


■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Today OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2013, 小関 敏彦

The University of Tokyo / Today OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2013, Toshihiko Koseki

2013年度夏学期学術俯瞰講義

物質の神秘-その生い立ちから私たちの未来まで

第7回

金属の科学と材料としての応用

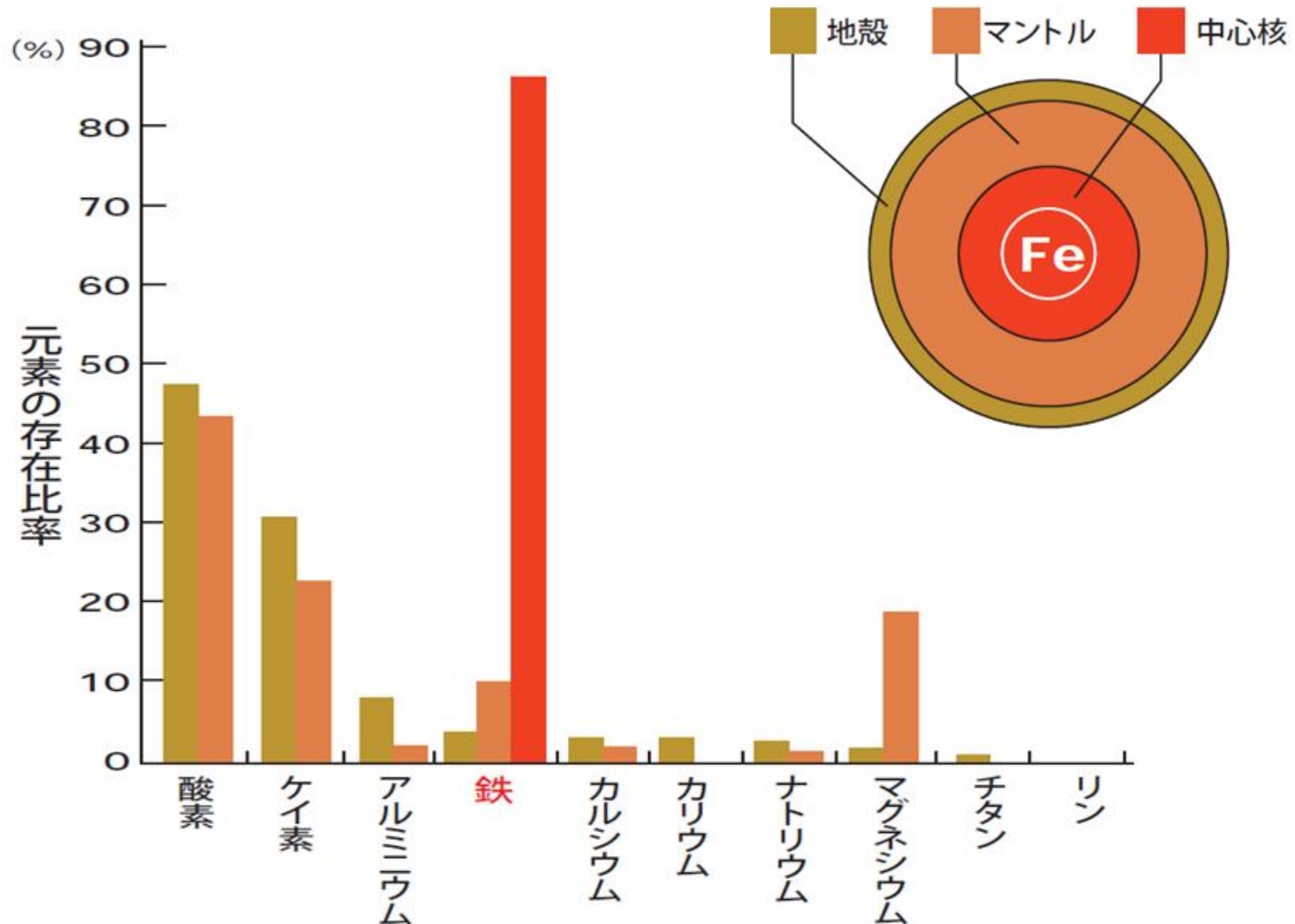


平成25年5月27日

工学部 マテリアル工学科

教授 小関 敏彦

地球の元素の存在割合



*
出典:「ものづくりの原点 - 科学の世界Vol.15:鉄の起源」
NIPPON STEEL MONTHLY, 2004.10, p.13 図7
新日鐵住金株式会社ウェブサイトより

物質から材料(マテリアル)へ



*

画像提供:
東京大学総合研究博物館

鉄鉱石 (Fe_2O_3)



*

ボーキサイト (Al_2O_3)

画像提供:
GeoGallery, Smithsonian National Museum of Natural History
http://www.mnh.si.edu/earth/text/geogallery_main.html



Photo by Ellywa, Wikipediaより転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:IMG_1614_rainbow_bridge_Tokyo.JPG
CC BY-SA 3.0



ビルや橋、自動車などに使われる鉄鋼



Photo by David Monniaux, Wikipediaより転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:B777-200LR_DSC04302.JPG
CC BY-SA 3.0



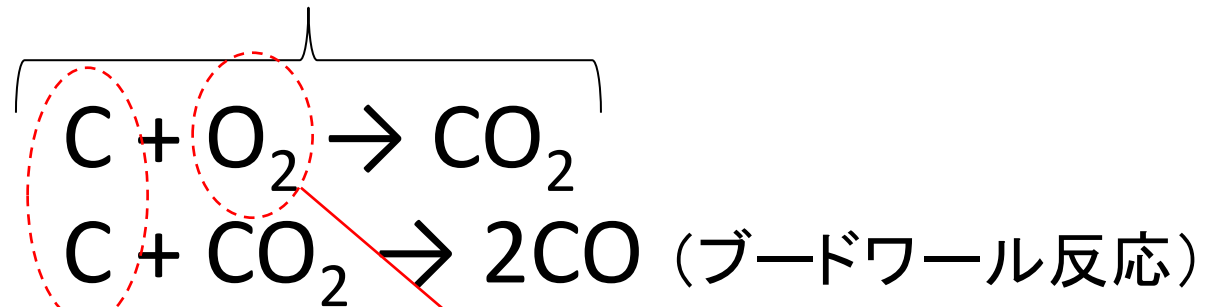
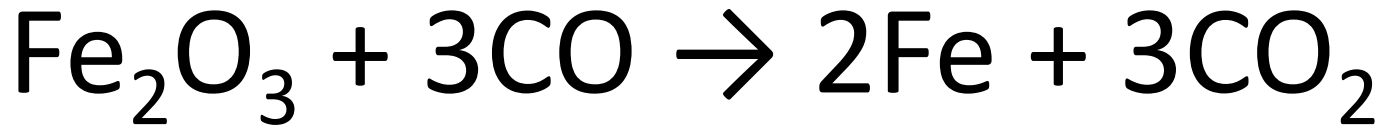
Photo by Lover of Romance, Wikipediaより転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Model_203_of_JNR.jpg
CC BY-SA 3.0

飛行機や鉄道車両、飲料缶などに使われるアルミ合金

物質から材料(金属)へ

- ◆ どうやって鉱物から金属を作るのか
鉄鋼-15 億ton/年, アルミ - 5千万ton/年
- ◆ どうやって強い金属にするのか
構造体の高性能化、安全性、軽量化

製鉄法



熱源・還元材

送風

温度・生産性

古代

木炭

人力ふいご

↓

↓

↓

中世

石炭 (16C)

風車・水車(15C)

↓

↓

↓

近代

コークス (18C)

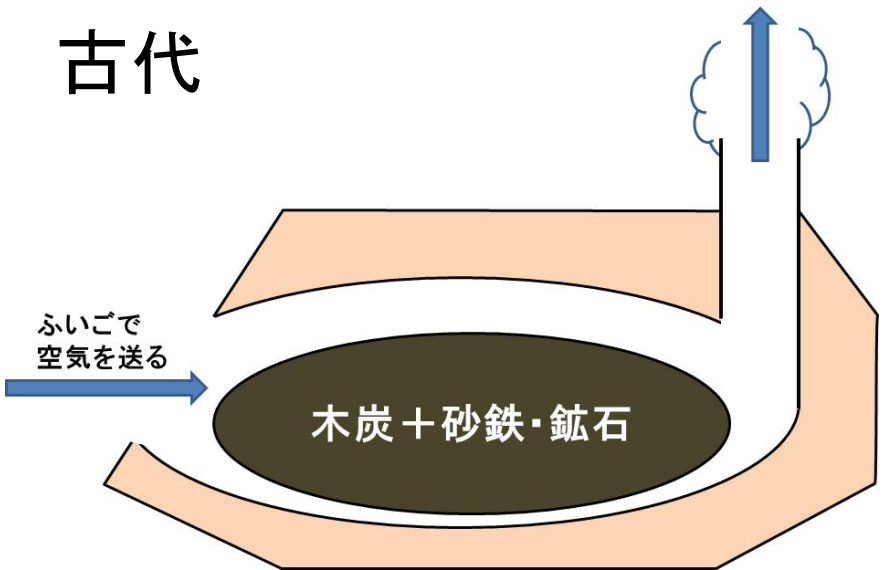
蒸気機関 (18C)

