

種々の熱処理

焼入れ (quenching, 鋼の焼き入れの場合はhardeningも用いられる)

金属を所定の高温状態から急冷させる熱処理

高温相を凍結し、過飽和固溶体などを得ることを目的とする場合は、溶体化処理 (solution treatment) と呼ぶ。

冷却には水、油、熱浴、空気などを用い、それらの中で保持したり、攪拌したりして冷却速度を調節する。例えば水を使う場合、「水焼入れ」ということもある。

焼戻し (tempering)

焼入れまたは溶体化処理されて不安定な組織を持つ金属を適切な温度に加熱・保持することで、組織の変態または析出を進行させて安定な組織に近づけ、所要の性質及び状態を与える熱処理。

アルミニウム合金などの溶体化処理後の熱処理も焼戻し処理と呼ばれ、時効処理の一種とされるが、しばしば「焼戻し」は鋼を対象に用いられることが多い。

アニーリング (annealing)

材料を所定の温度以上に保つ熱処理を、一般にアニールまたはアニーリングと呼ぶ。一般的に、冷却速度についての定義はない。

およそ0.8T_M程度の高温に保持し、成分の拡散による組成の均質化を図り、比較的速い速度で冷却する処理を特に均質化処理 (homogenization) と呼ぶ。

annealingにはアニーリングのほか焼鈍、焼きなましなどにも用いられるので、注意する。

焼鈍 (しょうどん)、焼きなまし (annealing)

加工硬化した材料を軟化させる為に行われる。一般に加熱後は炉冷 (炉中で徐冷) することで成される。

加工硬化による内部の残留ひずみ (残留応力) の除去、格子欠陥の減少、再結晶を行わせるために、金属材料を適当な再結晶温度に加熱、十分に保持した後に (しばしば徐冷にて) 冷却する方法。

熱処理の目的と熱処理方法

目的	熱処理方法	
	鋼	非鉄合金
高強度化	焼入れ・焼戻し	溶体化処理・時効処理
疲労強度の向上	(a)焼入れ・焼戻し (b)浸炭焼入れ、浸炭窒化焼入れなど	溶体化処理・時効処理
耐衝撃性の向上	(a)焼入れ・焼戻し (b)オーステンパー	
耐摩耗性の向上	(a)焼入れ・焼戻し (b)浸炭焼入れ、浸炭窒化焼入れなど	
耐食性向上	焼入れ(オーステナイト化)	溶体化処理
均一組織にする	焼ならし・焼きなまし	非鉄合金:焼きなまし
内部応力の除去	焼きなまし	焼きなまし
寸法の安定性向上	焼きなまし・サブゼロ処理	
冷間加工性の向上	焼きなまし	焼きなまし
被削性の向上	(a)低炭素鋼 焼ならし (b)中高炭素鋼 焼きなまし	

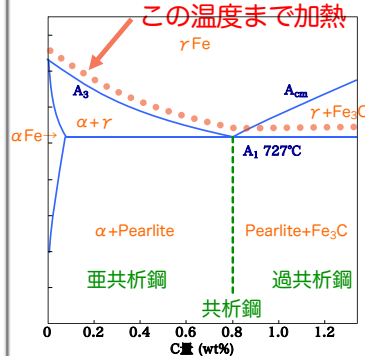
鋼における各組織の性質・状態

組織の名称	相	結晶構造	性質・状態
フェライト	α -Fe	bcc	炭素の侵入型固溶体 727°Cで最大固溶限0.022wt% 純鉄では912°C以下で安定
オーステナイト	γ -Fe	fcc	炭素の侵入型固溶体 1147°Cで最大固溶限2.14wt% 純鉄では912~1391°Cで安定
δ フェライト	δ -Fe	bcc	炭素の侵入型固溶体 1490°Cで最大固溶限0.08wt% 純鉄では1391~1536°Cで安定
パーライト	α +Fe ₃ C		α 相とFe ₃ Cが積層された共析複合組織
セメンタイト	Fe ₃ C		FeとCの化合物。 Cを6.7wt%含む。硬くて脆い
マルテンサイト	α'	bct	γ 域からの急冷時に無拡散変態により形成される準安定相

