

第34回MSJサマースクール「応用磁気の基礎」(2010.7.22)

ハード磁性材料

～永久磁石材料の基礎と応用～

日立金属(株) 磁性材料研究所

西内 武司




講義内容

1. はじめに
2. ハード磁性とソフト磁性
3. 反磁界
4. 永久磁石の性能の表現方法
5. 永久磁石の性能を決定する要因
6. 永久磁石の高性能化
7. さらなる高性能化への取り組み
8. おわりに

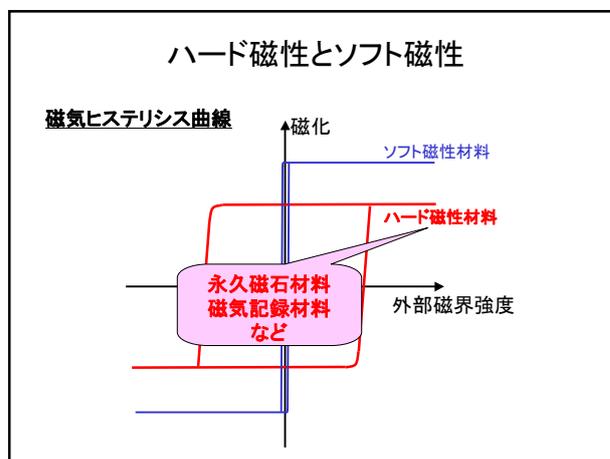
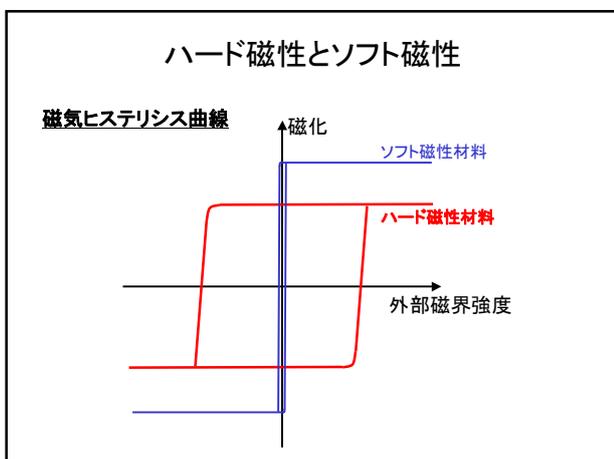
本講義を通じて期待すること

- ①永久磁石で用いられる性能の表現方法などを理解し、永久磁石に関する講演、論文などを理解する上での基本事項を学ぶ。
- ②高性能永久磁石を得るための指針に加え、実際の材料が優れた特性を発現するメカニズムを学ぶことにより、ハード磁性を支配する要因について理解を深める。

