

永久磁石百年史

A Century History of Permanent Magnet

福田 方勝

1. はじめに

1917年に本多光太郎先生がKS鋼を発明されて近代永久磁石開発の幕が開いてから、すでに百年が経過しました。この百年間には永久磁石として種々の材料が開発されました。永久磁石の開発年表を表1に示します。

永久磁石の磁気特性は、残留磁束密度(B_r)、保磁力(H_c)、最大エネルギー積($(BH)_{max}$)の3つの特性によって評価されます。とりわけ、最大エネルギー積は永久磁石が内部に蓄えているエネルギーを表わしますから永久磁石の強さといえます。永久磁石の開発の歴史はこの最大エネルギー積をいかに大きくするかという歴史です。

永久磁石の歴史については多くの著作がありますが、後述するNd(ネオジム)磁石を発明した佐川真人氏に対してその発想に大きな影響を与えた(故)浜野正昭氏の優れた解説があります[1]。以下、主に日本での永久磁石の開発の状況を最大エネルギー積(以下、単にエネルギー積)に着目して俯瞰します。紙面の都合で、すべての永久磁石には触れることはできず、また、ボンド磁石については省略します。なお、本文では、磁気特性についての数値は歴史的観点からcgs単位系を使用します。MKSA単位への変換は、エネルギー積は1MGOe(メガガウスエラストッド) $\div 8\text{kJ/m}^3$ (キロジュール毎立方メートル)です。

表1. 永久磁石の開発年表

日 本	世 界	出来事(日本)
1917(大正6) 本多: KS鋼 発明 0.95MGOe		1914~1918 第一次世界大戦
1922(大正11) 渡辺(日本特殊鋼): FW磁石鋼発明		1923(大正12) 関東大震災 1925(大正14) ラジオ放送開始
1931(昭和6) 三島: MK鋼 発明 1932(昭和7) 加藤、武井: OP磁石 発明 1933(昭和8) 本多、増本、白川: 新KS鋼 発明	1932 Köester(独): Remalloy磁石(Fe-Co-Mo)発明 1935 Neumann(独): CuNiFe, CuNiCo磁石発明 " Kussmann(独): PtFe磁石発明 1936 Jellinghous(独): PtCo磁石発明 1938 Oliver(米): アルニコ磁石の 磁場中冷却効果 発見	1939~
1945(昭和20) 三島、牧野: MT磁石発明	1940 Nesbit(米): Vicalloy磁石発明 1942 Jonas(蘭): Alnico-5磁石完成	1945(昭和20) 第二次世界大戦
	1952 Went(米): Baフェライト磁石 発明 1957 de Vos(蘭): Alnico-8磁石開発	1953(昭和28) テレビ放送開始
1964(昭和39) 久保(松下電器)ら: MnAlC磁石開発	1963 Cocharadt(米): Srフェライト磁石 発明 1966 Strnat(米): 希土類磁石 提案 1969 Buschow(蘭): 焼結SmCo ₅ 磁石開発	1960(昭和35) カラーテレビ放送開始 1964(昭和39) 東京オリンピック
1971(昭和46) 金子(東北大学): Fe-Cr-Co磁石発明 1975(昭和50) 俵(松下電器): SmCoFeCu磁石 開発 1977(昭和52) 米山(東京電気化学)、金子ら(東北大学): SmCoFeCuZr磁石で30MGOe達成	1971 Charles(米): (Sm,Pr)Co ₅ 磁石で26MGOe達成	1970(昭和45) 大阪万博 1972(昭和47) 札幌オリンピック 1973(昭和48) 第一次オイルショック 1979(昭和49) 第二次オイルショック
1982(昭和57) 佐川(住友特殊金属): NdFeB磁石 発明 1987(昭和62) 入山(旭化成)ら: SmFeN磁石 発明 " 大橋(信越化学): R(Fe,T)₁₂化合物 発見 1988(昭和63) 下田(セイコーエプソン): PrFeBCu磁石発明	1982 Croat(米): MQパウダー (NdFeB)発明 1988 Coehoon(蘭): ナノコンポジット磁石発表	1987(昭和62) 衛星放送開始 " 国鉄分割民営化 1989(平成1) 消費税導入(3%)
1990(平成2) 武下(三菱金属): HDDR法 によるNdFeB粉末発明 1996(平成8) 田口ら(TDK): LaZn置換型Srフェライト開発 1998(平成10) 日立金属、TDK: LaCo置換型Srフェライト開発	1990 Coey(アイルランド): SmFeN磁石 発表	1995(平成7) 阪神淡路大震災 1998(平成10) 長野オリンピック
2005(平成17) 松浦(NEOMAX): NdFeB磁石で59.5MGOe達成 " 中村(信越化学): 粒界拡散法 開発(省Dy) 2007(平成19) 日立金属: CaLaCoフェライト開発		2003(平成15) 地上デジタル放送開始 2008(平成20) リーマンショック
2016(平成28) 桜田(東芝): 高Fe濃度SmCoFeCuZr磁石開発		2011(平成23) 東日本大震災 2021(令和3) 東京オリンピック

