

# ナノ結晶材料

Soft Magnetic Alloys for High-Tech Devices / ハイテクデバイス向け軟磁性合金

(Joerg Petzold, Hans Joachim Poess, Juergen Richter)

[参考和訳；濱中秀利 ヴァック マグネティック ジャパン 2003年10月9日、一部修正  
2010年5月13日]

ナノ結晶合金は、幅広い種類の電磁誘導部品に使用されている新しい軟磁性材料です[1]。漏電遮断器、パワートランス、スイッチング電源向けコモンモードチョーク、ISDN用のインターフェーストランシーバーなどがその例です。

信頼できる生産プロセスと低コスト原材料が新しいナノ結晶合金群の中で傑出した **VITROPERM (Fe73.5Cu1Nb3Si15.5B7)** 合金を作り出しました。ナノ結晶合金に特有な特徴は 2 相構造で、そこでは **10~20** ナノメートルの平均直径を持つ微細結晶粒がアモルファス相の中に埋まっています。この構造により、最高透磁率と最小保磁力を可能にしています。さらに、条の薄さ（およそ **20** マイクロメートル）と、比較的高い電気抵抗率により、極めて低い渦電流損失と優れた周波数特性/透磁率を実現しています。

**1.2** テスラの飽和磁気分極や優れた熱特性と相まって、これらの特徴が、**VITROPERM** をパーマロイ、フェライトまたはコバルトアモルファスと同等以上の優れたものにしていきます。

## Magnetic Cores of Nanocrystalline Alloys / ナノ結晶合金磁性コア

アモルファス材料と同様に、出発点として使われる金属条は、急冷技術によって作られません。約 **1200** 度の温度において、合金は添加物である銅とニオブとともに、原材料である鉄、ケイ素、ホウ素から溶解し、ノズルを通して急速回転するロールの上に铸造されます。合金がロールの表面に達するやいなや、溶解材料は秒速 **100** 万度の速さで急冷され、アモルファス条に固化します。铸造パラメーターにより、リボンの厚さは **15~30** マイクロメートルの間になります。特別な自動巻き機械でこの条が巻かれトロイダルコアになります。現在生産されるコアの直径は、**2~3** ミリメートル~**0.5** メートルの範囲に及びます。コアの高さは、条幅により、**2~3** ミリメートルから数センチメートルの間になります。ナノ粒子構造を発現させるために、コアは約 **550** 度で熱処理されます。母体はまだアモルファスですが、とても小さい銅の固まり（それは鉄へほとんど溶解しませんが）が析出し、 $\alpha$ -**FeSi** の極微小単結晶の核として働きます。結果として生じるランダムに生成した粒子が、アモルファス相がほとんど排他的に鉄、ニオブ、ホウ素から構成され、安定化するまで成長し

ます。

結晶化が完了すると、母体の **80** パーセントは **20** パーセントのケイ素を含む  $\alpha$ -**FeSi** 粒子で占められます。

磁化曲線と、それにもとづく電磁誘導部品としての特徴は、リボン軸に垂直な強磁界存在下での追加的な熱処理によって決められます。原子整列化プロセスを使い、この磁界処理は磁界方向に平行な軸に対して単軸の異方性を引き起こします。その結果、誘起された異方化量に応じた、**25,000**~**200,000** の間の透磁率をもつ平坦なヒステリシス曲線になります。

### Structure Related Properties / 構造に基づく特性

過去の理論は、良い軟磁性は、(金属組織上の)『粗い粒子』によってのみ得られるというものです。しかしながら、保磁力  $H_c$  と粒子のサイズとの間の相関関係からわかるように、すぐれた磁気特性は極小粒子直径でも可能なのです(**Fig.1**)。これは、いったん粒子の直径が約 **30** ナノメートルという、強磁性交換相互作用の長さよりも小さくなると、磁化作用が単粒子のランダムな配向についていけないためです。結果として、 $\alpha$ -**FeSi** の結晶異方性の相当量が十分に抑えられ、その結果  $H_c$  がとても低い値になります。[2]

