです。

マイナーループ

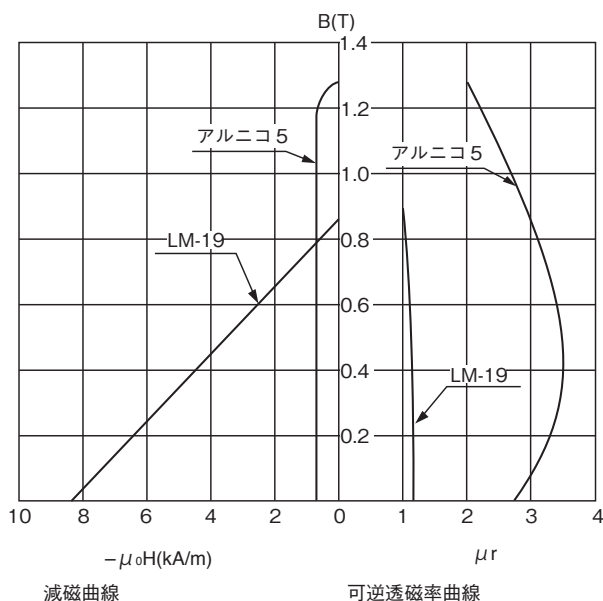
動作点は永久磁石の使用状況によって移動することを述べましたが、この移動は一般に減磁曲線上をそのまま移動するものではなく、第14図に示すように初めの動作点の位置を基点として作る小さなヒステリシス曲線を動かします。この減磁曲線上から始まる小さなヒステリシス曲線をマイナーループと呼びます。永久磁石の動作点はこのマイナーループ上の点に来るのが普通です。しかし、スピーカ用磁石のように動作点が移動しない場合には、当然、動作点は減磁曲線上にあります。



第14図 マイナーループとループ上の動作点

可逆透磁率

マイナーループはそのループの描く面積が小さく、一般にはループの往復を一本の線で代表させることができます。この直線の傾き B/H を可逆透磁率と呼び μr で表します。可逆透磁率は減磁曲線上の出発位置によっても異なります。ランタネットとアルニコ磁石の可逆透磁率を同一スケールで比較したのが第15図です。普通可逆透磁率を1つの数字で代表させる時は、最大エネルギー積を示す動作点での値を用います。減磁曲線が 45° に近い磁石材料はこの可逆透磁率が1に近いことと、保磁力が大きいために、強い逆磁界が一時的に加わっても、ほぼ始めの動作点に戻ります。したがって磁界を発生させたり、吸着力を利用するばかりでなく、反発力を利用する場合に有利です。



第15図

磁気特性の熱的变化

不可逆温度変化

永久磁石を高温にさらし再び常温に戻すと材質に変化がなくても永久磁石の作る磁束密度は減少します。このような磁束密度の変化率は、高温にさらす時間とともに次第に減少し比較的短時間で飽和に達し、変化は止まります。この時の始めの磁束密度に対する変化率を不可逆温度変化率と呼びます。この不可逆温度変化は程度の差はありますが、あらゆる永久磁石に認められ、その変化の大きさは保持温度と磁石の動作点の位置により大巾に異なります。バリウムフェライトは低温にさらすと減磁するという現象がありますが、ランタネットの場合には、そのようなことはありません。

熱からしと交流減磁

永久磁石には不可逆温度変化があるために、永久磁石の使用中に一度高温にさらされると磁気特性が低下します。このような弊害を取り除くために、永久磁石の設計には、少なくとも最高使用温度の不可逆温度変化率分だけ磁束密度にゆとりをもたせておき、実際の使用に当たっては、磁石の着磁後その最高使用温度に数時間さらすことがあります。この熱的な磁気安定化法を熱からしといいます。アルニコ磁石では、交流減磁といって交流磁界をかけることによって、安定化処理を行う場合があります。

可逆温度変化（温度係数）

今まで述べて来たことはすべて常温における磁気特性についてですが、磁石を低温または高温にさらした場合、その温度での磁気特性がどうであるかということは、実際の使用に関して極めて大切なことです。この磁気特性の温度変化を知るには各温度での減磁曲線が必要となります。これを簡略化して動作点 B_d の 1°C 当りの変化を可逆温度変化率（温度係数）といいます。この可逆温度変化は各温度での不可逆温度変化が完了してから測定いたします。