2. 金属・合金磁石

(1) 焼入れ硬化型磁石

19世紀末から20世紀初めにかけては、炭素鋼やクロム鋼、タングステン鋼などの工具鋼が永久磁石として使用されていました。エネルギー積は高々0.4MGOe程度でした。1917年に、東北帝国大学の本多光太郎先生は、タングステン・クロム鋼の鉄を1/3のコバルトで置換することにより磁化が増加することを予想し、Co-W-Cr磁石鋼(Fe-0.9%C-4%Cr-6%W-35%Co)を発明しました。エネルギー積は0.9MGOeと従来の2倍に向上しました。この磁石は、研究を支援してきた住友吉左衛門のイニシヤルから「KS鋼」と名づけられました。これが永久磁石の研究開発の端緒となりました。これらの永久磁石は保磁力を得るために高温から焼入れる必要がありました。そのため、「焼入れ硬化型磁石」と呼ばれました。焼入れ鋼であるので硬さが硬く、そのことが永久磁石材料のことを硬質磁性材料と呼ぶ元になっています(正しくは、磁氣的に硬い=保磁力が大きいこと)。KS鋼は1918年から住友鋳鋼所(住友金属工業の前身)が特許権者として量産を開始しました。

他の焼入れ硬化型磁石として、特殊鋼の父と呼ばれた、日本特殊鋼(現、大同特殊鋼)の渡辺三郎氏により1922年に発明された「FW磁石鋼」があります(FWは養父の渡辺福三郎翁のイニシヤルによる)[2]。高価なWを使用しないMn-Cr鋼です(Fe-0.6~1.0%C-2~5%Cr-1~4%Mn)。この磁石鋼は自硬性が強く、空气中放冷だけで焼入れ硬化が可能でした。関東大震災(1923年)後の復旧のための電話機用に、また1925年のラジオ放送の開始により受信機用に大量に使用されました。

また、第二次世界大戦中にNi、Coの入手が困難になったため、これらの希少金属を含まない永久磁石の開発が急務となり、Fe-Al-C合金の「MT磁石」が1945年に東京帝国大学の三島徳七先生の下で開発され(Fe-8%Al-2%C)、戦後、牧野昇氏(東京計器→三菱製鋼→三菱総研)らにより東京計器で実用化されました。この技術は戦後米国への技術輸出第一号となりました。

これらの磁石は、主に鍛造によって製造されるため、「鍛造磁石」とも呼ばれました。

(2) 析出硬化型磁石(分散硬化型磁石)

・MK磁石と新KS鋼

つぎに、非磁性母相中に強磁性微粒子相を析出させる

「析出硬化型磁石」が開発されました。1931年に東京帝国大学の三島徳七先生がFe-Niの非磁性鋼の研究の中で、Fe-Ni-Al系の「MK鋼」を発明しました(Fe-25%Ni-12%Al)。エネルギー積は1.2MGOeで、それまでのKS鋼を上回りました。MKは三島先生の養家の三島と実家の喜住の頭文字をとりました。MK鋼は炭素を含まないので、「MK磁石」という名称で東京鋼材(現、三菱製鋼)が実施権を得て1933年から工業化しました。三島先生は海外でも積極的に特許を取得し、米国ではGE社、欧州ではBosch社(独)へ実施権を許諾し、世界的規模の工業生産に貢献しました。

KS鋼の磁気特性の値がMK磁石により破られたため、東北大学金属材料研究所では直ちに本多先生を中心として新しい磁石鋼の研究が進められました。そして、1933年に、本多光太郎、増本量、白川勇記先生らがFe-Ni-Co-Ti系の「新KS鋼」を開発しました(Fe-28%Co-16%Ni-11%Ti)。エネルギー積は2.0MGOeで再び最強の磁石となりました。新KS鋼は「NKS磁石」として住友金属工業(現、日本製鉄)が工業化をしました。

これらの永久磁石の特許としては、MK磁石はFe-Ni-Al-(Co)合金が基本で、新KS鋼はFe-Ni-Co-Ti合金が基本でした。Ti原料としてのフェロチタンにAlが含まれていたため、新KS鋼がMK磁石の特許権の範囲を侵害するものであるか(改良発明であるか)について、量産をしていた三菱鋼材(現、三菱製鋼)と住友金属工業との間で特許係争となりました。幾度の変遷を経て、戦時下での挙国一致のために、1944年に和解しました。

・アルニコ磁石

MK磁石とNKS磁石がその後のアルニコ磁石のオリジナルとなりました。アルニコ磁石はFe、Al、Ni、Co、Cuを主な構成元素とし、それらの元素の頭文字をとってAlnico磁石と呼ばれました。元々は米国GE社の商品名でした。日本ではMK磁石、NKS磁石などと呼ばれ、外国ではAlNiCo(独)、Alcomax(英)、NiAlCo(仏)、Ticonal(蘭)などと呼ばれました。アルニコ磁石は合金組成、鑄造組織、磁気特性などにより様々なものが開発されましたが、大きくは、「等方性アルニコ磁石」、異方性磁石の「アルニコ5磁石」、「アルニコ8磁石」に分類されます[3]。(永久磁石には、どの方向に対しても同じ磁気特性を示す「等方性磁石」と、特定の方向に磁気特性が強い「異方性磁石」があります。)

等方性アルニコ磁石は、MK磁石を基本としてCoを

0~13%含むものです。Co含有量が1%以下のものは特に「アルニ磁石」と呼ばれ、コストパフォーマンスの良い磁石として二輪車のスピードメータなどに使用されています。