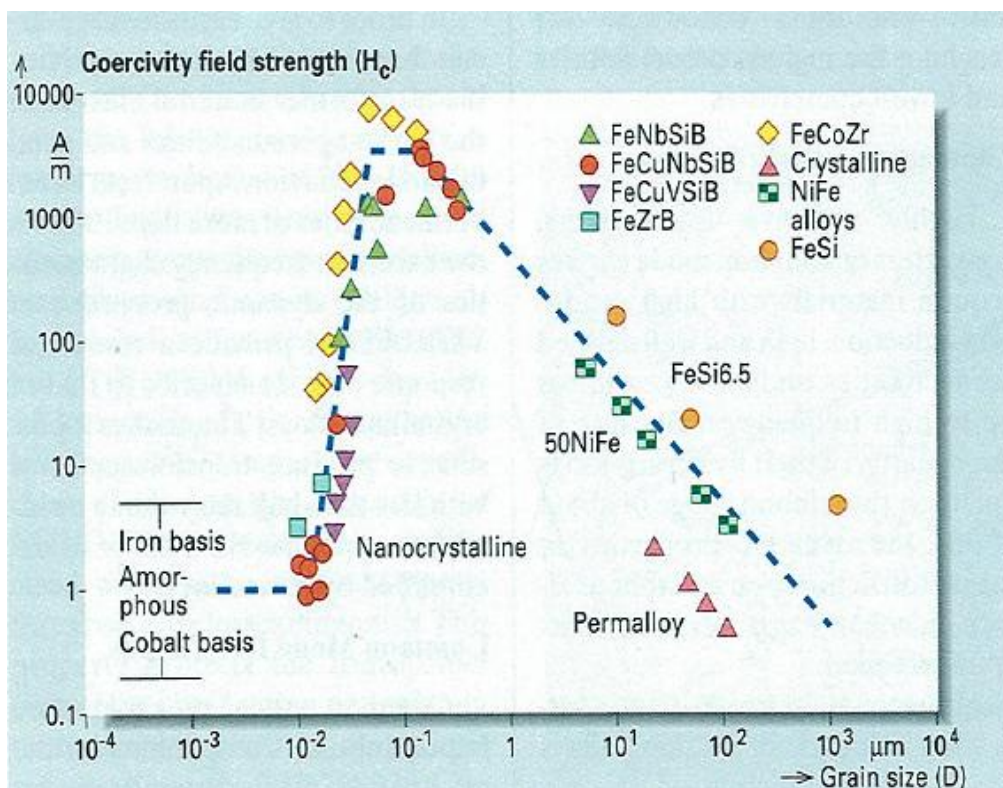


Fig.1 Coercivity and grain size of various magnetically soft alloys

軟磁性はまた、物理的な応力があるとネガティブに影響します。ここで飽和磁気歪は、物理的な量と磁気的な量を結びつけています。アモルファス状態では  $23 \times 10^{-6}$  という望ましくない高い磁気歪がありますがナノ構造形成後に相当量低下します。さらに残存アモルファス相と  $\alpha$ -FeSi 粒子の寄与の合成結果として、Fe73.5Cu1Nb3Si15.5B7 については磁歪ゼロも可能です。ナノ結晶の二相構造が、高透磁率と最小保持力を達成するという最重要 2 条件の実現を可能にしています。

### Consequences of the Structure / 構造の結果

高感度トランス、コンバーターやコモンモードチョークは、高い飽和誘電分極、適切に選ばれた高透磁率、そして高周波数までできるだけ低い損失を実現する材料を必要とします。ヒステリシス曲線の線形性と約 20 マイクロメートルという薄いリボン厚さで、磁気歪ゼロのコバルトアモルファス合金の交流特性を、以前は超越することができませんでした。しかし、残念なことに、飽和誘電分極 1T で、コバルトアモルファスは透磁率がわずか 1000 に過ぎません。Bs が 0.6T より小さい時にのみ初期透磁率 100,000 以上が可能なのです。