数値や数式にとらわれず、本質的な理解を！

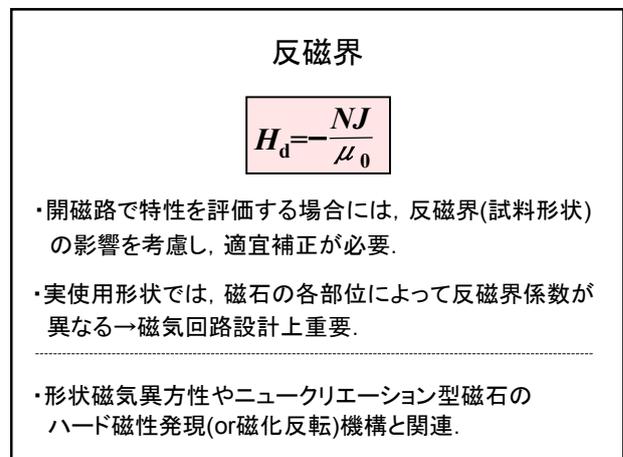
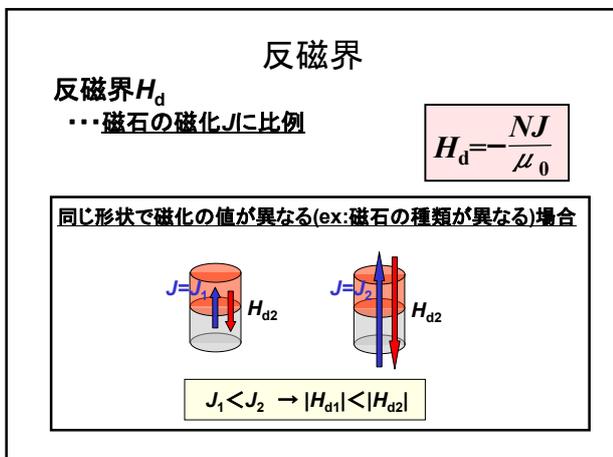
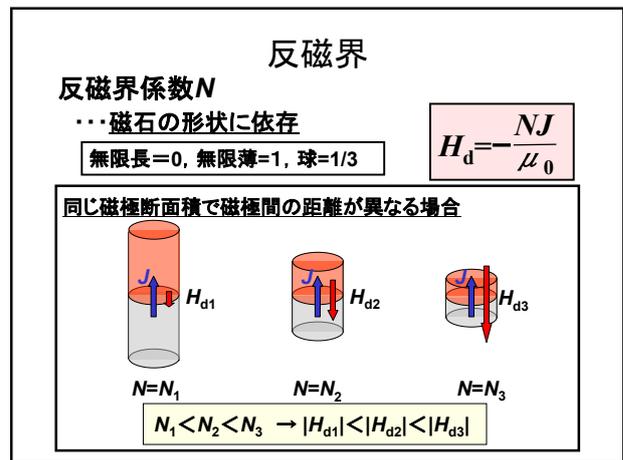
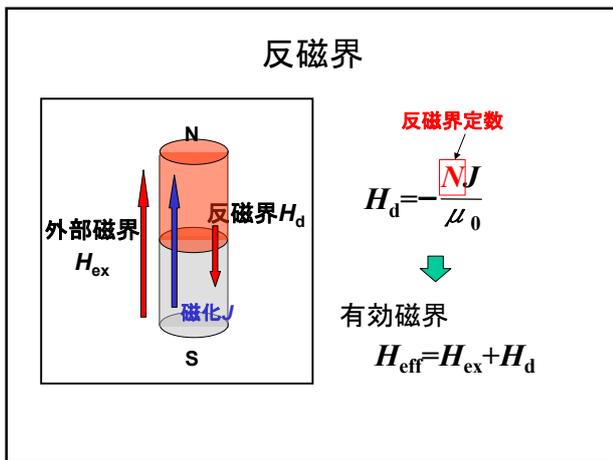
講義内容

1. はじめに
2. ハード磁性とソフト磁性
3. 反磁界
4. 永久磁石の性能の表現方法
5. 永久磁石の性能を決定する要因
6. 永久磁石の高性能化
7. さらなる高性能化への取り組み
8. おわりに



永久磁石材料の用途	
原理	製品
磁気に関するクーロン力	文房具 磁気パッキン 歯科アタッチメント(入れ歯)
ローレンツ力 (電磁気エネルギー →運動エネルギー)	モータ(回転/直進) アクチュエータ/ピックアップ スピーカ
電磁誘導 (運動エネルギー →電気エネルギー)	発電機 回転センサ
渦電流によるローレンツ力 (運動エネルギー →電磁気エネルギー →運動エネルギー)	積算電力計 渦電流ブレーキ 磁気選別機
原子・電子との相互作用	MRI(磁気共鳴診断装置) アンジュレータ、ウィングラ

講義内容
1. はじめに
2. ハード磁性とソフト磁性
3. 反磁界
4. 永久磁石の性能の表現方法
5. 永久磁石の性能を決定する要因
6. 永久磁石の高性能化
7. さらなる高性能化への取り組み
8. おわりに

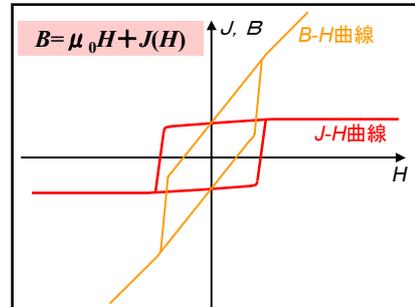


講義内容

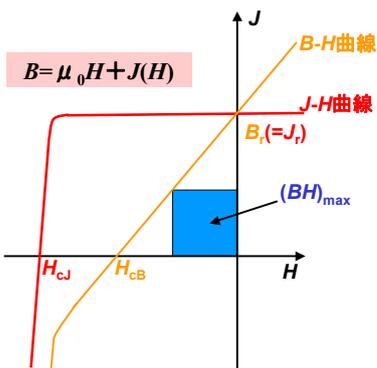
1. はじめに
2. ハード磁性とソフト磁性
3. 反磁界
4. 永久磁石の性能の表現方法
5. 永久磁石の性能を決定する要因
6. 永久磁石の高性能化
7. さらなる高性能化への取り組み
8. おわりに