1938年、D. A. Oliver と J. W. Shedden (英)が Alnico-2(Fe-12%Co-18%Ni-10%Al-6%Cu)の合金を磁場中で冷却することにより、その方向の磁気特性が20%増大することを発見しました。そして1939年、G. B. Jonas(蘭)により Co 量の高い組成(Fe-24%Co-13.5%Ni-8%Al-3%Cu)の合金において磁場中冷却を行い磁気特性を向上させる発明がされ(4.8MGOe)、Alnico-5磁石が開発されました(5.0MGOe)。その後、1953年、D. G. Ebeling(米)により、鑄造組織を柱状晶としてその方向に磁場を印加して熱処理することにより磁気特性が向上することが見い出されました。柱状晶アルニコ5磁石(Alnico-5Col)です。柱状晶の割合を増加させることにより磁気特性が向上しました(7.0→8.0MGOe)。そして、1962年、E. Steinort(伊)により単結晶合金で9.9MGOeが達成されました。アルニコ5磁石は、磁束密度が高いこと、温度安定性が非常に良いことから、計測器、汎用のスピーカなどに広く使用されています。

アルニコ5磁石に対して、Co含有量が高くTiが添加されているものがアルニコ8磁石で、新KS鋼から発展したものです。1957年、A. I. Luteijn と K. J. de Vos(蘭)は、Fe-34%Co-15%Ni-7%Al-4%Cu-5%Ti合金をチョコレート法によって柱状晶化し(Ticonal X)、実験室的ではあるものの11.0MGOeのエネルギー積を達成しました。同時期に、等軸晶(柱状晶ではない)のアルニコ8磁石が開発されました(Ticonal 450:4.5MGOe)。アルニコ8磁石はTiを含むために柱状晶化が難しく、Sなどの元素を添加する方法が開発され、また、柱状晶化の方法も加熱鑄型法や帯溶融法など工業的に実施できる方法が開発されました。柱状晶化により磁気特性が向上し、1967年にA. Hoffmann(独)らは帯溶融法で柱状晶化を図り、12.0MGOeのエネルギー積を得ました。アルニコ8磁石は保磁力が大きいという特長があるため、コアレスモータのロータなどに使用されました。

アルニコ磁石の基礎は日本で築かれましたが、その後の発展は欧米で行われました。丁度その時に日本が戦争に突入り、研究が停滞してしまったものと推察されます。

アルニコ磁石は鑄造法によって製造されるため「鑄造磁石」と呼ばれています(焼結法によっても製造されま

した)。MK磁石とNKS磁石の特許はそれぞれ1950年、1954年に満了となり、1950年代後半から多数の会社で製造されました。

・Fe-Cr-Co磁石

1971年、東北大学の金子秀夫先生らはスピノーダル分解という相変態理論に基づいて「Fe-Cr-Co磁石」を開発しました。アルニコ磁石と同様に分散硬化型磁石です。FeCrCo固溶体の α 相がFeCo-richの α_1 相とCr-richの α_2 相に分解するため、二相分離型磁石とも呼ばれます。アルニコ磁石の相変態もスピノーダル分解であることがわかっています。開発当初はCoの含有量がアルニコ5磁石と同程度の20~25%でしたが、その後、熱処理を容易にする目的から15%Coの組成での開発が行われました(5.5MGOe)。本間基文先生(東北大学)らは、二相分離面の詳細な検討により、Fe-24%Cr-12%Co合金において7.7MGOe、Fe-22%Cr-15%Co合金において8.3MGOe、保磁力を増加させるためにMoを添加したFe-18%Co-28%Cr-3%Mo合金において、柱状晶合金で9.5MGOe、単結晶合金で11.5MGOeのエネルギー積を達成しました。

工業的には塑性加工できる磁石(圧延磁石)として注目を浴び、住友特殊金属(現、日立金属)、日立金属、日本楽器(現、ヤマハ)などが工業化しました。1976年からのザイール(現在のコンゴ民主共和国)での紛争によるCo価格の高騰を契機として、アルニコ磁石と同じ鑄造磁石としての製造法が確立され、三菱製鋼磁材(現、三菱製鋼)、東北金属(現、トーキン)などが工業化しました。磁束密度が高いため、スピーカの磁気回路、ハイブリッド型ステッピングモータのロータ等に使用されています。

・バイカロイ(Fe-Co-V)

バイカロイ(Vicalloy)は、1940年に米国Bell研究所のE. A. Nesbittらにより開発された圧延磁石です(Fe-52%Co-10~14%V)。日本では、三島先生の下で木村康夫氏(東京計器→三菱製鋼→東京大学)らがVの一部をCrで置換したCrバイカロイの研究を行い、Fe-52%Co-8%V-4%Crの組成で3.7MGOeのエネルギー積を得ました。三菱製鋼が工業化を行い、冷間加工が可能であるというメリットを生かして薄板や細線などの形状で使用されましたが、その後、Fe-Cr-Co圧延磁石に代替されました。

