(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5115511号
(P5115511)

(45)発行日　平成25年1月9日(2013.1.9)　(24)登録日　平成24年10月26日(2012.10.26)

(51)Int.Cl.			F I		
H01F	1/057	(2006.01)	H01F	1/04	H
H01F	1/08	(2006.01)	H01F	1/08	B
C22C	38/00	(2006.01)	C22C	38/00	303D

請求項の数 3　(全 19 頁)

(21)出願番号　特願2009-82008(P2009-82008)
(22)出願日　平成21年3月30日(2009.3.30)
(65)公開番号　特開2009-260338(P2009-260338A)
(43)公開日　平成21年11月5日(2009.11.5)
審査請求日　平成23年8月24日(2011.8.24)
(31)優先権主張番号　特願2008-87492(P2008-87492)
(32)優先日　平成20年3月28日(2008.3.28)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

早期審査対象出願

(73)特許権者　000003067
ＴＤＫ株式会社
東京都中央区日本橋一丁目１３番１号
(74)代理人　100088155
弁理士　長谷川　芳樹
(74)代理人　100113435
弁理士　黒木　義樹
(74)代理人　100124062
弁理士　三上　敬史
(74)代理人　100145012
弁理士　石坂　泰紀
(72)発明者　藤原　篤
東京都中央区日本橋一丁目１３番１号　ＴＤＫ株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】希土類磁石

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
　Ｒ（但し、ＲはＹを含む希土類元素から選ばれる１種以上の元素）、Ｂ、Ａｌ、Ｃｕ、Ｚｒ、Ｃｏ、Ｃ、Ｓｉ及びＦｅを必須元素とし、
　前記必須元素全体に対する含有割合が
Ｒ：２５～３２質量％、
Ｂ：０．８４～０．９８質量％、
Ａｌ：０．０３～０．２５質量％、
Ｃｕ：０．０３～０．１１質量％、
Ｚｒ：０．０３～０．２５質量％、
Ｃｏ：３質量％以下（但し、０質量％を含まず。）、
Ｃ：０．０３～０．１５質量％、
Ｓｉ：０．０５８～１．５質量％、
Ｆｅ：残部、であり、
　Ｏの含有割合が０．２質量％以下である希土類磁石。
【請求項２】
　Ｒ（但し、ＲはＹを含む希土類元素から選ばれる１種以上の元素）、Ｂ、Ａｌ、Ｃｕ、Ｚｒ、Ｃｏ、Ｃ、Ｓｉ、Ｇａ及びＦｅを必須元素とし、
　前記必須元素全体に対する含有割合が
Ｒ：２５～３２質量％、

Ｂ：０．８４～０．９８質量％、
Ａｌ：０．０３～０．２５質量％、
Ｃｕ：０．０３～０．１１質量％、
Ｚｒ：０．０３～０．２５質量％、
Ｃｏ：３質量％以下（但し、０質量％を含まず。）、
Ｃ：０．０３～０．１５質量％、
Ｓｉ：０．０５７～１．５質量％、
Ｇａ：０．０５～０．１５質量％、
Ｆｅ：残部、であり、
Ｏの含有割合が０．２質量％以下である希土類磁石。

【請求項３】
前記必須元素全体に対するＳｉの含有割合が０．０５８～１．５質量％である請求項２に記載の希土類磁石。

【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、希土類磁石、より詳しくは、Ｒ－Ｔ－Ｂ系の組成を有する希土類磁石に関する。

【背景技術】
【０００２】
Ｒ－Ｔ－Ｂ（Ｒは希土類元素、ＴはＦｅ等の金属元素）系の組成を有する希土類磁石は、優れた磁気特性を有する磁石であり、その磁気特性の更なる向上を目指して多くの検討がなされている。磁石の磁気特性を表す指標としては、一般に、残留磁束密度（Ｂｒ）及び保磁力（ＨｃＪ）が用いられ、これらの積（最大エネルギー積）が大きいほど優れた磁気特性を有する磁石であるということができる。

【０００３】
希土類磁石のＢｒやＨｃＪは、その組成が変わることで変化することが知られている。例えば、下記特許文献１～３には、ＢｒやＨｃＪの向上を目的として、それぞれ特徴的な組成を有する希土類磁石が開示されている。

【先行技術文献】
【特許文献】
【０００４】
【特許文献１】国際公開第２００４／０２９９９５号
【特許文献２】特開２０００－２３４１５１号公報
【特許文献３】国際公開第２００５／０１５５８０号

【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００５】
近年、希土類磁石の用途は多岐にわたっており、従来に比して高い磁気特性が要求されるようになってきている。そのような状況下、ＢｒやＨｃＪといった磁気特性を、少しでも向上できるような希土類磁石が求められている。

【０００６】
かかる要求に応じて、本発明者らは、希土類磁石の組成について種々検討を行った。その結果、Ｂ（ボロン）及びＯ（酸素）の含有割合を低減することで、Ｂｒ及びＨｃＪなどの磁気特性を向上できることがわかった。

【０００７】
しかしながら、さらに検討を進めたところ、Ｂの含有割合を低減した組成では、希土類磁石の組成のわずかな変動によって、磁気特性、特にＨｃＪが大きく変化することがわかった。これは、Ｂの含有割合を基本組成よりも低減すると、軟磁性のR_2T_{17}相が形成されやすくなることに起因しているものと思われる。Ｂの含有割合の変動に伴うＨｃＪの

変化幅は、微量のＣｕを含有させることによって、ある程度低減することが可能であるものの、量産サイズにスケールアップすることを鑑みれば、未だ十分とはいえなかった。

【０００８】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、優れた磁気特性を有するとともに、Ｂの含有割合の変動に伴う磁気特性のばらつきを十分に抑制することができる希土類磁石を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【０００９】

上記目的を達成するため、本発明では、Ｒ（但し、ＲはＹを含む希土類元素から選ばれる１種以上の元素）、Ｂ、Ａｌ、Ｃｕ、Ｚｒ、Ｃｏ、Ｃ、Ｓｉ及びＦｅを必須元素とし、必須元素全体に対する含有割合が、Ｒ：２５～３２質量％、Ｂ：０．８４～０．９８質量％、Ａｌ：０．０３～０．２５質量％、Ｃｕ：０．０３～０．１１質量％、Ｚｒ：０．０３～０．２５質量％、Ｃｏ：３質量％以下（但し、０質量％を含まず。）、Ｃ：０．０３～０．１５質量％、Ｓｉ：０．０５８～１．５質量％、Ｆｅ：残部、であり、Ｏの含有割合が０．２質量％以下である希土類磁石を提供する。

【００１０】

本発明の希土類磁石は、$R_2T_{14}B$で表される基本組成よりもＢの含有割合が小さい（０．９８質量％以下である）ことから、Ｂリッチ相が過度に形成されることがなく、相対的に主相の体積比率が大きくなって、Ｂｒを向上させることができる。また、他の必須元素を特定範囲の割合で含有するとともに、酸素の含有割合が十分に低減されていることから、磁気特性を十分に向上させつつ、磁気特性のばらつきを十分に抑制することができる。

【００１１】

かかる効果が得られる理由は必ずしも明らかではないが、本発明者らは以下の通り推察する。Ｒ－Ｔ－Ｂ系の組成を有する希土類磁石の場合、基本組成よりもＢの含有割合が小さいと、化学量論上、Ｒ及びＴが余りやすくなり、これらの元素から軟磁性のR_2T_{17}相が析出する傾向がある。このため、Ｂの含有割合が過度に減少すると磁気特性が低下してしまうと考えられる。ところが、本発明では、Ｓｉを含有することによって、余剰となるＲ及びＴから磁気特性に悪影響を及ぼさない$R_6T_{13}Si$若しくはR_5Si_3等のＳｉ化合物相の生成を促進し、R_2T_{17}相の生成を抑制している。また、Ｃｕを含有することによって、磁気特性の向上に有効な$R_2T_{14}B$相の生成を促進し、R_2T_{17}相の生成を抑制している。すなわち、Ｂの含有割合を基本組成よりも減らすこと、並びにＳｉ及びＣｕを添加することが、磁気特性の向上と磁気特性のばらつきの抑制に寄与しているものと考えている。

【００１２】

本発明では、また、Ｒ（但し、ＲはＹを含む希土類元素から選ばれる１種以上の元素）、Ｂ、Ａｌ、Ｃｕ、Ｚｒ、Ｃｏ、Ｃ、Ｓｉ、Ｇａ及びＦｅを必須元素とし、必須元素全体に対する含有割合が、Ｒ：２５～３２質量％、Ｂ：０．８４～０．９８質量％、Ａｌ：０．０３～０．２５質量％、Ｃｕ：０．０３～０．１１質量％、Ｚｒ：０．０３～０．２５質量％、Ｃｏ：３質量％以下（但し、０質量％を含まず。）、Ｃ：０．０３～０．１５質量％、Ｓｉ：０．０５７～１．５質量％、Ｇａ：０．０５～０．１５質量％、Ｆｅ：残部、であり、Ｏの含有割合が０．２質量％以下である希土類磁石を提供する。

