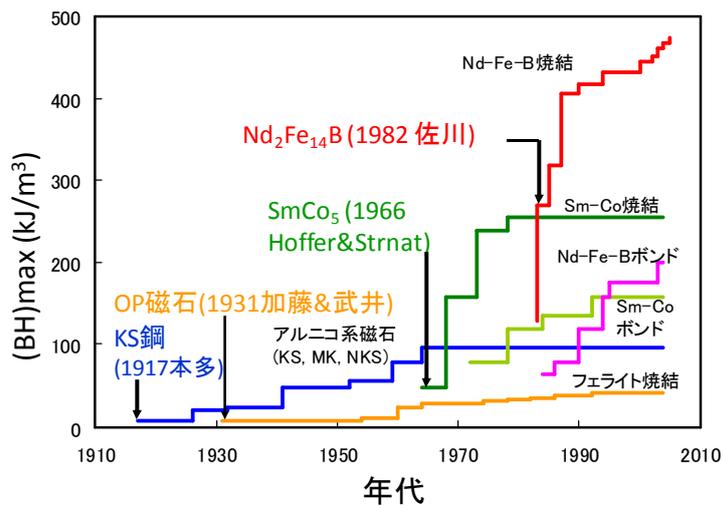


ネオジム磁石開発の現状と展望

日立金属株NEOMAXカンパニー
磁性材料研究所
広沢 哲

磁石材料高性能化の歴史



資源的観点から見たNd-Fe-B磁石

希土類元素の地殻存在比

0% 20% 40% 60% 80% 100%
理科年表1991

1. Ndが最も豊富な磁性希土類元素
2. Feが最も豊富な強磁性金属元素
3. Nd₂Fe₁₄Bが最も高磁化のハード磁性化合物
4. Nd₂Fe₁₄Bは熱的に安定、冶金可能

3d遷移金属元素の存在比

強磁性金属	Fe	Mn	Ni
存在比(ppm)	50000	950	75

理科年表1991

希土類金属間化合物の磁性

Material	J _s (T)	K ₁ (MJ/m ³)	H _A =2K ₁ /J _s (MA/m)
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.61	4.9	6.1
Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	1.54	8.6	11.2
Sm ₂ Co ₁₇	1.22	3.3	5.4
SmCo ₅	1.07	17.2	32.1

Nd-Fe-B系に勝る「希土類磁石」は存在しない。

↓

課題：低無Dy組成で

1. 高保磁力発現
2. Nd³⁺希釈 + 高特性化

SPring-8利用推進協議会 先端材料研究会

5

磁氣的硬さ $\kappa = \sqrt{(\mu_0 K_1 / J_s^2)}$

Magnetocrystalline Anisotropy, K₁ / MJ/m³

Magnetic Polarization, J_s / T

$\kappa > 1$
(Very Hard Magnets)

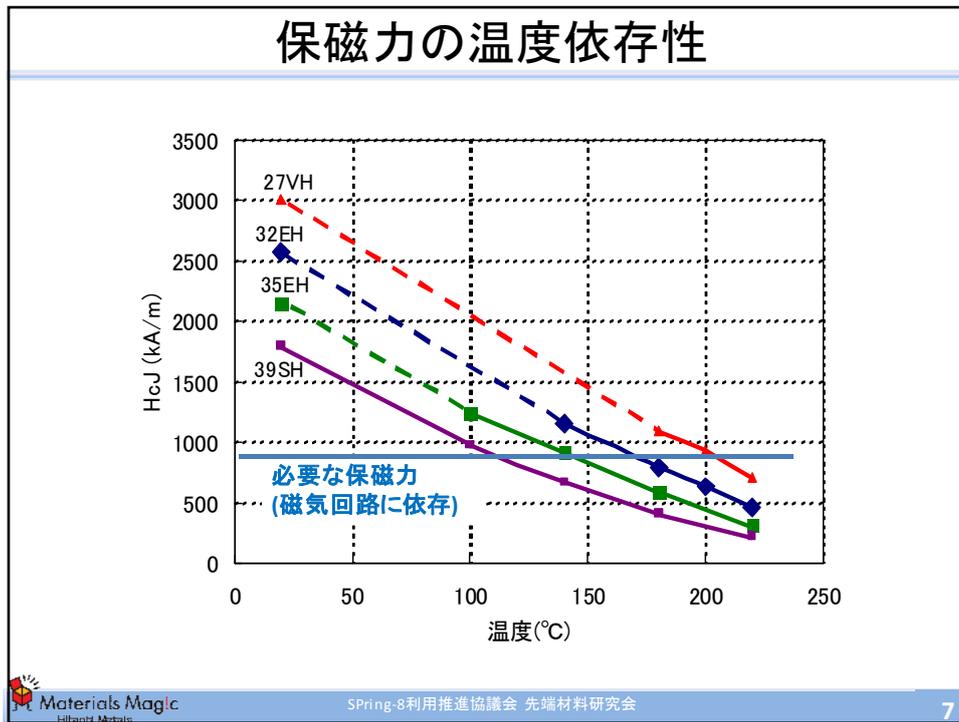
$\kappa > 1$
(Hard Magnets)