金属・合金磁石のエネルギー積の進歩を図1に示します。

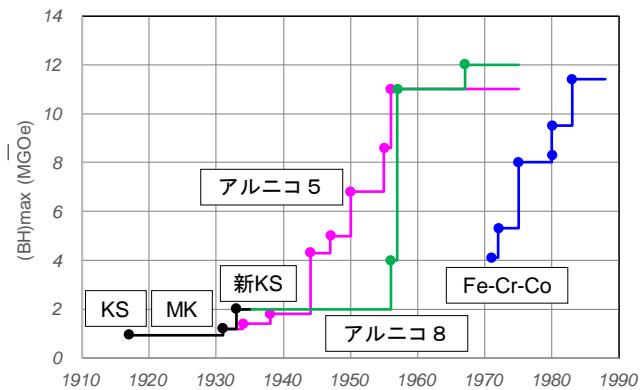


図1. 金属・合金磁石のエネルギー積の進歩

3. 酸化物（フェライト）磁石

フェライトとは金属イオンを含む亜鉄酸塩(ferrite)のことです。フェライト磁性材料の研究は、1932年、東京工業大学の加藤与五郎先生、武井武先生による OP 磁石および Cu-Zn フェライト(軟磁性材料)の発見を発端としています。加藤、武井先生は Co フェライトを磁場中で冷却すると強い磁石になることを見い出しました。磁場中冷却という手段を世界で初めて用いたもので、その後のパーマロイ(軟磁性材料)やアルニコ磁石の熱処理に影響を与えたものと考えられます。これを「OP 磁石」と命名しました。Ookayama Permanent と Oxide Powderに通じるということで名づけられました。Co フェライト磁石は 1935 年に三菱電機が工業化を行い、発電機などに使用されました。特に、磁力選鉱機への適用は戦時中の日本の砂鉄精錬に大きく貢献しました。

その後、オランダ Philips 社により多くのフェライト材料が Ferroxdur という名称で開発されました。1952年、J. J. Went が Ba フェライト ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$) 磁石を開発しました(1.0MGOe \Rightarrow 3.0MGOe)。さらに 1963年、米国 Westinghouse 社の A. Cochardt らにより Sr フェライト ($SrO \cdot 6Fe_2O_3$) 磁石が開発されました(4.0MGOe)。日本では、フェライト磁石は住友特殊金属(現、日立金属)が 1954年、東京電気化学(現、TDK)が 1956年から量産を開始しました。その後、製造法の改良による磁気特性の向上はありましたが、4.5MGOe 程度まででした。

より高い特性が期待できる W 型フェライトの研究も行われましたが、成功しませんでした。そして、1996年、田口仁氏(TDK)らは LaZn で置換した Sr フェライト磁石により 5.2MGOe のエネルギー積を達成しました。その後、日立金属と TDK は相次いで LaCo 置換型 Sr フェラ

イト磁石を開発し、日立金属は CaLaCo フェライト磁石、TDK は LaCo フリーSr フェライト磁石を開発しました。さらに、2017年、日立金属は新組成で 5.6MGOe のフェライト磁石では世界最高のエネルギー積を達成しました。現在、5.4MGOe 程度の高性能フェライト磁石が量産されています。

フェライト磁石のエネルギー積の進歩を図2に示します。

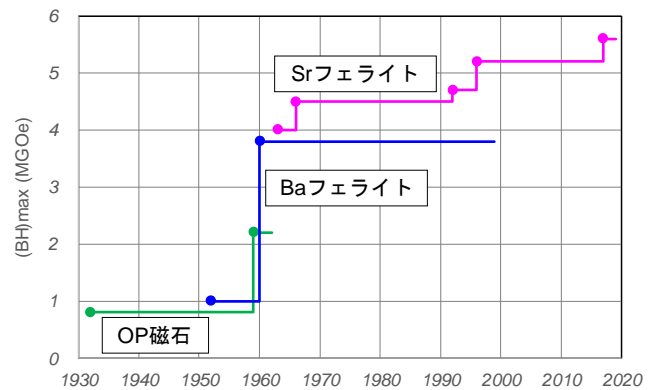


図2. フェライト磁石のエネルギー積の進歩

4. 希土類磁石

(1) SmCo 磁石

より強力な磁石を求めて、世界中で研究が行われ、1966年、米国空軍研究所の G. Hofer と K. J. Strnat が希土類とコバルトの化合物にその可能性があることを示しました。希土類(レアアース)というのは周期表の欄外に示される La から Lu までの 15 元素のことです(Sc, Y を加える場合もあります)。特に、Sm と Co の化合物が磁石として使われました。1969年、オランダ Philips 社の K. H. J. Buschow らは実験室ではあるものの 20 MGOe という驚異的な特性を達成しました。製造法の検討などから 1971年には $(SmPr)Co_5$ の焼結で 26MGOe の特性が得られました。これらは Sm と Co の原子比から 1-5 型($SmCo_5$)と呼ばれる第一世代の希土類磁石です。

その後、1-5 型よりも高い特性を目指して Sm と Co の原子比が 2:17 である 2-17 型(Sm_2Co_{17})の研究が行われました。1975年、俵好夫氏(松下電器→信越化学)により $Sm(Co_{0.76}Fe_{0.10}Cu_{0.14})_{7.0}$ 合金で 26.4MGOe が達成され、エネルギー積向上の開発競争が始まりました。そして、1977年、東北大学と東京電気化学(現、TDK)の米山哲人氏らにより Zr を添加した合金 ($Sm(Co_{0.68}Fe_{0.21}Cu_{0.10}Zr_{0.01})_{7.4}$) で、ついに 30MGOe が達成されました。さら