J-H曲線とB-H曲線

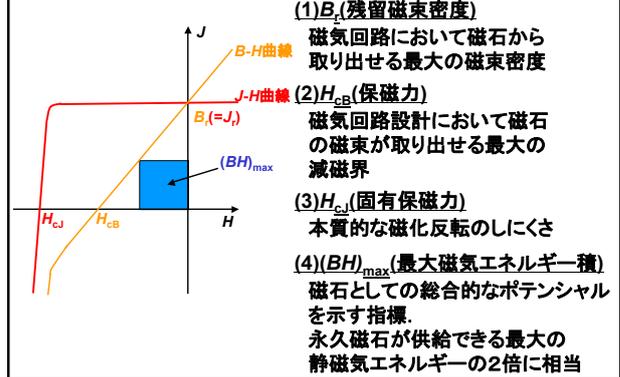
J: 材料内の磁化(単位体積あたりの磁気モーメントの総和)
B: 材料内を通過する磁束密度



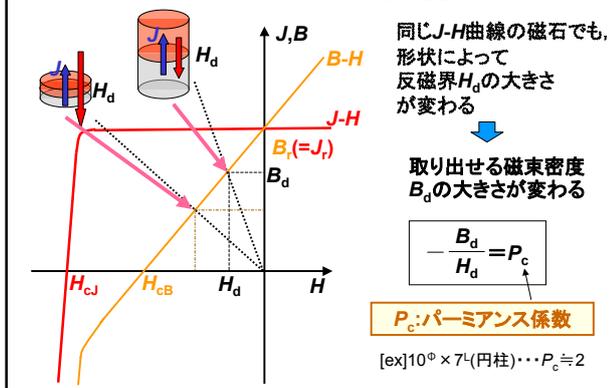
減磁曲線



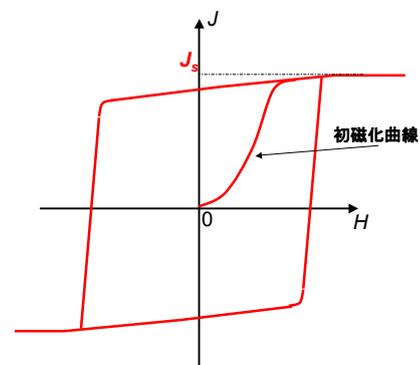
永久磁石の性能を示す指標

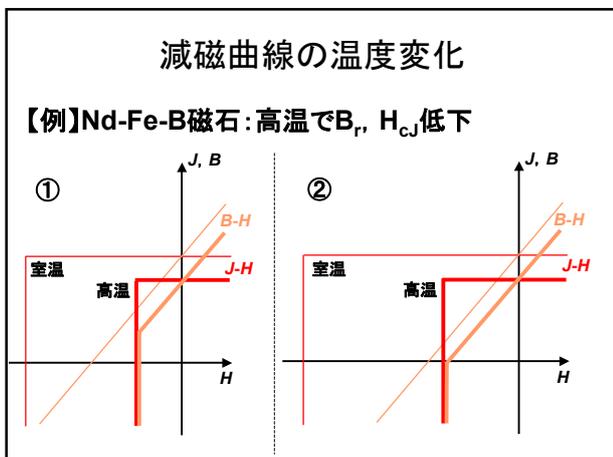
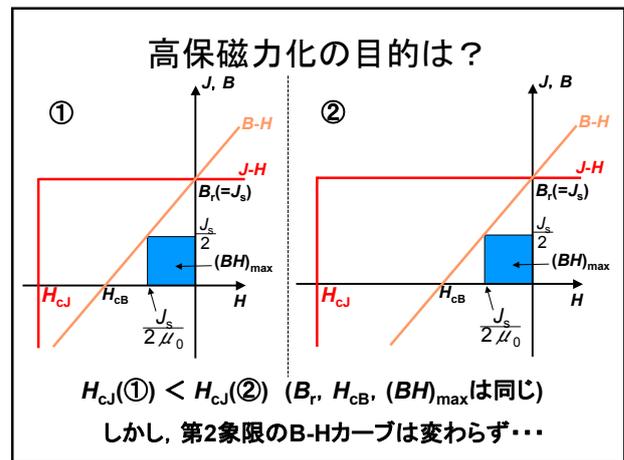
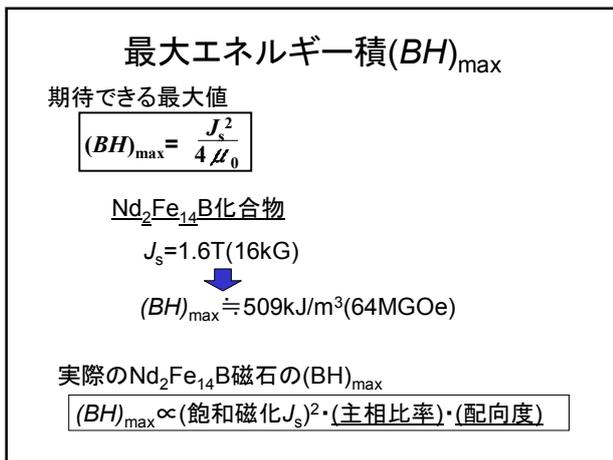
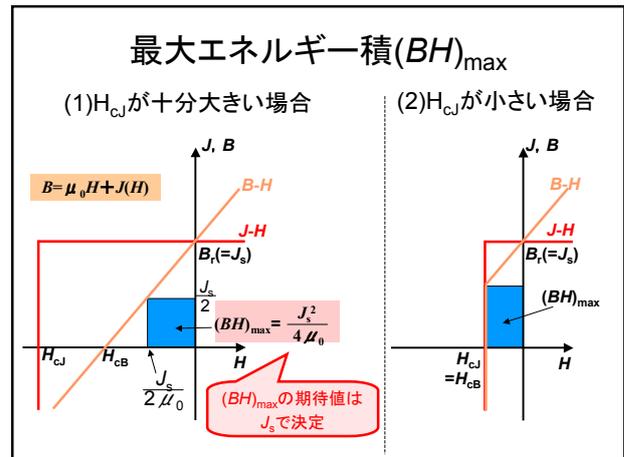
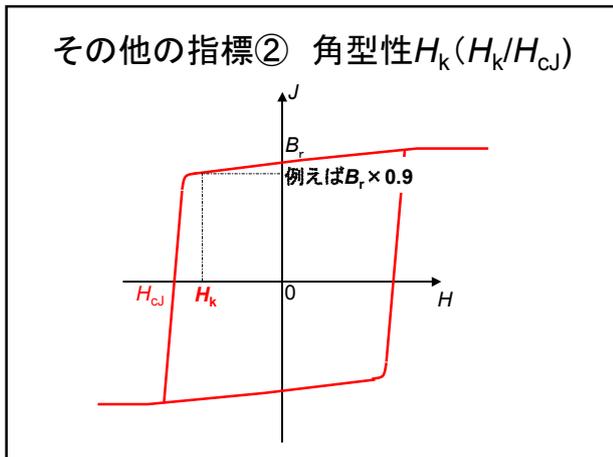


磁石形状と磁束密度 B



その他の指標① 飽和磁化 J_s





永久磁石の性能を示す指標(記号)

- ・磁化: J, I
(磁気モーメント: $M, m, \sigma \dots$)
- ・保磁力: $H_{cB}, bH_c \dots$
- ・固有保磁力: $H_{cJ}, H_{ci}, iH_c \dots$

永久磁石の性能を示す単位

	CGS	SI	換算式
J, B	[G]	[T] =[Wb/m ²]	1[G]=10 ⁻⁴ [T]
H	[Oe]	[A/m]	1[Oe]= $\frac{10^3}{4\pi}$ [A/m] ≒79.58[A/m]
$(BH)_{max}$	[GOe]	[J/m ³]	1[GOe]= $\frac{10^{-1}}{4\pi}$ [J/m ³] ≒7.958 × 10 ⁻³ [J/m ³]

