

4. 電気と磁石の絡み合い

電荷を持つ粒子が移動すれば電流が流れる

一般に、電荷を持つ 2 個の粒子の間に働く静電的な力はクーロン力と呼ばれ、それぞれの電荷の大きさに比例し距離に反比例する式 2 - 1 に示す Coulomb の関係式で表されます。この式は同じ符号の電荷であれば反発力に、異なる符号の電荷であれば引力として働くことを意味しています。また、これらの粒子がクーロン力を振り切って無限の彼方へ引き離されるときに要するエネルギーはクーロンエネルギーと呼ばれ式 2 - 2 で表されます。物質は多くの原子で構成されていますが、その原子は中性子のほかに正電荷を持つ陽子と負電荷を持つ電子からなり、クーロン力で互いに結ばれています。さらに、原子同士を結び付けている共有結合も配位結合もイオン結合も金属結合も電子と陽子の間に働いているクーロン力で主に結び付けられています。

原子が集合して物質はできていますが、その中には同じ数の陽子と電子を含んでいますから、互いにその電荷を打ち消し物質全体には通常電荷が残りません。原子は陽子を含む原子核が中心に座し、周囲を電子が覆っており、特に最外殻電子は小さなクーロンエネルギーで容易に離れてゆきます。2 種の物質を擦るときに表面の分子や原子や原子団が一部剥離しますが、原子から電子が離れ易いために、物質の表面に陽子の数よりも多くの電子が残ったままで表面の分子が剥離してゆけば、物質全体として電子が多くなり負電荷を帯電します。逆に、剥離する部分に多くの電子が乗って、物質全体は正電荷を帯電する場合もあります。帯電の正負の極性は接触する物質の組み合わせにより決まる相対的な性質で、相手となる物質により電子を出す側が正に、電子を受け取る側が負に帯電します。冬になって空気が乾燥する季節になると、衣服が擦れ合って静電気が発生し、繊維間の静電引力(クーロン力)により互いに引き付けあいますから、強く繊維同士が擦れ合いますます高く帯電します。そのために、シャツやスカートが身体に纏わり付いてしまいます。また、擦ると琥珀は強く帯電して強いクーロン力を発生するために、このクーロン力の意味を持つ electricity という言葉はギリシャ語の琥珀に由来すると聞いています。

このように電荷を持った物質は周囲の電荷を持つ物質との間にクーロン力が働き、その大きさは電荷の大きさに比例します。また、その力に逆らうために要するクーロンエネルギーを電位と呼んでいますから、電位の大きさも電荷の大きさに比例します。帯電した物質は電子を放出して電位差のない安定な状態になろうとしますが、そのときに放出された電子は電子が不足して正電荷を帯電した物質に移動します。2 つの物質の間に大きな電位差がある場合には、電子が移動するように大きなクーロン力が働き、エネルギー的に安定化しようとします。

このように電子などの電荷を持った粒子が移動することを電気が流れるあるいは電流が流れると定義しています。電荷を持った粒子を出し易い物から粒子を受け取り易い物の方向に電荷を持った粒子は移動しますから、電流の流れには方向性があり、正電荷を持つ

粒子と負電荷を持つ粒子があります。衣服の擦れ合いで発生した静電気は非常に大きな電位差を生じますから、火花となって電子が空中を移動し電流が流れてエネルギー的に安定化しますが、そのときの放電により不愉快な思いをすることがあります。

物質の成分比を調べるときにガスクロマトグラフィーが広く用いられていますが、医薬品や環境汚染物質を研究する分野では高い精度と感度が要求され、特に炭素を含む有機化合物の成分比を調べるのが最も重要になってきます。炭化水素などの炭素を含む化合物を酸素の中で水素を燃やす高温の酸水素炎の中に入れますと、わずかながら電子とともに炭素上に正電荷を持つようイオンに熱分解します。ここで生成する電子やイオンは炎の中を移動しますから、酸水素炎のバーナーと炎の中に置いた電極の間に高い電位をかけておけば電荷を持った粒子が電極に移動して電流が流れます。流れる電流の量と燃やした炭素の量の間には $1 \sim 10^7$ の大きな範囲で比例関係がありますから、 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{g}$ の少量の炭素化合物まで検出できます。この高い精度と感度を持つ検出器は水素炎イオン化検出器(FID)と呼ばれ、炭素を含む物質の成分比を調べるガスクロマトグラフィーの検知器として広く用いられています。幸いGLサイエンス社製のFIDの構造図が手元にありましたので図4-1に掲げておきます。

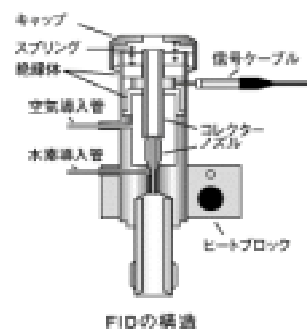


図4-1 FIDの構造図

水溶液中などで正電荷を持つ陽イオンが移動して電流の流れる場合もありますが、原子は陽子を含む原子核が中心に座し、クーロン力の小さい最外殻電子が離れ易いために、多くの場合は負電荷を持つ電子の移動することが多いと考えられます。正電荷の流れるときにその方向に+から-に電流が流れると定義しましたから、負電荷を持つ電子の流れるばあいにはその方向とは反対の方向に電流が流れることになります。電流の概念と実際の電子の挙動が逆になりややこしい限りです。

左手で分かる原子量や分子量

電流の単位として名前の残っている Ampère は図4-2に示すように水平な何れの方法にでも自由に回転できる輪になった電線のコイルに電流を流す実験をしたところ、赤色の矢印のように南北の方向にコイルの輪の面が必ず向きました。この実験は電流を流すとその直角の方向に磁性が発生し、地磁気との間に相互に磁力が働いてコイルが南北

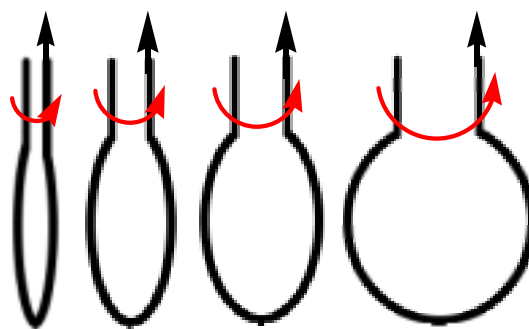


図4-2 Ampereの実験の模型

方向に向くと説明されました。電流には方向性がありますから、コイルに発生する磁石にも NS の方向性が生じます。地磁気の方法は常に一定していますから、逆方向に電流の流