【００１３】

上記希土類磁石も、$R_2T_{14}B$で表される基本組成よりもＢの含有割合が小さい（０．９８質量％以下である）ことから、Ｂリッチ相が過度に形成されることがなく、相対的に主相の体積比率が大きくなって、Ｂｒを向上させることができる。また、他の必須元素を特定範囲の割合で含有するとともに、酸素の含有割合が十分に低減されていることから、磁気特性を十分に向上させつつ、磁気特性のばらつきを十分に抑制することができる。

【００１４】

本発明の希土類磁石は、必須元素全体に対するＳｉの含有割合が０．０５８～１．５

質量％であることが好ましい。これによって、磁気特性のばらつきを一層十分に抑制することができる。

【発明の効果】

【００１５】

本発明によれば、優れた磁気特性を有するとともに、Ｂの含有割合の変動に伴う磁気特性のばらつきを十分に抑制可能な希土類磁石を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１６】

【図１】各実施例及び各比較例の希土類磁石におけるＢ含有割合とＨｃＪとの関係を示すグラフである。

【図２】各実施例及び各比較例の希土類磁石におけるＢ含有割合とＢｒとの関係を示すグラフである。

【図３】酸素の含有割合の変化に伴う保磁力の変化を示すグラフである。

【図４】各実施例及び各比較例の希土類磁石におけるＢ含有割合とＨｃＪとの関係を示すグラフである。

【図５】各実施例及び各比較例の希土類磁石におけるＢ含有割合とＢｒとの関係を示すグラフである。

【図６】各参考例の希土類磁石におけるＢの含有割合とＢｒとの関係を示すグラフである。

【図７】各参考例の希土類磁石におけるＢの含有割合とＨｃＪとの関係を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【００１７】

以下、本発明の好適な実施形態について説明する。本実施形態の希土類磁石は、Ｒ、Ｂ、Ａｌ、Ｃｕ、Ｚｒ、Ｃｏ、Ｃ、Ｓｉ及びＦｅを必須元素として含有している。各必須元素の含有割合は、必須元素の合計を基準として、Ｒ：２５～３２質量％、Ｂ：０．８４～０．９８質量％、Ａｌ：０．０３～０．２５質量％、Ｃｕ：０．０１～０．１５質量％、Ｚｒ：０．０３～０．２５質量％、Ｃｏ：３質量％以下（但し、０質量％を含まず。）、Ｃ：０．０３～０．１５質量％、Ｓｉ：０．０２８～１．５質量％、Ｆｅ：６１～７４質量％である。

【００１８】

希土類磁石は、上述の必須元素以外の元素として、例えばＯ、Ｎ、Ｍｎ、Ｃａ、Ｎｉ、Ｃｌ、Ｓ及びＦなど、製造時等において意図せずに混入する不可避不純物（不純物成分）などを含有していてもよい。

【００１９】

磁気特性に一層優れる希土類磁石を得る観点から、希土類磁石全体に対する必須元素の総含有割合は９９質量％以上であることが好ましく、９９．５質量％以上であることがより好ましく、９９．８質量％以上であることがさらに好ましい。

【００２０】

上記不純物成分のうち、希土類磁石全体に対するＯの含有割合は０．２質量％以下である。不純物成分の合計の含有割合は、希土類磁石全体に対し、０．５質量％以下であることが好ましく、０．２質量％以下であることがより好ましい。

【００２１】

上述した組成を有する本実施形態の希土類磁石は、例えば、$R_2T_{14}B$で表される正方晶系の結晶構造を有する粒子状の主相と、この主相間に配置された粒界相とから構成される。粒界相は、例えば、Ｒ元素の含有割合が大きいＲリッチ相やＢの含有割合が大きいＢリッチ相等を含む。ここで、上記Ｔは、主に上述した必須元素のうちのＦｅ及びＣｏである。希土類磁石に含まれるその他の必須元素及び不純物成分は、添加成分として主相及び粒界のいずれにも含まれる場合がある。

【００２２】

希土類磁石に含まれる必須元素のうち、Ｒは、Ｙを含む希土類元素から選ばれる１種以上の元素であり、Ｌａ、Ｃｅ、Ｐｒ、Ｎｄ、Ｓｍ、Ｅｕ、Ｇｄ、Ｔｂ、Ｄｙ、Ｈｏ、Ｅｒ、Ｙｂ、Ｌｕ及びＹからなる群より選ばれる１種以上の元素が挙げられる。なかでも、Ｒとしては、一層優れた磁気特性を得る観点から、Ｎｄ又はＤｙを必須成分として含むと好ましい。

【００２３】

必須元素全体に対するＲの含有割合は、２５～３２質量％である。Ｒの当該含有割合が２５質量％未満であると、主相である$Ｒ_2Ｔ_{14}Ｂ$相が形成され難くなって、軟磁性を有するα－Ｆｅ相が形成され易くなり、その結果ＨｃＪが低下する。一方、Ｒの当該含有割合が３２質量％を超えると、$Ｒ_2Ｔ_{14}Ｂ$相の体積比率が低くなり、Ｂｒが低下する。また、Ｒと酸素とが反応することで酸素の含有割合が過度に増加し、これに伴ってＨｃＪに寄与するＲリッチ相が減少することによりＨｃＪも低下する。一層良好なＢｒ及びＨｃＪを得る観点から、必須元素全体に対するＲの含有割合の下限値は２８質量％、上限値は３０質量％であることが好ましい。必須元素全体に対するＲの含有割合が３０質量％以下であると、主相である$Ｒ_2Ｔ_{14}Ｂ$相の体積比率が特に高くなり、更に良好なＢｒが得られるようになる。

【００２４】

上述のように、ＲとしてはＮｄ又はＤｙが好ましい。特に、$Ｄｙ_2Ｔ_{14}Ｂ$相は、高い異方性磁界を有することから、ＨｃＪを向上させる効果がある。しかしながら、$Ｄｙ_2Ｔ_{14}Ｂ$相が多すぎる場合はＢｒが低下する傾向にあることから、必須元素全体に対するＤｙの含有割合は０．１～８質量％として、Ｒ全体の含有割合（２５～３２質量％）の残部が他の希土類元素（特にＮｄ）となるようにすることが好ましい。必須元素全体に対するＤｙの含有割合は、高いＢｒを得る場合は０．１～３．５質量％であると好ましく、一方、高いＨｃＪを得る場合は３．５～８質量％であると好ましい。

【００２５】

また、希土類磁石における必須元素全体に対するＢ（ホウ素）の含有割合は０．８４～０．９８質量％である。Ｂの当該含有割合が０．８４質量％未満であると、粒界相に軟磁性の$Ｒ_2Ｔ_{17}$相が析出し易くなり、ＨｃＪが低下する。一方、０．９８質量％を超えると、Ｂリッチ相（例えば$Ｎｄ_{1.1}Ｔ_4Ｂ_4$）が過度に形成されて、Ｂｒが不十分となる。これらの観点から、必須元素全体に対するＢの含有割合は、０．８６～０．９８質量％であると好ましく、０．８８～０．９３質量％であるとより好ましい。なお、Ｓｉを含有しない場合、必須元素全体に対するＢの含有割合が０．８７質量％未満になると、ＨｃＪが低下する傾向があったが、上記の通りＳｉを必須元素として含有することによって、必須元素全体に対するＢの含有割合が０．８４質量％付近となっても、ＨｃＪの低下を十分に抑制することができる。

【００２６】

本実施形態の希土類磁石においては、Ｂの含有割合を$Ｒ_2Ｔ_{14}Ｂ$で表される基本組成の化学量論比よりもわずかに小さくすることで、Ｂリッチ相が殆ど形成されないようにし、主相（希土類磁石を構成する主な結晶相）の体積比率を向上させることで、高いＢｒを得ることが可能となる。なお、従来、Ｒ－Ｔ－Ｂ系の希土類磁石の製造においては、異常粒成長を抑制するためにあえてＢリッチ相を形成させることも多かったが、本実施形態では、Ｏの含有割合が０．２質量％以下になる場合であっても、上述した適量のＺｒが含まれることによって、Ｂリッチ相を形成させずに異常粒成長を抑制することができる。その結果、より均一且つ微細な構造を有しており、しかも優れた磁気特性を有する希土類磁石を得ることが可能となる。

【００２７】

また、希土類磁石は、$Ｒ_2Ｔ_{14}Ｂ$の基本組成におけるＴで表される元素としてＦｅ（鉄）に加えてＣｏ（コバルト）を含有しており、Ｃｏの含有割合は０質量％を超え３質量％以下である。ＣｏはＦｅと同様の相を形成するが、Ｃｏを含む相を含むことで、希土類磁石のキュリー温度が向上するほか、粒界相の耐食性が向上する。