また一般の磁石では磁石の動作点の位置によって可逆温度変化率が変化しますが、一つの数字で代表される時は、やはり可逆透磁率と同じように最大エネルギー積の点での B_d の変化をいいます。

永久磁石の設計法

電子計算機を使わなくても永久磁石の設計をかなりの精度で行うことができます。その基本となる考え方を示せば次のようになります。

永久磁石設計法の基本(その1 フラックス法)

永久磁石を用いてある場所に磁界を作る場合、一般に永久磁石を継鉄(ヨーク)と組み合わせて起磁力の損失を防ぎます。このようないわゆる磁気回路を設計する場合の問題点の一つは永久磁石の必要最少寸法をどのように決定するかということです。この問題は次の2つの式によって解くことができます。

a) 永久磁石の起磁力は、空隙中の起磁力損失に等しい。

$$Hd \cdot Lm = Hg \cdot Lg \quad \dots\dots (1)$$

b) 永久磁石中央を通る全磁束は空隙を通る全磁束に等しい。

$$Bd \cdot Am = Bg \cdot Ag \quad \dots\dots (2)$$

C.G.S単位を用いれば、 $Hg = Bg$ だから(1)×(2)から

$$Hd \cdot Bd = \frac{Bg^2 \cdot Lg \cdot Ag}{Lm \cdot Am}$$

ただし Am : 磁石の断面積

Lm : 磁石の長さ

Bd : ある動作点での磁束密度

Hd : ある動作点での磁界の強さ

Ag : 空隙部の断面積

Lg : 空隙部の長さ

Bg : 空隙部の磁束密度

Hg : 空隙部の磁界の強さ

したがって、永久磁石の体積 $Lm \cdot Am$ を最小にするには、永久磁石の減磁曲線上の $Bd \cdot Hd$ が最大になるような動作状態、すなわち、最大エネルギー積上の点を選び、その Hd 、 Bd を選んだ場合、必要な空間(体積 = $Ag \cdot Lg$) に必要な磁界 Bg が出るかどうかを調べて行くという手順になります。しかし実際には起磁力の損失、磁束の漏洩が大きく、(1)、(2)の式を大巾に修正しなければなりません。この修正の方法は起磁力の損失係数(リラクタンス係数)、漏洩係数(リーケージ係数)として知られております。

これらの値を

f : 漏洩係数(リーケージ係数)

r : 起磁力損失係数(リラクタンス係数)

とすると、次の2式が成立します。

$$F = Hd \cdot Lm = r \cdot Bg \cdot Lg \quad (\text{起磁力}) \quad \dots\dots (1)'$$

$$\phi = Bd \cdot Am = f \cdot Bg \cdot Ag \quad (\text{磁束}) \quad \dots\dots (2)'$$

リラクタンス係数 r は、永久磁石で生じた起磁力が、継鉄および継鉄と磁石の接合部で消費されるための補正係数です。無理な設計でない場合には、その値は1.1~1.5で、普通1.3にすれば大きな間違いはありません。