れを替えますと当然コイルも逆方向に向きます。電流が流れますとコイルに磁性が生じますから、地磁気と同じように外部磁場の中では、互いに 2 つの磁石の間に相互作用が起こり磁力が発生します。ここで外部磁場にもコイルに流れる電流にも方向性がありますから、Fleming は磁力の方向を解り易くするために磁場と電流の方向の関係を図 4 - 3 に示すような「左手の法則」に要約しました。このように電流によ



図4-3 左手の法則

り発生する磁場の強さ B は電流量 I に比例し、電流の流れる電線からの距離 r に反比例する式 4 - 1 で表すことができます。ただし μ_0 は真空中の誘磁率 ($1.257 \times 10^{-2} \text{ Gm/A}$) を意味します。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \text{式 4 - 1}$$

外部磁場の中で電線に電流を流しますと、左手の法則により電線に力が働きますから、電流を断続させることによりこの力を往復運動に替えて鐘撞棒や振動盤やカミソリ刃を振動させて、電鈴やスピーカーや電話や髭剃りなど多くの電化製品を機能させています。また、流す電流の方向を刻々変化させることによりこの力を回転運動に替える電動モーターは、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する最も効率の良い装置として、多くの電化製品に利用され人間生活に欠かすことができません。

原子は中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の周囲に負電荷を持つ電子が陽子と同じ数だけ広く分布して原子核の正電荷を打ち消しています。電子が原子に対して相対的に非常に軽い質量

しか持っていないために、イオンは原子とほとんど変わらない質量を持っていますが、陽子の数と電子の数が異なっていますから電荷を帯びています。電場の中にイオンをおきますと、イオンにクーロン力が働きイオンは走り出し

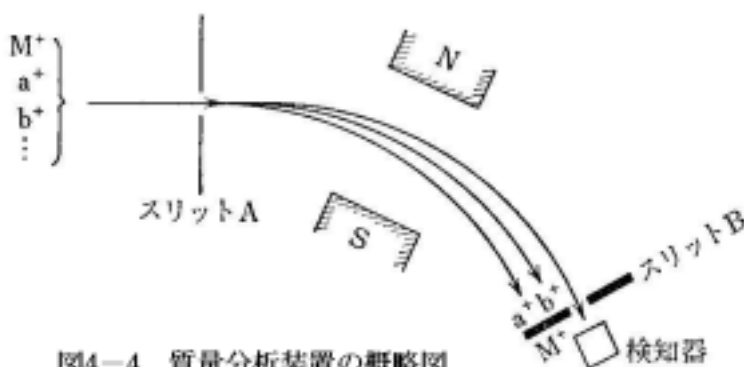


図4-4 質量分析装置の概略図

ます。図 4 - 4 に示すように、小さな穴の空いたスリット A に負の電位を与えておきますと、正電荷を持つ種々の陽イオンはスリット A を目掛けて突進しますが、わずかな数の陽イオンは速い速度で小さな穴を通り抜けます。このとき、スリット A に与える電圧により突進する陽イオンの速度は変化します。通り抜けた陽イオンの持つ運動量は陽イオンの質量とその速度の積で表すことができますから、質量に比例して陽イオンは直進しようとし、スリット A の先で陽イオンを磁場の中に導きますと、磁場の中では走る陽イオンは電流の流れとして左手の法則に従って力を受けます。陽イオンの持つ運動量と左手の法則に従う力との釣り合いにより、質量の軽い陽イオンは磁場の影響を大きく受けて大きく曲がりますが、重い陽イオンは運動量が大きいために直進しようとし、相対的に磁場の影響をあまり受けず小さく曲がります。

大気中では陽イオンが空気などに衝突して瞬時に運動量を失ってしまいますが、真空中では検知器まで陽イオンを無事に移動させることが出来ます。原子や分子のイオン化装置とイオンを加速させる電場と左手の法則に従う力を生み出す磁場とイオンを検出する検出器を真空中で図 4 - 4 のように接続した分析機器は質量分析装置と呼ばれ、 10^{-9} g 以下の極めて少量の試料で正確に原子量あるいは分子量を測定することが出来ます。近年になって、この質量分析装置はその感度も精度も取り扱い易さも非常に改良されました。原子はそれぞれ固有の原子量を持っていますが、正確にはその値は整数値ではありません。例えば自然界に多く存在する質量数 1 の水素、2 の水素、12 の炭素、13 の炭素、14 の窒素、16 の酸素で構成されるエチレン、シアン化水素、一酸化炭素、窒素ガスの分子量は、表 4 - 1 に示すようにいずれも約 28 ですが正確には異なる値を持っています。そのため、質量分析装置により精密に分子量を測定するだけで同位元素の存在を含めて分子式まで求められてしまいます。

表 4 - 1 微小分子量の違う一例

化合物名	分子式	分子量
エチレン	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	28.0313
^2H -シアン化水素	$^2\text{H-CN}$	28.0172
^{13}C -シアン化水素	$\text{H-}^{13}\text{CN}$	28.0142
窒素ガス	N_2	28.0061
一酸化炭素	CO	27.9949

このように左手の法則を応用した質量分析装置により物質の正確な原子量や分子量を測定することができ、物質の存在や性質を知る手段になります。とくに、クロマトグラフィーなどの分離方法と組み合わせることにより、大量の物質の中に含まれる極めて少量の成分まで検出しその存在を証明できますから、オリンピック選手に義務付けられているドーピング検査や商品に含まれる微量成分の解析などに用いられています。さらに、この質量分析装置を搭載した人工衛星を送り、金星や火星などの惑星の大気成分が分析されました。

電子が動き回って原子が磁石になる

原子は相対的に質量の重い中性子と陽子が原子核を構成して中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が広く分布しています。電子は負電荷を持って原子核の周囲を動き回っていますから、これらの電子により原子の中を電流が流れ、Ampèreの実験のように原子は磁性を持ちます。云い替えれば、電子は動く方向に対して直角に向いたそれぞれ小さな磁石の性質を持っています。地球が太陽系の中を自転と公転をして動いているように、これらの電子も自転に相当する軌道と公転に相当する軌道を動き回っています。自転に相当する軌道はその軸に対して2通りの方向しかありませんが、西から東に自転している地球が地磁気を持っているように、それぞれの軸方向に向いた磁石を持っています。これらの2通りの軌道がそれぞれ1個ずつの電子で充足されるときにエネルギー的な安定化が起こりますが、それらの電子は対になって互いの磁性を打ち消し合いますから磁性を示しません。しかし、電子が対になっていない軌道を持つ原子では原子全体として磁石の性質を示します。