鋼の焼入れ

焼入れ (quenching, 鋼の焼き入れの場合はhardeningも用いられる)

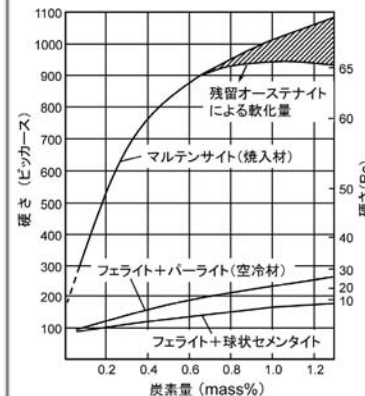
高炭素を含有する鋼を硬化させるために、変態点(A₃線)以上の温度に保持した後(オーステナイト領域まで加熱した後)に「急冷」してマルテンサイト組織を得る操作。



亜共析鋼では、A₃線より高温(+50°C程度)にしてオーステナイト化(γ Fe)させ、焼入れ処理をする。(A₃線を最低温度とする)

過共析鋼は低温域ではパーライトとセメンタイトで構成され、一般的にはA₁より高温で保持することで、パーライトをオーステナイト化させ、セメンタイトは変化せずにそのまま残して焼き入れする。A_{cm}を越えれば、すべての組織がオーステナイト化するが、焼入れや残留オーステナイトの増加などのリスクが高くなる。

鋼のマルテンサイトの硬さ



鋼を硬くすることが焼入れの目的だが、硬化の程度は鋼に含まれる炭素量で決まる。炭素だけでなく、さまざまな合金元素によっても最高硬さや硬化の度合いが変化する。

その変化の度合いが高い鋼ほど「焼入れ性がよい」と言われ、冷却速度の条件も緩やかであるが、反対に焼入れ性が悪い鋼種の場合は水焼入れするなど急速に冷却しないと目的の硬さが得られない。

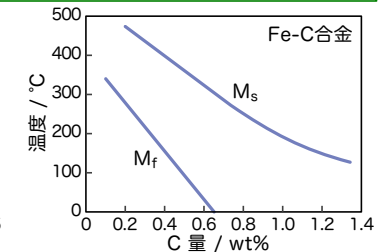
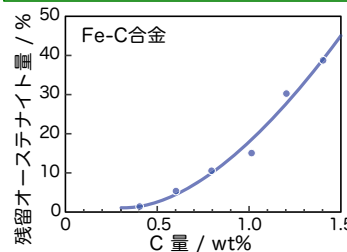
マルテンサイトは鋼で最も硬い組織

鋼の種々な組織の硬さに及ぼすC量の影響

残留オーステナイト

残留オーステナイト (retained austenite)

鋼を焼入れする際に、完全にマルテンサイトにならず、一部未変態のオーステナイトとして残ったもの。



焼入れ後の残留オーステナイト量とC量の関係

M_s点およびM_f点のC量による変化

高炭素(約0.6wt%C以上)のFe-C合金を焼入れると室温で未変態のオーステナイトが残る

約0.6wt%C以上で残留オーステナイトを減らすには、室温以下にあるM_f点まで冷却すればよい
→サブゼロ処理

残留オーステナイト量は指定の焼入れ温度範囲を超えると急激に増加する。冷却速度が遅い場合にも増加する。

残留オーステナイトは、C・Mn・Ni・Crなどの合金成分が多いほど多く残留するために、刃物や工具に多用される鋼種ではかなりの量が残留している。しかし、**焼もどし**をすると残留オーステナイトが安定になって、その後は分解や変化することが少なくなる。

残留オーステナイトのデメリット

残留オーステナイトは熱力学的に不安定な組織であるため、長い時間をかけて他の組織に変化するが、このときに焼入れ時の硬さの低下や、製品の寸法変化などの問題が生じることがある。