上昇

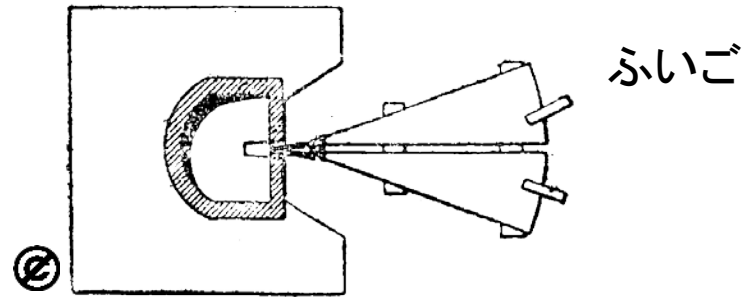
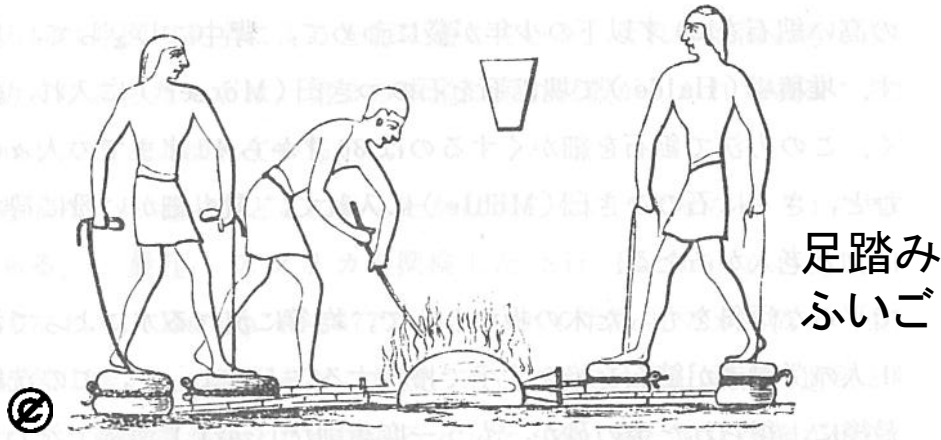
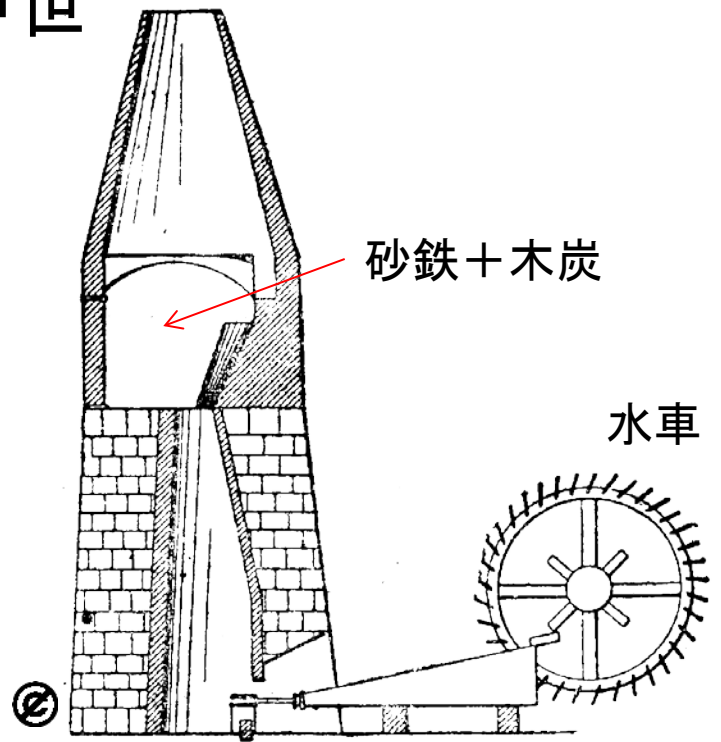
↓

古代～中世の製鉄

古代



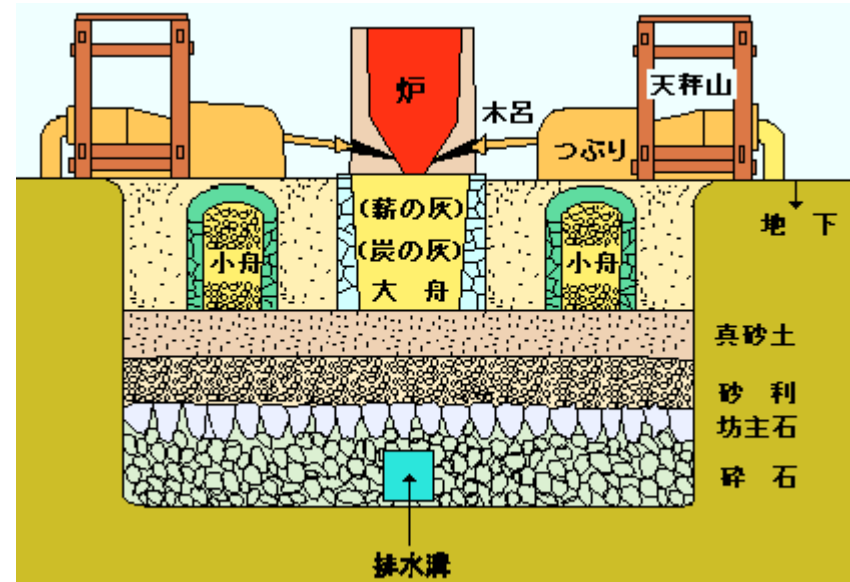
中世



たたら（日本、明治初期まで）

著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

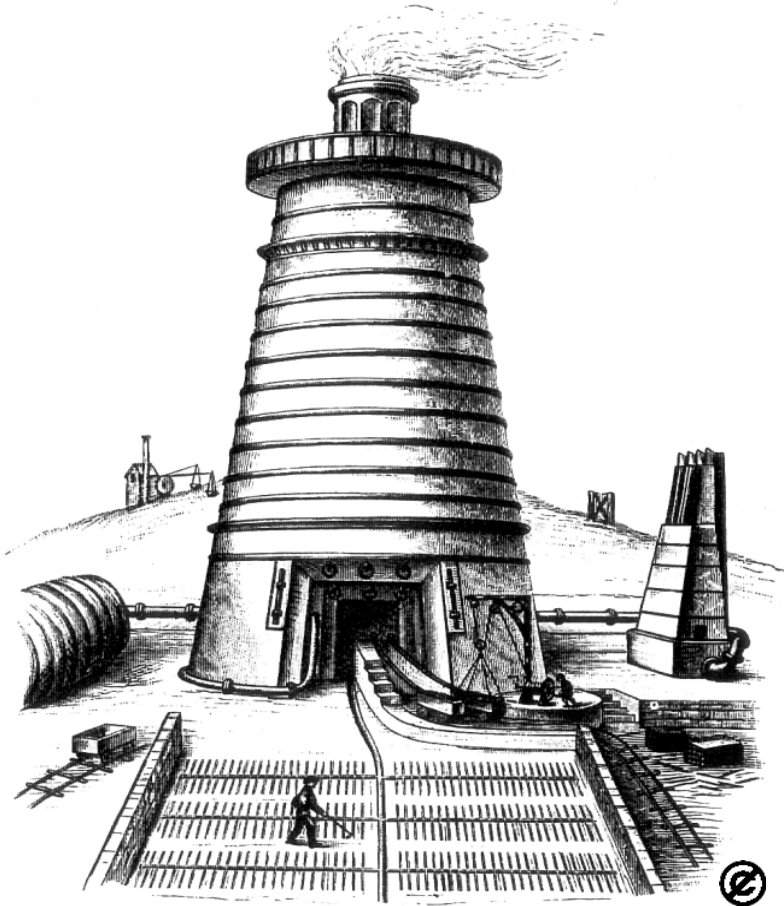
映画「もののけ姫」より
「足踏みふいご」と「たたら」の描かれた場面



* 日立金属ウェブサイト「たたらの話」
<http://www.hitachi-metals.co.jp/tatara/nnp0102.htm>

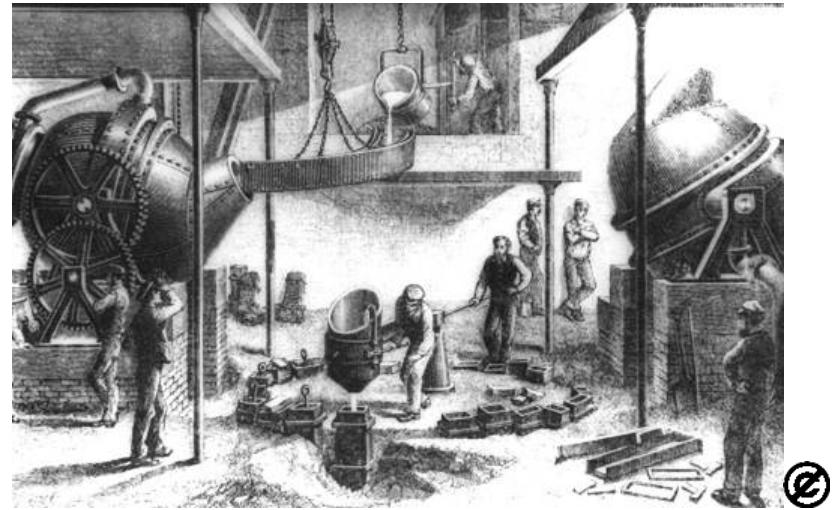
- 砂鉄＋木炭 → 鉄1トンに対し木炭6トン
- 人力ふいご。炉を横長にしてふいご数を増やす