に 1980 年には Fe 濃度を高めた組成($\text{Sm}(\text{Co}_{0.61}\text{Fe}_{0.28}\text{Cu}_{0.10}\text{Zr}_{0.01})_{7.7}$)において 33MGOe が得られました。エネルギー積の開発競争の激しさは、歌人の俵万智さんが詠んだ歌(「サラダ記念日」より)に象徴されていると思います。

ひところは「世界で一番強かった」

父の磁石がうづくまる棚

これらの希土類磁石は元素の頭文字から「サマコバ磁石」とよばれ、携帯音楽プレーヤー「ウォークマン(1979 年発売)」の普及に大きく貢献しました。

その後、希土類磁石の開発は Nd 磁石へ移りますが、東芝の桜田新哉氏らはさらなる研究をつづけ、2015 年、高 Fe 濃度 SmCo 磁石($\text{Sm}(\text{Co}_{0.572}\text{Fe}_{0.35}\text{Cu}_{0.06},\text{Zr}_{0.018})_{7.8}$)を開発し、35.4MGOe のエネルギー積を達成しました。この SmCo 磁石は Nd 磁石に比べて温度に対する安定性が良いことから、鉄道車両用モータ等への実用化が進んでいます。

(2) NdFeB 磁石

エネルギー積の開発競争が一段落した頃、1982 年、住友特殊金属(現、日立金属)の佐川真人氏は希土類として Nd を用いた全く新しい磁石を開発しました。Nd と Fe と B の新しい化合物 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (2-14-1 型)を用いるもので「ネオジム磁石(又はネオジ磁石)」と呼ばれます。エネルギー積は 36.3MGOe で SmCo 磁石の特性を大きく上回るものでした。その後、磁気特性は瞬く間に 40MGOe 以上へ向上していきました。Nd 磁石の開発経緯については、佐川氏自身のいくつかの著作があります[4]~[7]。1990 年代には、Nd 磁石は多くの製品に用いられていきます。HDD のヘッド駆動用の VCM(ボイスコイルモータ)、永久磁石式 MRI(磁気共鳴イメージング)、エアコン用モータなどです。

全く同じ頃(1982 年)、米国 GM 社の J. J. Croat は液体急冷法により Nd-Fe-B の粉末を開発しました。「MQ パウダー」と呼ばれ、ボンド磁石の原料として使用されています。GM 社は MQ パウダーを製造するマグネクエンチ社(MQI)を設立しました。MQI は幾度の変遷を重ね、現在は Neo Performance Materials (カナダ)の傘下となり、中国とタイの工場粉末を生産し、世界中に供給しています。MQ パウダーから製造されるボンド磁石(MQ-1)は等方性磁石ですが、HDD ドライブの駆動モータ(スピンドルモータ)用として大量に使用されています。

また、MQ パウダーを熱間加工する磁石も開発されま

した。ホットプレスするものは等方性で MQ-2、さらに熱間で押出し加工するものは異方性で MQ-3 と呼ばれます。結晶粒が非常に細かいために高い保磁力が得られ、Dy フリー磁石として大いに期待されています。ダイド一電子が工業化しています。

MQ パウダーは等方性の磁粉のため、異方性の磁粉の開発も進められました。MQ-3 を粉砕する方法もありましたが、工程が複雑になるため普及しませんでした。1990 年、三菱マテリアルの武下拓夫氏らは異方性の粉末を製造する HDDR(Hydrogenation Decomposition Desorption Recombination)法を完成させました。さらに、1998 年、愛知製鋼の本蔵義信氏らは d-HDDR (dynamic-HDDR)法を開発しました。これらの粉末により異方性の 20MGOe のボンド磁石が製造されています。

Nd 磁石は組成の検討により 40MGOe の特性が得られ、その後、低酸素化、パルス磁場配向、ストリップキャスト材などの製造法の改良により 50MGOe 以上の特性が得られました。そして、2005 年、NEOMAX(現、日立金属)の松浦裕氏らは、合金組成と粉末の磁場配向度を厳密に制御し、不純物の酸素を極限まで少なくして 59.5MGOe の世界最高のエネルギー積を達成しました。この値は Nd 磁石のエネルギー積の理論値 64MGOe にほぼ近いものです(93%)。エネルギー積を高くする試みはこれで一段落し、その後の研究は保磁力を大きくする開発へと移行しました。

21 世紀に入り、Nd 磁石の使用は増大してきました。ハイブリッド自動車の駆動モータに適用する場合は、200°Cまでの耐熱性が要求されます。Nd 磁石は保磁力の温度係数が大きいので、高温において磁力が低下してしまうという現象があります(100°Cの温度上昇で HcJ が半分に減少する)。そこで、室温においてあらかじめ保磁力を大きくしておく必要があります。そのために、Nd の一部を Dy(ジスプロシウム)や Tb(テルビウム)で置換する必要があります。Dy は中国に偏在する元素であるため、Dy の使用量を減らしたり(省 Dy)、Dy を使用しない(Dy フリー)磁石を開発する試みが精力的に行われました。2005 年、信越化学の中村元氏は、Nd 磁石の表面から Dy や Tb を結晶粒界に拡散させる「粒界拡散法」を開発し、Dy の使用量を低減することに成功しました。また、Nd 磁石の保磁力発生に対するマイクロ組織の研究も行われ、Dy フリーでも高保磁力を得る研究が現在でも継続しています。