漏洩係数 f は、永久磁石から発生した磁束が空隙部の周囲や継鉄などから漏れるための補正係数で、磁気回路の状態によって大きな違いを生じます。

例1 Bg を求める

今、すでに磁気回路の形と寸法が決まっており、かつ f がわかっているとした場合(1)'、(2)'から

$$\rho = \frac{Bd}{Hd} = \frac{Lm \cdot Ag \cdot f}{Am \cdot Lg \cdot r}$$

となります。 Lm 、 Lg が決まっているのでパーミアンス係数が決まります。一方減磁曲線から Bd 、 Hd が求められます。

$$(2)' \text{ から } Bg = \frac{Bd \cdot Am}{f \cdot Ag}$$

したがって、 Bg を求めることができます。この計算で Bg を求めるためには、近似の磁気回路で f が想定出来る場合に限られます。

漏洩係数とパーミアンス

漏洩係数 f の求め方は、磁束の流れを近似的に想定し第7表で関係づけられた等価回路として計算することにより近似的に求めることができます。

電気回路と磁気回路との関係

第7表

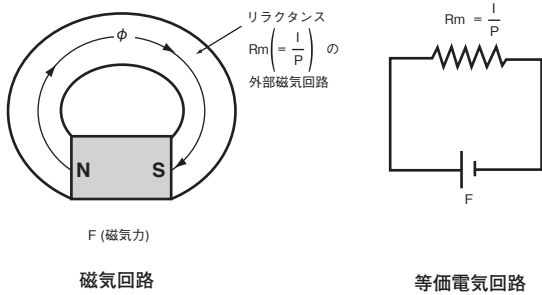
起 磁 力 F	起 電 力 V
磁 束 ϕ	電 流 I
リ ラ ク タ ン ス Rm	抵 抗 R
$Rm = \frac{1}{\mu S}$	$R = \frac{1}{\sigma S}$
透 磁 率 μ	導 電 率 σ
パ ー ミ ア ン ス P	コ ン ダ ク タ ン ス G
$P = \frac{1}{Rm}$	$G = \frac{1}{R}$
$F = NI = Rm \mu \phi$	$V = R \cdot I$

第16図の回路において、磁石外部のパーミアンス P は、 $P = \phi / F$ で定義されます。

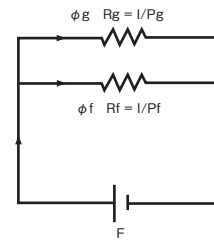
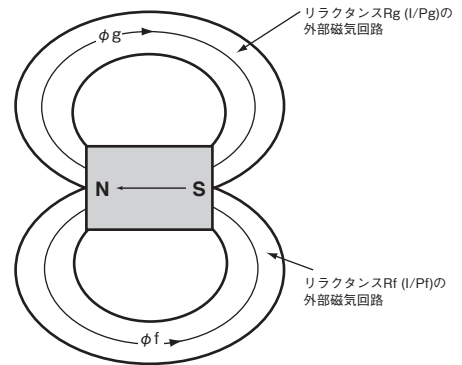
一方 $F = Hd \cdot Lm$ 、 $\phi = Bd \cdot Am$
の関係式から

$$p = \frac{Bd}{Hd} = P \cdot \frac{Lm}{Am} \dots\dots\dots 3)$$

したがってパーミアンス係数 p は、磁石の長さ Lm と断面積 Sm が単位の大きさのときのパーミアンス P であり、ユニットパーミアンスともいわれます。



第16図 磁気回路と等価電気回路



第17図 外部磁界が2系統ある磁気回路

次に外部磁気回路が2系統にわかれている場合には第17図から

$$F = \phi g / Pg = \phi f / Pf$$

$$\phi = \phi g + \phi f$$

$$= F(Pg + Pf)$$

が成立します。全体のパーミアンスを P_T とすれば、

$$P_T = Pg + Pf$$

と書くことができます。 Pg をギャップ部分のパーミアンス、 Pf を漏洩部分のパーミアンスとすると、

漏洩係数 f は

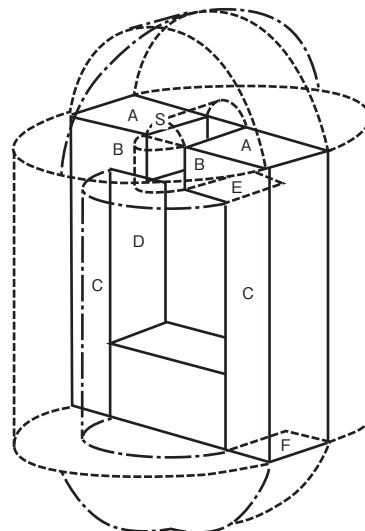
$$f = \frac{\text{全磁束}(\phi)}{\text{ギャップ部の全磁束}(\phi g)} = \frac{Pg + Pf}{Pg} = \frac{P_T}{Pg}$$