【００２８】
さらに、希土類磁石は、必須元素としてＡｌ（アルミニウム）及びＣｕ（銅）を含有している。これらの元素を含むことによって、希土類磁石のＨｃＪ、耐食性及び温度特性が向上する。必須元素全体に対するＡｌの含有割合は、０．０３～０．２５質量％である。また、必須元素全体に対するＣｕの含有割合は０．０１～０．１５質量％である。
【００２９】
特に、本実施形態においては、従来、Ｂ量が少ないと粒界相に軟磁性のR_2T_{17}相が析出してＨｃＪの低下を招き易かったところ、Ｃｕを含有することで、例えば$R_2T_{14}C$相が析出し易くなることによってR_2T_{17}相の析出が抑制され、これによりＨｃＪが良好に維持されるようになる。このようなＣｕによる効果は、上述した本実施形態におけるＢの含有割合が低い組成において、特に顕著に得られる傾向にある。そして、必須元素全体に対するＣｕの含有割合が０．０１質量％未満であったり０．１５質量％を超えたりすると、このような効果が十分に得られず、また、０．０１質量％未満である場合はＢｒの低下も生じる。必須元素全体に対するＣｕの含有割合は、０．０３～０．１１質量％であるとより好ましい。
【００３０】
本実施形態の希土類磁石は、必須元素としてＳｉ（ケイ素）を含有している。必須元素全体に対するＳｉの含有割合は、０．０２８～１．５質量％であり、好ましくは０．０３～１．５質量％である。Ｓｉを含有することによって、Ｂの含有割合が基本組成の化学量論比よりも小さい組成において、ＨｃＪのばらつきを小さくすることができる。すなわち、上述の通りＣｕを含有することによって、ある程度ＨｃＪを良好に維持することが可能となるが、さらにＳｉを上記範囲で含有することによって、ＨｃＪのばらつきを十分に抑制することが可能となる。これは、Ｂが減量された組成において、余剰になるＲ及びＴと、Ｓｉとから$R_6T_{13}Si$若しくはR_5Si_3等のＳｉ化合物相が形成され、R_2T_{17}相の生成が抑制されるためと考えられる。例えば、ＲとしてＮｄ，ＴとしてＦｅを含有する希土類磁石の場合、$Nd_6Fe_{13}Si$相が形成されると考えられる。
【００３１】
必須元素全体に対するＳｉの含有割合が０．０２８質量％未満の場合、ＨｃＪのばらつきを十分に抑制できない。一方、必須元素全体に対するＳｉの含有割合が１．５質量％を超える場合、磁気特性が低下する。一層優れた磁気特性を保持しつつＨｃＪのばらつきを十分に抑制する観点から、必須元素全体に対するＳｉの含有割合は０．０２８～１．３５質量％であることが好ましく、０．０３～１．３５質量％であることがより好ましく、０．０４～０．５０質量％であることがさらに好ましい。
【００３２】
本実施形態の希土類磁石は、必須元素としてＣ（炭素）を含有している。必須元素全体に対するＣの含有割合は０．０３～０．１５質量％である。この範囲でＣを含有することによって、Ｃｕを含有することに伴う$R_2T_{14}C$相の生成が促進され、R_2T_{17}相を低減することができる。
【００３３】
本実施形態の希土類磁石は、必須元素としてＦｅ（鉄）を含有している。必須元素全体に対するＦｅの含有割合は６４～７１質量％である。この範囲でＦｅを含有することによって、磁気特性に優れる希土類磁石を得ることができる。
【００３４】
また、本実施形態の希土類磁石におけるＯ（酸素）の含有割合は、０．２質量％以下であり、Ｏを含有していなくてもよい。Ｏの含有割合が０．２質量％を超えると、非磁性の酸化物相の割合が増大してＢｒやＨｃＪが低下する。特に、本実施形態の希土類磁石のように、Ｂの含有割合が化学量論量よりも小さく、且つＣｕを含む組成とした場合に、上記のような低酸素とすることによる磁気特性の向上効果が顕著に得られる。
【００３５】
さらに、上述のようにＢの含有割合を化学量論量よりも小さくして実質的なＢリッチ（

$R_1T_4B_4$）相を無くし、且つ、上記のような低酸素とすることで焼成時の液相量を増加させることにより、焼成時の焼結性が変化して、得られる希土類磁石は、低温度領域でも十分な焼結がなされたものとなる。その結果、本実施形態の希土類磁石は、焼結後の結晶粒径が微細であり、これによっても高ＨｃＪを発揮し得るものとなり得る。

【００３６】

なお、磁気特性を向上させる観点からは、Ｏの含有割合はできるだけ小さいことが好ましい。Ｏの含有割合が小さくなること、つまりＲの酸化物の含有量が減少することで、ＨｃＪの向上に寄与するＲリッチ相が増加し、$R_2T_{14}B$相や$R_2T_{14}C$相の生成が促進されるとともにR_2T_{17}相の生成が抑制される傾向がある。したがって、Ｓｉを所定割合含有するとともに、Ｏの含有割合を小さくすることによって、Ｂの含有割合が低減された組成であっても、Ｂの含有割合の変動に対する磁気特性の変化を十分に低減することができる。なお、通常、製造時等に大気中の酸素等に由来するＯが不可避的に希土類磁石に取り込まれる傾向がある。そのため、Ｏの含有割合の下限値は、希土類磁石全体に対し、通常０．０３質量％程度、より好ましくは０．００５質量％程度となる。なお、Ｏを含むことで、過焼結を防止し、且つ優れた角形性が得られる場合もあることから、このような特性を良好に得る観点からは、希土類磁石全体に対するＯの含有割合の下限値を上記値とすることが好ましい。Ｏのより好適な含有割合は、希土類磁石全体に対し０．０３～０．１質量％である。

【００３７】

また、Ｎも、磁気特性を向上させる観点から、含有割合はできるだけ小さいことが好ましいが、Ｏ同様に、製造時等に大気中の窒素等に由来するＮが不可避的に希土類磁石に取り込まれる傾向がある。そのため、Ｎの含有割合の下限値は、希土類磁石全体に対し、通常０．０３質量％程度、より好ましくは０．００５質量％程度となる。なお、ＮもＯと同様に過焼結を防止し、且つ優れた角形性が得られる場合もあることから、このような特性を良好に得る観点からは、希土類磁石全体に対するＮの含有割合の下限値を上記値とすることが好ましい。Ｎのより好適な含有割合は、希土類磁石全体に対し０．０３～０．１質量％である。

【００３８】

さらに、本実施形態の希土類磁石は、Ｚｒ（ジルコニウム）を０．０３～０．２５質量％含有する。Ｚｒは、希土類磁石の製造過程での結晶粒の異常成長を抑制することができ、得られる焼結体（希土類磁石）の組織を均一且つ微細にして磁気特性の向上に寄与する。特に、本実施形態のようなＯの含有割合が小さい（０．２質量％以下）場合に、このようなＺｒの効果が顕著となる。

【００３９】

Ｚｒの含有割合が０．０３質量％未満であると、結晶粒の異常成長を抑制する効果が十分に得られなくなり、希土類磁石の角形比が低下する。また、０．２５質量％を超えると、希土類磁石のＢｒ及びＨｃＪが不十分となる。ここで、角形比とは、Ｈｋ／ＨｃＪで表される値であり、Ｈｋとは、磁気ヒステリシスループ（４πＩ－Ｈカーブ）の第２象限における磁化がＢｒの９０％となるときの磁界強度である。この角形比は、外部磁界の作用や温度上昇による減磁のし易さを表すパラメータであり、角形比が小さいと、減磁の程度が大きい性質があることを意味する。また、角形比が小さいと、着磁に要する磁界強度が増大する。さらに、角形比が小さい希土類磁石は、磁気ヒステリシスループの第２象限の形状に問題があるため、磁石としての適用が困難となる傾向にある。

【００４０】

本実施形態の希土類磁石は、必須元素として、上述の元素に加えてＧａを更に含んでいてもよい。この場合、Ｇａの含有割合は、Ｇａを含む必須元素全体に対し、０質量％を超え０．２質量％以下であると好ましく、０．０５～０．１５質量％であるとより好ましい。なお、Ｇａを含む場合も、その他の元素の含有割合は上述のとおりである。Ｇａを含有することによって、希土類磁石の主相の異方性磁界を向上させることが可能となり、希土類磁石の保磁力を向上させることができる。また、希土類磁石は、ＧａとＳｉの両方を含