自然界には90種類の元素が存在していますが、これらの元素の大部分はその自転に相当する電子の軌道が完全には充足されていませんから、電子の対になっていない軌道を持っていて磁性を示します。ヘリウムやネオンやアルゴンなどの希ガス元素以外の物質は単独の原子で存在することは無く、磁性を持つ原子が集合してイオン結合や共有結合や金属結合で結ばれています。炭素や窒素や酸素などの典型元素と呼ばれる比較的質量の小さな原子は対になっていない軌道の電子が他の原子の不对電子と互いに対になるように相互作用し、共有結合により分子を形成して、エネルギー的に安定化するとともに原子が持っている磁性を打ち消します。例えば、炭素原子も水素原子も本来小さな磁石の性質を持っていますが、メタン分子は炭素の最外殻にある4個の不对電子が4個の水素原子の不对電子と共有結合して対になるために、不对電子がなくなり磁性を示しません。このような分子では、構成する原子は小さな磁石の性質を持っていますが、共有結合により分子を形成したときに不对電子が対になり磁石の性質を失います。

表2-1の中で褐色に示した遷移金属元素や赤褐色に示したランタニド金属元素は結合に寄与している最外殻の電子のほかに、内殻にも対になっていない軌道の電子を持っています。このような内殻に不对電子を持つ元素ではイオン結合や共有結合や金属元素で結ばれていても、原子の磁性が残ります。表4-2には代表的な遷移金属元素の鉄、コバルト、ニッケル、銅における電子の充足の仕方を掲げておきますが、電子を26個持つ鉄の原子は内殻の軌道(3d)に4個の不对電子を持っているために強い磁性を示しています。コバルトとニッケルでは内殻の軌道がそれぞれ対になってゆくために不对電子の数が減少し磁性も次第に弱くなります。さらに、29個の電子を持つ銅では内殻の軌道の電子が全て対になりますが、最外殻に1個の不对電子が残りますから原子は磁性を示します。この最外殻の不对電子が1個失われた1価の銅イオン(第1銅イオン)は磁性を失いますが、2価の銅イオン(第2銅イオン)では最外殻の電子のほかに内殻の軌道の電子が1個失われますから磁性を示し

表 4 - 2 鉄、コバルト、ニッケル、銅の 3d および 4s 軌道の電子数

元素名、イオン名		総電子数	$3d_{x^2y^2}$	$3d_{z^2}$	$3d_{xy}$	$3d_{xz}$	$3d_{yz}$	4s
鉄原子	Fe	26	2	1	1	1	1	2
第 1 鉄イオン	Fe^{2+}	24	2	1	1	1	1	0
第 2 鉄イオン	Fe^{3+}	23	1	1	1	1	1	0
コバルト原子	Co	27	2	2	1	1	1	2
ニッケル原子	Ni	28	2	2	2	1	1	2
銅原子	Cu	29	2	2	2	2	2	1
第 1 銅イオン	Cu^+	28	2	2	2	2	2	0
第 2 銅イオン	Cu^{2+}	27	2	2	2	2	1	0

ます。

自由に動き回っている状態から固体物質に固化するときには、原子やイオンや分子は集合して規則正しく整列しますが、そのそれぞれの小さな磁石は無秩序にあらゆる方向に向いていますから、互いの磁場は打ち消されてしまい物質全体としては磁性を示しません。しかし、原子やイオンの持つ小さな磁場よりもはるかに大きな磁場の中で固体物質が生成する場合には、図 4 - 5 に示すようにすべての原子やイオンの小さな磁石は大きな磁場の方向に向けて整列します。固化した物質の中では原子やイオンは規則正しく整列していますが、それらの持つ個々の小さな磁石も一定の方向に向いているために、物質全体として磁性を示します。温度が低いために原子やイオンの運動エネルギーが分子間力よりもはるかに小さい固体の状態では、原子やイオンは整然と規則的に並んでほとんど動くことが出来ませんから、それらの小さな磁石は整列したままでその秩序を保ちます。火山が作り出す火成岩中には磁性を持つ磁鉄鉱と呼ばれる鉄の酸化物(Fe_3O_4)が多く含まれています。高温で液状になった溶岩が冷されて固化するとき、地磁気の影響を受けてその中に含まれている比較的大きな磁性を持つ鉄の酸化物が一定方向にその磁石を揃えるために磁性を持った磁鉄鉱が生成するものと思われます。このように磁場の中で原子やイオンが集合し整列するとき、それぞれの小さな磁石が同一の方向に整列し、物質全体としても磁性を示しますので、強磁性体と呼んでいます。

温度が少し高くなり原子やイオンの運動エネルギーが大きくなりますと、原子やイオンは整然

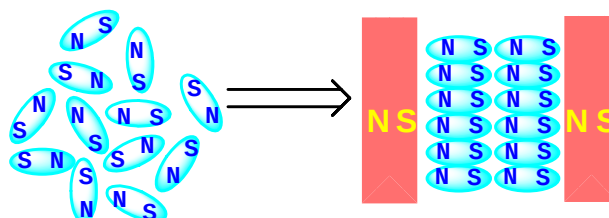


図4 - 5 常磁性体の磁場での挙動

としたその配列を保つことが困難になります。構成している原子やイオンの運動エネルギーが大きくなるために、ある温度以上になりますと小さな磁石の方向が無秩序に向いて整列しなくなり、強磁性体の磁性が失われます。この磁性を失う転移温度以上では原子やイオンの小さな磁石があらゆる方向に自由に向きを替えますから磁性を示しません。表 4 - 3 には種々の物質の転移温度(T_c)を掲げておきますが、このように小さな磁石が乱雑な方向に向くために磁性を持たない性質を常磁性と呼んでいます。逆に、転移温度以上で常磁性の状態にある強磁性体に強い磁場を加えれば構成している原子やイオンの小さな磁石の方向が強い磁場の方向に整い、物質全体として磁性を示すようになりますので、この現象を磁化と呼んでいます。このままで磁場の中で転移温度以下に冷却すれば、発生した強磁性体の磁性は外部磁場を取り除いても残存しますから永久磁石として利用されます。

表 4 - 3 強磁性物質の転移温度()

物質名	分子式	転移温度	物質名	分子式	転移温度
塩化コバルト	CoCl_2	-38	鉄金属	Fe	770
フッ化コバルト	CoF_2	50	臭化マンガン	$\text{MnBr}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3
酸化コバルト	CoO	330	塩化マンガン	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2
コバルト金属	Co	1131	フッ化マンガン	MnF_2	113
酸化クロム	Cr_2O_3	485	酸化マンガン	MnO	610
臭化銅	CuBr_2	246	硫化マンガン	MnS	982
塩化銅	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5	塩化ニッケル	NiCl_2	-68
塩化鉄	FeCl_2	-48	フッ化ニッケル	NiF_2	116
フッ化鉄	FeF_2	117	酸化ニッケル	NiO	2000
酸化鉄	FeO	507	ニッケル金属	Ni	358
磁鉄鉱	Fe_2O_3	2940	ガドリニウム金属	Gd	16