と定義されます。また永久磁石のパーミアンス係数は(3)式から、

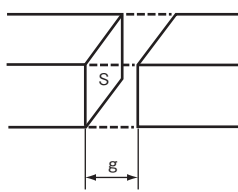
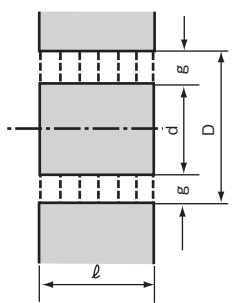
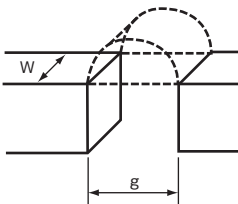
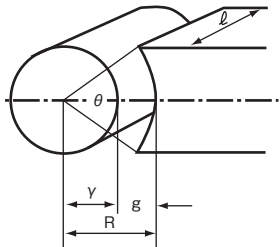
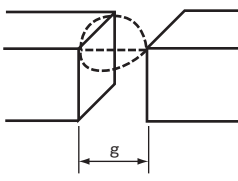
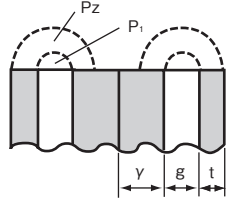
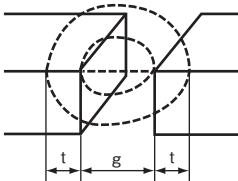
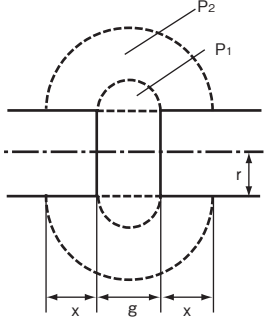
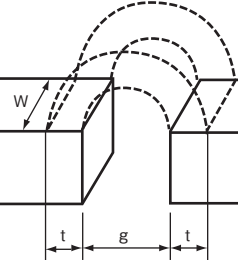
$$p = P_T \cdot \frac{Lm}{Am \cdot r}$$

となります。

磁気回路の漏洩状態の一例を第18図に示します。



第18図 漏洩磁束の一例

場所	計算式	場所	計算式
平行、平坦 二面間のパーミアンス 	S ; 磁極面積 g ; 空隙距離 $P = \frac{S}{g}$	同心円筒 2 曲面間のパーミアンス 	$P = 2\pi l / \ln \frac{D}{d}$ (gがdに比べて十分小さく g/d<0.01の場合は $P = \pi d l / g$)
直線上稜線からの半円柱状パーミアンス 	W ; ヨーク又は磁石巾 $P = 0.264W$	円弧状極面間のパーミアンス 	$P = \theta l / \ln \frac{R}{\gamma}$ (gがgammaに比べて十分小さい 場合 $P = \theta l / g$)
角部からの球の四分の一に当るパーミアンス 	g ; 空隙距離 $P = 0.077g$	円筒状空隙端部の平面間のパーミアンス 	$P = P_1 + P_2$ (y > t) $= \left(\gamma + \frac{g}{2}\right) \{1.66 + 2\ln(1 + 2t/g)\}$ (y < t) $= \left(\gamma + \frac{g}{2}\right) \{1.66 + 2\ln(1 + 2\gamma/g)\}$
側部直線上稜線からの球殻の四分の一に当るパーミアンス 	t ; 考慮に入れた巾 g ; 空隙距離 $P = \frac{t}{4}$	円柱側面間のパーミアンス 	$P = P_1 + P_2$ $= 1.65(\gamma + 0.212g)$ $+ \{2r + \sqrt{g(g+2x)}\} \ln(1 + 2x/g)$
側部平面からの半円筒上パーミアンス 	W ; ヨーク又は磁石巾 t ; 考慮に入れた巾 g ; 空隙距離 ① $g \geq 3t$ のとき, $P = 0.637 \frac{W}{1 + g/t}$ ② $g < 3t$ のとき, $P = \frac{W}{\pi} \ln \frac{g+2t}{g}$		

第19図 各種空隙部のパーミアンス

例2 漏洩係数を求める

パーミアンスが並列で数多くある場合についての設計方法は、

- イ) 空隙部近傍の磁界の流れを第19図に近似出来る様想定する。(ギャップも含める)
- ロ) 第19図の式によって各部のパーミアンス Pg, Pfi, \dots, Pfm を求める
- ハ) $P_T = Pg + Pfi + \dots + Pfm$ を求める。
- ニ) $f = P_T / Pg$ を求める。
- ホ) $\rho = P_T \times (Lm / Am)$ が減磁特性上最良となるように Am を求める。この際 $Lm = (rBg \cdot Lg) / Hd$ である。
- ヘ) 決まった寸法でもう一度 f を求め確かめる。