コバルトアモルファスと対照的に、Bs 1.2~1.5T が FeSiB 合金にとっては典型的で、もしナノ結晶状態であれば、初透磁率 10,000 からおよそ 200,000 になります。このように、ナノ結晶構造は、(鉄ベース合金特有の)高飽和誘電分極と、高透磁率や良好な交流特性をユニークに結合させています。

### Pulse-Current-Sensitive Earth Leakage Circuit Breakers / パルス電流感応漏電遮断装置

漏電遮断器は、人保護のために規定されている 30mA 正弦漏電流がある場合に、直流パルス漏電流の場合と同様、正確に電力を遮断しなくてはなりません。この遮断器は、電流総和原理に基づく漏電トランス 1 つと、1、2 個のコンデンサ及び高感度電磁リレーから構成されます (Fig.2)。回路は、調波群から構成される非正弦パルスの場合と 50Hz 正弦漏電流の場合に共振するように設計されています。もし、わずかの漏電流が流れると、共振の振幅が限界値を超え、電源システムが磁気システムによって切断されます。

漏電遮断器が十分な感度を持つために、トランス材料は最高透磁率と優れた交流特性を持たなければなりません。初透磁率が 100,000 以上であることの他に、VITROPERM の優れた交流周波数特性は結晶合金よりも優れた共振応答 (Fig.2) を生み出します。このことは、パーマロイに代表される NiFe 結晶合金に必要な半分以下の体積でトランスコアを生産することを可能にします。

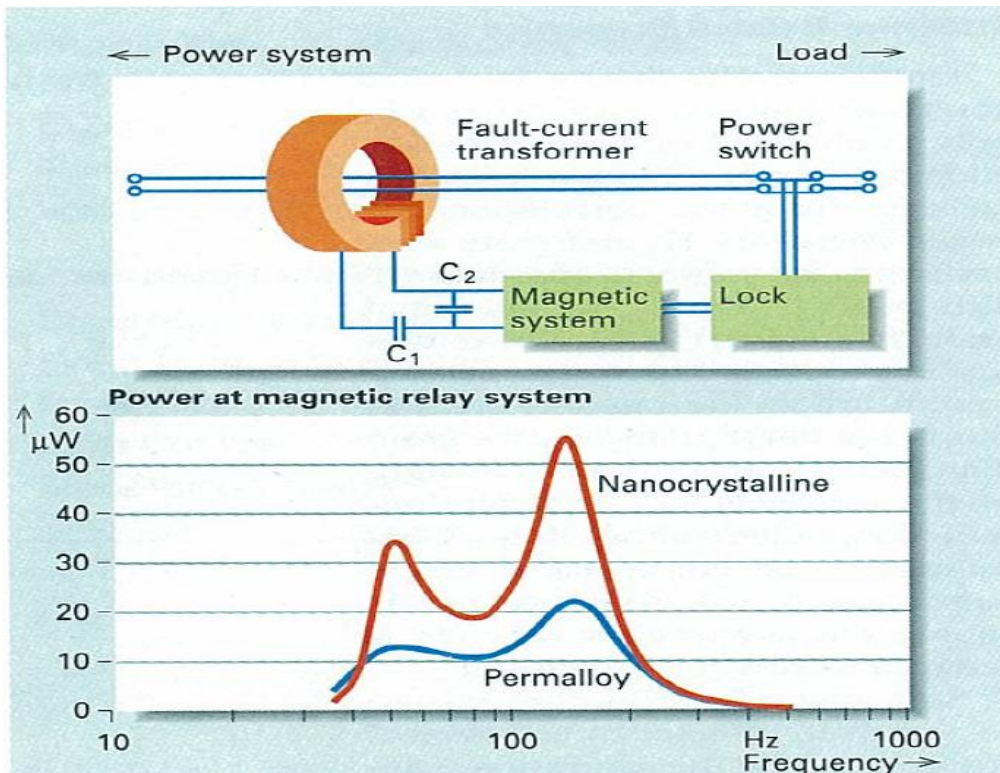


Fig.2 Operating Principle and resonance behavior of a passive pulse-current-sensitive earth-leakage circuit-breaker with a serial and parallel capacitor