温度係数

$$\alpha(B_r)[\%/^{\circ}\text{C}] = \frac{B_r(T^{\circ}\text{C}) - B_r(20^{\circ}\text{C})}{(T-20)} \times \frac{1}{B_r(20^{\circ}\text{C})} \times 100$$

$$\beta(H_{cJ})[\%/^{\circ}\text{C}] = \frac{H_{cJ}(T^{\circ}\text{C}) - H_{cJ}(20^{\circ}\text{C})}{(T-20)} \times \frac{1}{H_{cJ}(20^{\circ}\text{C})} \times 100$$

通常は高温側の温度係数を評価.

(フェライト磁石の H_{cJ} は、低温側の温度係数を評価)

講義内容

1. はじめに
2. ハード磁性とソフト磁性
3. 反磁界
4. 永久磁石の性能の表現方法
5. 永久磁石の性能を決定する要因
6. 永久磁石の高性能化
7. さらなる高性能化への取り組み
8. おわりに

飽和磁化

永久磁石 = 自発磁化を生じる

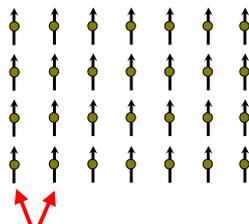


(向きを考慮した)磁気モーメントの総和がゼロでない

・フェロ磁性
・フェリ磁性 > 強磁性体

フェロ磁性

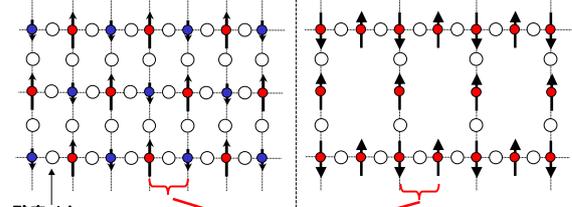
磁気モーメントが同一方向を向くことで自発磁化が生じる



交換相互作用により、同一方向を向く。

フェリ磁性

上向きと下向きの磁気モーメントの大ききの違いで自発磁化が生じる 数の違いで自発磁化が生じる



酸素イオン

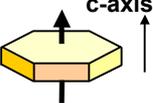
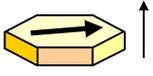
超交換相互作用により個々の向きが決まる。

磁気異方性

物質が特定の方向に磁化されやすい性質
→ 特定方向に磁化されるとその方向を維持しつづけようとする。

ハード磁性(高保磁力)の根源

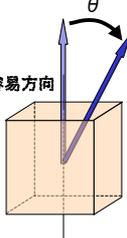
磁気異方性

形状磁気異方性	
結晶磁気異方性	一軸異方性 
	面内異方性 

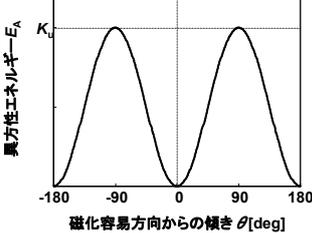
異方性エネルギー

★結晶磁気異方性の場合

$$E_A = K_u \sin^2 \theta$$



磁化容易方向

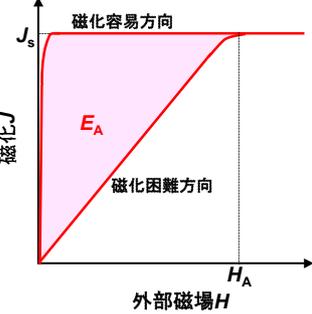


異方性エネルギー E_A

磁化容易方向からの傾き θ [deg]

異方性磁界

結晶磁気異方性による磁化の拘束力と等価な外部磁界



磁化容易方向

磁化困難方向

外部磁場 H

$$E_A = K_u \sin^2 \theta$$

$$\theta = 90^\circ \rightarrow E_A = K_u$$

$$H_A = \frac{2K_u}{\mu_0 J_s}$$

キュリー温度

永久磁石・・・ほとんどの場合室温以上で使用.

- ・少なくともキュリー点が使用温度以上になることが必要.
- ・キュリー点が高いほど熱安定性に優れる (B_r , H_{cJ} の温度係数: 小)傾向.