残留オーステナイトのメリット

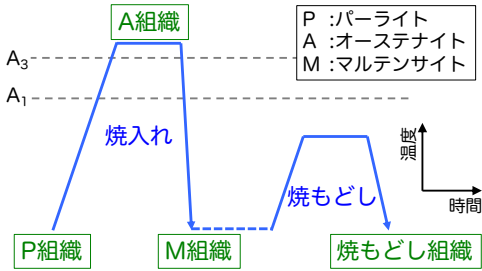
適度な残留オーステナイトは、靱性を向上させるメリットがあり、使用中の割れや焼き割れなどの現象を防ぐことが期待される。

例えばSi含有鋼などでは残留オーステナイトが変形時に加工誘起マルテンサイト変態を起こしていわゆるTRIP効果をし、高い延性・靱性を示す場合がある。

鋼の焼もどし

焼もどし、焼戻し (tempering)

焼入れなど行った鋼について、硬さを減少させ**靱性を向上させる目的**で行う。一般的に硬さを必要とする場合は200°C程度 (低温焼もどし)、粘さを目的とする構造用鋼などの場合は400°C以上の焼もどし温度で行う。



オーステナイトから急冷して出来たマルテンサイトは、硬くて脆いので、焼戻しすることにより靱性を保たせる(マルテンサイト変態した時に内部応力が発生し、応力が鋭角の所に集中しそのままの状態では鋭角部から割れが発生する)。

鋼の焼なまし

焼なまし、焼鈍し、焼鈍 (しょうどん) (annealing)

加工硬化した材料を軟化させる為に行われる。一般に加熱後は炉冷 (炉中で徐冷) することで成される。

目的によって、「拡散焼なまし」「完全焼なまし」「球状焼なまし」「等温変態焼なまし」「応力除去焼なまし」などがあり、目的に合わせた温度で行い、鋼材の性質改善を行う。

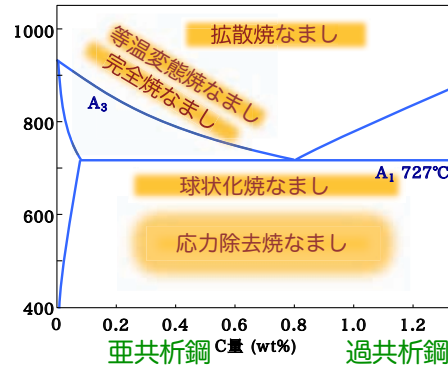
完全焼なまし (full annealing)

金属一般においては再結晶温度以上に保った後、徐冷することによって、内部応力の無い、組織とすることであり、これによって材料は軟化する。鋼の場合は、オーステナイト領域まで加熱し、炉冷することによって軟らかい層状パーライト組織などが得られる。

歪み取り焼鈍、応力除去焼なまし (stress relief annealing)

鍛造、铸造、冷間加工、機械加工などで生じる残留応力を除去するために行われる。比較的低温で行われることから**低温焼きなまし**とも呼ばれる。主に再結晶温度(約450°C)からA1線以下の温度領域で行われる。

種々の焼なましと処理温度



拡散焼なまし
偏析元素を拡散して均質にする

等温変態焼なまし
パーライトを制御して切削性を良くする

完全焼なまし
内部の結晶粒度をそろえ組織を均質に整える

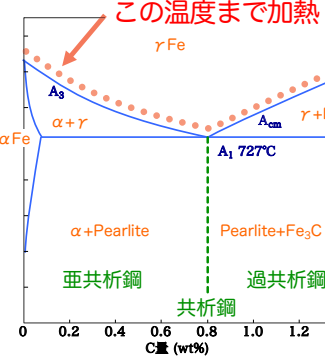
球状化焼なまし
球状のセメントライトで加工性を良くする

応力除去焼なまし
残留応力を除去して使用中の割れを防ぐ

鋼の焼ならし

焼ならし、焼準 (しょうじゅん) (normalizing)