むことによって、特にＢの含有割合が低減された組成において、Ｂの含有割合の変動に対するＨｃＪの変化を十分に低減することが可能となり、ＨｃＪを高いレベルで安定化させることができる。ただし、Ｇａの含有割合が多すぎる場合、上述の好適な含有割合の範囲にある場合と比べて、飽和磁化が低くなりＢｒが低下する傾向にある。また、Ｇａは比較的高価であるため、製造コスト低減の観点からはその使用量は少ない方が好ましい。

【００４１】

次に、上述した実施形態の希土類磁石の製造方法について説明する。

【００４２】

希土類磁石の製造においては、まず、希土類磁石の各構成元素の原料金属を準備し、これらを用いてストリップキャスティング法等を行なうことにより原料合金を作製する。原料金属としては、例えば、希土類金属や希土類合金、純鉄、フェロボロン、またはこれらの合金が挙げられる。そして、これらを用い、所望とする希土類磁石の組成が得られる原料合金を作製する。なお、原料合金としては、組成が異なる複数のものを準備してもよい。

【００４３】

次に、原料合金を粉砕して、原料合金粉末を準備する。原料合金の粉砕は、粗粉砕工程及び微粉砕工程の２段階で行うことが好ましい。粗粉砕工程は、例えば、スタンプミル、ジョークラッシャー、ブラウンミル等を用い、不活性ガス雰囲気中で行うことができる。また、水素を吸蔵させた後、粉砕を行う水素吸蔵粉砕を行うこともできる。粗粉砕工程においては、原料合金を、粒径が数百μｍ程度となるまで粉砕を行う。

【００４４】

次に、微粉砕工程において、粗粉砕工程で得られた粉砕物を、更に平均粒径が３～５μｍとなるまで微粉砕する。微粉砕は、例えば、ジェットミルを用いて行うことができる。なお、原料合金の粉砕は、必ずしも粗粉砕と微粉砕との２段階で行なう必要はなく、はじめから微粉砕工程を行ってもよい。また、原料合金を複数種類準備した場合は、これらを別々に粉砕して混合するようにすればよい。

【００４５】

続いて、このようにして得られた原料粉末を磁場中で成形して、成形体を得る。より具体的には、原料粉末を電磁石中に配置された金型内に充填した後、電磁石により磁場を印加して原料粉末の結晶軸を配向させながら、原料粉末を加圧することにより成形を行なう。この磁場中の成形は、例えば、１２．０～１７．０ｋＯｅの磁場中、０．７～１．５ｔ／ｃｍ^{2}程度の圧力で行えばよい。

【００４６】

磁場中成形後、成形体を真空又は不活性ガス雰囲気中で焼成し、焼結体を得る。焼成は、組成、粉砕方法、粒度等の条件に応じて適宜設定することが好ましいが、例えば、１０００～１１００℃で１～５時間行なえばよい。

【００４７】

そして、焼結体に対して、必要に応じて時効処理を施すことにより、希土類磁石を得る。時効処理を行うことによって、得られる希土類磁石のＨｃＪが向上する傾向にある。時効処理は、例えば、２段階に分けて行うことができ、８００℃近傍、及び６００℃近傍の２つの温度条件で時効処理を行うと好ましい。このような条件で時効処理を行うと、特に優れたＨｃＪが得られる傾向にある。なお、時効処理を１段階で行う場合は、６００℃近傍の温度とすることが好ましい。

【００４８】

以上、好適な実施形態の希土類磁石及びその製造方法について説明したが、本発明の希土類磁石の製造方法は上記の方法に限定されるものではない。上述の方法では、原料合金を一旦作製した後、粉砕して得られる原料粉末を磁場中成形しているが、例えば、原料合金を作製せずに、所定量に秤量された原料金属を混合して磁場中成形を行い、焼結させて希土類磁石を形成してもよい。

【００４９】

本実施形態の希土類磁石は、上述のように、Ｂの含有割合が小さいことから、Ｂリッチ相の形成が抑制されて主相である$R_2T_{14}B$相の割合が多くなるため、優れたＢｒが得られる。また、Ｃｕを含むことから、Ｂの含有割合が少ないにもかかわらず軟磁性のR_2T_{17}相の形成が抑制され、ＨｃＪを向上させることができる。また、Ｓｉをさらに含むことから、R_2T_{17}相の形成が一層抑制される。これによって、十分に高い磁気特性を維持しつつＨｃＪのばらつきを十分に抑制することができる。さらに、本実施形態の希土類磁石では、Ｏの含有割合が小さいため、実質的なＲ量が多い状態となり、これにより、ＨｃＪに寄与するＲリッチ相が増大したり、$R_2T_{14}B$相、$R_2T_{14}C$相、$R_6T_{13}Si$若しくはR_5Si_3等のＳｉ化合物相の形成が有利となってR_2T_{17}相が更に形成され難くなったりする。その結果、上述したようなＢｒやＨｃＪの向上効果が特に顕著に得られるようになる。

【００５０】

以上、本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に何ら限定されるものではない。

【実施例】

【００５１】

以下、実施例及び比較例に基づき本発明をさらに具体的に説明するが、本発明は以下の実施例に何ら限定されるものではない。

【００５２】

まず、希土類磁石の組成において、Ｂ、Ｏ、Ｃｕの含有割合による磁気特性の変化を検討した。

【００５３】

（参考例１～１６）

［希土類磁石の製造］

希土類磁石の原料を準備し、これらを用いてストリップキャスティング法により、下記表１で表される参考例１～１６の希土類磁石の組成が得られるように、それぞれ原料合金を作製した。

【００５４】

次に、得られた原料合金に水素を吸蔵させた後、Ａｒ雰囲気で６００℃、１時間の脱水素を行う水素粉砕処理を行った。なお、本参考例では、この水素粉砕から、焼成までの各工程（微粉砕及び成形）を、１００ｐｐｍ未満の酸素濃度の雰囲気下で行なった。

【００５５】

続いて、水素粉砕後の粉末に、粉砕助剤としてオレイン酸アミドを０．１５質量％添加し、ナウターミキサーを用いて５～３０分間混合した後、ジェットミルを用いて微粉砕を行い、平均粒径が３μｍである原料粉末を得た。

【００５６】

それから、原料粉末を、電磁石中に配置された金型内に充填し、１５ｋＯｅの磁場を印加しながら１．２ｔ／cm^2の圧力を加える磁場中成形を行い、成形体を得た。その後、成形体を、真空中で１０３０℃で４時間焼成した後、急冷して焼結体を得た。そして、得られた焼結体に対し、８５０℃で１時間、及び、５４０℃で２時間（ともにＡｒ雰囲気中）の２段階の時効処理を施し、参考例１～１６の希土類磁石をそれぞれ得た。

【００５７】

［特性評価］

参考例１～１６で得られた希土類磁石について、Ｂ－Ｈトレーサーを用いてＢｒ（残留磁束密度）、ＨｃＪ（保磁力）及びＨｋ／ＨｃＪ（角形比）をそれぞれ測定した。得られた結果を表１にまとめて示す。角形比は、ＨｃＪとＨｋとを用いて、下記式（１）によって求めた。角形比は磁石性能の指標となるものであり、Ｂ－Ｈトレーサーを用いて測定した磁気ヒステリシスループの第２象限における角張の度合いを表す。式（１）におけるＨｋは、磁気ヒステリシスループの第２象限において、残留磁束密度に対する磁化の割合が９０％になるときの外部磁界強度である。

【００５８】
角形比（％）＝Ｈｋ／ＨｃＪ×１００　　（１）
【００５９】
【表１】

	希土類磁石の組成											Br	HcJ	Hk/HcJ
	必須元素含有量	必須元素の割合								O	N	(kG)	(kOe)	(%)
		Nd	Dy	Fe	Co	Al	Cu	Zr	B	C				
参考例1	99.90	28.2	1.5	68.3	0.5	0.20	0.08	0.21	0.98	0.10	0.05	0.05	14.26	17.09	99
参考例2	99.90	28.1	1.5	68.4	0.5	0.20	0.08	0.19	0.95	0.10	0.05	0.05	14.27	17.10	98
参考例3	99.90	28.1	1.5	68.4	0.5	0.22	0.08	0.21	0.92	0.11	0.05	0.05	14.30	17.55	99
参考例4	99.90	28.1	1.5	68.4	0.5	0.21	0.08	0.20	0.89	0.09	0.05	0.05	14.32	18.40	98
参考例5	99.90	28.1	1.5	68.4	0.5	0.21	0.08	0.19	0.88	0.09	0.05	0.05	14.28	17.30	98
参考例6	99.90	28.1	1.5	68.5	0.5	0.20	0.08	0.19	0.87	0.09	0.05	0.05	14.24	16.30	99
参考例7	99.90	28.1	1.5	68.5	0.5	0.20	0.08	0.19	0.84	0.10	0.05	0.05	14.23	14.75	97
参考例8	99.74	28.1	1.5	68.2	0.5	0.20	0.08	0.20	0.97	0.09	0.21	0.05	14.21	16.88	94
参考例9	99.73	28.1	1.5	68.3	0.5	0.21	0.07	0.19	0.95	0.12	0.22	0.05	14.20	16.79	95
参考例10	99.73	28.2	1.5	68.1	0.5	0.20	0.08	0.19	0.93	0.09	0.22	0.05	14.19	16.83	93
参考例11	99.73	28.2	1.5	68.2	0.5	0.20	0.08	0.20	0.89	0.11	0.22	0.05	14.22	16.91	92
参考例12	99.45	28.0	1.5	68.1	0.5	0.20	0.07	0.20	0.89	0.09	0.50	0.05	–	–	–
参考例13	99.90	28.2	1.5	68.4	0.5	0.21	0.00	0.20	0.89	0.10	0.05	0.05	14.40	16.47	63
参考例14	99.90	28.1	1.5	68.4	0.5	0.21	0.04	0.21	0.89	0.13	0.05	0.05	14.35	17.01	91
参考例15	99.90	28.2	1.5	68.3	0.5	0.20	0.10	0.20	0.89	0.11	0.05	0.05	14.23	18.45	95
参考例16	99.90	28.1	1.5	68.3	0.5	0.20	0.17	0.20	0.89	0.13	0.05	0.05	14.18	18.89	97