物質の磁化する強さ(M)は外部磁場の強さ(H)に比例しますから、その比例定数を磁化率 χ と呼び、式 4 - 2 のように表されます。温度が高いほど物質を構成している原子やイオンの運動エネルギーは大きくなりますから、その小さな磁石が外部磁場の影響で整列するとき、磁化率にはその絶対温度(T)および転移温度(T_c)との間に式 4 - 3 に示す関係が成り立ちます。

$$M = \chi H \quad \text{式 4 - 2}$$

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad \text{式 4 - 3}$$

電流を流すとその直角の方向に磁力が発生しますが、電流には方向性がありますから、磁力にも NS の方向性が生じます。原子核の周囲を電子が動き回る原子においてもこの現象により磁石の性質が現れます。遷移金属元素をはじめ多くの原子が持っている不対電子が自転に相当する軌道を動くとき小さな磁石の性質を持ちますが、外部の大きな磁場の影響でそれらの小さな磁石が整列するときには物質は磁化されます。さらにそのまま転移温度よりも低い温度に冷却すれば、永久磁石が出来上がります。

典型元素は不対電子を最外殻に持っているために、共有結合やイオン結合により不対電子が対になって磁性を失いますが、鉄やコバルトやニッケルなどの遷移金属元素は内殻に不対電子をもっていますから、結合しても磁性を失うことが無く強磁性体の性質を示します。しかし、酸化亜鉛(ZnO)などのように、小さな磁石を持つ原子が酸素などの典型元素を介して互いに結合するときには、それぞれの小さな磁石が打ち消すように互いに相互作用して原子が配列し結合しますから、分子は全体として磁性を示しません。

原子が共有結合で結ばれている分子は自転に相当する軌道を動く電子による原子の小さな磁石の性質を打ち消していますから磁性を示しませんが、各原子の周囲には負の電荷を持った電子が公転に相当する軌道を自由に運動しています。これらの電子の動きが一定方向に揃えば当然電流が流れ、磁石の性質を持つようになります。分子が外部からの大きな磁場の影響を受けるとき分子内の原子の配列には変化が起こりませんが、公転に相当する周囲の軌道を自由に運動している電子は外部磁場を打ち消すように軌道の変化をさせます。結果として、磁性を示さない分子が外部磁場の影響によりその磁場を弱めるような磁性を誘起します。外部磁場を取り除きますと、即座に電子は乱雑な方向に運動する元の状態に戻りますから、誘起した磁性も失われます。そのためこのような物質を反磁性体と呼んでいます。

物質を構成している原子の性質やそれらが結合して分子を形作るときの結合の仕方などにより、外部磁場により誘起される磁性にも強磁性と常磁性と反磁性の 3 種があり、磁化の強さが異なります。表 4 - 4 には主な物質の室温における磁化率を掲げておきますが、ここで反磁性体の磁化率は負の値で示されています。しかし、強磁性体は磁化しますと外部磁場に磁性体の磁場が蓄積されるように加わり磁化に影響を与える磁場がますます強くなりますから、磁化率を求めることができません。磁化されていない強磁性体を磁場の中に置きますと、誘磁率と呼ばれる磁化され易さに応じて、小さな原子の磁石が整列して行きどんどん磁化されてゆきますが、飽和磁足まで磁化されると乱雑な方向を向く小さな磁石がなくなるためにそれ以上には磁化されません。誘磁率は外部磁場の強さにより影響されますから、表 4 - 5 には鉄を含む代表的な強磁性体の初期誘磁率と最大誘磁率と飽和磁足と保磁力を掲げておきます。この表からも明らかなように若干の炭素原子を含む鋼では誘磁率があまり大きくありませんが、鉄の純度が向上すると小さな磁石の整列を邪魔する不純物の原子が少なくなるために誘磁率は飛躍的に向上します。保磁力の大小により軟磁性なものと硬磁性なものの 2 種類に大別されますが、この飽和状態に磁化された強磁性

表 4 - 4 室温における種々の物質の磁化率

物質	分子式	磁化率	物質	分子式	磁化率
アルミニウム	Al	0.620	水素	H ₂	-1.970
酸化アルミニウム	Al ₂ O ₃	-0.340	窒素	N ₂	-0.800
塩化アルミニウム	AlCl ₃	-0.600	酸素	O ₂	106.200
カルシウムイオン	Ca ²⁺	-8.000	硫黄	S ₈	-0.490
塩化カルシウム	CaCl ₂	-0.490	塩素	Cl ₂	-0.570
炭酸カルシウム	CaCO ₃	-0.382	塩素イオン	Cl ⁻	-26.000
塩化コバルト	CoCl ₂	90.500	水	H ₂ O	-0.720
酸化コバルト	CoO	74.500	炭酸イオン	CO ₃ ²⁻	34.000
銅	Cu	-0.850	無水珪酸	SiO ₂	-0.493
塩化銅	CuCl ₂	9.100	五酸化二磷	P ₂ O ₅	-0.460
酸化銅	CuO	3.800	硫酸	H ₂ SO ₄	-0.406
硫化銅	Cu ₂ S	-0.180	黒鉛	C	-6.000
ユーロピウム	Eu	200.000	クロロホルム	CHCl ₃	-0.515
塩化ユーロピウム	EuCl ₂	119.000	エタノール	C ₂ H ₅ OH	-0.718
酸化第 2 鉄	Fe ₂ O ₃	20.600	アセトアルデヒド	CH ₃ CHO	-0.515
塩化第 1 鉄	FeCl ₂	101.200	酢酸	CH ₃ COOH	-0.533
塩化第 2 鉄	FeCl ₃	86.200	酢酸エチル	CH ₃ COOC ₂ H ₅	-0.626
マグネシウム	Mg	0.250	アセトアミド	CH ₃ CONH ₂	-0.577
マンガン	Mn	9.600	グリセリン	HOCH(CH ₂ OH) ₂	-0.618
塩化マンガン	MnCl ₂	107.000	アセトン	(CH ₃) ₂ CO	-0.585
二酸化マンガン	MnO ₂	38.400	アラニン	H ₂ NCH(CH ₃)COOH	-0.567
ナトリウム	Na	0.680	エチルエーテル	(C ₂ H ₅) ₂ O	-0.766
ナトリウムイオン	Na ⁺	-5.000	コハク酸	(CH ₂ COOH) ₂	-0.490
炭酸ナトリウム	Na ₂ CO ₃	-0.240	トリエチルアミン	(C ₂ H ₅) ₃ N	-0.806
塩化ナトリウム	NaCl	-0.499	ベンゼン	C ₆ H ₆	-0.702
重曹	NaHCO ₃	-0.210	アニリン	C ₆ H ₅ NH ₂	-0.676
アンモニウムイオン	NH ₄ ⁺	-11.500	フェノール	C ₆ H ₅ OH	-0.640
塩化アンモン	NH ₄ Cl	-0.605	トルエン	C ₆ H ₅ CH ₃	-0.711
硫酸アンモン	(NH ₄) ₂ SO ₄	-0.429	安息香酸	C ₆ H ₅ COOH	-0.640
塩化ニッケル	NiCl ₂	44.700	安息香酸エチル	C ₆ H ₅ COOC ₂ H ₅	-0.621
酸化ニッケル	NiO	53.700	オクタン	C ₈ H ₁₈	-0.845
亜鉛	Zn	-0.157	ナフタレン	C ₁₀ H ₈	-0.719