主に加工や铸造された鋼を所定の高温まで加熱した後、一般にはオーステナイト領域で十分に保持した後、**空冷で冷却**して、金属組織の結晶を均一微細化させて、機械的性質の改善や切削性の向上を行う熱処理。**微細なパーライト組織**が得られる。鋼にある程度の**硬さと粘り強さ**を与える。



目的:

- ✓ 組織の均一微細化
- ✓ 機械的性質 (強度、延性など) の改善
- ✓ 残留応力の除去
- ✓ 機械加工性 (被削性) の向上
→ 低炭素鋼
- ✓ 焼き入れの前処理として使われることもある

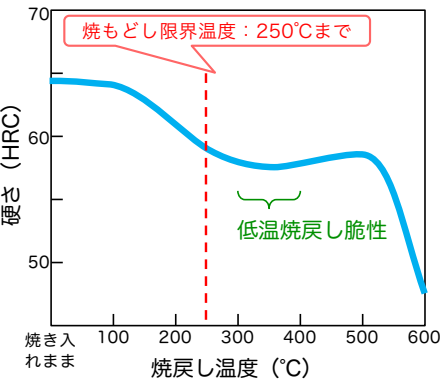
A3又はAcm点以上50°C程度高い温度に加熱して、オーステナイト相としたのち大気中で放冷(空冷)を行う。

低温焼もどし

マルテンサイトを**焼もどし**(一般には160°C~250°C程度)すると、マルテンサイト (αマルテンサイト) が**焼もどしマルテンサイト (βマルテンサイト)** になることで硬さが若干低下し、**靱性が増加**する。

硬さと強さの両方が必要な、高硬度で使うナイフや工具などは、一般的には、この焼戻し温度範囲を採用する。(焼戻しをしないと、欠けたり折れたりしやすいということになる。)

250°C以上に、もっと焼もどし温度を上げていくと、次第に焼もどし後の硬さが低下するが、組織的には炭化物が析出する「共析反応」が進んでいる。



250°C以上: Fe₃Cが析出し、共析反応が進行。硬さが緩やかに低下する。

300~400°C: 粒界析出物により脆化する (**低温焼戻し脆性**)。鋼材特有な性質で、この温度での処理は避ける。

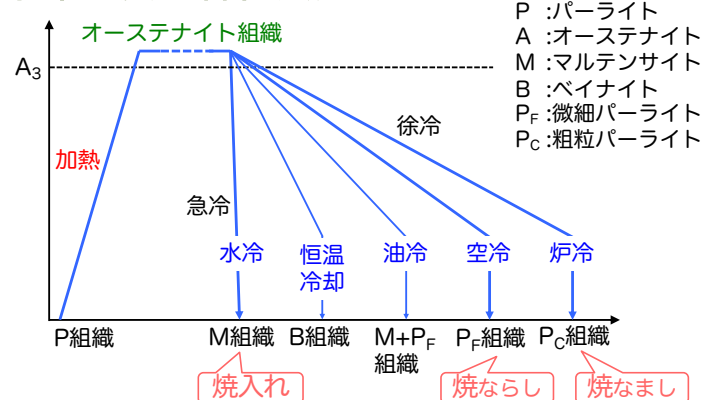
500°C以上: 残留オーステナイトの消失。硬さが急激に低下する。

焼もどし温度と硬さ (SLD鋼の例)

高温焼もどし

550~650°Cの高温で1時間程度加熱した後に空冷する。強靱性が必要なシャフトや歯車類、工具類の製造に用いる。

冷却速度と各種熱処理



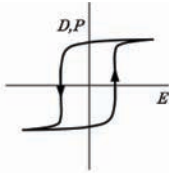
誘電体の特殊な性質



圧電性 (Piezoelectricity) : 応力を加えることにより分極 (および電圧) が生じる。逆に電圧を印加することで応力および変形が生じる。

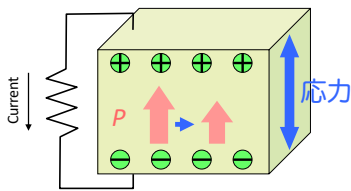
焦電性 (Pyroelectricity) : 自発分極を有しており、(微小な) 温度変化に応じて分極 (およびそれによる電圧) が生じる。