表中、「必須元素の割合」は、必須元素の総量を基準とする各元素の含有割合（質量％）を示す。
「必須元素含有量」、「Ｏ」及び「Ｎ」の数値は、希土類磁石全体基準の含有割合（質量％）を示す。

【００６０】

Ｏの含有割合が０．０５質量％であり、必須元素全体に対するＢの含有割合が０．８４～１．００質量％の範囲で異なる希土類磁石（参考例１～７）について、Ｂの含有割合に対するＢｒの値をプロットしたグラフを図６に、ＨｃＪの値をプロットしたグラフを図７にそれぞれ示す。また、これらの図中には、比較のため、Ｏの含有割合が０．２１又は０．２２質量％（「約０．２２質量％」とまとめて示す）であり、必須元素全体に対するＢの含有割合が０．８９～０．９７質量％の範囲で異なる希土類磁石（参考例８～１１）について、Ｂの含有割合に対するＢｒ又はＨｃＪの値をそれぞれプロットして得られたグラフも併せて示す。

【００６１】

図６及び図７より、Ｏの含有割合が０．０５質量％と小さい場合は、Ｂの含有割合が１質量％未満の特定の範囲（例えば、必須元素全体に対して０．８８～０．９８質量％）においてＢｒ及びＨｃＪが向上していることが確認された。一方、Ｏの含有割合が約０．２２質量％である場合は、このようなＢｒ及びＨｃＪの向上効果は得られていなかった。

【００６２】

このことから、Ｏの含有割合が小さく（０．２質量％以下）、しかも必須元素全体に対するＢの含有割合が１質量％未満の特定の範囲である場合に、優れたＢｒ及びＨｃＪの両方が得られることが確認された。なお、参考例１２の希土類磁石は、Ｏの含有割合が０．５０質量％であるものであるが、低密度であり、測定し得る程度の磁気特性が得られなかった。

【００６３】

Ｂの含有割合が同じ（０．８９質量％）で、必須元素全体に対するＣｕの含有割合が０．００～０．１７質量％の範囲で異なる参考例４、１３～１６の希土類磁石の評価結果から、Ｃｕの含有割合が大きくなるとＢｒの低下が見られるものの、Ｃｕの含有割合が小さくなり過ぎるとＨｃＪが低下してしまうことが確認された。その結果、希土類磁石は、少なくともＣｕを含み、しかもＣｕの含有割合が大きくなり過ぎない場合（必須元素全体に対して０．１５質量％以下の場合）に、優れたＢｒ及びＨｃＪを両立させ得ることが確認された。

【００６４】

以上より、Ｂを基本組成よりも減量した組成において、必須元素全体に対するＣｕの含有割合を０．０１～０．１５質量％、希土類磁石全体に対するＯの含有割合を０．２質量％以下にすることで、優れた磁気特性が得られることが分かった。しかしながら、図４に示すとおり、Ｃｕを含有する場合でも、Ｂの含有割合によるＨｃＪのばらつきが大きいことが分かった。そこで、良好な磁気特性を維持しつつＨｃＪのばらつきが低減可能な組成について検討した。

【００６５】

（参考例１７～２５、実施例８～２１，２４～４５、比較例１～１６）

［希土類磁石の製造］

希土類磁石の原料を準備し、これらを用いてストリップキャスティング法により、下記表２に示す組成を有する原料合金を作製した。なお、それぞれの原料合金における不可避不純物の含有量は、０．５質量％以下であった。

【００６６】

【表２】

	合金組成(質量%)												
原料合金	Nd	Dy	Fe	Co	Si	Al	Ga	Cu	Zr	B	O	N	C
合金 a-1	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	1.03	0.02	0.00	0.01
合金 a-2	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	1.00	0.02	0.00	0.01
合金 a-3	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.98	0.02	0.00	0.01
合金 a-4	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.95	0.02	0.00	0.01
合金 a-5	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.93	0.02	0.00	0.01
合金 a-6	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.91	0.02	0.00	0.01
合金 a-7	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.88	0.02	0.00	0.01
合金 a-8	28.00	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	1.03	0.02	0.00	0.01
合金 a-9	31.50	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	1.03	0.02	0.00	0.01
合金 a-10	29.60	0.00	残部	0.15	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.93	0.02	0.00	0.01
合金 a-11	29.60	0.00	残部	3.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.93	0.02	0.00	0.01
合金 a-12	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.95	0.02	0.00	0.01
合金 a-13	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	0.20	0.95	0.02	0.00	0.01
合金 a-14	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.95	0.02	0.00	0.01
合金 a-15	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.07	0.20	0.95	0.02	0.00	0.01
合金 a-16	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.05	0.95	0.02	0.00	0.01
合金 a-17	29.60	0.00	残部	0.50	0.00	0.20	0.00	0.00	0.25	0.95	0.02	0.00	0.01
合金 b-1	0.00	30.00	残部	0.00	6.00	0.20	0.00	1.50	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
合金 b-2	0.00	30.00	残部	0.00	0.00	0.20	0.00	1.50	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
合金 b-3	0.00	30.00	残部	0.00	0.00	0.20	6.00	1.50	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
合金 b-4	16.00	20.00	残部	0.00	0.60	0.20	0.00	1.50	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01

【００６７】

次に、得られた原料合金に、室温で水素を吸蔵させた後、Ａｒ雰囲気で６００℃、１時間の脱水素を行う水素粉砕処理を行った。なお、本実施例及び比較例では、この水素粉砕から、焼成までの各工程（微粉砕及び成形）を、１００ｐｐｍ未満の酸素濃度の雰囲気下で行なった。

【００６８】

続いて、水素粉砕後の粉末に、粉砕助剤としてオレイン酸アミドを０．１５質量％添加し、ナウターミキサーを用いて５～３０分間混合した後、ジェットミルを用いて微粉砕を行い、平均粒径が３μｍである原料合金粉末を得た。

【００６９】

表３～表５に示すように、所望の組成を有する各参考例、各実施例及び各比較例の希土類磁石を作製するために、得られた各原料合金粉末を配合した。配合した原料粉末を、電磁石中に配置された金型内に充填し、１５ｋＯｅの磁場を印加しながら１．２ｔ／ｃｍ^{2}の圧力を加える磁場中成形を行い、成形体を得た。

【００７０】

得られた成形体を、真空中で１０３０℃で４時間焼成した後、急冷して焼結体を得た。そして、得られた焼結体に対し、８５０℃で１時間、及び、５４０℃で２時間（ともにＡｒ雰囲気中）の２段階の時効処理を施し、各実施例及び各比較例の希土類磁石をそれぞれ得た。

【００７１】

［特性評価］

参考例１～１６と同様にして、得られた希土類磁石について、Ｂ－Ｈトレーサーを用いてＢｒ（残留磁束密度）、ＨｃＪ（保磁力）及びＨｋ／ＨｃＪ（角形比）をそれぞれ測定した。得られた結果を表３～５に示す。