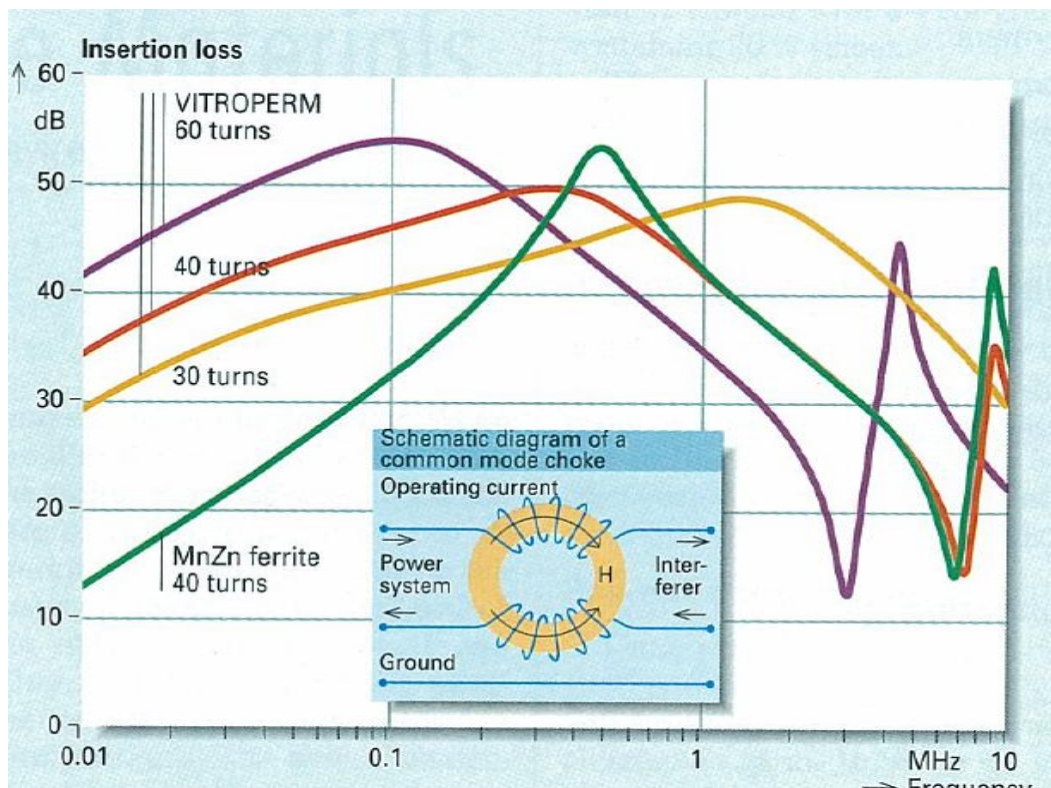
### Common Mode RFI Chokes / コモンモード RFI チョーク

コモンモード **RFI** チョークは電磁干渉の減衰のために重要なフィルターコンポーネントです。最も知られているアプリケーションは、スイッチング電源、電気モータの周波数変換器、パルス制御の溶接機器そして **ISDN** デバイスでの電波干渉抑制です。