強誘電性 : 外部からの電界によって自発分極の方向を反転させることのできるもの分極が外部電場に対するヒステリシス特性を示す。



圧電性

圧電性 (Piezoelectricity) : 圧力 (力) を加えると、圧力に比例した分極 (表面電荷) が現れる現象

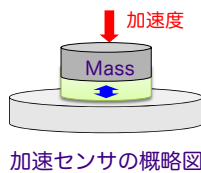


圧電アクチュエータ・超音波モータ

電界 → 応力 (変形)

ガス圧センサ, 加速メータ

応力 → 電気信号



加速センサの概略図

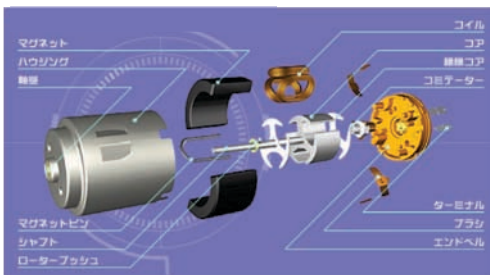
磁石材料・磁心材料

磁石材料の応用例:

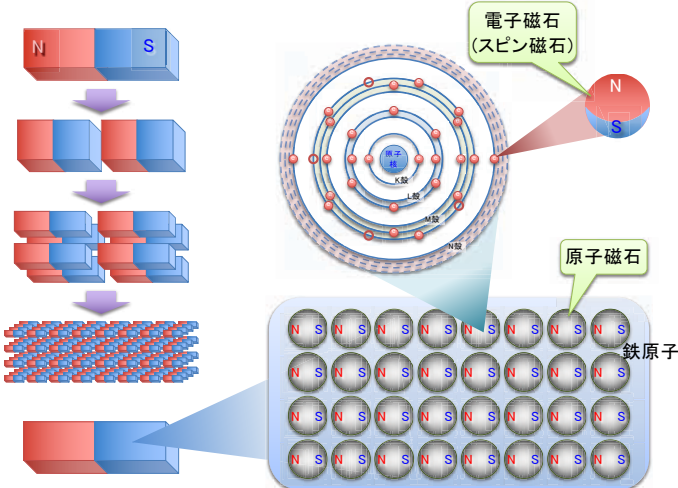
- ◆ モーター
- ◆ センサー
- ◆ 文具など、

磁心材料の応用例:

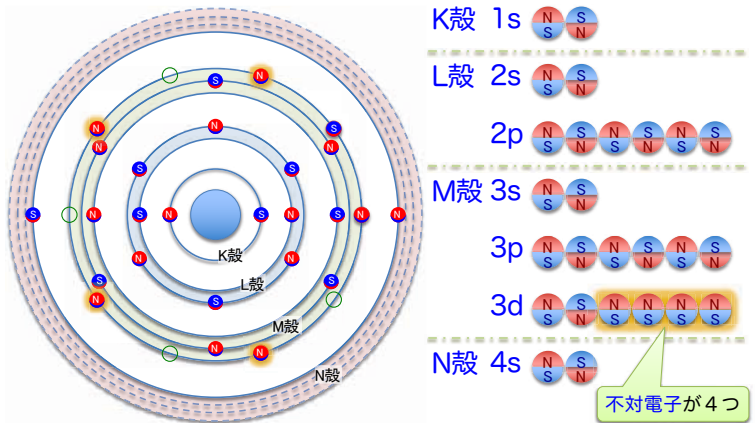
- ◆ モーター
- ◆ 電磁石のコア (磁心)
- ◆ 磁気ヘッド



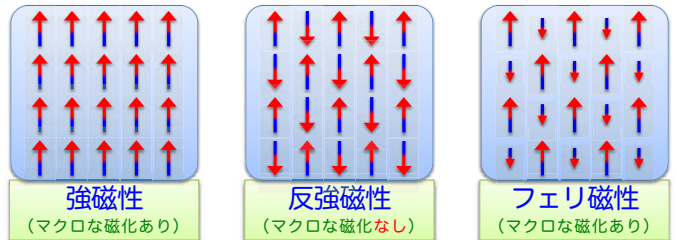
磁性の起源



強磁性を発現する原子の電子構造は?