【００７２】

【表３】

	原料合金の配合	希土類磁石の組成													特性評価		
		必須元素含有量	必須元素の割合										O	N	Br (kG)	HcJ (kOe)	Hk/HcJ (%)
			Nd	Dy	Fe	Co	Si	Al	Cu	Zr	B	C					
参考例17	a-1,b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.27	0.48	0.031	0.22	0.07	0.19	0.98	0.11	0.05	0.05	14.25	17.08	99
参考例18	a-2, b-1,b-2	99.90	28.16	1.48	68.34	0.47	0.028	0.22	0.08	0.19	0.95	0.09	0.05	0.05	14.26	17.11	99
参考例19	a-3, b-1,b-2	99.90	28.16	1.49	68.34	0.47	0.030	0.20	0.08	0.20	0.93	0.10	0.05	0.05	14.29	17.65	100
参考例20	a-4, b-1,b-2	99.90	28.13	1.49	68.37	0.48	0.033	0.21	0.07	0.21	0.90	0.11	0.05	0.05	14.29	18.20	99
参考例21	a-5, b-1,b-2	99.90	28.14	1.50	68.42	0.48	0.029	0.19	0.08	0.19	0.88	0.10	0.05	0.05	14.27	17.33	97
参考例22	a-6, b-1,b-2	99.90	28.17	1.51	68.37	0.48	0.030	0.19	0.07	0.22	0.87	0.10	0.05	0.05	14.22	16.89	99
参考例23	a-7, b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.43	0.48	0.028	0.20	0.08	0.19	0.84	0.11	0.05	0.05	14.20	16.33	98
実施例8	a-1, b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.26	0.48	0.058	0.20	0.08	0.19	0.98	0.11	0.05	0.05	14.24	17.07	99
実施例9	a-2, b-1,b-2	99.90	28.16	1.48	68.30	0.47	0.061	0.22	0.08	0.19	0.95	0.09	0.05	0.05	14.25	17.25	99
実施例10	a-3, b-1,b-2	99.90	28.16	1.49	68.30	0.47	0.060	0.21	0.08	0.20	0.93	0.10	0.05	0.05	14.28	17.60	100
実施例11	a-4, b-1,b-2	99.90	28.13	1.49	68.34	0.48	0.061	0.21	0.07	0.21	0.90	0.11	0.05	0.05	14.30	17.90	99
実施例12	a-5, b-1,b-2	99.90	28.14	1.50	68.39	0.48	0.059	0.19	0.08	0.19	0.88	0.10	0.05	0.05	14.25	17.78	97
実施例13	a-6, b-1,b-2	99.90	28.17	1.51	68.32	0.48	0.059	0.21	0.07	0.22	0.87	0.10	0.05	0.05	14.22	17.32	99
実施例14	a-7, b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.40	0.48	0.060	0.20	0.08	0.19	0.84	0.11	0.05	0.05	14.22	16.95	98
実施例15	a-1, b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.21	0.48	0.118	0.19	0.08	0.19	0.98	0.11	0.05	0.05	14.20	17.22	99
実施例16	a-2, b-1,b-2	99.90	28.16	1.48	68.24	0.47	0.121	0.22	0.08	0.19	0.95	0.09	0.05	0.05	14.22	17.50	99
実施例17	a-3, b-1,b-2	99.90	28.16	1.49	68.24	0.47	0.120	0.21	0.08	0.20	0.93	0.10	0.05	0.05	14.24	17.73	100
実施例18	a-4, b-1,b-2	99.90	28.13	1.49	68.29	0.48	0.118	0.20	0.07	0.21	0.90	0.11	0.05	0.05	14.25	18.00	99
実施例19	a-5, b-1,b-2	99.90	28.14	1.50	68.33	0.48	0.119	0.19	0.08	0.19	0.88	0.10	0.05	0.05	14.21	17.81	97
実施例20	a-6, b-1,b-2	99.90	28.17	1.51	68.29	0.48	0.122	0.18	0.07	0.22	0.87	0.10	0.05	0.05	14.19	17.55	99
実施例21	a-7, b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.34	0.48	0.120	0.20	0.08	0.19	0.84	0.11	0.05	0.05	14.17	17.22	98
比較例1	a-1, b-2	99.90	28.16	1.49	68.30	0.48	0.000	0.20	0.08	0.21	0.99	0.10	0.05	0.05	14.26	17.09	99
比較例2	a-2, b-2	99.90	28.15	1.48	68.38	0.47	0.000	0.20	0.08	0.19	0.95	0.10	0.05	0.05	14.27	17.10	98
比較例3	a-3, b-2	99.90	28.13	1.50	68.36	0.47	0.000	0.22	0.08	0.21	0.92	0.11	0.05	0.05	14.30	17.55	99
比較例4	a-4, b-2	99.90	28.12	1.50	68.44	0.48	0.001	0.21	0.08	0.20	0.89	0.09	0.05	0.05	14.32	18.40	98
比較例5	a-5, b-2	99.90	28.14	1.51	68.43	0.47	0.000	0.21	0.08	0.19	0.88	0.09	0.05	0.05	14.28	17.30	98
比較例6	a-6, b-2	99.90	28.15	1.50	68.45	0.48	0.000	0.20	0.08	0.19	0.87	0.09	0.05	0.05	14.24	16.30	99
比較例7	a-7, b-2	99.90	28.15	1.50	68.47	0.48	0.001	0.20	0.08	0.19	0.84	0.10	0.05	0.05	14.23	14.75	97

表中、「必須元素の割合」は、必須元素の総量を基準とする各元素の含有割合（質量%）を示す。

「必須元素含有量」、「O」及び「N」の数値は、希土類磁石全体基準の含有割合（質量%）を示す。

【００７３】

【表４】

	原料合金の配合	希土類磁石の組成													特性評価		
		必須元素含有量	必須元素の割合										O	N	Br (kG)	HcJ (kOe)	Hk/HcJ (%)
			Nd	Dy	Fe	Co	Si	Al	Cu	Zr	B	C					
参考例24	a-8,b-1,b-2	99.90	26.62	1.50	69.81	0.48	0.031	0.22	0.07	0.19	0.98	0.11	0.05	0.05	14.25	17.08	99
参考例25	a-9,b-4	99.90	30.58	0.97	66.39	0.47	0.028	0.22	0.08	0.19	0.98	0.09	0.05	0.05	14.26	17.11	99
実施例24	a-10,b-1,b-2	99.90	28.17	1.51	68.70	0.12	0.059	0.21	0.07	0.20	0.86	0.10	0.05	0.05	14.22	17.32	99
実施例25	a-11,b-1,b-2	99.90	28.13	1.52	66.07	2.77	0.060	0.21	0.08	0.19	0.86	0.11	0.05	0.05	14.22	17.32	98
実施例26	a-12,b-1,b-2	99.90	28.16	1.51	68.43	0.48	0.119	0.04	0.08	0.21	0.88	0.10	0.05	0.05	14.21	17.81	97
実施例27	a-13,b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.23	0.49	0.120	0.25	0.08	0.19	0.88	0.11	0.05	0.05	14.19	17.89	96
実施例28	a-14,b-1,b-2	99.90	28.16	1.51	68.30	0.48	0.119	0.22	0.02	0.21	0.88	0.10	0.05	0.05	14.21	17.81	97
実施例29	a-15,b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.23	0.49	0.118	0.20	0.15	0.19	0.88	0.09	0.05	0.05	14.22	17.84	98
実施例30	a-16,b-1,b-2	99.90	28.16	1.51	68.41	0.48	0.120	0.22	0.08	0.04	0.88	0.10	0.05	0.05	14.21	17.81	97
実施例31	a-17,b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.23	0.49	0.119	0.20	0.07	0.25	0.88	0.11	0.05	0.05	14.17	17.71	99
実施例32	a-4, b-1,b-2	99.92	28.15	1.49	68.34	0.47	0.058	0.21	0.08	0.21	0.89	0.10	0.03	0.05	14.32	18.30	98
実施例33	a-4, b-1,b-2	99.90	28.13	1.49	68.34	0.48	0.061	0.21	0.07	0.21	0.90	0.11	0.05	0.05	14.30	17.90	99
実施例34	a-4, b-1,b-2	99.89	28.13	1.49	68.34	0.48	0.061	0.21	0.07	0.21	0.90	0.11	0.06	0.05	14.25	17.78	98
実施例35	a-4, b-1,b-2	99.86	28.13	1.50	68.37	0.49	0.061	0.19	0.07	0.20	0.89	0.09	0.09	0.05	14.00	17.41	99
実施例36	a-4, b-1,b-2	99.81	28.14	1.50	68.36	0.49	0.061	0.19	0.07	0.20	0.89	0.09	0.14	0.05	13.89	17.10	99
比較例8	a-4, b-1,b-2	99.65	28.19	1.51	68.30	0.49	0.059	0.20	0.07	0.20	0.89	0.09	0.30	0.05	13.68	16.98	99
実施例37	a-1, b-1,b-2	99.92	28.14	1.48	68.27	0.49	0.060	0.20	0.07	0.20	0.98	0.10	0.03	0.05	14.29	17.18	100
実施例38	a-1, b-1,b-2	99.90	28.15	1.50	68.28	0.48	0.058	0.20	0.08	0.19	0.98	0.09	0.05	0.05	14.24	17.07	99
比較例9	a-1, b-1,b-2	99.65	28.19	1.50	68.22	0.48	0.059	0.20	0.08	0.20	0.98	0.09	0.30	0.05	13.66	16.72	98