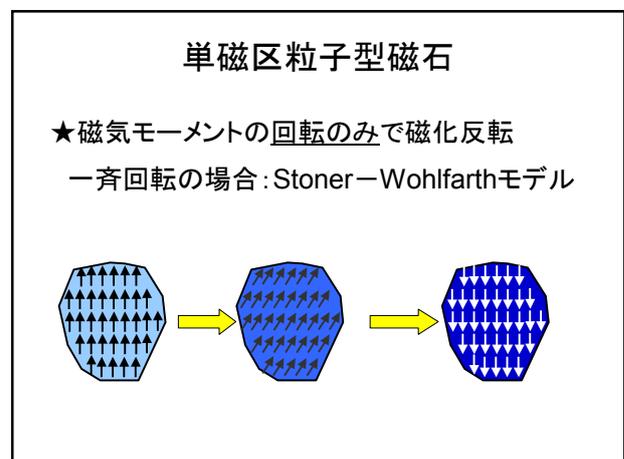
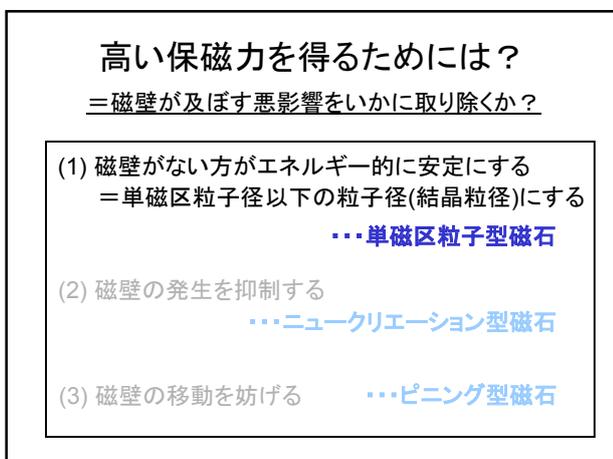
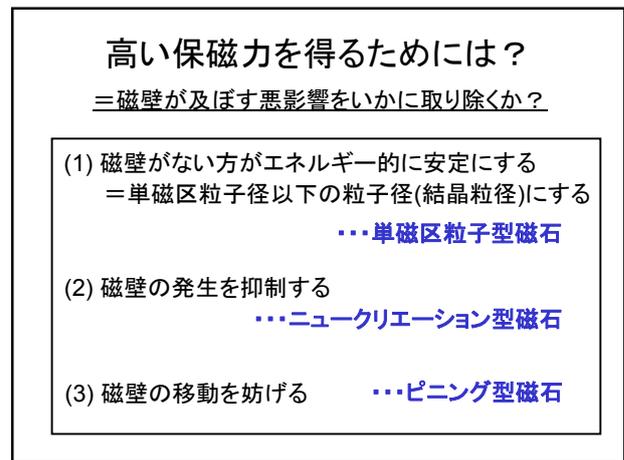
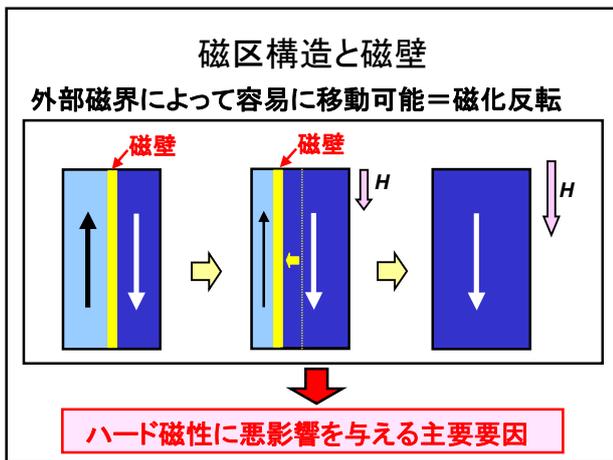
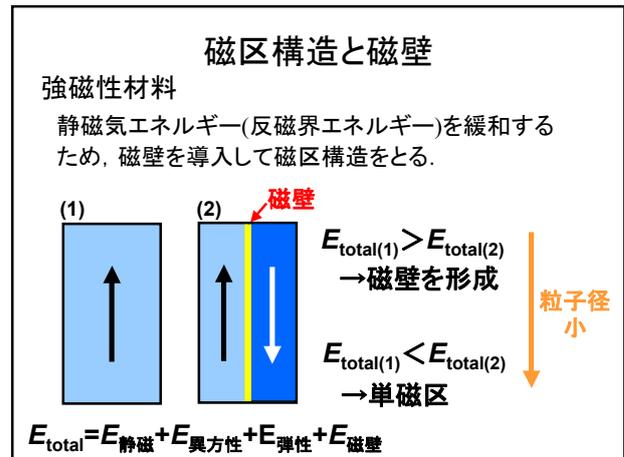
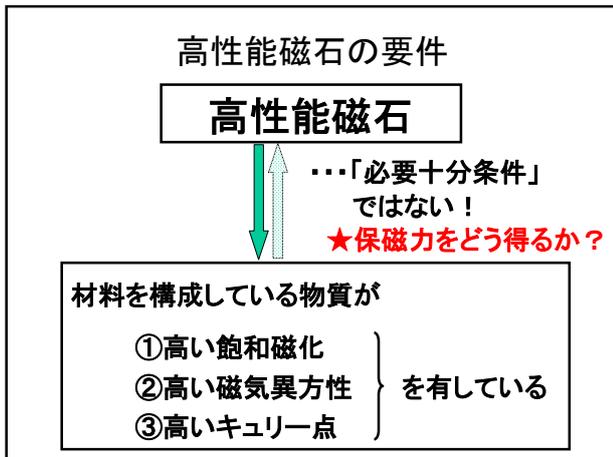
高性能磁石の要件