産業革命を牽引した製鉄



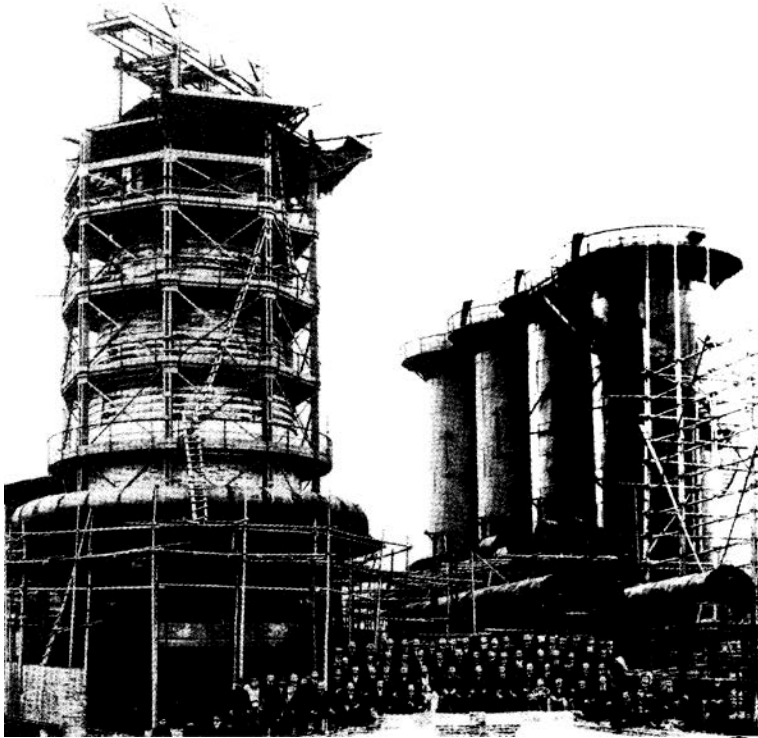
1850年代のイギリスの高炉

バック:鉄の歴史より



- ◆木炭の代わりにコークスを使用
- ◆水車の代わりに蒸気機関を使った送風
- ◆ベッセマー、「転炉」を発明(1856)
高炉で作った「鉄」を「鋼」に
- ◆製鉄⇔輸送・動力・機械

近代～現代の製鉄



1901年日本初の高炉
(官営八幡製鉄所)
生産 320トン/日

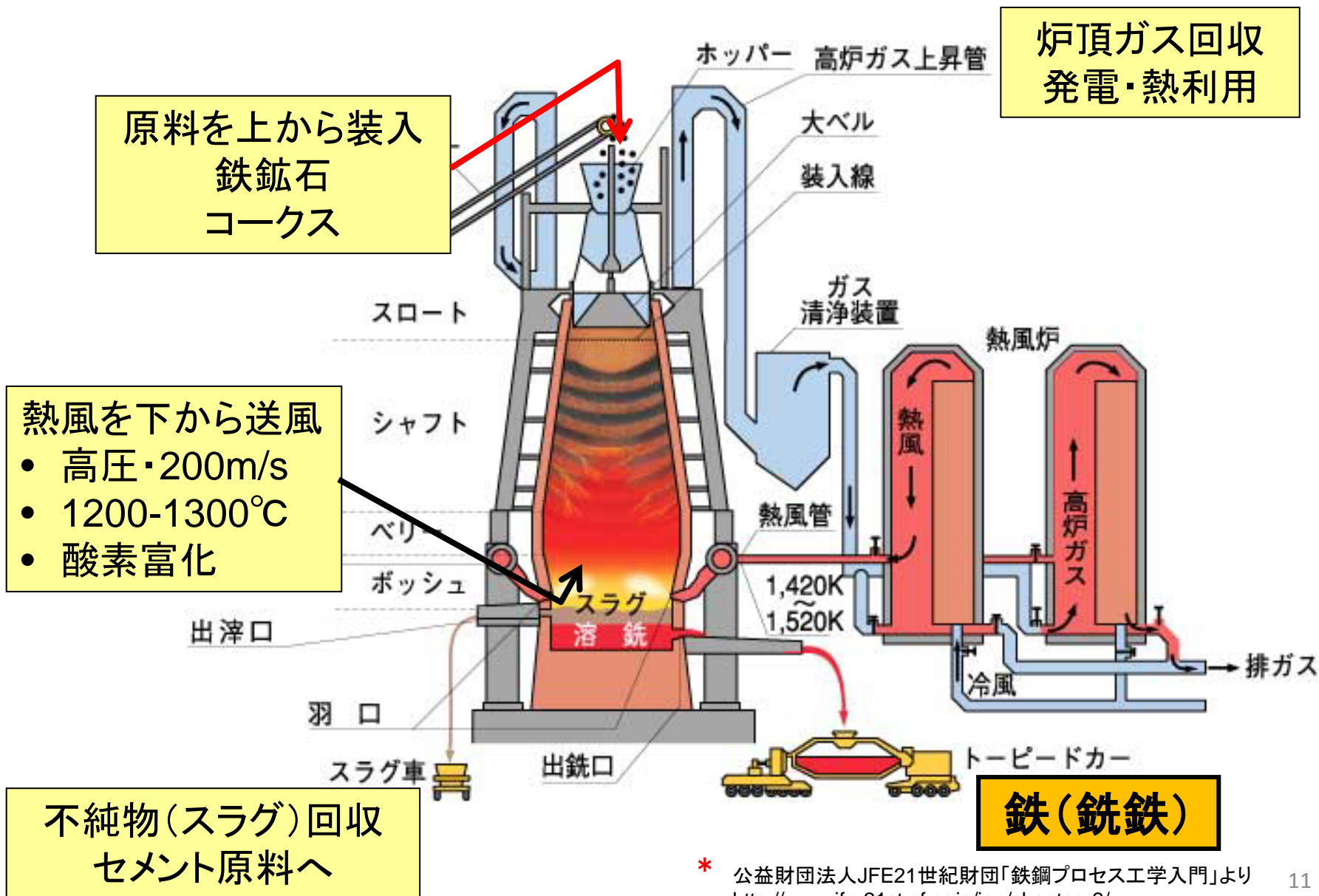


現在の高炉(八幡製鉄所)
高炉1基あたりの生産 約1万トン/日



写真出典:「日経ビジネスオンライン」2012年5月23日掲載
「日経ビジネス—時事深層:「技術流出」、特効薬なきジレンマ」八幡製鉄所の写真
<http://business.nikkeibp.co.jp/article/topics/20120518/232279/>
(初出:『日経ビジネス』2012年5月21日号「時事深層」/「技術流出」、特効薬なきジレンマ)
写真提供:新日鐵住金株式会社 八幡製鐵所

現代の高炉製鉄法



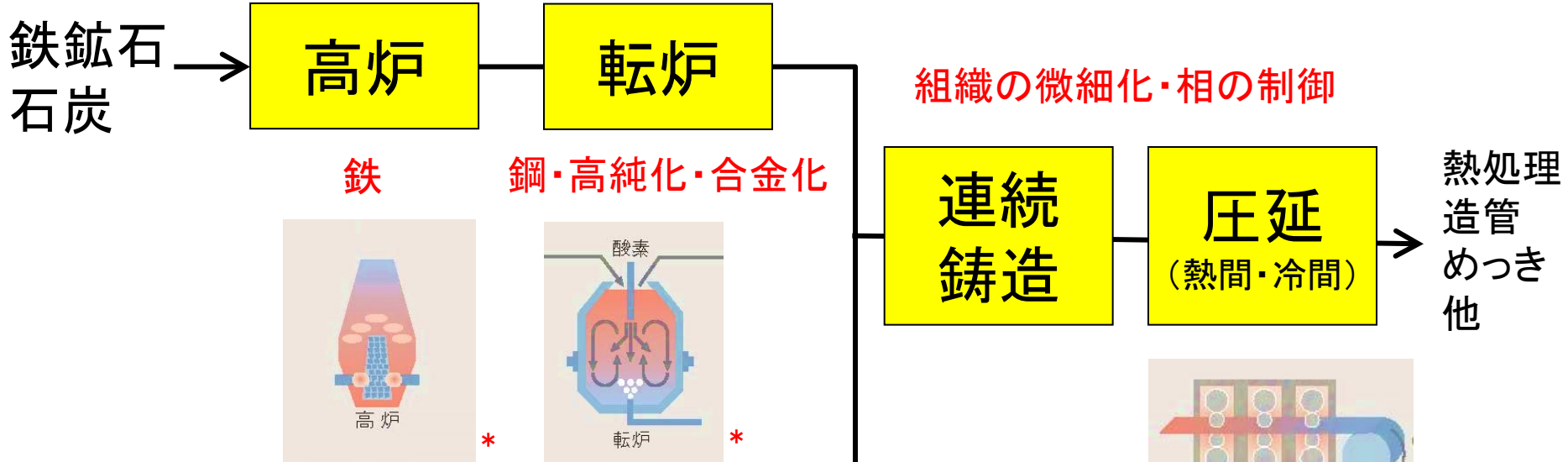
* 公益財団法人JFE21世紀財団「鉄鋼プロセス工学入門」より
http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_2/