$\kappa = 1$

$\kappa < 1$
(Soft Magnets)

SPring-8利用推進協議会 先端材料研究会

6



7

保磁力の現象論

$$H_{cJ}(T) = \alpha H_A(T) - N J_s(T)$$

$H_A(T)$: 異方性磁界

$J_s(T)$: 飽和磁化

α : 現象論的係数

N : 局所反磁界係数

}

主相の固有物性値

}

微構造に依存

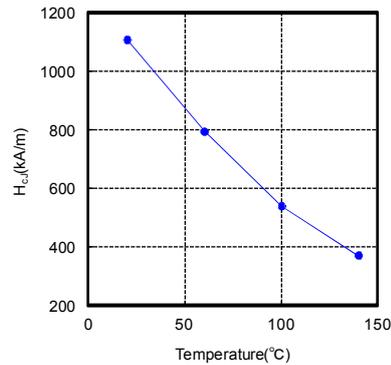
Materials Maglc
Spring-8利用推進協議会 先端材料研究会

8

Nd-Fe-B焼結磁石のc, Nの値

保磁力の温度依存性:

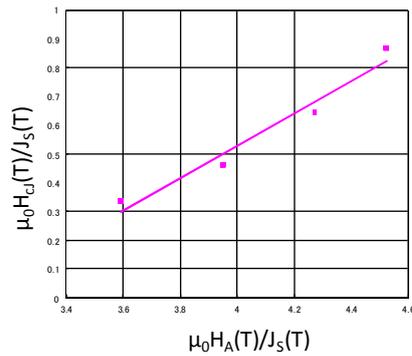
$$\mu_0 H_{cl}(T) = c \mu_0 H_A(T) - N J_S$$



$\mu_0 H_{cl}(T)/J_S(T)$ vs. $\mu_0 H_A(T)/J_S(T)$ plot:

$$\mu_0 H_{cl}(T)/J_S(T) = c \mu_0 H_A(T)/J_S(T) - N$$

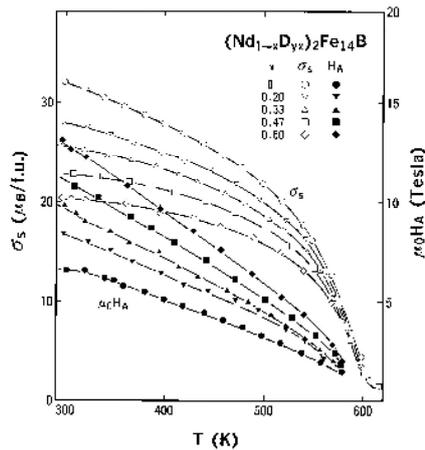
勾配 = c, 切片 = N



Nd-Fe-B焼結磁石(Dyフリー)の保磁力依存性の解析例

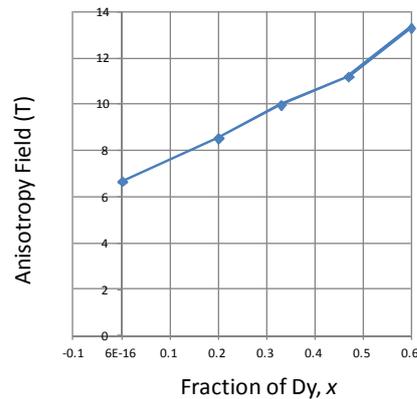


重希土類 Dy置換による高H_A化

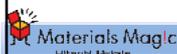


Sagawa et al., JAP61(1987)3559

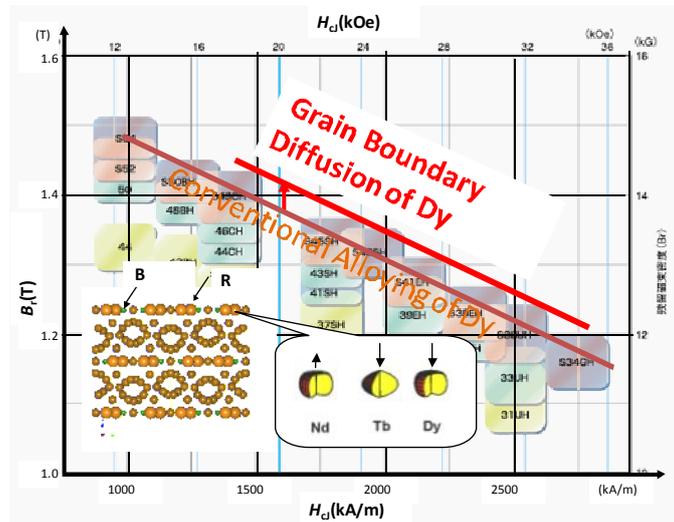
$$\mu_0 H_{cl}(x) = c \mu_0 H_A(x) - N J_S(x)$$



単結晶試料測定値(低磁界(H<1.2MA/m)困難軸磁化曲線の外挿値)



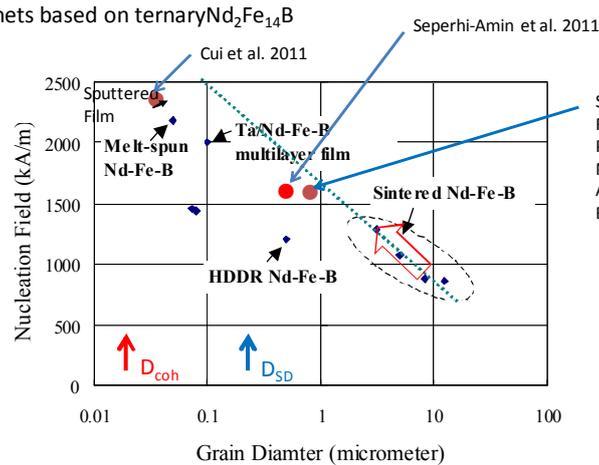
Dyの粒界偏在化による磁気特性向上



http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod03/p03_01.html

結晶粒径と保磁力(Nd-Fe-B(3元)磁石)

Magnets based on ternary $Nd_2Fe_{14}B$



Seperhi-Amin et al. 2011

Sagawa, Proc. Rare Earth Permanent Magnets and Their Applications, 2010, Bled, Slovenia

Dy無添加「 H_{CJ} 2MA/m超」磁石への道

$$H_{CJ}(300K) = c \times 5.3 - N \times 1.28 \quad (\text{MA/m})$$

$\uparrow H_A(300K)$ $\uparrow J_S(300K)$

- 係数 c と N の値は材料組織に依存
- c を大きく、 N を小さくする ⇒ 保磁力 大

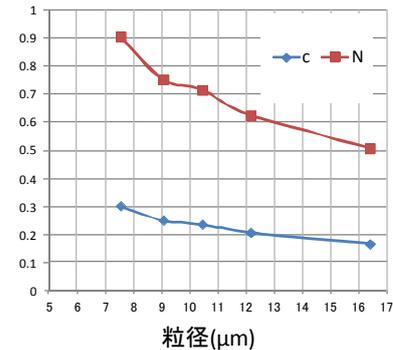
eg.
結晶粒径(右図)
微量添加元素
熱処理

Hirosawa et al., Physica B 164, (1990) 117

メカニズムは未解明

保磁力発現メカニズム解明

↓
Dyフリー磁石への組織制御



Tang Weizhong et al. JMMM94(1991)67-73.