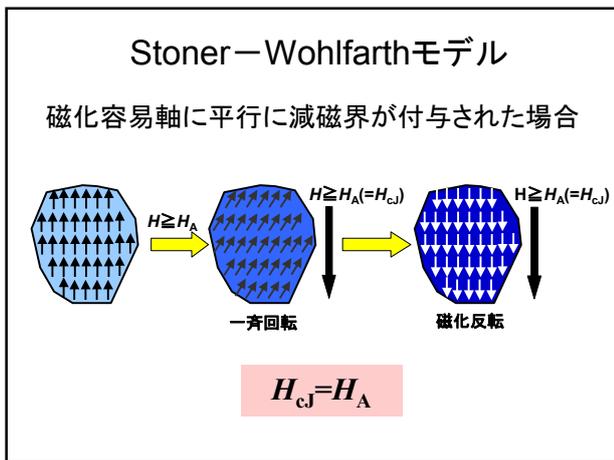
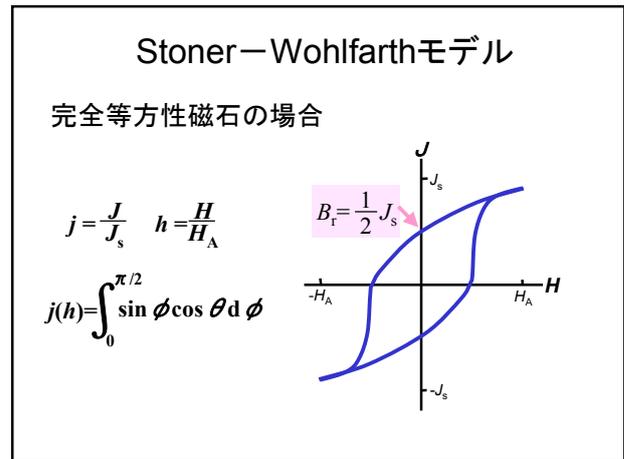
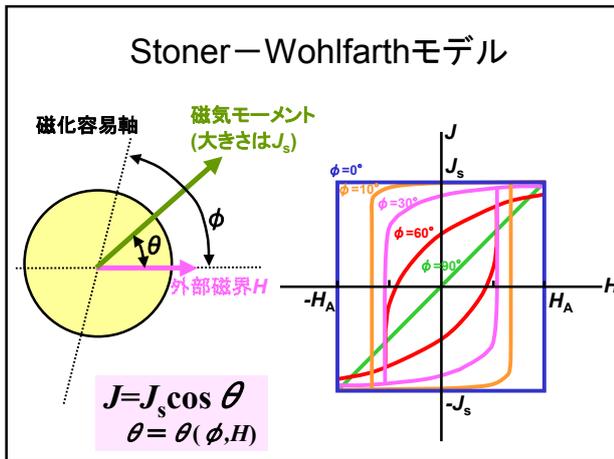
高性能磁石