コモンモードチョークは、条巻き電磁トロイダルコアと巻き線からなっており、対称干渉信号が消去しあうのと同じように、動作電流から誘導される磁界がお互いに相殺するような形に接続されています。もし一方で、非対称干渉が動作電流に重ねあわせされると、干渉信号磁界はもはや打ち消し合いません。この場合、チョークの全インピーダンスが干渉信号に対して作用し、そして求められる減衰を引き起こします。良い減衰特性では、高周波数までずっと、可能な限り最高のインピーダンスを呼び出します。

しかしながら、実際の減衰作用は、コア材料の透磁率特性、巻き数、巻き方によって決定される異なる周波数特性に細分されます。(Fig.3)

高周波数帯においては、コンデンサ寄与による減衰効果の低下と、攻撃周波数帯が巻き数増加につれ減少するという共鳴効果があります。ですので、巻き数が少ないほうが有利です。高インピーダンスと小さい体積のコンポーネントを実現するために、チョーク材料は



**Fig.3 Influence of core material and number of turns on the frequency dependence of the insertion damping of common mode chokes. The dimensions of the contrasted components are comparable.**

優れた周波数特性をもつ高初期透磁率を持たなければなりません、それは現在のところナノ結晶合金かコバルトアモルファスによってのみ実現されます。

さらに、コア材料は高振幅干渉信号の影響下や高い漏れ磁束の存在下でも高透磁率を保たなくてはなりません。このことは **FeCuNbSiB** 合金の高透磁率と高飽和磁気分極がいかによすばらしい組み合わせであるかを示しています。

さらに、ナノ結晶の熱的安定性—最大アプリケーション温度が **120°C**以上—は、フェライトやアモルファス材料の場合に比べれば、巻き線に相当量細いワイヤーを使用することを可能にします。

このように、**VITROPERM** は小型チョークの最重要条件を満たしています。そういうわけで、**VITROPERM** は、体積に制限がある場合や (**EMC** コネクタのように) 統合コンポーネントが必要な場合に、最高度 **EMC** 要求に応えるために求められる材料なのです。

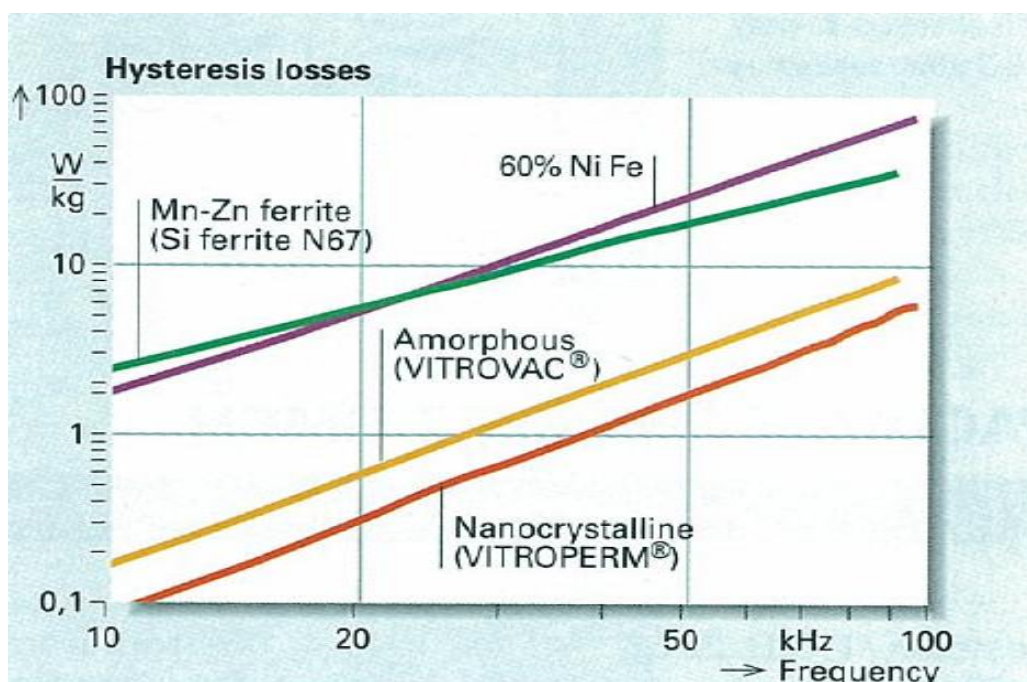
## Transformers in Switched-Mode Power Supplies / スイッチング電源向けトランス