(3) SmFeN 磁石

希土類磁石の開発において日米に後れをとった欧州では、Nd 磁石の発表以後、CEAM(磁石に関する欧州協調活動)において組織的な研究開発を行いました。そして、1990 年に Trinity 大学(アイルランド)の J. M. D. Coey が $Nd_2Fe_{14}B$ 化合物のつぎの新しい材料として、 Sm_2Fe_{17} を窒化した $Sm_2Fe_{17}N_x$ 化合物を合成して発表しました。しかし、この材料は 1987 年に旭化成の入山恭彦氏(現、大同特殊鋼)らがすでに発明していたものでした。窒素が高温(600°C以上)で抜けてしまうのでそのままでは焼結することができないため、より低温で緻密化させる方法などの研究が進められています。ポンド磁石としては 20MGOe 程度まで実用化されています。

(4) 希土類磁石ワークショップ(国際会議)

希土類コバルト磁石を提案した K. J. Strnat は、Dayton 大学(米)へ移り希土類磁石の国際会議を立ち上げました。第 1 回は 1974 年に米国 Dayton 大学で「希土類コバルト磁石とその応用ワークショップ」として開催されました。その後、ほぼ 2 年おきに開催されています。NdFeB 磁石が発明されたため、1985 年の第 8 回からは「希土類磁石とその応用ワークショップ」として、さらに、2014 年の第 23 回からは「希土類磁石および未来磁石とその応用ワークショップ」と名称を変え開催されています。日本でも、箱根(第 4 回 1979 年)、京都(第 10 回 1989 年)、仙台(第 16 回 2000 年)、長崎(第 22 回 2012 年)と 4 回開催しています。2020 年は第 26 回で、8 月に米国の Baltimore で開催の予定でしたが、新型コロナウイルス感染の影響により延期されました。この国際会議には世界中の磁石研究者が集まり、研究発表を行っています。

希土類磁石のエネルギー積の進歩を図 3 に示します。

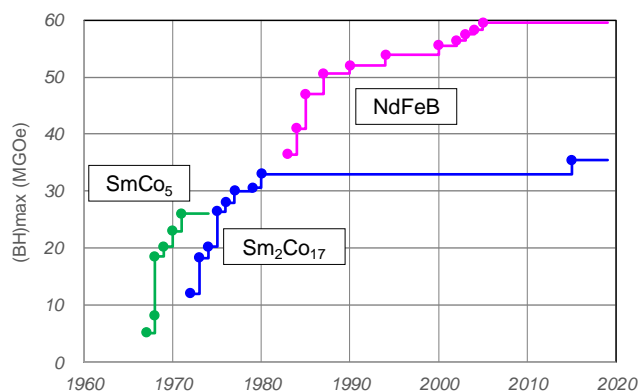


図 3. 希土類磁石のエネルギー積の進歩

5. 永久磁石の工業生産

現在生産されている永久磁石は、希土類磁石、フェライト磁石、そして割合は少ないのですが鑄造磁石および圧延磁石です。世界の永久磁石の生産量に関する信頼できる統計はありません。日本電子材料工業会(現、電子情報技術産業協会 JEITA)による、国内における永久磁石の生産金額および各永久磁石のシェアの推移を図 4、図 5 に示します。1955~1975 年は鑄造磁石(アルニコ磁石)の全盛期です。1966 年の生産量は鑄造磁石が 5400 トン、フェライト磁石が 1200 トンでした。同年のマグネット工業会の会員名簿には 20 社、26 工場が記載されていました。次第にフェライト磁石が増えていき、ついに 1977 年にフェライト磁石が鑄造磁石を金額で越え(クロスポイント①)、鑄造磁石のシェアが 50% を下回りました。1976 年からは希土類磁石(SmCo 磁石)の生産が始まり、鑄造磁石が減少し、フェライト磁石、希土類磁石が増加しました。フェライト磁石は 1990 年代以降減少していますが、これは製造会社の海外展開の影響によります。そして、1993 年には希土類磁石がフェライト磁石を越えました(クロスポイント②)。希土類磁石(Nd 磁石)は 2002 年、2009 年に、それぞれ IT バブル崩壊、リーマンショックの影響で大きく減少しましたが、全体としては伸びており、2017 年では 1000 億円の規模となっています。なお、JEITA では、鑄造磁石、フェライト磁石、希土類磁石の統計をそれぞれ、2006 年、2017 年、2018 年から廃止しています。

希土類磁石の価格は原料である希土類の価格に大きく依存します。特に、2012 年には、2010 年に起きた尖閣諸島中国漁船衝突事件による日中問題から希土類価格が 10 倍以上に暴騰した影響により、生産金額は見かけ上大きく膨らんでいます。希土類の価格は現時点では安定しています。ただし、希土類の資源は Dy、Tb を除いては世界中に豊富に存在するとはいうものの、まだまだ中国依存の体質は変わらず、中国での採掘・精錬コストの上昇などにより、安心はできない状況です。