表中、「必須元素の割合」は、必須元素の総量を基準とする各元素の含有割合（質量%）を示す。

「必須元素含有量」、「O」及び「N」の数値は、希土類磁石全体基準の含有割合（質量%）を示す。

【００７４】

【表５】

	原料合金の配合	希土類磁石の組成															特性評価		
		必須元素含有量	必須元素の割合												O	N	Br (kG)	HcJ (kOe)	Hk/HcJ (%)
			Nd	Dy	Fe	Co	Si	Al	Cu	Zr	B	C	Ga						
実施例39	a−1, b−1,b−2,b−3	99.90	28.14	1.50	68.62	0.02	0.058	0.21	0.08	0.21	0.98	0.11	0.07	0.05	0.05	14.20	17.78	99
実施例40	a−2, b−1,b−2,b−3	99.90	28.16	1.48	68.24	0.47	0.061	0.20	0.08	0.19	0.95	0.09	0.08	0.05	0.05	14.22	18.10	98
実施例41	a−3, b−1,b−2,b−3	99.90	28.13	1.49	68.26	0.48	0.059	0.21	0.08	0.20	0.93	0.10	0.06	0.05	0.05	14.26	18.33	98
実施例42	a−4, b−1,b−2,b−3	99.90	28.16	1.49	68.23	0.49	0.059	0.21	0.07	0.21	0.90	0.11	0.07	0.05	0.05	14.28	18.59	99
実施例43	a−5, b−1,b−2,b−3	99.90	28.14	1.50	68.27	0.49	0.061	0.19	0.08	0.20	0.88	0.10	0.08	0.05	0.05	14.25	18.00	98
実施例44	a−6, b−1,b−2,b−3	99.90	28.17	1.51	68.25	0.48	0.058	0.21	0.07	0.22	0.87	0.10	0.07	0.05	0.05	14.22	17.65	99
実施例45	a−7, b−1,b−2,b−3	99.90	28.14	1.49	68.35	0.50	0.057	0.19	0.07	0.19	0.84	0.11	0.07	0.05	0.05	14.21	17.33	96
比較例10	a−1, b−2,b−3	99.90	28.14	1.50	68.18	0.47	0.000	0.22	0.08	0.18	0.98	0.11	0.14	0.05	0.05	14.18	18.00	99
比較例11	a−2, b−2,b−3	99.90	28.16	1.48	68.25	0.47	0.000	0.20	0.07	0.20	0.95	0.09	0.13	0.05	0.05	14.20	18.43	99
比較例12	a−3, b−2,b−3	99.90	28.16	1.49	68.21	0.48	0.000	0.21	0.08	0.20	0.93	0.10	0.14	0.05	0.05	14.24	18.93	98
比較例13	a−4, b−2,b−3	99.90	28.13	1.49	68.25	0.48	0.000	0.21	0.07	0.21	0.90	0.11	0.15	0.05	0.05	14.26	19.33	99
比較例14	a−5, b−2,b−3	99.90	28.14	1.50	68.29	0.49	0.000	0.19	0.07	0.19	0.88	0.10	0.14	0.05	0.05	14.23	18.43	97
比較例15	a−6, b−2,b−3	99.90	28.17	1.51	68.24	0.48	0.000	0.21	0.07	0.22	0.87	0.10	0.14	0.05	0.05	14.20	17.33	99
比較例16	a−7, b−2,b−3	99.90	28.18	1.50	68.20	0.49	0.000	0.20	0.15	0.18	0.84	0.11	0.15	0.05	0.05	14.19	16.11	99

表中、「必須元素の割合」は、必須元素の総量を基準とする各元素の含有割合(質量%)を示す。
「必須元素含有量」、「O」及び「N」の数値は、希土類磁石全体基準の含有割合(質量%)を示す。

【００７５】

図１は、参考例１～７（Ｓｉ含有割合：約０．０３質量％）、実施例８～１４（Ｓｉ含有割合：約０．０６質量％）、実施例１５～２１（Ｓｉ含有割合：約０．１２質量％）及び比較例１～７（Ｓｉ無し）の希土類磁石について、Ｂの含有割合に対するＨｃＪの値を

プロットしたグラフである。図２は、参考例１～７（Ｓｉ含有割合：約０．０３質量％）、実施例８～１４（Ｓｉ含有割合：約０．０６質量％、実施例１５～２１（Ｓｉ含有割合：約０．１２質量％）及び比較例１～７（Ｓｉ無し）の希土類磁石について、Ｂの含有割合に対するＢｒの値をプロットしたグラフである。

【００７６】

図１に示す結果から、必須元素全体に対してＳｉを約０．０３～０．１２質量％含有する参考例１～７及び実施例８～２１の希土類磁石は、Ｓｉを意図的に添加していない比較例１～７の希土類磁石に比べて、Ｂの含有割合の変動に対するＨｃＪの変化が小さいことが確認された。Ｓｉを意図的に添加していない比較例１～７の希土類磁石は、必須元素全体に対するＢの含有割合が０．８８質量％未満になると、急激にＨｃＪが低下してしまうことが確認された。図２に示す結果から、必須元素全体に対しＳｉを約０．０３～０．１２質量％含有する実施例１～２１の希土類磁石は、Ｓｉを添加していない比較例１～７の希土類磁石と同等のＢｒを示すことが確認された。

【００７７】

以上の結果より、実施例８～２１の希土類磁石は、Ｂの含有割合が０．８８質量％付近でバラついた場合であっても、ＨｃＪは大きく低下しないことが確認された。すなわち、実施例８～２１の希土類磁石では、良好な磁気特性を維持するためのＢの含有割合の下限値を低減できることが確認された。このように、本発明の希土類磁石は、Ｂの含有割合の変動による影響を軽減するとともに、より広いＢ含有割合の範囲で良好な磁気特性を維持することができるため、量産スケールにおいて特に有用である。

【００７８】

図３は、実施例３２～３６及び比較例８（Ｂ含有割合：約０．９質量％）、並びに実施例３７～３８及び比較例９（Ｂ含有割合：約０．９８質量％）の希土類磁石について、Ｏ（酸素）の含有割合に対するＨｃＪの値をそれぞれプロットしたグラフである。図３に示す結果から、Ｏの含有割合を低くすることによって、ＨｃＪをさらに向上できることが確認された。

【００７９】

図４は、図１に示した実施例８～１４（Ｓｉ含有割合：約０．０６質量％）及び比較例１～７（Ｓｉ無し）のＨｃＪの値とともに、比較例１０～１６（Ｇａ含有割合：約０．１４質量％）及び実施例３９～４５（Ｓｉ含有割合：０．０６質量％、Ｇａ含有割合：約０．０７質量％）の希土類磁石について、Ｂの含有割合に対するＨｃＪの値をプロットしたグラフである。

【００８０】

図５は、図２に示した実施例８～１４（Ｓｉ含有割合：約０．０６質量％）及び比較例１～７（Ｓｉ無し）のＢｒの値とともに、比較例１０～１６（Ｇａ含有割合：約０．１４質量％）及び実施例３９～４５（Ｓｉ含有割合：０．０６質量％、Ｇａ含有割合：約０．０７質量％）の希土類磁石について、Ｂの含有割合に対するＢｒの値をプロットしたグラフである。

【００８１】

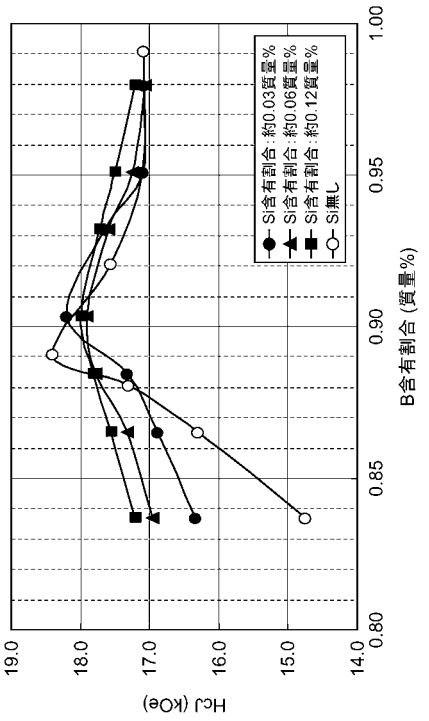
図４に示す結果から、Ｓｉが意図的に添加されておらず、且つＧａの含有割合が約０．１４質量％である希土類磁石は、Ｂの含有割合が０．８８質量％付近において、Ｂの含有割合の変動に対してＨｃＪの変化が大きいことが確認された。一方、Ｓｉの含有割合が０．０６質量％である実施例８～１４及びＳｉとＧａをともに含有する実施例３９～４５の希土類磁石は、Ｓｉを意図的に添加していない比較例１～７の希土類磁石やＧａの含有割合が約０．１４質量％でありＳｉが意図的に添加されていない比較例１０～１６の希土類磁石に比べて、Ｂの含有割合の変動に対するＨｃＪの変化を低減できることが確認された。また、ＳｉとＧａの両方を含有する希土類磁石は、Ｂの含有割合の変動に対するＨｃＪの変化が小さく、且つＨｃＪの値を高くできることが確認された。