表 4 - 5 強磁性体の磁化の性質

名前	成分 (%)						初期誘磁率 (Gm/A)	最大誘磁率 (Gm/A)	保磁力 (m/A)	飽和磁足 (G)
	Fe	Ni	Co	Mo	Mn	Si				
鋼	98.5						2	25	143	21000
鉄	99.91						3	63	80	21500
純鉄	99.95						63	2260	4	21500
けい素鋼	96					4	6	88	40	19700
けい素鋼	97					3	19	380	12	20000
パーマロイ	54.7	45			3		50	630	6	16000
パーマロイ	21.2	79			3		100	1260	4	10700
パーマロイ	16.7	79		4	3		250	1260	4	8700
スーパーマロイ	15.7	79		5	3		1260	10000	0	8000
パーメンダー	49.7		50		3		10	63	159	24000

体から外部磁場を取り除きますと、保磁力の大きな硬磁性の鋼やパーメンダーでは整列した小さな磁石が乱雑になることはありませんから、永久磁石となって強磁性体の磁性が保たれます。また、保磁力の小さな軟磁性のけい素鋼やパーマロイなどの強磁性体では外部磁場を取り除くとすみやかに磁性が失われてゆきます。

磁化されていない強磁性体を磁場の中に置きますと、図 4 - 6 の緑色の矢印のように誘磁率が大きいほど速やかに飽和状態まで磁化されます。磁化された強磁性体から外部磁場を取り除きますと、保磁力の大きな強磁性体では永久磁石となって磁性が保たれます。また、保磁力の小さな強磁性体では外部磁場を取り除くとすみやかに磁性が失われてゆきます。この飽和状態の磁石に逆方向の磁場を与えますと、原子の小さな磁石がその方向を反転しますから、図 4 - 6 の赤色の矢印のように磁性が失われ、さらに逆方向の磁性が生じて飽和状態になります。再度外部磁場を反転させれば青色の矢印のように磁性が反転して飽和状態に戻ります。この反復変化は原子の整列のしかたの変化ですから、保磁力の大きな強磁性体では発熱などによる多少のエネルギーの損失を伴ってしまいます。

多くの原子はそれぞれ不対電子を

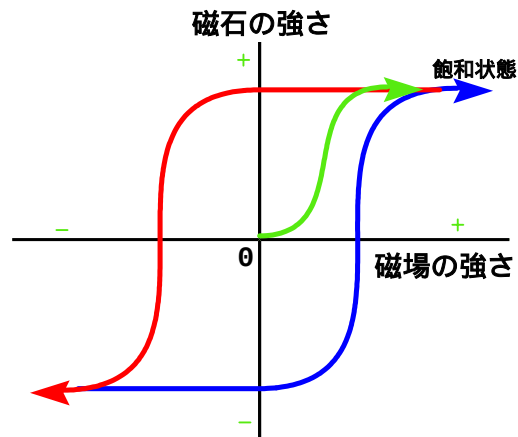


図4 - 6 強磁性体の磁化曲線

持っていますから小さな磁石の性質を持っていますが、これらの原子が共有結合するときには不対電子が対になり磁性を失います。不対電子を持つ原子が小さな磁石の性質を失うことなく規則的に整列して物質を構成するとき、物質全体として磁性を示します。ある転移温度よりも高温では原子の運動エネルギーが整列するための分子間力よりも大きくなるために、原子の小さな磁石は乱雑な方向を向いてしまい、その磁性を打ち消しあって物質全体としての磁性を失ってしまいます。

原子核の小さな磁石で身体の中を診断

前節で見てきたように電子は負電荷を持って原子核の周囲を動き回っていますから、これらの電子により原子の中を電流が流れ、Ampère の実験のように原子は磁性を持ちます。言い換えれば、電子は動く方向に対して直角に向いたそれぞれ小さな磁石の性質を持っています。原子核を構成している陽子も正電荷を持っていますから、Ampère の実験のように原子核も磁性を持ちます。地球が太陽系の中を自転と公転をして動いているように、小さな原子核の中をこれらの陽子も自転に相当する軌道と公転に相当する軌道を動き回っています。自転に相当する軌道が 2 個の陽子で充足されるときにエネルギー的な安定化が起こりますが、それらの原子核は陽子が対になって互いの磁性を打ち消し合いますから磁性を示しません。しかし、陽子が奇数の原子核では陽子が対になっていないために原子核全体として磁石の性質を示します。

原子は相対的に質量の重い中性子と陽子が極めて小さな原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が広く分布しています。平均的な元素では原子核の直径を 1mm とするとき電子の動き回る軌道の半径は 10m 以上と考えられます。原子核の周囲に多くの電子が広い領域を運動していますから、物質の磁性は主として周囲の電子に依存していますが、原子核の中にわずかに自転に相当する軌道を運動している陽子も弱いながら磁性を示しています。外部からの磁場の影響の無いときには陽子の自転に相当する軌道の向きもあらゆる方向を向いていますから、物質の中では陽子由来の磁性は打ち消されてしまいます。しかし、大きな磁場の中に置かれた物質においては、陽子の極めて小さな磁石も図 4 - 5 のように一定方向に整列します。