鉄から鋼へ

- 「高炉」から出たままの「鉄」は炭素を4.5%含む。そのままでは脆く使えない。
- 炭素2%以下の鉄を「鋼」と呼ぶ。強さとしなやかさを併せ持つ。我々が日常使うのは「鋼」
- 「転炉」で鉄から鋼へ転換 $C(\text{in Fe}) + O_2 \rightarrow CO_2$
- 更に、材料として使えるようにするために合金化(他の元素の添加)、金属組織の微細化や相の制御

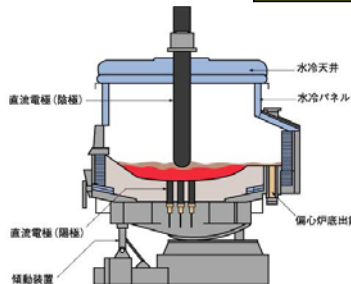
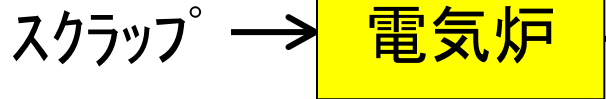
現在の鉄鋼の製造の流れ

<高炉・転炉法>



公益財団法人21世紀財団「大学教材 鉄鋼工学」
第1章図1.1より一部転載

<電炉法>



* 公益財団法人JFE21世紀財団「鉄鋼プロセス工学入門」より
http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_2/2h_1.html



公益財団法人21世紀財団「大学教材 鉄鋼工学」
第1章図1.1より一部転載

熱間圧延～1,000m/min
冷間圧延～3,000m/min

アルミニウムの製法

- ボーキサイト（純度40-60%）を250°CのNaOH中に溶解、
 $2 [\text{Al}(\text{OH})_4]^- \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$ （バイヤー法, 1888）
- Al_2O_3 を1000°CのNaFに溶解し、炭素電極で電気分解：
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 2\text{Al} + 3\text{CO}$ （ホールエール法, 1886）
- Al_2O_3 1トンあたり 15,000 kWh。「電気の缶詰」。大規模な発電・送電が可能になり大量生産
- 鉄鋼と同様、材料として使えるようにするために、合金化（他の元素の添加）、金属組織の微細化や相の制御。

物質から材料(金属)へ

◆ 鉱物から金属へ

→ 巨大なエネルギー、大型の多段のプロセスを使って酸化物を還元・高純度化 & 大量生産。

◆ どうやって強い金属にするのか

→ 構造体の高性能化、安全性、軽量化には**材**
料の高強度化が必要。

金属材料の強度

著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

William D. Callister, Jr. and David G.
Rethwisch,
Materials science and engineering, 8th.ed.,
SI version, New York: Wiley, 2011
p.164 Fig.6.11.

降伏強度

- ・弾性変形の限界
- ・ヤング率(弾性係数)

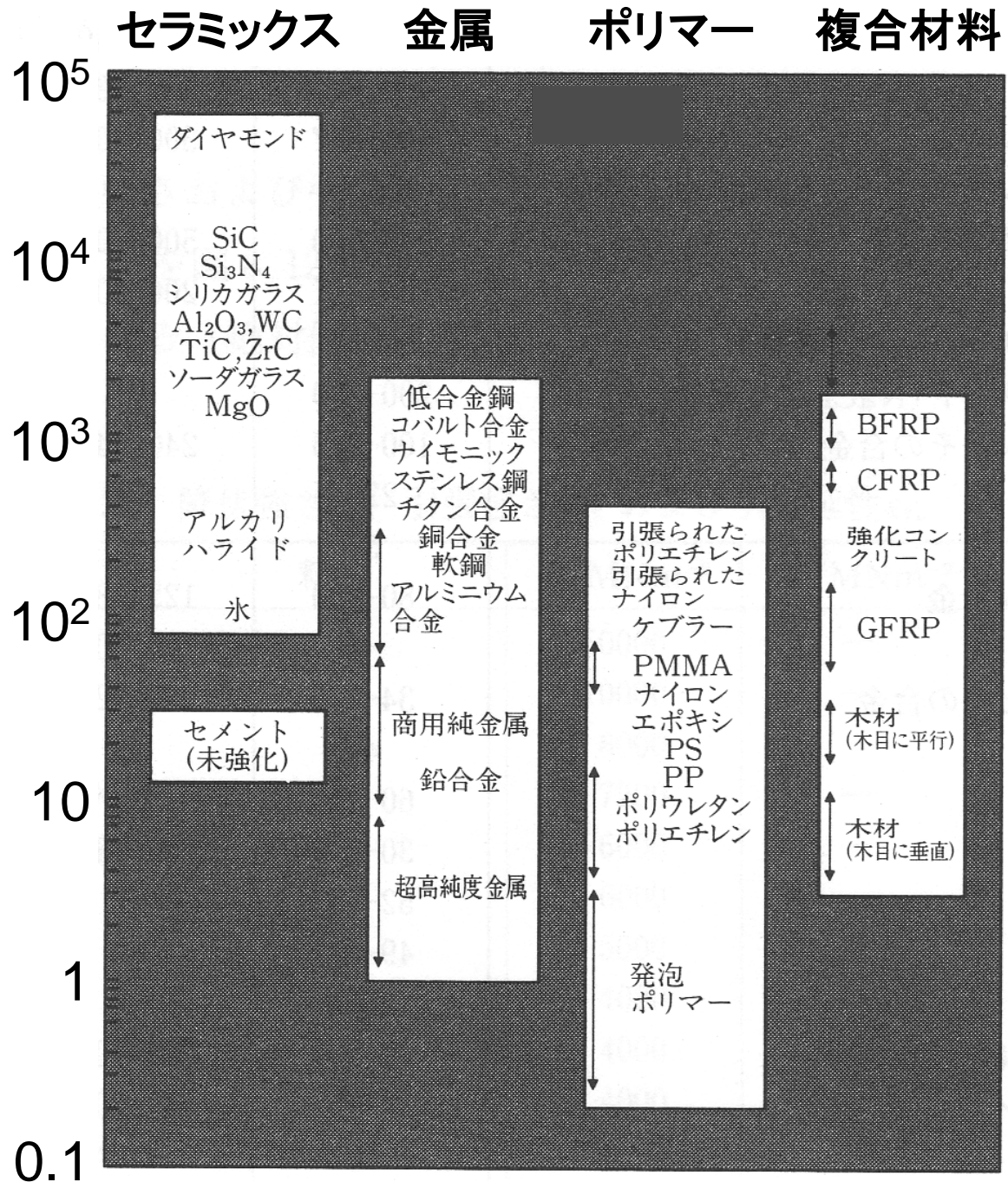
引張強度

- ・破断強度
- ・伸び

図: 引張変形したときの荷重と伸びの関係

降伏強度

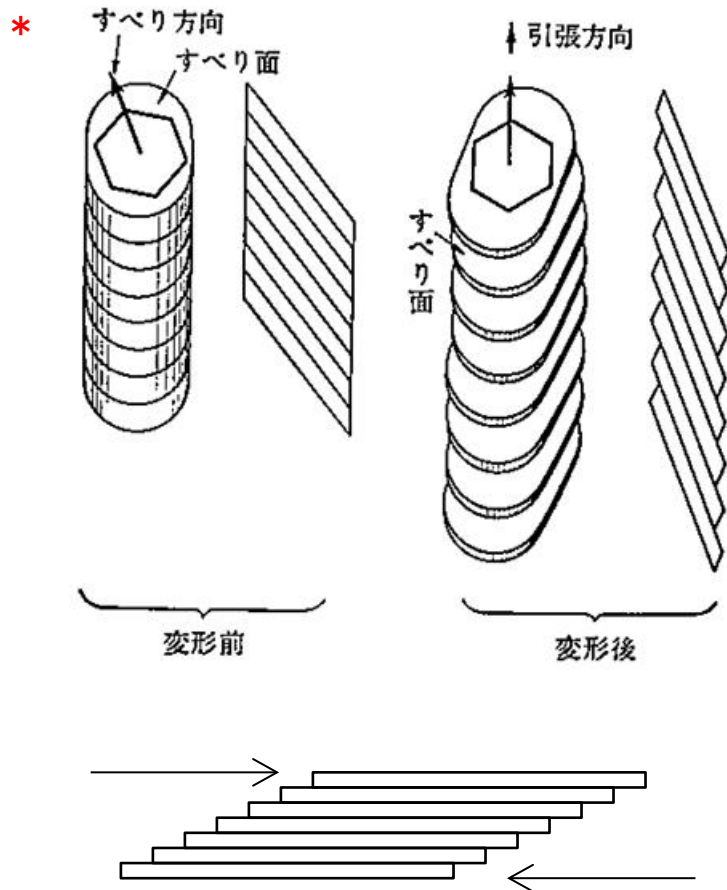
降伏強度 (MPa)