↓

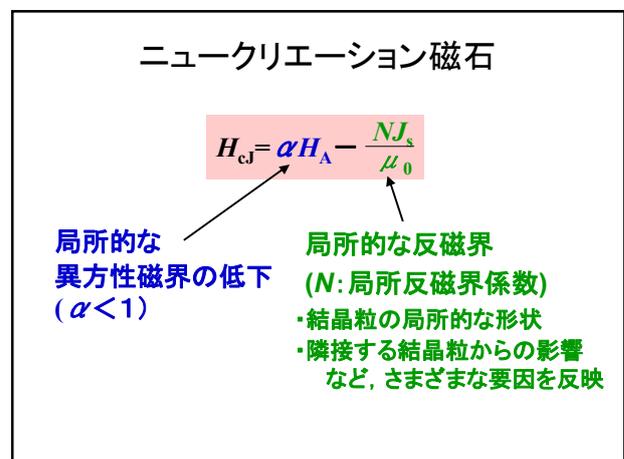
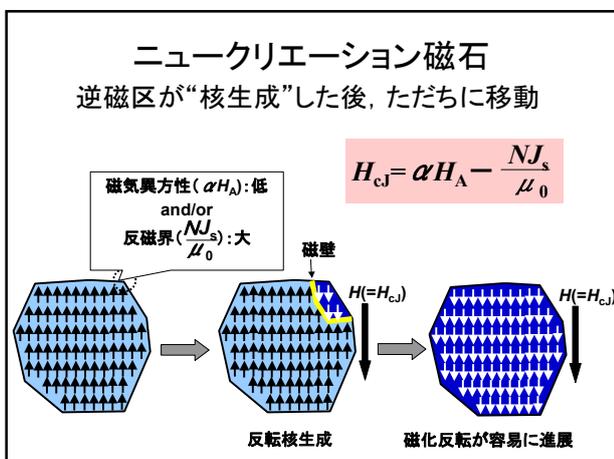
材料を構成している物質が

<ul style="list-style-type: none"> ① 高い飽和磁化 ② 高い磁気異方性 ③ 高いキュリー点 	} を有している
--	----------





- ### 高い保磁力を得るためには？
- ＝磁壁が及ぼす悪影響をいかに取り除くか？
- (1) 磁壁がない方がエネルギー的に安定にする
＝単磁区粒子径以下の粒子径(結晶粒径)にする
・・・単磁区粒子型磁石
 - (2) 磁壁の発生を抑制する
・・・ニュークリエーション型磁石
 - (3) 磁壁の移動を妨げる
・・・ピンニング型磁石



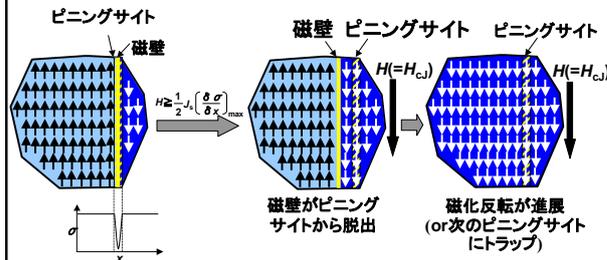
高い保磁力を得るためには？

=磁壁が及ぼす悪影響をいかに取り除くか？

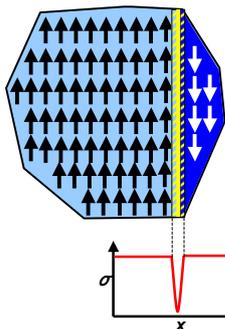
- (1) 磁壁がない方がエネルギー的に安定にする
=単磁区粒子径以下の粒子径(結晶粒径)にする
...単磁区粒子型磁石
- (2) 磁壁の発生を抑制する
...ニュークリエーション型磁石
- (3) 磁壁の移動を妨げる
...ピンング型磁石

ピンング磁石

磁壁の移動がピンングサイトで妨げられる



ピンング磁石



★ピンングサイト
磁壁エネルギー σ が急峻な
変化をする部分

$$H_{cJ} = \frac{1}{2J_s} \left(\frac{\delta \sigma}{\delta x} \right)_{\max}$$