このように外部磁場により整列した陽子の磁石は電磁波を吸収して、磁石を反転しエネルギー的に不安定な反結合性軌道になります。当然、吸収したエネルギーを放出して元の安定な状態に整列しますが、このとき吸収した電磁波のエネルギーよりも放出するエネルギーの量が少なく、エネルギーの一部分は熱エネルギーなどに变化して陽子が浪費したように電磁波の吸収が観測されます。この外部磁場の影響下での電磁波の吸収の現象は核磁気共鳴吸収現象(NMR)と呼ばれ、原子核の小さな磁石の反転に必要なエネルギーを ΔE 、外部の磁場の強さを B_0 、整列している磁石と反転する磁石の数をそれぞれ N_0 と N_{ex} とするとき式 4 - 4 に示すようになります。ただし、 k は Boltzmann 定数、 h は Planck 定数、 c は光の速さ、 T は絶対温度、 λ は電磁波の波長を表し、それぞれの原子核が持つ磁石の

表 4 - 6 種々の核種の核磁気モーメント

核種	天然存在比 (%)	スピン 量子数	核磁気モー メント(nm)	核種	天然存在比 (%)	スピン 量子数	核磁気モー メント(nm)
¹ H	99.99	1/2	2.792743	²⁹ Si	4.68	1/2	-0.55525
² H	0.01	1	0.857407	³¹ P	100	1/2	1.13162
⁷ Li	92.5	3/2	3.256314	³² S	95.02	0	0
¹² C	98.89	0	0	³³ S	0.75	3/2	0.64342
¹³ C	1.11	1/2	0.702381	³⁵ Cl	75.77	3/2	0.821808
¹⁴ N	99.63	1	0.40371	³⁷ Cl	24.23	3/2	0.68409
¹⁶ O	99.96	0	0	⁵⁵ Mn	100	2/5	3.46766
¹⁹ F	100	1/2	2.6285	⁵⁶ Fe	91.72	0	0
²³ Na	100	3/2	2.217529	⁵⁹ Co	100	7/2	4.6488
²⁷ Al	100	5/2	3.641421	⁶³ Cu	69.17	3/2	2.22664

$$\Delta E = \mu B_0 = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\frac{N_{ex}}{N_0} = e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

式 4 - 4

強さを表す磁気モーメント μ は表 4 - 6 に核磁子 (nm) を単位として掲げておきます。ただし、核磁子は 1.207×10^{-30} kcal/T の値を持っています。この関係式から、弱い磁場の中では磁石の整列した原子核が小さなエネルギーを持つ長波長の電磁波で少しか反転することを示しています。逆に、非常に強い磁場の中では整列した原子核がエネルギーの高く波長の短い電磁波を吸収して、その原子核の磁石を多く反転させます。

天然同位元素比の高い水素 (¹H) の原子核は陽子 1 個で出来ており極めて小さな磁石の性質を持つ原子核で、この原子は大きな磁場の中では FM 放送の電波に用いられている 60 ~ 600MHz の波長領域の電磁波を吸収します。水などのように水素原子を構成元素とする物質を 14100 ガウスの磁場の中に置きますと、¹H の原子核の小さな磁石が 60MHz の電磁波を吸収します。同じように 141000 ガウスの磁場に置けば 600MHz の電磁波を吸収してより多くの反転した磁石を持つようになります。式 4 - 4 から明らかなように原子核に影響を与える外部磁場の強さと吸収する電磁波の波長は反比例します。さらに、表 4 - 6 に掲げたように種々の原子核が固有の磁気モーメントを持っていますから、大きな磁場の中では原子核の種類に対応した固有の電磁波を原子核の存在量に比例した強さで吸収します。この核磁気共鳴吸収現象により、物質が吸収する電磁波の波長とその強度により含まれている原子核の種類と含有量を分析することができます。

前節で考えたように物質を構成している原子の性質やそれらが結合して分子を形作る
ときの結合の仕方などにより、原子核の周囲を動き回っている電子が外部磁場により誘起
する磁性にも強磁性と常磁性と反磁性の 3 種があります。原子核の持つ極めて小さな磁石
に比較して、強磁性体と常磁性体の周囲を動き回る電子は大きな磁性を示します。しかし、
反磁性体は外部磁場のない環境では磁性を示しませんが、原子の周囲を取り囲んでいる電
子が外部磁場によりその強さを弱めるような磁場を誘起します。物質を外部磁場の中に置
くときには原子核の周囲を取り囲んでいる電子が外部磁場の影響を受けて、その強さを弱
めるような磁場を誘起します。結果として、外部磁場は周囲を取り囲む電子により弱めら
れて原子核に影響を与えますから、吸収する電磁波の波長も原子の周囲を取り囲んでいる
電子により変化します。

1960 年代になると電磁波の発振と強度測定の精度が向上し、その上ある程度大きな面
積に均一で強度の高い磁場を与える磁石を用意することが出来るようになりましたので、
水素原子を含む多くの物質の核磁気共鳴吸収現象を観測できるようになりました。日本国
内の第 1 号の多目的な核磁気共鳴吸収測定装置は東京都新宿区西新宿に設置されましたが、
付近を直流電源の京王帝都電鉄の電車が走っていますので、電車が通過するたびに磁場が
変化してしまい安定した状態での核磁気共鳴吸収測定をすることが出来ませんでした。そ
のため、測定時間が終電から初電までの電車の運行されない短時間のみに限られていまし
た。その後の種々の技術的な進歩により、外界の影響なしに極めて一様で強力な磁場を作
ることが出来るようになりましたので、多くの共有結合で結ばれた物質の ^1H の核磁気共鳴
吸収が測定されました。

電磁波の吸収波長は影響を与える磁場の強さに反比例しますが、核磁気共鳴吸収測定装
置に用いられる磁場には必ずしも統一性がなくその上技術的な進歩により第 1 号機の磁石
(9400 ガウス)に比較して現在の最先端の機種では約 20 倍も磁石が強力になっています。同
じ物質を測定しても、単純に吸収波長が一致しません。そのために標準物質を決めその吸
収する電磁波の振動数を ν_0 、測定試料の吸収する電磁波の振動数を ν とするとき、式 4 -
5 のような化学シフトの値 δ として割合を示す ppm で表しています。しかし、原子核と周
圍を取り囲んでいる電子が一体となって原子を構成していますから、電子の影響を全く受
けない原子核の吸収する電磁波の波長を測定することは実験的に出来ません。初期の研究
段階には溶媒や水などの種々の物質が標準物質として用いられていましたが、現在では反
応性に乏しく化学的に極めて安定で測定試料と混合可能であり、非常に小さな振動数 ν を
示す物質としてテトラメチルシラン(TMS)が標準物質に用いられています。

$$\delta = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \cdot 10^6 \quad \text{式 4 - 5}$$