* 出典: Michael Ashby・David R.H. Jones『材料工学入門: 正しい材料選択のために』増訂版、堀内良・金子純一・大塚正久(訳)、内田老鶴圃、1999年、p.96 図8.12

金属の(塑性)変形

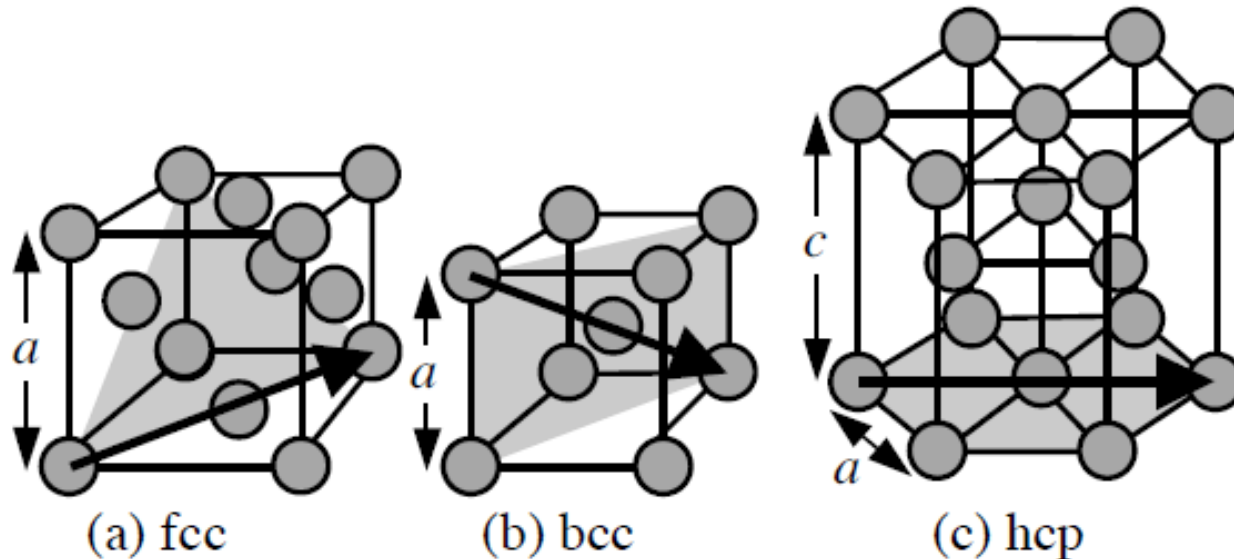
須藤一・田村今男・西澤泰二
『金属組織学』丸善、1972年、
p.107 図5.3

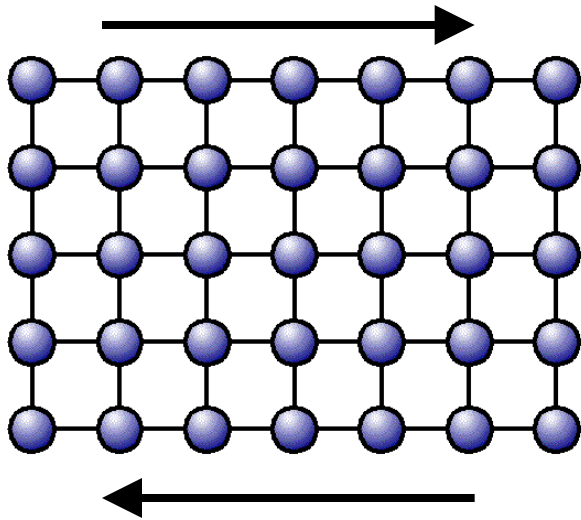


- 金属の引張り変形は**特定な結晶面の「すべり変形」**
- 金属の理論上のせん断強度は非常に高い
- しかし、実際の純鉄や純アルミは非常に軟らかい。強度は理論強度より何桁も低い。

金属結晶のすべり系

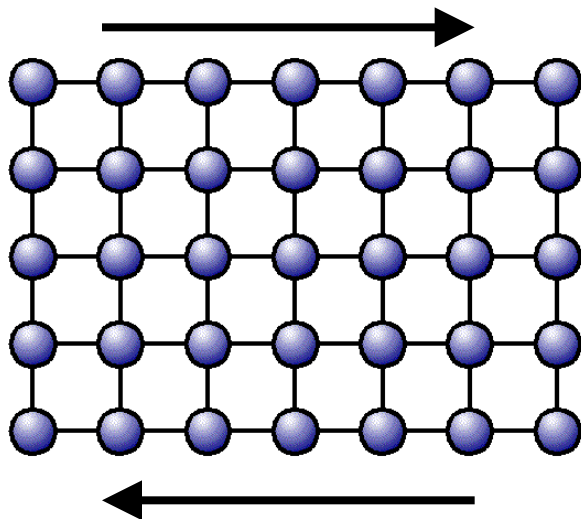
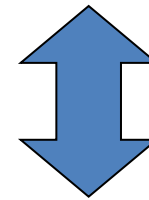
結晶構造	すべり面	すべり方向	すべり系の数	代表的な金属
面心立方晶 (fcc)	{111}	$\langle 110 \rangle$	12	Al, Cu, Au, Ni
体心立方晶 (bcc)	{110}	$\langle 111 \rangle$	12	α Fe, Mo, Cr
最密六方晶 (hcp)	(0001)	$\langle 11\bar{2}1 \rangle$	3	Ti, Mg





原子面全体を一度にずらすには

非常に大きな応力が必要.



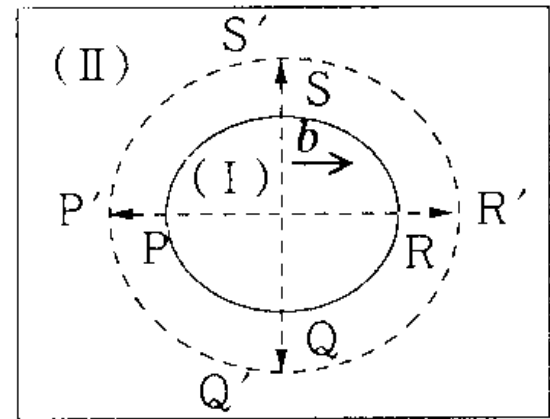
「**転位**」と呼ばれる格子欠陥を移動させる**応力は非常に小さい**.

転位の活動により塑性変形が起こる.

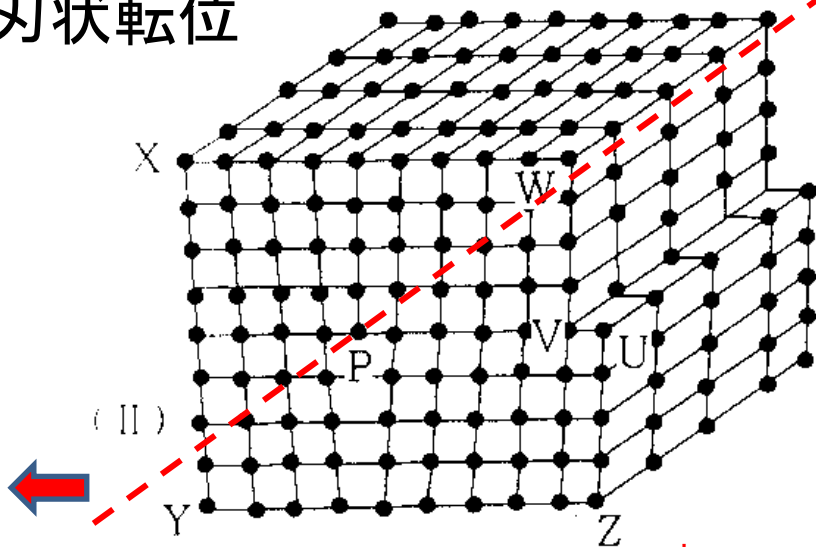
転位

- 金属結晶中の線欠陥
- 刃状+らせんの組合せ
- 通常 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m/m}^3$
- 応力下、すべり面上を移動
- 加工・変形中に増殖 ($\sim 10^{15} \text{ m/m}^3$)

* 出典: 西川精一『新版 金属工学入門』
アグネ技術センター、2001年、p.23 図1.20(a)