永久磁石設計法の基本(その2 チャージ法)

この方法は永久磁石が一様に磁化されていて、その磁化の強さが I ならばこの磁化の向きに垂直に切った断面での単位面積当たりの磁極密度はやはり I となることを用いるものです。

一点に磁極 I があって、そこから ℓ だけ離れた点における磁極 I が作る磁界はクーロンの法則から

$$H = \frac{I}{\ell^2}$$

となります。

従って半径 r_0 の円板に面密度 ℓ の分布があるとき、その中心軸上 ℓ だけ離れた点での磁界は

$$H = 2\pi I \left(1 - \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + r_0^2}} \right) \text{ (Oe)} \dots\dots\dots(4)$$

となります。

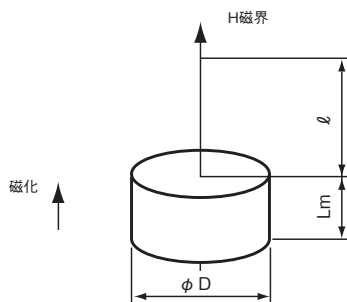
この方法は磁極が一様に分布されていることが条件となりますから、減磁曲線がほぼ 45° の領域内に動作点がある場合にのみ有効です。即ち減磁曲線上の折れ曲り点以上であればすべてのフェライト磁石、希土類磁石に有効である。

例1 円柱上磁石の中心軸上磁界

この場合は第20図に示される寸法と、(4)式において $2\pi I = \frac{Br}{2}$ と $\gamma_0 = \frac{D}{2}$ を代入かつ表面の円と裏面の円の磁極が作る磁界の和となりますから、

$$H = \frac{Br}{2} \left(\frac{(\ell + Lm)}{\sqrt{(\ell + Lm)^2 + \frac{D^2}{4}}} - \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + \frac{D^2}{4}}} \right) \dots\dots\dots(5)$$

となります。



第20図 円柱状磁石

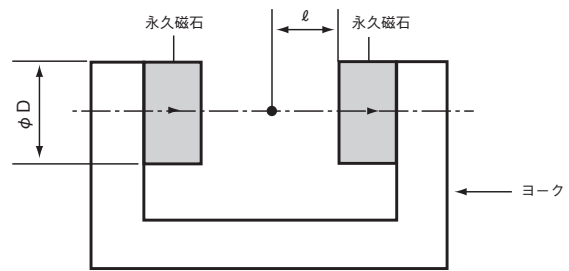
例2 円柱状磁石を対向させた場合

第20図の磁石を向かい合わせた場合その中心点の磁界は(5)式の2倍となります。

例3 円柱状磁石を対向させ、裏面をヨークでつないだ場合

この場合は第21図の裏面の磁極はヨークによって消えていますから(4)式の2倍をそのまま使えます。

$$H = Br \left(1 - \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + \frac{D^2}{4}}} \right)$$



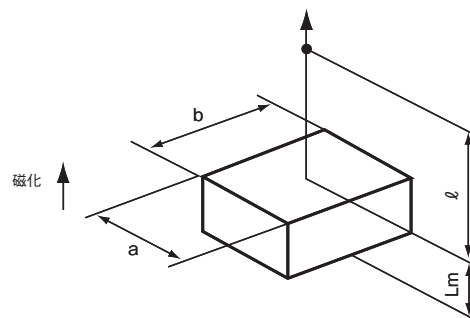
第21図 ヨークを組んだ場合

磁石の寸法比 (D/L) が小さくなると誤差が大きくなります。

例4 角柱状磁石の場合

同じ考え方に立って第22図の寸法を適用すれば、(角度はラジアン)

$$H = \frac{Br}{\pi} \left[\tan^{-1} \frac{ab}{2\ell\sqrt{4\ell^2 + a^2 + b^2}} - \tan^{-1} \frac{ab}{2(\ell + Lm)\sqrt{4(\ell + Lm)^2 + a^2 + b^2}} \right] \dots\dots\dots(6)$$