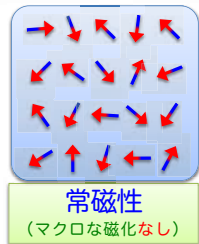
磁性体の種類



秩序状態

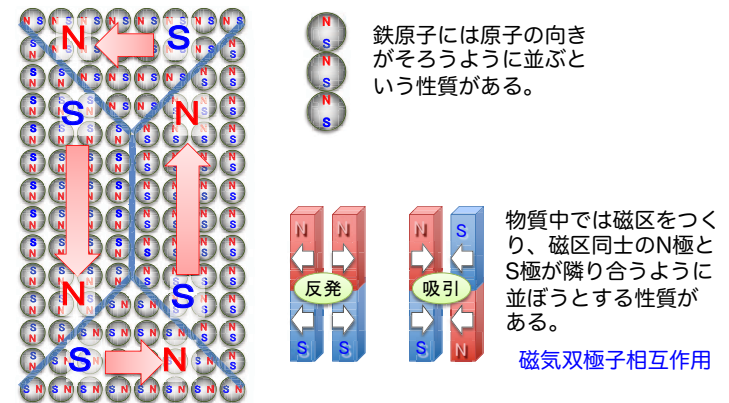
例えば、高温になると

無秩序状態

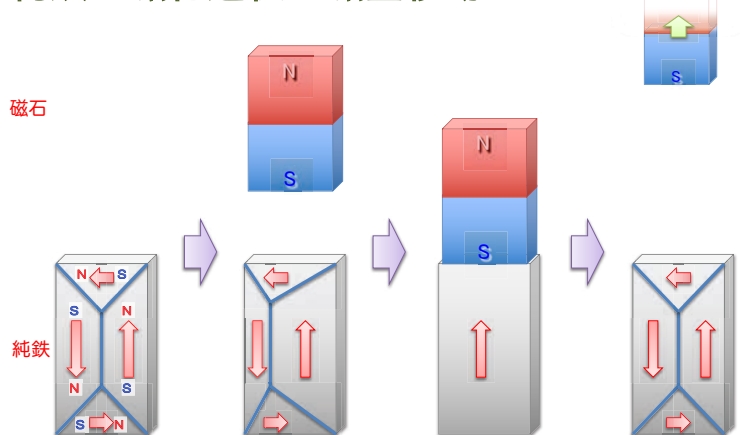


室温で常磁性を示すものは多数ある

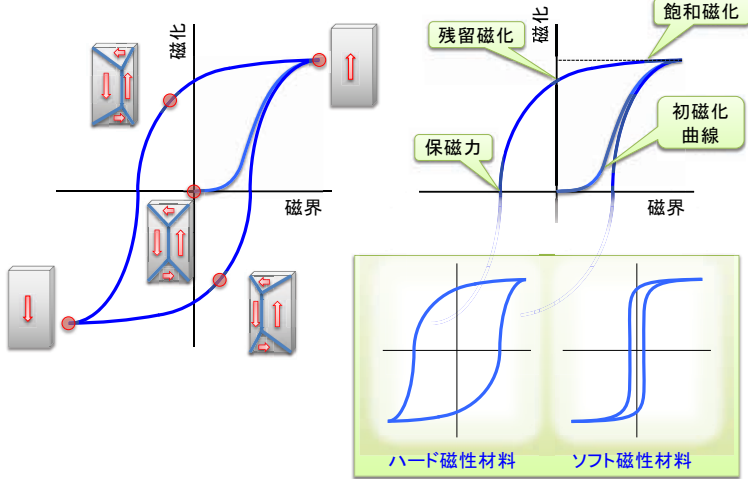
磁区構造とヒステリシス



純鉄の磁化過程と磁壁移動



磁気ヒステリシス



代表的な水素吸蔵合金

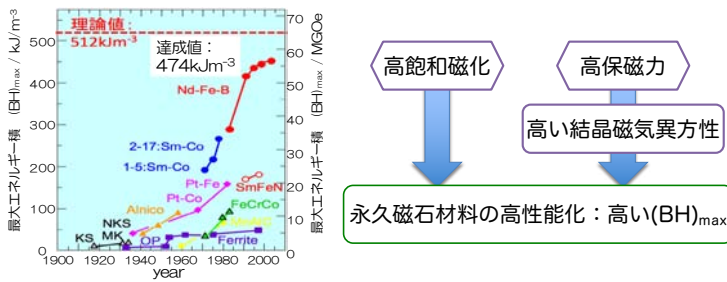
LaNi₅
TiFe
TiCr₂
V-Ti-Cr
Mg₂Ni

水素との親和力が大きな元素と小さな元素の組み合わせ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H	He															2
3	Li	Be															10
11	Na	Mg															18
19	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
37	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