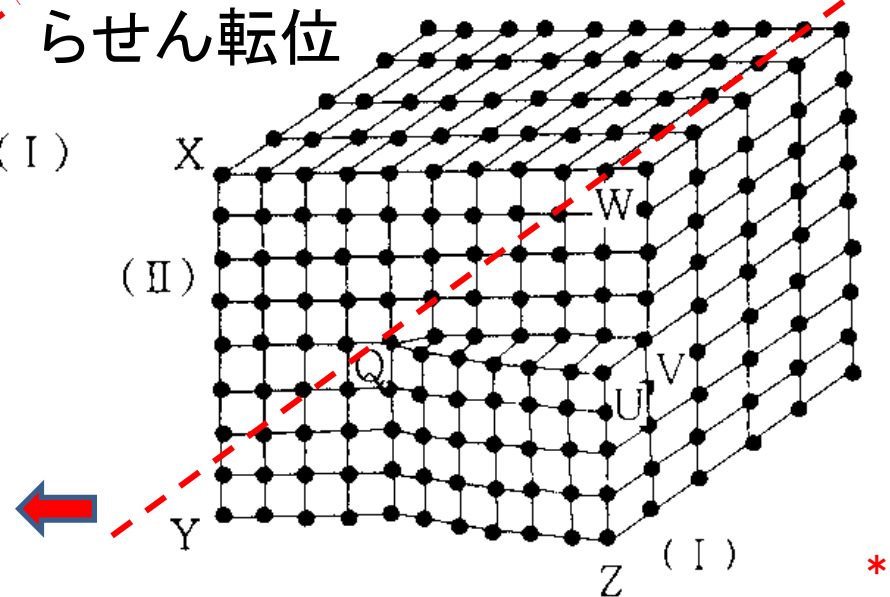


刃状転位



(a) PR断面

らせん転位



(b) SQ断面

出典: 西川精一『新版 金属工学入門』
アグネ技術センター、2001年、p.23 図1.21

アルミ中の転位の観察例

著作権の都合により、
ここに挿入されていた動画を削除しました。

鉄(フェライト)中の転位の観察例

著作権の都合により、
ここに挿入されていた動画を削除しました。

<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002/dislocations.movies.html>