磁場の中で水素原子を含む物質に電磁波を照射する場合でも、水素原子が陽イオンの場
合には、原子核の周囲に電子が全く取り囲んでいませんから、大きな周波数の電磁波を吸

収します。しかし、水素の原子核の周囲を囲んでいる電子の量が多ければ外部磁場を大きく打ち消しますから、比較的小さな周波数の電磁波を吸収します。このように水素の原子核の周囲を取り囲んでいる電子の状態の違いにより、吸収する電磁波の周波数は変化します。原子核と周囲を取り囲んでいる電子が一体となって原子を構成していますが、その電子の量は周囲に結合している原子の種類や数により影響を受けます。原子は電子を欲しがる性質に応じた電気陰性度と呼ばれる物理量が知られていますが、隣接する原子との電気陰性度の大小により、その原子を取り囲んでいる電子の量が変化します。例えば、炭素に結合した水素原子は両者の電気陰性度にはあまり大きな違いがありませんから、その水素の原子核の周囲をほぼ 1 個の電子が取り囲んでいます。電気陰性度が大きく電子を欲しがる性質を持つ酸素原子に結合した水素原子の原子核は周囲を取り囲む電子が 1 個よりも若干少なくなっています。原子核の周囲を取り囲むこの電子の量はごく僅かしか違いませんが吸収する電磁波は約 2 ~ 3ppm ほど変化します。多くの共有結合で結ばれた物質に対する ^1H の核磁気共鳴吸収の測定結果が報告されていますが、参考のために種々の原子や原子団に隣接するメチル基(CH_3)の平均的な化学シフトの値を隣接する原子の電気陰性度とともに表 4 - 7 に掲げておきます。

同じ ^1H の原子核の電磁波吸収でも、その水素原子が隣に結合している原子や原子団の種類や数により、化学シフトの値が微妙に異なりますから、種々の物質の核磁気共鳴吸収を測定して得られる化学シフトの値からその物質を構成している水素原子の置かれている環境や結合の情報を逆に得ることが出来ます。水素原子は水やアミノ酸や石油など生活に密着した物質の中に普遍的に含まれており、分子構造に関する情報を非常に多く得ることが出来ますから、化学的研究

表 4 - 7 CH_3 の化学シフト (ppm) と電気陰性度

$\text{CH}_3\text{-X}$	CH_3 の化学シフト	X の電気陰性度
$\text{CH}_3\text{-H}$	0.23	2.20
$(\text{CH}_3)_4\text{Si}$	0.00	1.90
$\text{CH}_3\text{-CH}_3$	0.88	2.60
$\text{CH}_3\text{-NH}_2$	2.47	3.00
$\text{CH}_3\text{-SH}$	2.00	2.50
$\text{CH}_3\text{-OH}$	3.38	3.50
$\text{CH}_3\text{-I}$	2.16	2.65
$\text{CH}_3\text{-Br}$	2.68	2.95
$\text{CH}_3\text{-Cl}$	3.05	3.15
$\text{CH}_3\text{-F}$	4.26	3.90

には欠かすことの出来ない測定機器として用いられるようになっていきます。そのうえ、 ^1H の核磁気共鳴吸収は比較的感度も高く容易に測定することが出来ますが、それでも結合に関する情報を得るためには 0.01ppm すなわち 1 億分の 1 まで化学シフトの精度が要求されます。東京都新宿区西新宿に設置された 1 号機は近くを通る電車により磁場を 0.01ppm まで均一に保つことができなかったために、電車の運行時間には ^1H の核磁気共鳴吸収の測定

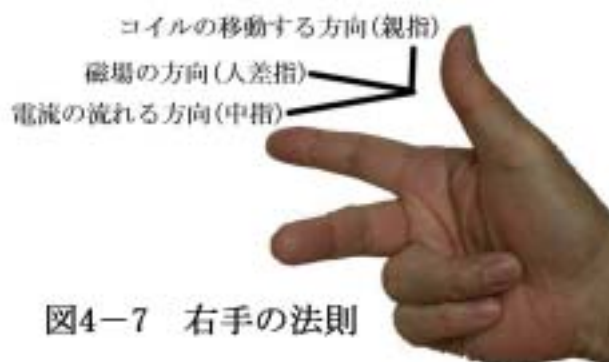
をできませんでした。

天然同位元素比の高い窒素(^{14}N)やフッ素(^{19}F)や燐(^{31}P)も表 4-6 に示すように磁気モーメントを持っていますから、それらの原子核は小さな磁石の性質を持っています。さらに、人間をはじめ多くの生物が炭素を含む物質で構成されていますから、天然存在比がわずかに 1% 程度しかありませんが、炭素の同位元素 ^{13}C が磁気モーメントを持っていることは極めて注目すべき性質と思われます。フーリエ解析による積算技術や超電導材料を用いた強力な磁石の技術など各種の技術の進歩により、 ^{13}C の核磁気共鳴吸収も容易に測定できるようになりました。また、極めて少量の試料、固体試料、気体試料など種々の形態の試料も測定できるようになりました。

特殊な場合を除いて、強力な磁場も 60 ~ 600MHz の電磁波も人間をはじめとするほとんどの生物にとってあまり危害を加えるものではありませんから、生体物質を生きたまま測定することができます。極めて大きく均一な磁石を作る技術が開発されたために、近年では人間も測定できるようになりました。さらに、位相数学の考え方を利用して、試料の 3 次元的な測定も可能になってきましたから、これらの最先端の技術を総合的に利用した磁気共鳴映像法 (MRI) が完成されました。病人の頭をそのまま磁石の中に入れ、そこに電磁波を照射して水の分子の濃度を 3 次元的に調べますと、頭の中の毛細血管まで手術することなく形が分かりますから、病人の脳の異常を診断できるようになりました。さらに、細胞膜や DNA や ATP などの生物にとって最も重要な物質はいずれもりん酸のエステルですが、MRI により燐の原子の分布を測定することにより、細胞密度の異常など病気の患部を間接的に見る事が出来るようになります。著者は幸いにまだこの診断法を受けたことがありませんが、何の痛痒も感じないものと想像でき、この核磁気共鳴吸収を用いた MRI は原子核の極めて小さな磁石が化学や生物学の研究に役立つばかりでなく、医学の分野でも重要な働きをしていることを示しています。

右手で発生する電流

Ampère の実験により電流を流すとその直角の方向に磁性の発生することが明らかになってからは、多くの物理学者は逆に磁気が電流を生じるのではないかと考えるようになりました。10 年後に Faraday は電線を巻いたコイルの近くで磁石を動かすと、磁場の变化を打ち消すような方向に電流がコイルに流れることを見出しました。電線を巻いたコイルを磁場の中で移動させてもコイルと磁場の位置関係が Faraday の実験と同じになりますから、コイルの中に電流が流れます。この現象は電磁誘導と呼ばれ、コイルに流れる電流の強さ V は磁場 Φ の時間的变化に比例します。ここで磁場にもコイルの移動にも流れ