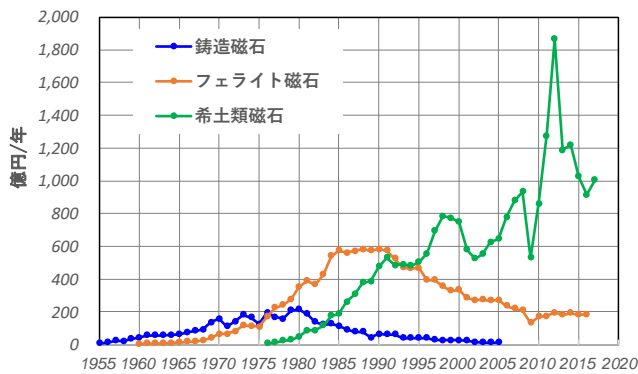


図4. 国内における永久磁石の生産金額の推移

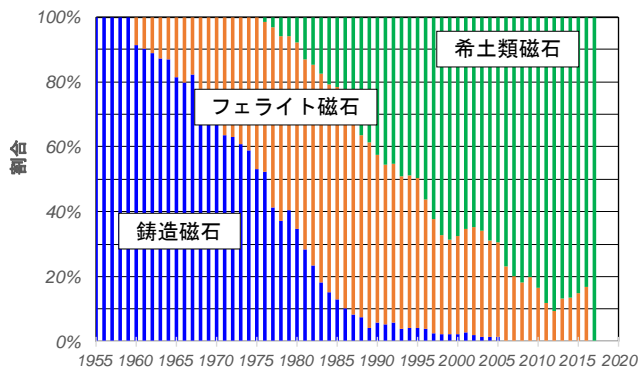


図5. 各永久磁石のシェアの推移

Nd 磁石の世界の生産量の推定を図6に示します。欧米での生産量は少なく、日本と中国で生産されています。2006年に中国の生産量が日本を上回り、年々中国の生産量が増加しています。この傾向は今後も続くものと思われれます。2018年は全世界で約13万トンと推定されています。

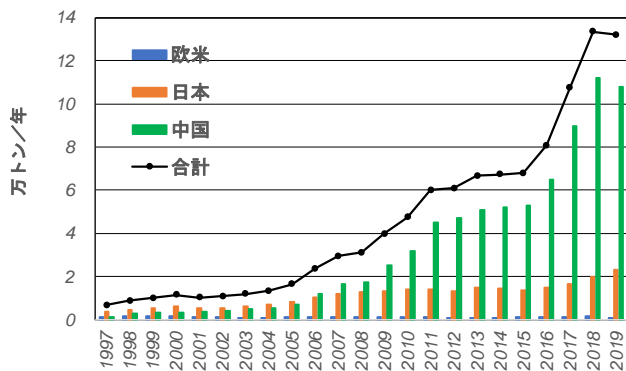


図6. Nd磁石の生産量の推定 (NeoMagによる)

そして、2050年に向けて、Nd磁石の需要はますます増えることが予想されています。それらを牽引するのは、ハイブリッド自動車や電気自動車の駆動モータと大型風力発電機です。これらの需要に対応するためには、現

在の生産量の数十倍が必要となり、永久磁石の供給が不足することも起こりえます。Nd磁石のハイグレードのものは駆動モータ等に向けられるでしょうが、それ以外の製品にはローグレードのものが使われるでしょう。足りない分はほかの磁石となりますが、選択肢としてフェライト磁石しかないという状況にはならないようにするべきだと思います。形状自由度が非常に大きい圧延磁石、温度安定性に優れ高い磁束密度が得られる鑄造磁石など用途に応じて使い分けていくこと、すなわち、「永久磁石の多様性」が大事であると思います。

現在、工業的に生産されている永久磁石の磁気特性(エネルギー積)を図7に示します。

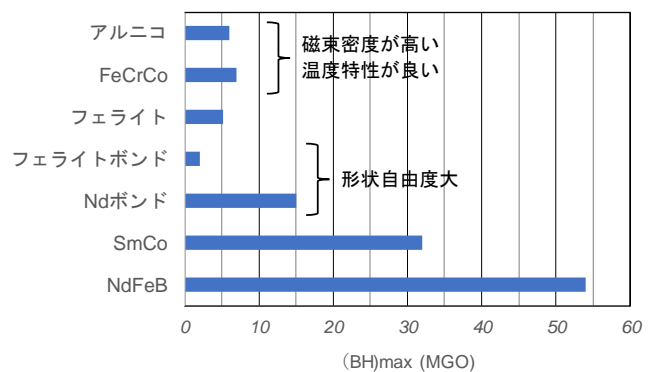


図7. 各永久磁石の磁気特性 ((BH)_{max})

6. むすび

100年間のエネルギー積の進歩をまとめて図8に示します。ソリッドの印は日本人によるものです。KS鋼からNd磁石まで100年間で62倍に向上しました。2005年以降、エネルギー積の更新はありませんが、更なる高性能磁石材料を世界中で研究中です。

以上で述べたように、永久磁石の開発には多くの日本の研究者、技術者がかかわってきました。昭和60年(1985年)、特許庁が工業所有権制度百周年を記念して日本の十大発明家を選定しました(表2)。その中に、永久磁石を発明した本多光太郎先生、三島徳七先生の二人が選ばれています。また、国際的な学会である米国電気電子学会(IEEE)が重要な技術業績を称えるIEEE Milestonesにおいて、2009年に加藤与五郎先生、武井武先生の「フェライト」が選定されました(銘板が東京工業大学に設置されています)。さらに、1985年から始まった日本国際賞(Japan Prize:日本版ノーベル賞)の第28回(2012年)において、Nd磁石を開発した佐川真人氏が

受賞されました。これらは、日本の永久磁石材料の研究開発がいかに優れているかを示しているものと思います。我々は、これらの先輩方々の業績を受け継ぎ、つぎの100年に向け、世界をリードする永久磁石材料開発を続けていかなければならないと感じています。