【００８２】

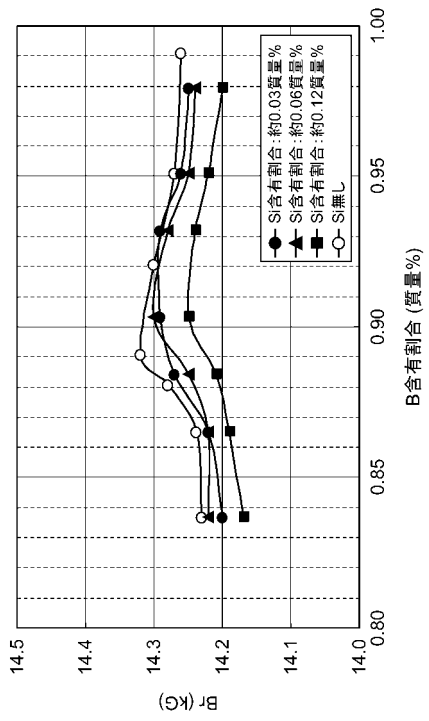
図５に示す結果から、Ｓｉ及びＧａをともに含有する実施例３９～４５の希土類磁石は

、Ｓｉを添加していない比較例１～７の希土類磁石と同等のＢｒを示すことが確認された。

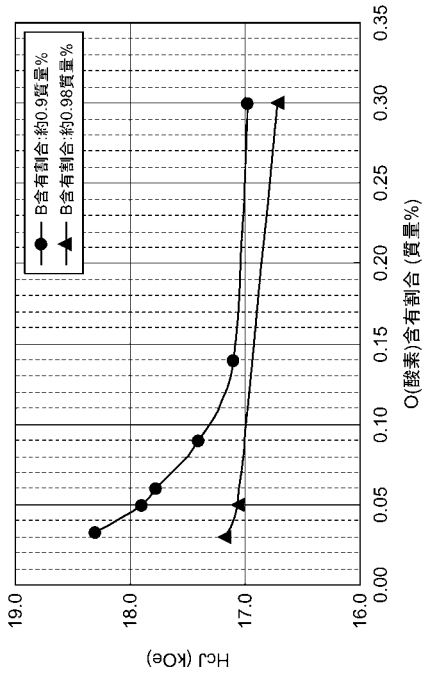
【図１】



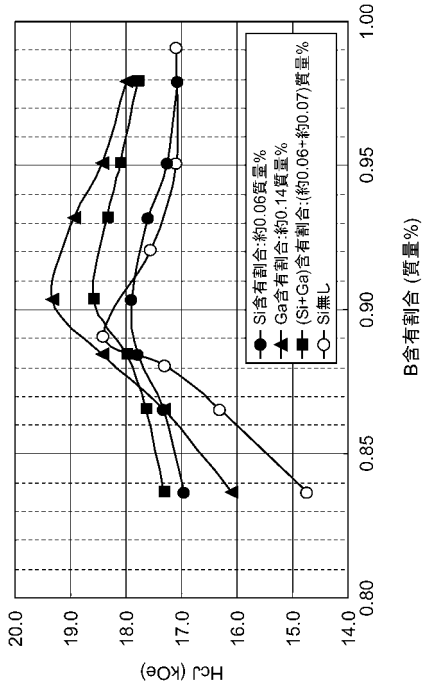
【図２】



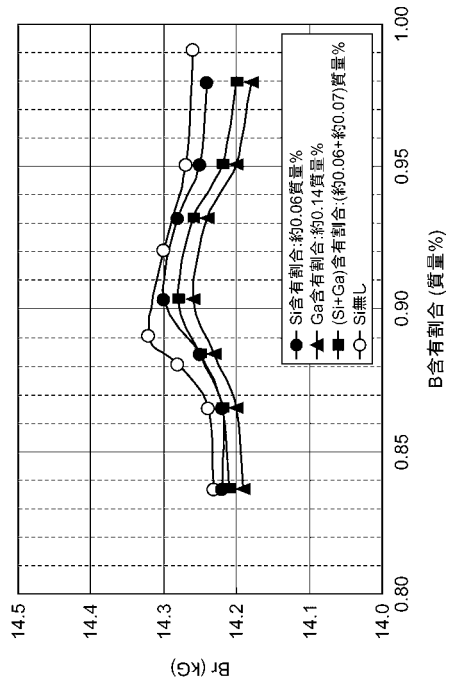
【図３】


B含有割合:約0.9質量%
B含有割合:約0.98質量%
HcJ (kOe)
O(酸素)含有割合 (質量%)

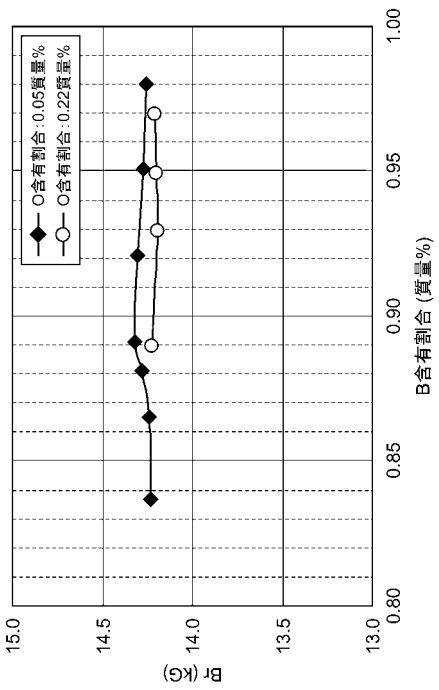
【図４】


Si含有割合:約0.06質量%
Ga含有割合:約0.14質量%
(Si+Ga)含有割合:(約0.06+約0.07)質量%
Si無し
HcJ (kOe)
B含有割合 (質量%)

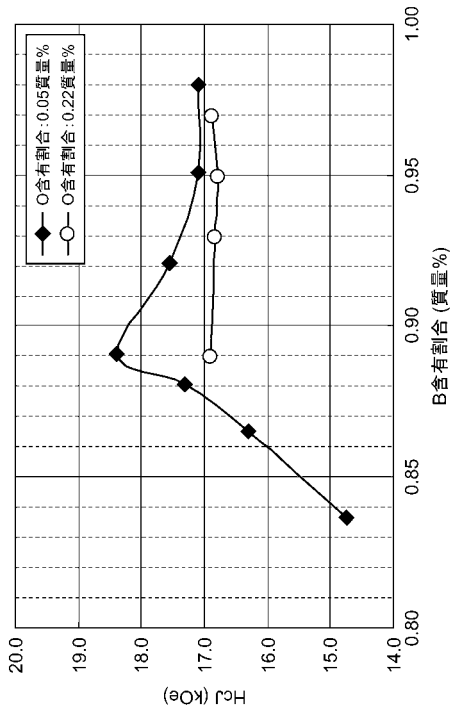
【図５】


Si含有割合:約0.06質量%
Ga含有割合:約0.14質量%
(Si+Ga)含有割合:(約0.06+約0.07)質量%
Si無し
Br (kG)
B含有割合 (質量%)

【図６】


O含有割合:0.05質量%
O含有割合:0.22質量%
Br (kG)
B含有割合 (質量%)

【図７】


O含有割合:0.05質量%
O含有割合:0.22質量%
HcJ (kOe)
B含有割合 (質量%)
20.0
19.0
18.0
17.0
16.0
15.0
14.0
0.80
0.85
0.90
0.95
1.00

フロントページの続き

(72)発明者　中根　誠
東京都中央区日本橋一丁目１３番１号　ＴＤＫ株式会社内
(72)発明者　岩崎　信
東京都中央区日本橋一丁目１３番１号　ＴＤＫ株式会社内
(72)発明者　國枝　良太
東京都中央区日本橋一丁目１３番１号　ＴＤＫ株式会社内

審査官　長谷川　直也

(56)参考文献　特開平０６－２３１９１６（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－２１９７２３（ＪＰ，Ａ）
特開２００４－１６５４８２（ＪＰ，Ａ）
特開２００４－１４９８５１（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－０６４０１０（ＪＰ，Ａ）
国際公開第０３／００３３９２（WO，Ａ１）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｆ　１／００－　１／１１、　１／４０、
４１／００－４１／０４、
４１／０８－４１／１０、
Ｂ２２Ｆ　１／００－　８／００、
Ｃ２２Ｃ　１／０４－　１／０５、
３３／０２、３８／００