金属の強化

- 転位の移動を妨げる→変形しにくい→高強度

- 妨げるためには

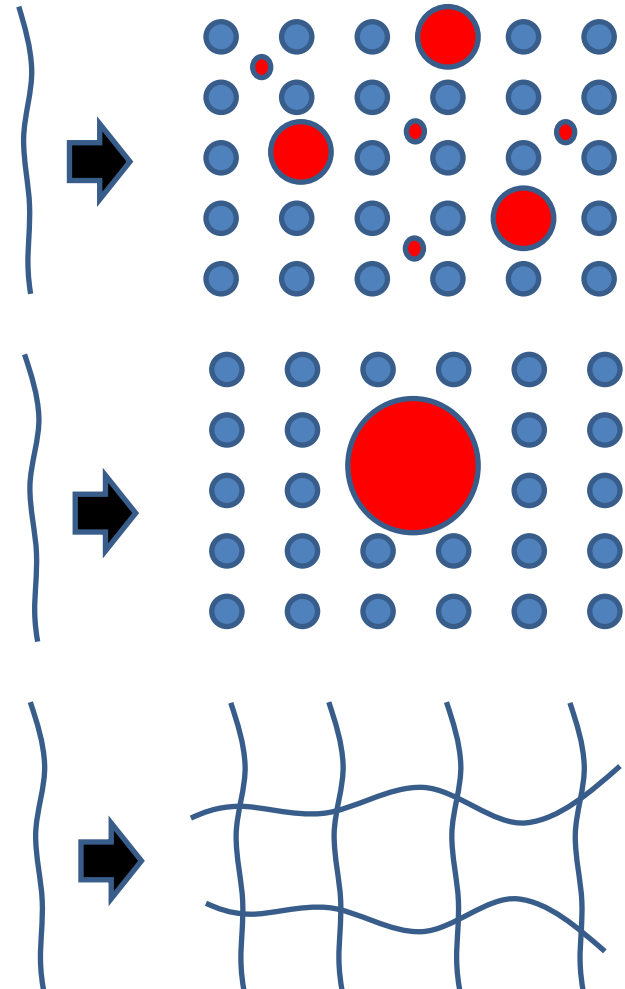
① サイズの異なる原子
→ 他の元素の添加

② 微細な第二相の分散

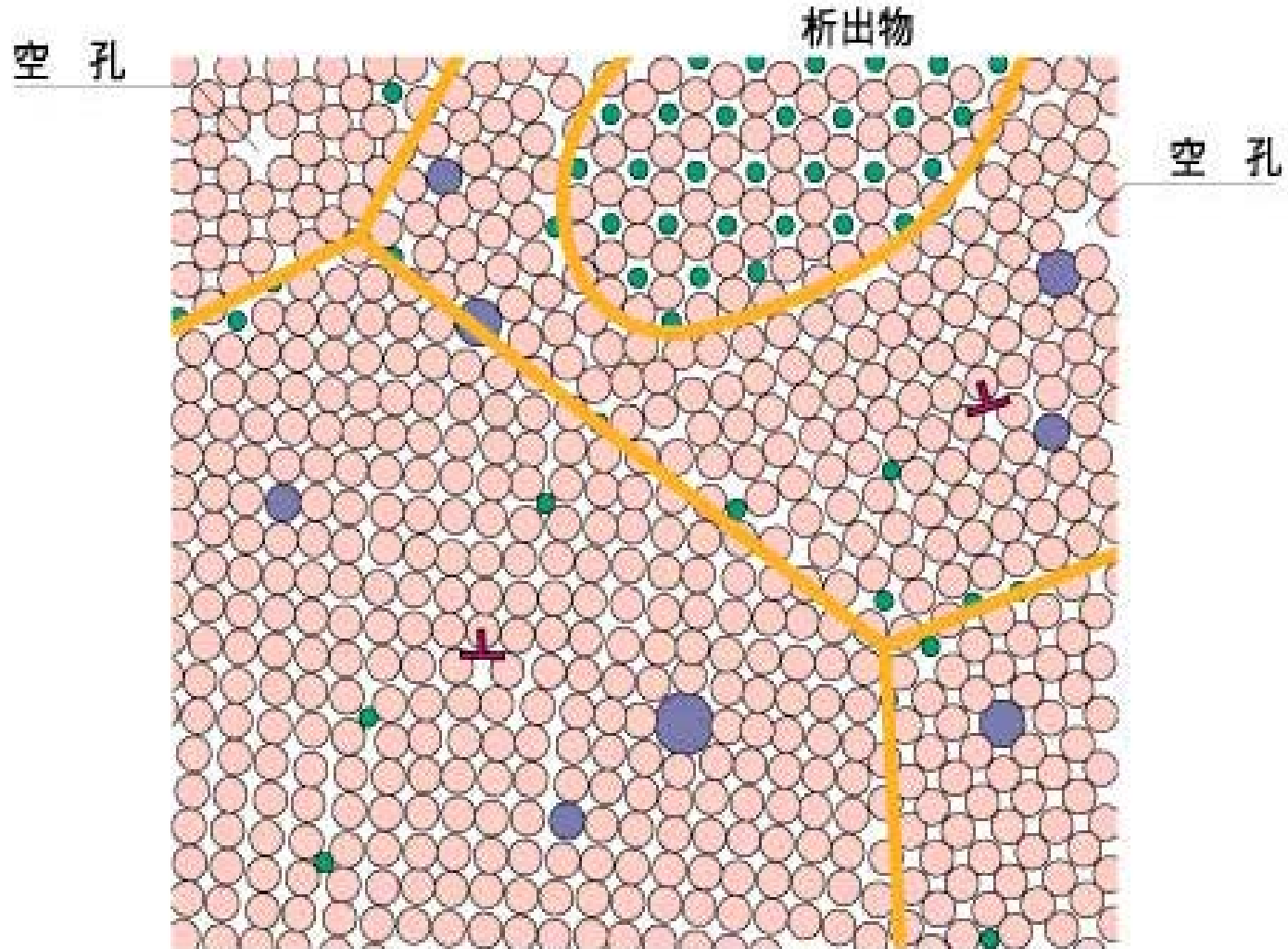
③ 転位同士の妨害
→ 転位を増やす

④ 結晶粒界を増やす
→ 結晶を微細化する

⑤ (鋼の場合)マルテンサイト相



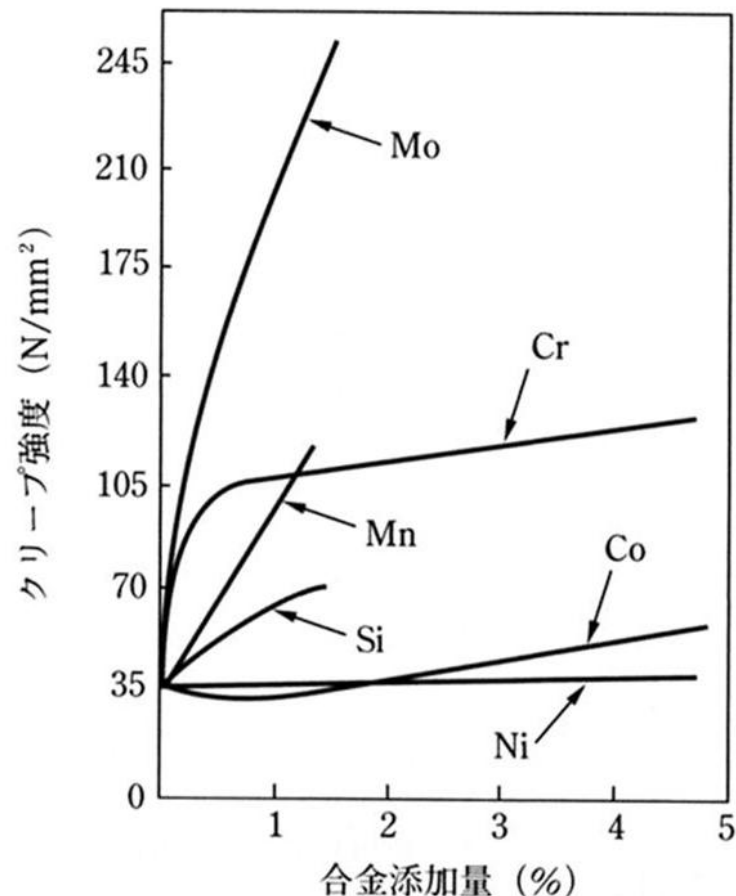
金属(鋼)の組織



- 鉄原子
- 侵入型固溶原子
- 置換型固溶原子
- ⊥ 刃状転位
- 結晶粒界

耐熱Cr-Mo鋼

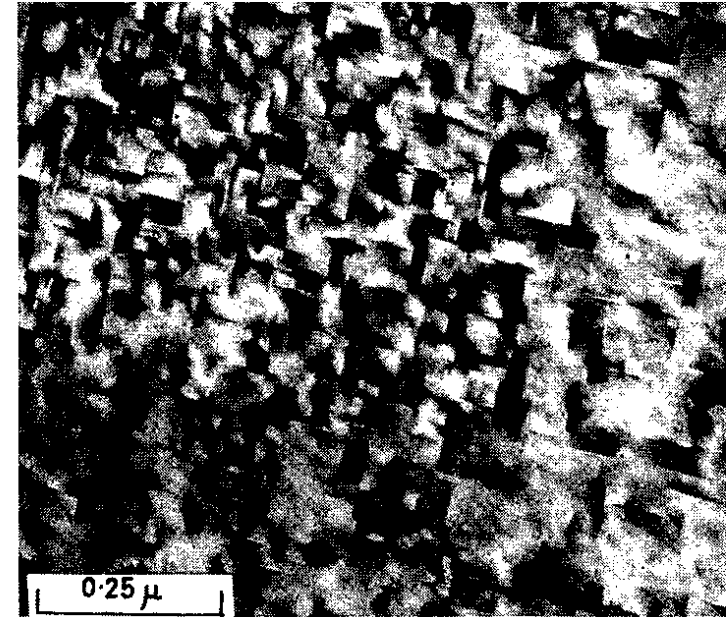
- Fe中のCr, Moは高温でも転位の移動を妨げ、鋼の高温強度に有効。
- Cr-Mo鋼は発電タービンやボイラー、耐火鋼に適用
- 火力発電の運転温度の上昇、建物の耐火性能の向上に貢献。



* 出典: 門間改三『鉄鋼材料学 改訂版』
実教出版、1981年、p.469 図8-53

強いアルミ合金 – ジュラルミン

- AlにCuを添加。Al-Cuの化合物がナノ析出し、転位の移動を妨害。軟らかいアルミを高強度に。
- 超ジュラルミン、超々ジュラルミンへ発展
- 航空機、新幹線などに適用

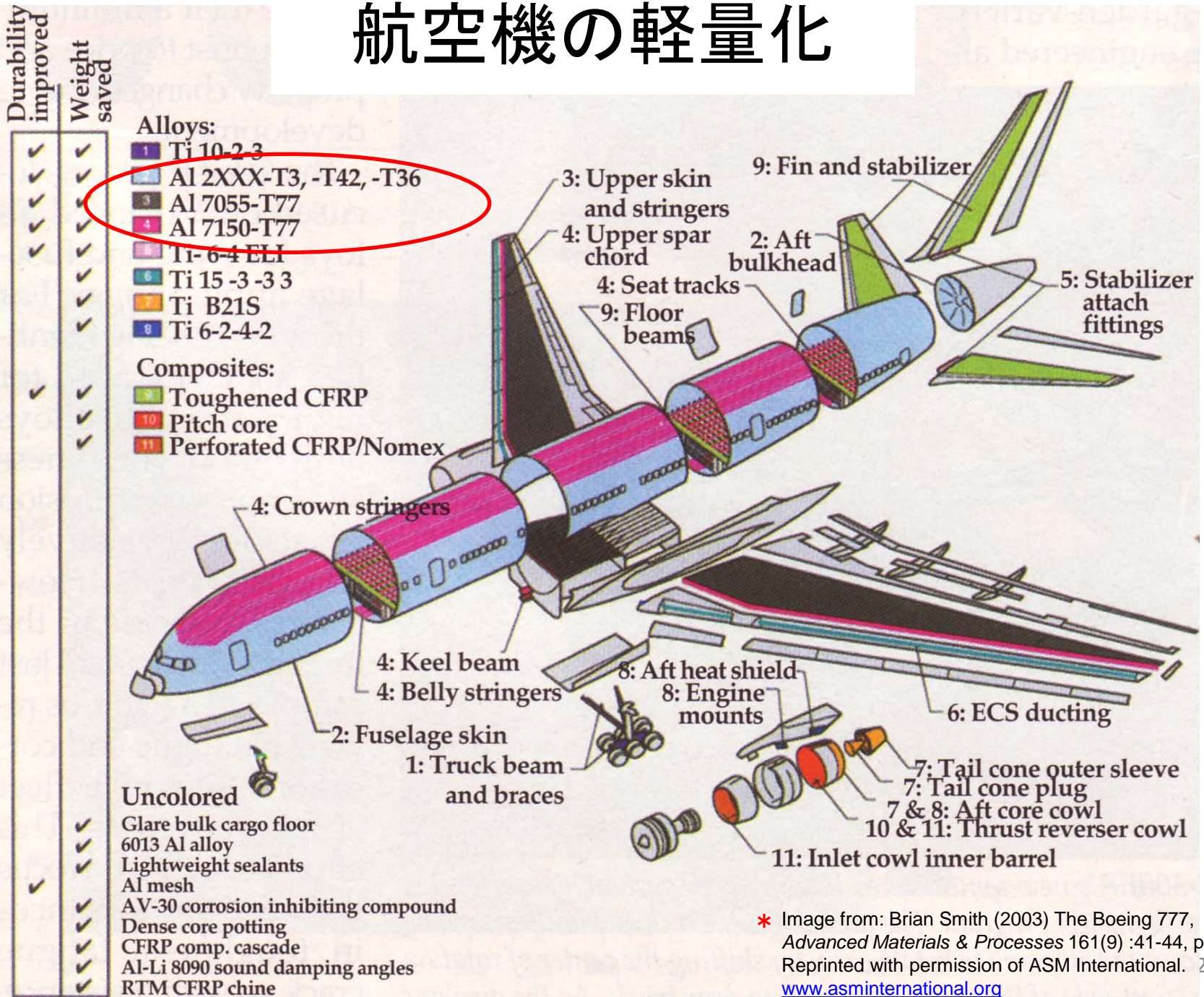


* Image credit: R.B. Nicholson, G. Thomas and J. Nutting (1959) Electron-Microscopic Studies of Precipitation in Aluminium Alloys, *Journal of the Institute of Metals*, vol.87(no.12):429-438, p.433 Fig.10 (c)The Institute of Metals 1959



Photo by David Monniaux, Wikipediaより転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:B777-200LR_DSC04302.JPG
CC BY-SA 3.0