55	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
87	Fr	Ra	Ac														
57	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
89	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

元素の組み合わせに特徴が、

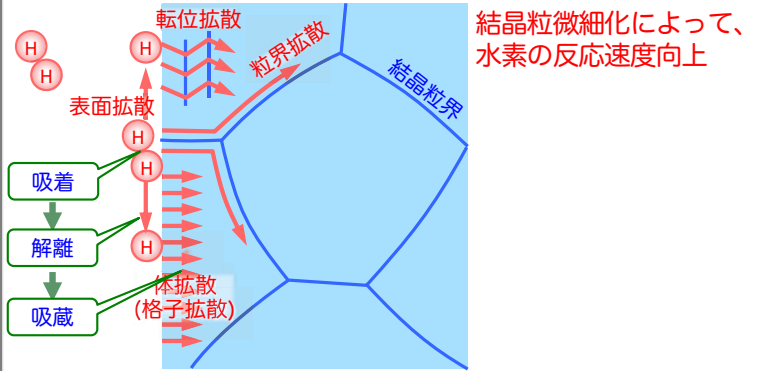
磁石の歴史と高保磁力化



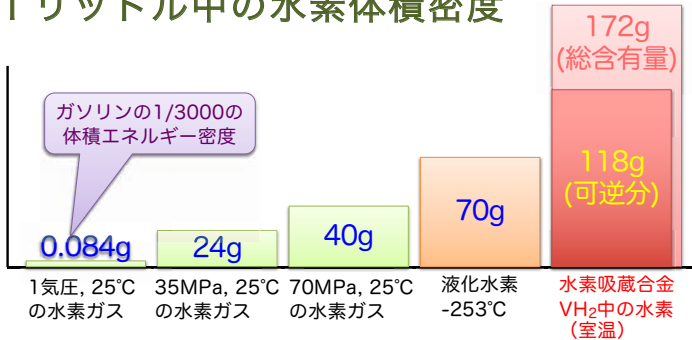
高保磁力化の方法

- ・残留ひずみで磁壁移動をピン止め →KS鋼
- ・スピノーダル分解で、微細粒化と磁壁ピン止め →Al-Ni-Co, Fe-Cr-Co
- ・第2相で、磁壁ピン止め →Sm₂Co₁₇系
- ・結晶粒微細化で、磁壁の数を減らす →Nd-Fe-B

水素の拡散と組織制御



1 リットル中の水素体積密度



1気圧、25°C の水素ガス
35MPa、25°C の水素ガス
70MPa、25°C の水素ガス
液化水素 -253°C
水素吸蔵合金 VH₂中の水素 (室温)