る電流にも方向性がありますから、Fleming はこの電磁誘導により流れる電流の方向を解り易くするためにそれぞれの関係を図 4 - 7 に示すような右手の法則に要約しました。さらに、ここで用いられるコイルの電線の巻き数 N を多くすれば、誘導される電流の強さも強くなりますから、この電磁誘導の現象をまとめますと式 4 - 6 の関係式で表されます。

$$V = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{式 4 - 6}$$

磁場の中でコイルを回転させれば磁場の時間的变化に比例して電磁誘導現象によりコイルの中に電流の流れが発生しますから、この発生する電流を外に導き出すことにより、運動エネルギーを電気エネルギーに変換する発電ができます。逆にコイルの中で磁石を回転させても磁場の時間的变化に比例した電流がコイルの中に発生しますから発電機となります。磁石として永久磁石を用いた発電機では、磁場の強さが反対方向に変化するためには永久磁石が半回転しなければなりませんから、一定時間内の回転数が大きいほど磁場の時間的变化も大きくなり発電される電流量も大きくなります。永久磁石を用いた発電機では回転部分に電流を流す必要がありませんから、構造が簡単で保守が容易になります。表 4 - 5 に掲げた強磁性体の飽和磁足から考えて最も強力な永久磁石の磁場は約 20000 ガウスですが、大型の永久磁石をつくることがむずかしく、そのうえ磁場の強さを調整することができませんから、自転車や自動車用の小型の発電機には適していますが、大電力を供給する発電所の発電機には適していません。

電磁石は電線を磁性材料にコイル状に巻いて電流を流して磁力を発生させ、磁性材料を磁化した磁石です。真空中の誘磁率 μ_0 が $1.256 \times 10^{-2} \text{Gm/A}$ ですから、式 4 - 1 によれば 1 アンペア流れる電線にほぼ密着した 1mm の所で約 10 ガウスの磁石の強さになり、電流量 I に比例した強さの磁場を生じます。永久磁石と同等の磁石を作るためには 2000 アンペア以上の大電流を流さなければなりません、そのような大電流を流すとエネルギーの損失も大きくなります。電磁石の強さはコイルの巻き数と流す電流の量に比例しますが、巻き数を多くすればコイルに用いる電線の長さが長くなりますから、通電の折の電気抵抗が大きくなり電圧を上げなければ電流量は減少してしまいます。

強磁性体は形作っている原子の小さな磁石が外部磁場の影響を受けて整列し磁石の性質を持ちますから、生じた磁場が外部磁場に加わって全体の磁場が強められます。この強磁性体に外部磁場の影響を与え続けると図 4 - 6 に示すように、与え続けた磁場の影響が蓄えられて磁場はますます強められます。強磁性体を形作っている原子の小さな磁石がすべて整列しますと、最早、磁石の強さが向上せず飽和します。電磁石は磁性材料に長い電線をコイル状に巻いた構造をしています、強磁性体を磁性材料に用いコイルに電流を流しますと、コイルに発生する磁場の影響が蓄えられるように電磁石の強さは飽和状態まで強められます。この飽和状態に磁化された強磁性体から外部磁場を取り除きますと、保磁力の大きな硬磁性の鋼やパーマゲネットでは永久磁石となって強磁性体の磁性が保たれま

すし、保磁力の小さな軟磁性のけい素鋼やパーマロイなどの強磁性体ではすみやかに磁性が失われてゆきます。

けい素鋼は誘磁率と飽和磁足が大きな値を示し保磁力が小さい軟磁性を示しますから、けい素鋼を磁性材料としてコイルを巻きつけますと、コイルに発生する磁場の影響を蓄える強力な大型の電磁石まで製作できます。けい素鋼は保磁力が小さいために、コイルに流す電流量に即応するように磁石の強さが変化しますから、出力 10^6 k w を越えるような大電力を供給する発電機に用いることができます。発電所では、永久磁石を用いた小型の発電機で発電した電流をけい素鋼の電磁石のコイルに流して強力な磁場を作り出して、この電磁石を別の大きなコイルの中で回転させて、コイルに 2 次的に大電力を発電しています。このけい素鋼の電磁石を回転させる動力として、水車を用いれば水力発電、風車を用いれば風力発電になります。石油の燃焼や核分裂反応で発生する熱エネルギーでお湯を沸かしてその水蒸気の流れを用いればそれぞれ火力発電や原子力発電になります。

保磁力の小さなけい素鋼にコイルを巻いた電磁石はコイルに流す電流量に即応するように磁石の強さが変化しますから、この電磁石に発生する磁場の変化により引き起こされる電磁誘導の現象により、電磁石に巻きつけた別のコイル(2 次コイル)に電流が流れます。発電所で発電される電気は東日本では 50Hz、西日本では 60Hz の周期で電流の方向が変化する交流電流ですから、この交流電流をこの電磁石のコイルに通電すれば、磁場の方向と強さは同じ周期で逆転しながら変化します。交流電流を通電することにより電磁石に生じる磁場の変化により電磁誘導し、2 次コイルに同じ周期の電流が発生する変圧器を作ることができます。ここで、1 次コイルに流す電圧と電流量をそれぞれ V_1 と I_1 、2 次コイルに流れる電圧と電流量をそれぞれ V_2 と I_2 とするとき、電磁石に巻き付けた 1 次コイルの巻き数 N_1 により電磁石の強さは比例しますし、式 4 - 6 で明らかのように 2 次コイルの巻き数 N_2 に比例した電流が電磁誘導により 2 次コイルに発生しますから式 4 - 7 のような関係式が成り立ちます。

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{式 4 - 7}$$

コイルの近くで時間的に磁場の強さが変化する時には、電磁誘導と呼ばれる現象によりコイルに電流が流れます。発電所の発電機は石油の燃焼や核分裂による水蒸気タービンや水車や風車などにより磁石を回転させて磁場の強さを変化させてコイルに電流を発生させています。また、電流量が常に変化する交流電流を電磁石に通電して磁場を時間的に変化させることにより、交流の周期と等しい交流の電流を発生させる変圧器も電磁誘導の現象を利用しています。このように重要な役目を担っている電磁石は鉄原子の持つ不対電子が小さな磁石の性質を持ち、その小さな磁石が外部磁場を打ち消すように整列することにより作られています。電磁石の芯となる磁性材料はその誘磁率や飽和磁足や保磁力などの性質の違いにより、永久磁石や発電用など種々の目的に適するように用いられています。