表2. 日本の十大発明家 (特許庁：1985年)

発明家	特許登録	発明内容
豊田佐吉	1891年(明治24)	木製人力織機
御木本幸吉	1896年(明治29)	真珠養殖
高峰讓吉	1901年(明治34)	アドレナリン
池田菊苗	1908年(明治41)	グルタミン酸ナトリウム
鈴木梅太郎	1911年(明治44)	ビタミンB1
杉本京太	1915年(大正4)	邦文タイプライター
本多光太郎	1918年(大正7)	K S 鋼
八木秀次	1926年(大正15)	八木アンテナ
丹羽保次郎	1929年(昭和4)	写真電送方式
三島徳七	1932年(昭和7)	M K 磁石鋼

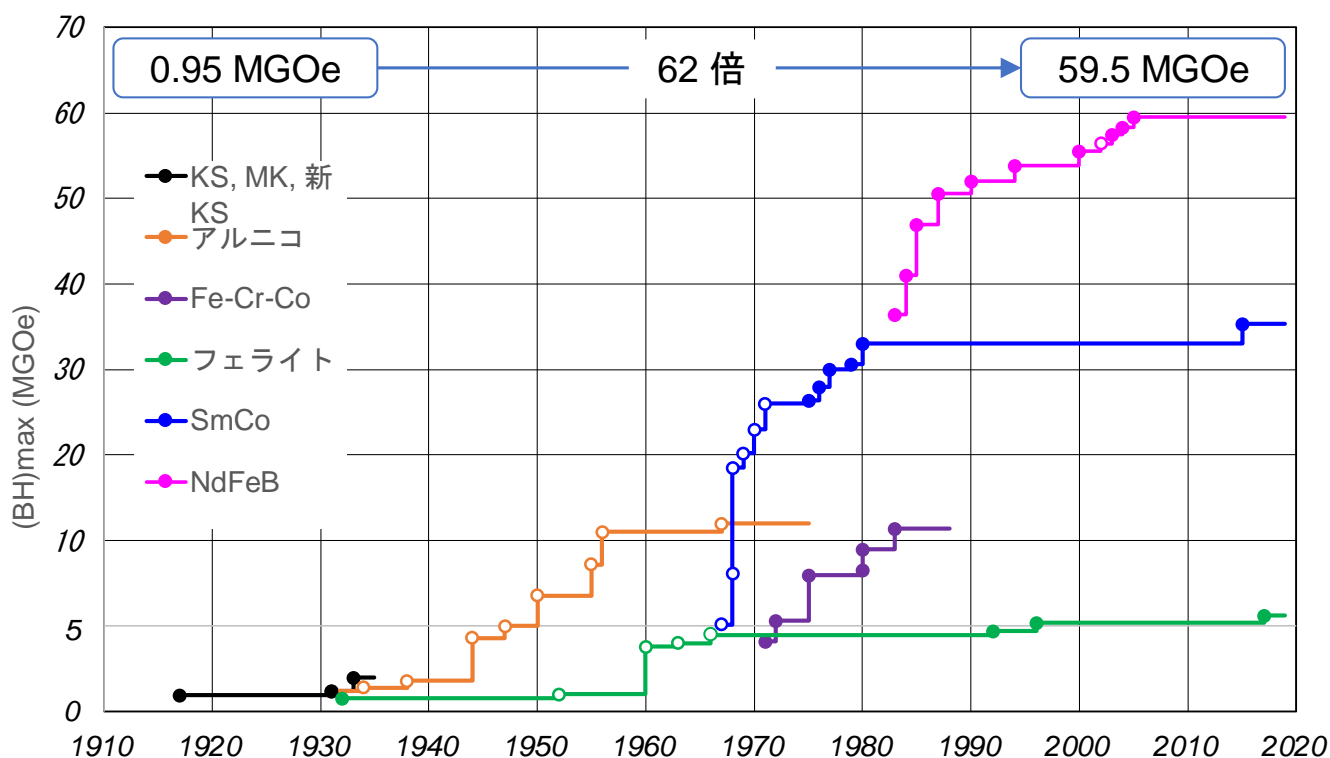


図8. 永久磁石のエネルギー積の進歩 (白抜きは外国人による)

参考文献

[1] 浜野正昭；”永久磁石の歴史”，「永久磁石(アグネ技術センター)」， p.19-48, (2007).
 [2] 鈴木雄一；”第四話 渡辺三郎のFW 鋼”，「磁石の発明特許物語(アグネ技術センター)」， p.60-71, (2015).
 [3] 福田方勝；”3.2.4 ハード磁性材料”，「磁気工学ハンドブック(朝倉書店)」， p.301-312, (1998).
 [4] 佐川真人；”永久磁石の発展”，「永久磁石(アグネ技術センター)」， p.1-9, (2007).
 [5] 佐川真人；”ネオジム磁石発明者の述懐”，「ネオジム磁石のすべて(アグネ技術センター)」， p.191-197, (2011).
 [6] 佐川真人；”ネオジム磁石の30年”，「希土類磁石(日刊工業新聞社)」， p.1-9, (2012).
 [7] 佐川真人、中村修二；”最強のネオジム磁石はいかにして生まれたか”，「最強エンジニアの仕事術(実務教育出版)」， p.13-57, (2016).