磁気物性値と特性長

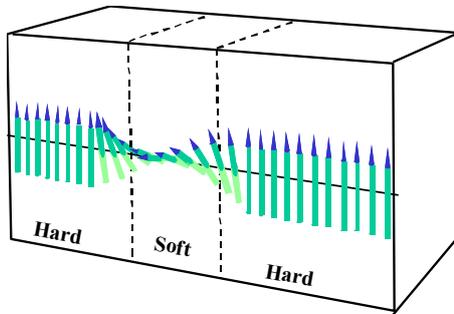
物質名	磁壁幅 パラメータ $\sqrt{A/K_1}$ (nm)	Bloch磁壁幅 $\pi\sqrt{A/K_1}$ (nm)	一斉回転 パラメータ $\sqrt{\mu_0 A / Js^2}$ (nm)	一斉回転 臨界径 $4\sqrt{6\mu_0 A / Js^2}$ (nm)	単磁区粒子 臨界径 (nm)
Fe	12.9	40.5	1.5	14.7	12
Co	4.4	13.8	2	19.6	68
Ni	26.1	81.9	3.4	33.3	32
BaFe ₁₂ O ₁₉	4.3	13.5	6.7	65.6	660
SmCo ₅	1.1	3.6	4.9	48.0	1538
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.3	3.9	1.9	18.6	214
Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	1.2	3.6	2.5	24.5	380

- 磁壁幅(Bloch Wall)は4nm-10nm
- 一斉回転は直径20nm-50nmまで



磁気異方性低下層 核生成 vs ピニング

逆磁区核発生(Nucleation)



磁壁ピンニング(Pinning)

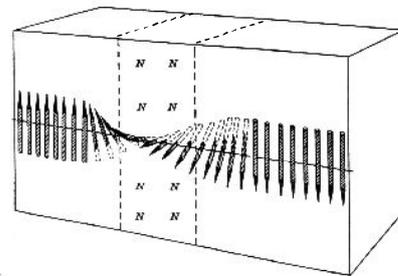
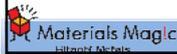


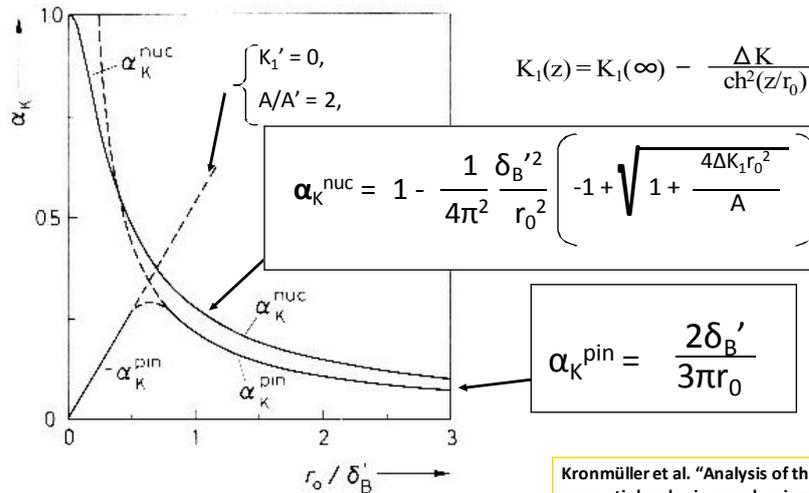
Fig. 15.21. The structure of the transition layer separating domains. To from the thickness of the transition region is about 300 lattice constants.

C. Kittel: Introduction to Solid State Physics (1956)

外部磁界

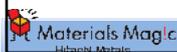


磁気異方性低下層の存在と保磁力



ピンニングと逆磁区核発生についての係数 $\alpha (=c)$ の K_1 低下層厚み r_0 に対する依存性。
図は $\Delta K = K_1(\infty)$ の場合。

Kronmüller et al. "Analysis of the magnetic hardening mechanism in RE-Fe-B permanent magnets," J. Magn. Magn. Mater. 74 (1988) 291.



Nd-Fe-B磁石の保磁力機構理解の現状

- 定性的理解にとどまっているのが現状
 - 磁気交換長($\approx 4\text{nm}$)領域の局所情報が不足
 - 微細組織の形成過程および原理が未解明
 - 磁化反転伝播メカニズムが未解明
- Dyフリーの低 H_A (5.3MA/m)化合物($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)で高 H_C ($>2\text{MA/m}$)を得る基本方針が未確立



低磁気異方性材料高保磁力化の展望

- Dyの粒界近傍への偏在配置が実用化
- 次の課題:
- 逆磁区核発生磁界低下要因の解明と消去
 - 磁壁ピンング実体(粒界)の組織適正化、ピンング力の最大化(optimization)
- 磁壁幅(4-10nm)の磁気物性値(K_u , A , J_s)評価技術
- 現実の磁石の磁化反転過程の理論
(磁区伝播、磁化反転粒子の影響)
- 組織形成原理解明に基づく組織制御技術

