

BM素心

<ボンデッドマグネット用素材研究に思う>

明治大学工学部教授

山元 洋



私とボンデッドマグネットの出会いは、学生時代に、私の恩師である川口寅之輔教授よりゴム磁石を紹介されたことに始まる。その当時は磁石特性はともかく、複合磁性材料であることが重要で、これからはこのようないくつかの素材の巨視的あるいは、微視的組合わせによって作られる複合材料の時代であると講義されたのは、大変印象的であった。現在はあらゆる分野において、まさにハイブリッドの時代であり、複合材料は発展の一途をたどっていることは明白である。特に、ボンデッドマグネットのここ1, 2年の生産量は、前年に比べ倍近くの伸びを示しているのは、驚嘆の限りである。

現在、私の行っている研究は、ボンデッドマグネット用素材としての急冷薄帯磁石の開発である。今から10数年前にさかのぼるが、当時は非晶質軟質磁性材料（例えばFe-Co-B系合金）の研究が盛んであり、これら材料は鉄損が少なく、電力用トランス用素材として有用であることが発表されており、私の研究室でも、当初は液体急冷法を用いて非晶質鉄心材料の研究を行っていた。何か新しいことをやらねばと思いながら、たいした研究はできなかった。そこで、硬質磁性材料の超急冷はどうかと考えた。文献を調べると、1973年にClarkがTbFe₂スパッタ膜は、低温で大きな保磁力を持つことを発表しており、1980年にCroatがPr-Co系スパッタ膜で、熱処理することにより、常温で大きな保磁力を持つことが報告されていた。このとき、スパッタ膜を作製することができなかったのも、急冷薄帯でやってみてはどうかと思い、さっそく実験を行った。しかし、非晶質軟質磁性材料

の作製と違い、大気中で片口ロール液体急冷法を用いて薄帯作製を試みたが、酸化のために希土類系合金の薄帯はできなかった。今から思うと当然のようであるが、その頃は、最初薄帯作製の射出管のまわりにアルゴンガスを流してやればできると考え実験を行った。そこで、この酸化防止のためには、急冷薄帯作製装置全体を不活性ガスの中に入れることを考え、できれば真空のチャンバーを作りたいと試案をめぐらした。しかし、私立大学の研究費の少ない費用で、大きな真空チャンバーを作るなどということは不可能であった。そのとき考えついたのが、現在使用しているビニールテント方式である。それは装置全体をビニールテントに入れ、ビニールテント内の空気をロータリポンプで排気して、高純度アルゴンで置換し、この不活性雰囲気中で薄帯を作製したところ、うまく薄帯ができた。この装置は日本の多くの大学、企業の方が見学に来られ、よく感心されたものである。あるときには、大手企業の常務の方と、研究員の方が一緒に我々の研究室を見学され、こんな装置で論文発表ができるのに、うちの研究所の立派な装置で、何をやっているのかと研究員に話されているのを聞き、私は一緒に来られた研究員の方に大変悪いことをしたような気がした。さらに驚いたことに、韓国の大学の先生が、わざわざこの装置を見学に来られ、自分のところも研究費が少ないので、この方式でやってみるといわれ、国際的にも何かお役に立てたかと思った次第である。しかし、このような装置は困っていたからこそ考えついたものであるが、大変良いアイデアであったと自負している。

このような装置で希土類系合金の薄帯ができるようになったが、今度は急冷薄帯磁石を何に使用するかが、まったくわからなかった。今でも思い出すことは、学会発表時に、磁石の保磁力理論の質問ができることを当方は予想していたが、磁石はブロックで使用するもので30~50 μm の薄帯磁石は、何を目的に研究されているのかといわれ、大変困ってしまった思い出がある。その当時は、私は長尺の薄帯磁石を作ること、VTRの速度センサに使用できるのではと真剣に考えていた。このようなことで、実験を進めているときに、住友特殊金属の佐川らにより焼結Nd-Fe-B磁石が、一方GMのCroatらにより急冷薄帯のNd-Fe-B系磁石が発表された。急冷薄帯磁石はボンデッドマグネット用の素材であると聞いたときには、大変ショックであった。我々は目的を長尺・可撓性のある薄帯を作るために、組成、添加物を種々変化させ実験を行っていたことが、この新しい化合物の出現により根本的に考えなおさねばならなかった。

そこで、私の研究室では当初GMと同じような組成で種々実験を行い、圧縮成形磁石を作製していた。このボンデッドマグネットを測定してみると、保磁力が大きく、密度を高くしても残留磁束密度があまり高くならず、実用磁石としては着磁がしづらいのではないかという疑問があった。そこで保磁力が10 kOe程度で、残留磁束密度を上げるために、素材となる急冷薄帯の組成を変化させ、また、添加物の影響を丹念に調べていた。このような考えで実験を行っているうちに、1987年も終ろうとしていたある日に、急冷薄帯磁石で $(\text{BH})_{\text{max}}$ が19 MGOeの値ができましたと、院生が興奮して報告にきた。このとき、私は1年前にも17 MGOe程度の薄帯ができたが、その後、いろいろ実験してだめであったので、そのときも、心ではすばらしいと思いながら、何回も実験をやって確かめなくてはと思い、種々繰返しの実験を行った。確かに19 MGOe

以上の薄帯ができたのは、最初の報告から3ヶ月かかった。また、一度であるが最高は21 MGOeのものでできた。それが当協会で一昨年講演させていただいたNd-Fe-Co-B-V系の急冷薄帯である。もちろん、圧縮成形磁石としては、 $(\text{BH})_{\text{max}}$ で11 MGOe以上の値は常に得ることができる。この薄帯の特性は、等方性でありながら、残留磁束密度が飽和磁束密度の1/2を越える値をとり、Stoner-Wohlfarthの単磁区粒子理論に合わない素材であった。この理由としては、現在は粒子間相互作用が働くため、高くなるといわれているが、本当に保磁力理論を含め、解明されているかは疑わしい。

なにはともあれ、ボンデッドマグネット用素材としては、保磁力はもちろんであるが、飽和磁束密度が大きいことが、残留磁束密度を高くする可能性を持ち、要求される。今までは飽和磁束密度を大きくするためには、スレータ・ポーリング曲線よりFe系ならばCoで置換することを考えた。このFe-Coを上回る高い飽和磁束密度を持つ化合物は、1972年に東北大高橋実先生等によって発見された Fe_{16}N_2 化合物である。当時は安定な Fe_{16}N_2 化合物ができなかったが、1989年に日立製作所の小室らがInGaAs単結晶基板上に Fe_{16}N_2 化合物をエピタキシャル成長させ、飽和磁束密度が2.8~2.9 Tの鉄の窒化物ができたことが発表された。この物質は保磁力は10 Oe程度である。このような高飽和磁束密度を持っていることから、私自身はR(希土類)-Fe-Nの化合物を考えてはと思っている。ただ、この窒化物は簡単に安定したものがないので、不可能かもしれない。焼結磁石では窒化物が分解してしまうので、ボンデッドマグネット素材として、窒化物磁石粉末ができればと思う。このような夢のような新しい素材を、この系で見つけることができれば、これはまさに材料開発の研究者がよく使う言葉の“Serendipity”にあてはまる。