第22図 角柱状磁石

これらの方法を応用して穴あき磁石の内外の磁界を求めることができます。

いずれも実測値との誤差が生じますが、その理由は磁極が一様に分布していないためと、ここで考慮した面以外の面にも磁極が存在しているために生じるものと考えられます。

単体磁石のパーミアンス係数の求め方

単体磁石のパーミアンス係数はすべて(5)式と(6)式から求めることができます。まずこれらの式に $l = -\frac{Lm}{2}$ を代入し、Hを求めます。これが磁石内部の反磁界Hdとなります。次に減磁曲線が45°の勾配を持つならば $Bd = Br - Hd$ の関係がありますから

パーミアンス係数 $\rho = \frac{Bd}{Hd} = \frac{Br - Hd}{Hd}$ として求められます。

より精度を高めるために実験的に補正係数を追加して、次の様な式になります。

円柱状磁石のパーミアンス係数

$$\rho = 1.3 \frac{Lm}{D} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{Lm}{D}\right)^2} + \frac{Lm}{D} \right)$$

角柱状磁石のパーミアンス係数（角度はラジアン）

$$\rho = 1.2 \left[\frac{\pi}{2} \left\{ \tan^{-1} \frac{ab}{Lm \sqrt{a^2 + b^2 + Lm^2}} \right\}^{-1} - 1 \right]$$

（寸法記号はいずれも第20図、及び第22図を参照）

なお、これらの計算はいずれもチャージ法を用いています。従ってパーミアンス係数が減磁曲線のクニック点（折れ曲り点）以下の場合には、その点からマイナーループを作った場合の見掛けのBrを使用する必要があります。

磁気に関する単位について

磁気に関するSI単位（国際単位）とCGS単位の相互の換算については次の基本式があります。

$$\begin{array}{l}
 \text{SI単位} \\
 \nearrow \\
 B = \mu_0 (H+M) \\
 \searrow \\
 \text{CGS単位}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \mu_0 = \mu_0 \\
 \\
 B = \mu_0 H + \mu_0 M \\
 = \mu_0 H + J \\
 \\
 \mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \text{ (H/m)} \\
 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \\
 \\
 \mu_0 = 1 \\
 B = H + M \\
 = H + 4\pi J
 \end{array}$$