高いクロック周波数のスイッチング電源の開発へ向けて、重要な進展が見られました。

この回路でパワートランスがきわめて重要なコンポーネントですが、その体積は磁気材料によって決まります。**VITROPERM**の初期応用分野は、交通工学、医療技術、溶接設備において使用される約 **40kW** までのスイッチング電源向けのパワートランスを含んでいました。

キロワット範囲でのトランス用磁気材料は、高温下でも、可能な限り低いヒステリシス損失(クロック周波数 **15~20kHz** で)と高磁束密度を持たなければなりません。

フェライトの他に結晶合金、アモルファスやナノ結晶合金が使用されることが可能ですが、**VITROPERM** が最も低い損失を示します(**Fig. 4**)。



**Fig.4 Typical Hysteresis losses of various materials with a flat hysteresis loop for power transformers**

さらに、**VITROPERM** は、特筆されるべきですが、温度が上昇するにしたがってコア損失が小さくなるという、負の温度係数をもっています。この特性がトランスコアの過熱を防ぎ、本質的なマイナス **40度~120度**の温度においての信頼動作を保証します。

上述した特徴は—高飽和誘電分極(**1.2T**)とあいまって—高い『実効』磁束密度を実現します。その結果、1単位体積あたりの移送可能電力はフェライトトランスの **2** 倍になり、電源供給ユニットの体積と重さが減少します。この点で、鉄道技術からの例が言及に値するのですが、旧来技術(**16 2/3Hz**)がクロック周波数 **16kHz**の電源供給ユニットに置換されました。

70kHz の電力供給に、合計が **25kg** に満たない **4** 基の **VITROPERM** ベースのトランスフォーマー台が、結晶材料ベースの **800kg** のトランスフォーマー**1** 基を置換したのです。

#### 著者紹介（執筆時現在）

##### **Joerg Petzold**

ドイツのハナウにある **VAC** の半完成製品と部品工場の電磁誘導応用のための研究所長である **Dr. Petzold** (**43**) は、アモルファスとナノ結晶材料の開発に参加し、電磁誘導アプリケーションに注力しています。**1986** 年以前（彼が **VAC** に入社した年）、彼はシュトゥットガルト大学とシュトゥットガルトにある金属分析のためのマックスプランク研究所の科学者メンバーでした。

##### **Hans-Joachim Poess**

**Dr. Poess** は、**1988** 年以来 **VAC** の社員として **EMC** の開発に参加していました。物性技術学位を取得後、彼はスミージングチョークの分野の開発者になりました。**1993** 年に彼は **EMC** に移り、そこで電流補償リアクターの開発に注力しました。

**Dr. Poess** は電流補償干渉抑制リアクターとほかの **EMC** の分野でいくつかの特許を申請しました。

##### **Juergen Richter**

**1987** 年以来 **VAC** の社員として、**Dr. Richter** は当初、会社の契約、特許の部署に勤めていました。現在、彼は **VAC** のコアとコンポーネントの工場において電流コンポーネントの開発をしています。**1956** 年生まれ。物理学の学位保持。

#### 参考文献

[1]Yoshizawa, Y.; Oguma, S.; Yamauchi, K.; J. Appl. Phys. 64 (1988)6044

[2]Herzer, G.; IEEE Trans. Magn. 25 (1989) 3327

[本資料は『Siemens Review Special R&D, Fall 1996』の Reprint の和訳版です。]

（日本における問合せ先；

ヴァック マグネティック ジャパン 濱中秀利 電話 03-5337-8522)