具体的には次頁を御覧下さい。

SI単位とCGS単位の換算

量	量記号	単 位				SI単位系からCGS単位系へ	CGS単位系からSI単位系へ
		SI単位系の場合		CGS単位系の場合			
		名称(関係式)	記号	名称(関係式)	記号		
磁束	Φ	ウェーバ ($\Phi=BA$)	Wb	マクスウェル ($\Phi=BA$)	Maxwell	1Wb=10 ⁸ Maxwell	1 Maxwell=10 ⁻⁸ Wb
磁束密度	B	テスラ	T	ガウス	G	1T=10 ⁴ G	1G=10 ⁻⁴ T
磁気誘導							
磁気定数(真空透磁率)	μ_0	ヘンリー毎メートル	H/m	無名数 ($\mu_0=1$)	-	-	-
磁界の強さ	H	アンペア毎メートル	A/m	エルステッド	Oe	1A/m= $\frac{4\pi}{10^3}$ Oe=1.25664×10 ⁻³ Oe	1Oe= $\frac{10^3}{4\pi}$ A/m=79.5775A/m
磁界の強さに対応する空間の磁束密度		テスラ ($\mu_0 H$)	T	エルステッド	Oe	1T=10 ⁴ Oe	1Oe=10 ⁻⁴ T
磁化※	M	アンペア毎メートル ($M=\frac{J}{\mu_0}$)	A/m	ガウス ($M=4\pi J$)	G	1A/m=10 ³ G	1G=10 ⁻³ A/m
磁気分極	J	テスラ ($J=\mu_0 M$)	T	ガウス ($J=\frac{M}{4\pi}$)	G	1T= $\frac{10^4}{4\pi}$ G	1G=4 π ×10 ⁻⁴ T
透磁率(絶対透磁率)	μ	ヘンリー毎メートル	H/m	無名数	-	1H/m= $\frac{10^7}{4\pi}$ =7.95775×10 ⁵	1= $\frac{4\pi}{10^7}$ H/m=1.25664×10 ⁻⁶ H/m
比透磁率(パーミアンス係数)	μ_r	無名数 ($\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0}$)	-	無名数 ($\mu_r=\mu$)	-	SI単位系とCGS単位系は同一	
起磁力	F_m	アンペア ※※ ($F_m=HL$) ($U_m=H\Delta L$)	A	ギルバート ($F_m=HL$) ($U_m=H\Delta L$)	Gilbert	1A= $\frac{4\pi}{10}$ Gilbert	1 Gilbert= $\frac{10}{4\pi}$ A
磁位差	U_m					=1.25664 Gilbert	=0.795775 A
パーミアンス	Λ	ヘンリー ($\Lambda=\frac{\Phi}{F_m}$)	H	マクスウェル毎ギルバート ($\Lambda=\frac{\Phi}{F_m}$)	$\frac{\text{Maxwell}}{\text{Gilbert}}$	1H= $\frac{10^9}{4\pi}$ $\frac{\text{Maxwell}}{\text{Gilbert}}$ =7.95775×10 ⁻³ $\frac{\text{Gilbert}}{\text{Maxwell}}$	$\frac{1 \text{ Gilbert}}{\text{Maxwell}} = \frac{4\pi}{10^9} \text{ H}$ =1.25664×10 ⁻⁸ H
磁気抵抗	R_m	毎ヘンリー ($R_m=\frac{F_m}{\Phi}$)	H ⁻¹	ギルバート毎マクスウェル ($R_m=\frac{F_m}{\Phi}$)	$\frac{\text{Gilbert}}{\text{Maxwell}}$	1H ⁻¹ = $\frac{4\pi}{10^9}$ $\frac{\text{Gilbert}}{\text{Maxwell}}$ =1.25664×10 ⁻⁸ $\frac{\text{Gilbert}}{\text{Maxwell}}$	$\frac{1 \text{ Gilbert}}{\text{Maxwell}} = \frac{10^9}{4\pi} \text{ H}^{-1}$ =7.95775×10 ⁷ H ⁻¹
磁気エネルギー積		ジュール毎立方メートル (BH)	J/m ³	ガウスエルステッドまたは エルグ毎立方センチメートル (BH)	G Oe erg/cm ³	1J/m ³ =4 π ×10GOe =1.25664×10 ² GOe =1.25664×10 ² erg/cm ³	1GOe= $\frac{1}{4\pi}$ ×10 ⁻¹ J/m ³ =7.95775×10 ⁻³ J/m ³ =1erg/cm ³
磁気エネルギー	E	ジュール ($\frac{BH \cdot AL}{2}$)	J	エルグ ($\frac{BH \cdot AL}{8\pi}$)	erg	1J=10 ⁷ erg	1erg=10 ⁻⁷ J
磁気吸引力	F	ニュートン ($\frac{B^2 A}{2\mu_0}$)	N	ダイン ($\frac{B^2 A}{8\pi}$)	dyn	1N=10 ⁵ dyn (1N=0.101972kgf)	1dyn=10 ⁻⁵ N (1kgf=9.80665N)

備考 1. Aは断面積 (m², cm²)

2. Lは磁路長 (m, cm)

3. ΔLは部分磁路長 (m, cm)

4. 「毎」は「パー」と呼んでも良い。

※ 「磁化」は磁化過程で磁化すること (to magnetize) の意味で用いられるので、これとの混乱を避けるために「磁化の強さ」と呼んでもよい。

※※ 慣習的には電流とコイルの巻数に基づくアンペア回数 (アンペーターン) が用いられてきたが、一般的には電流密度の面積積分の意味であるため、SI単位では回数をとり単にアンペアとしている。

輸出管理

本製品が外国為替及び外国貿易法の規定により、規制貨物など（または役務）に該当する場合には、日本国外に輸出する際に、同法に基づき日本国政府の輸出許可が必要です。

本製品は輸出令別表第1の16項の対象貨物です。従い当該貨物を輸出令別表第3に掲げる国以外へ輸出する場合には、客観条件における最終需要者の用途、取引の態様、条件等からみて、大量破壊兵器等への開発などに用いられないことが明らかな場合を除き、経済産業大臣の輸出許可が必要です。

ご使用に際して

- (1) 電子部品の故障発生とご使用時の装置、システムの製品安全設計のお願い
一般的に電子部品はある確率で故障が発生します。当社としても電子コンポーネント製品の品質、信頼性の向上に努めていますが、その確率をゼロにすることは不可能です。従いまして、当社の電子コンポーネント製品のご使用に当たっては、その製品の故障の発生を考慮して、人身事故、火災事故、社会的な損害等に対する冗長設計、延焼対策設計、誤作動防止設計等の安全設計をお願いいたします。
- (2) 各種部品の品質水準と適用可能な装置について
特に、記述のないものは、標準水準です。
当社は、当社の電子コンポーネント製品に関し、品質水準の低いものから順に「標準水準」、「特別水準」およびお客様に個別に品質保証プログラムをご指定して頂く「特定水準」に分類しています。
各品質水準は以下に示す用途に製品が使われることを意図しています。
つきましては、「標準水準」に示す用途以外でご使用をお考えの場合は、必ず事前に当社販売窓口までご相談いただきますようお願いいたします。
標準水準：コンピュータ、OA 機器、通信機器、計測機器、AV 機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット
特別水準：輸送機器（自動車、列車、船舶等）、交通用信号機器、防災／防犯装置、各種安全装置、生命維持を直接の目的としない医療機器
特定水準：航空機器、航空宇宙機器、海底中継機器、原子力制御システム、生命維持のための医療機器、装置またはシステム等
なお、当社の電子コンポーネント製品のカタログ、データシート、データブック等の資料で、特に品質水準の表示がない場合は、当該製品は標準水準であることを表します。
- (3) 本資料は事前予告なく改訂します。
本資料に記載されている内容は2024年1月現在の資料に基づいたもので、今後、予告なく変更する場合があります。量産設計の場合は、念のため、当社販売部門にお問い合わせ下さい。
- (4) 文書による当社の許諾なしに本資料の転載複製を禁じます。
- (5) 工業所有権問題について
この製品を使用したことにより、第三者の工業所有権等にかかわる問題が発生した場合、当社製品の構造製法にかかわるもの以外につきましては、当社はその責を負いませんのでご了承ください。

販売拠点

セールス&マーケティング本部

東京営業グループ

〒101-8362 東京都千代田区西神田 3 丁目 8 番 1 号(千代田ファーストビル東館)
TEL.(03)3515-9192 FAX.(03)3515-9188

名古屋営業グループ

〒460-0003 名古屋市中区錦 2 丁目 15 番 15 号(豊島ビル)
TEL.(052)211-0131 FAX.(052)211-0134

大阪営業グループ

〒532-0003 大阪市淀川区宮原 4 丁目 1 番 14 号(住友生命新大阪北ビル)
TEL.(06)6398-5321 FAX.(06)6398-5331

ディストリビューションセールスグループ

〒101-8362 東京都千代田区西神田 3 丁目 8 番 1 号(千代田ファーストビル東館)
TEL.(03)3515-9180 FAX.(03)3515-9181

TOKIN Korea Co., Ltd.

N tower garden building 8F, 26, Hwangsaetul-ro 200beon-gil, Bundang-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea, 13595
Phone: +82-31-712-4797 Fax: +82-31-712-5866

技術お問合せ先

(キャパシタ製品)

キャパシタ事業部販売推進部

〒101-8362 東京都千代田区西神田 3 丁目 8 番 1 号(千代田ファーストビル東館)
TEL.(03)3515-9264 FAX.(03)3515-9261

(EMC/ノイズ対策製品、材料・マグネット、圧電製品、センサ・モジュール製品)

マグネティック・センサ&アクチュエータ事業本部販売推進部

〒101-8362 東京都千代田区西神田 3 丁目 8 番 1 号(千代田ファーストビル東館)
TEL.(03)3515-9260 FAX.(03)3515-9261

www.tokin.com