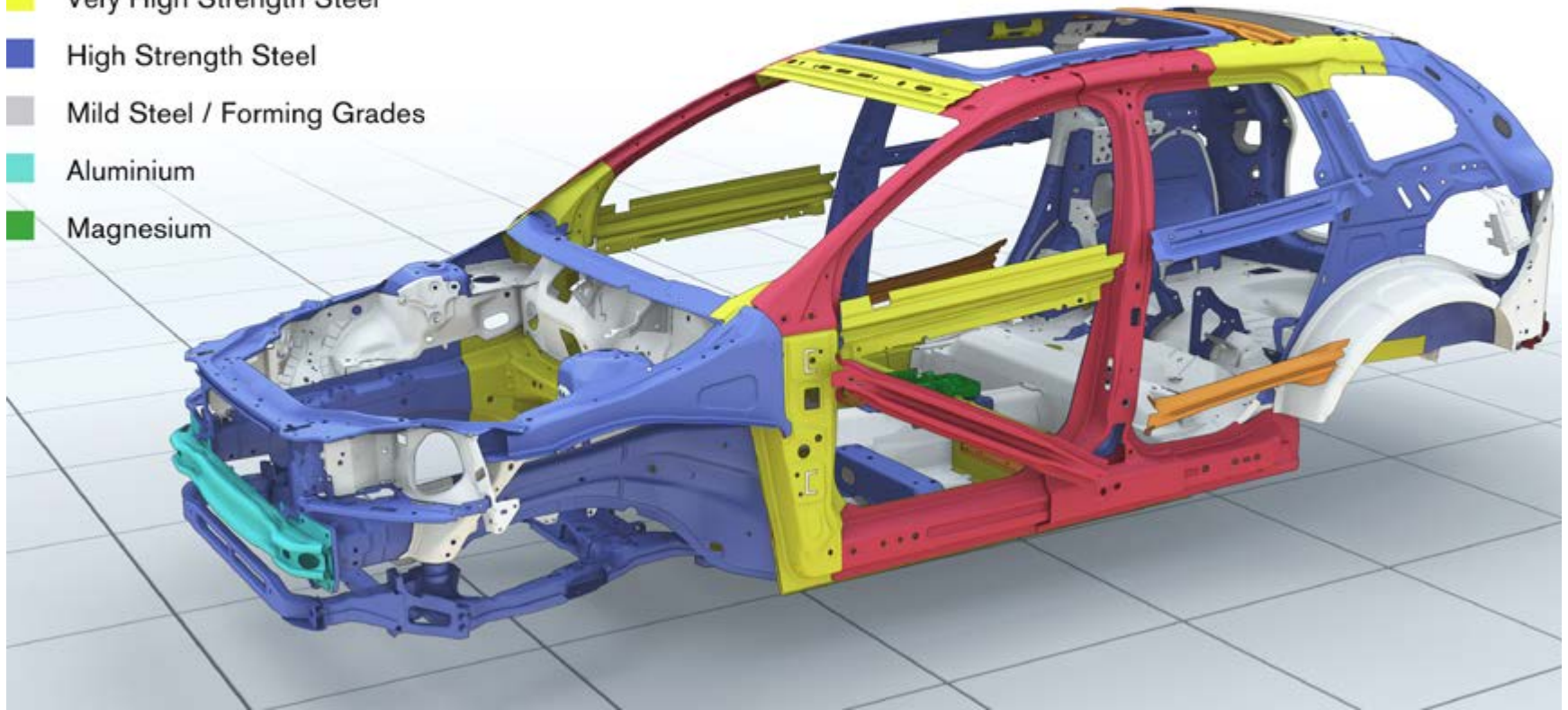
航空機の軽量化



* Image from: Brian Smith (2003) The Boeing 777, *Advanced Materials & Processes* 16(1):41-44, p.42. Reprinted with permission of ASM International. 27 www.asminternational.org

高強度鋼による軽くて衝突に強い車

- Ultra High Strength Steel
- Extra High Strength Steel
- Very High Strength Steel
- High Strength Steel
- Mild Steel / Forming Grades
- Aluminium
- Magnesium



* 画像提供:ボルボ・カーズ・ジャパン

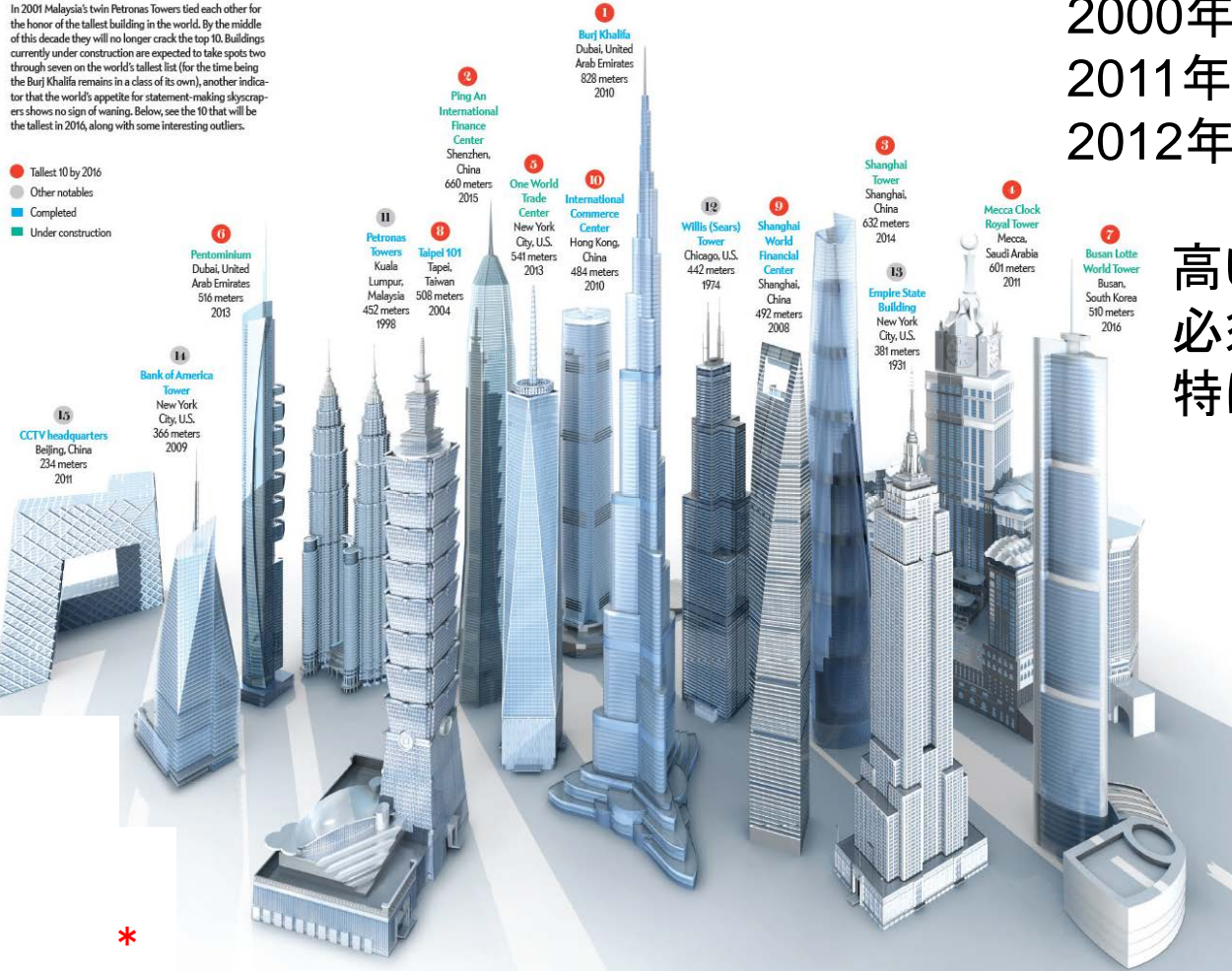
単に強いだけではダメ。加工性・変形性能も必要。

これから増える超高層

The Skyline of 2016

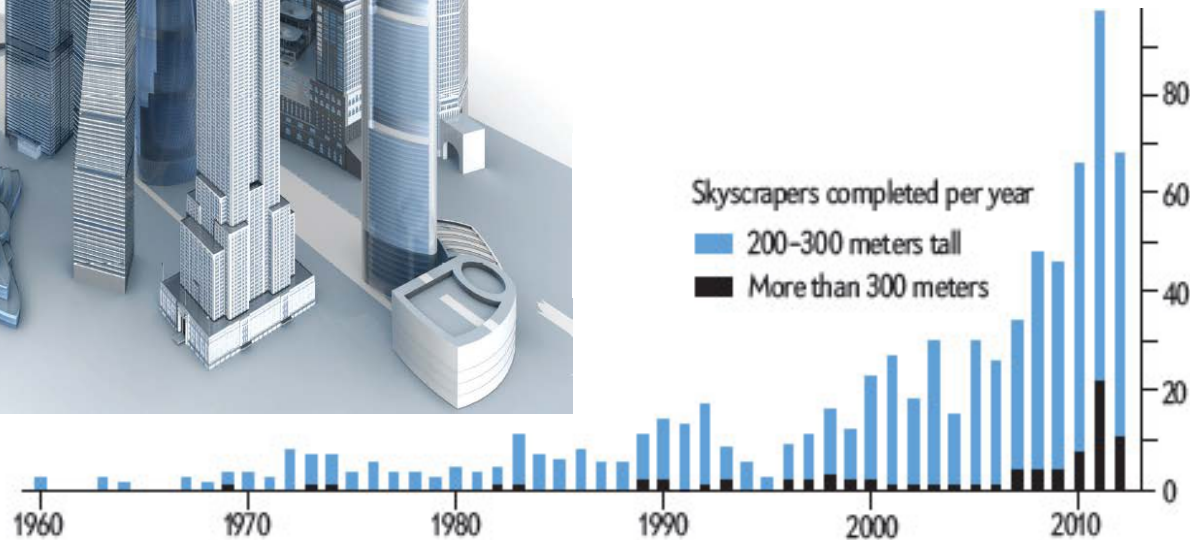
In 2011 Malaysia's twin Petronas Towers tied each other for the honor of the tallest building in the world. By the middle of this decade they will no longer crack the top 10. Buildings currently under construction are expected to take spots two through seven on the world's tallest list (for the time being the Burj Khalifa remains in a class of its own), another indicator that the world's appetite for statement-making skyscrapers shows no sign of waning. Below, see the 10 that will be the tallest in 2016, along with some interesting outliers.

- Tallest 10 by 2016
- Other notables
- Completed
- Under construction



2000年まで、300m超の超高層22棟
 2011年単年で10棟完成
 2012年は15棟

高い強度と信頼性の鉄鋼材料
 必須
 特に地震国、日本では。



耐震性を高める鉄鋼材料

制振ダンパー

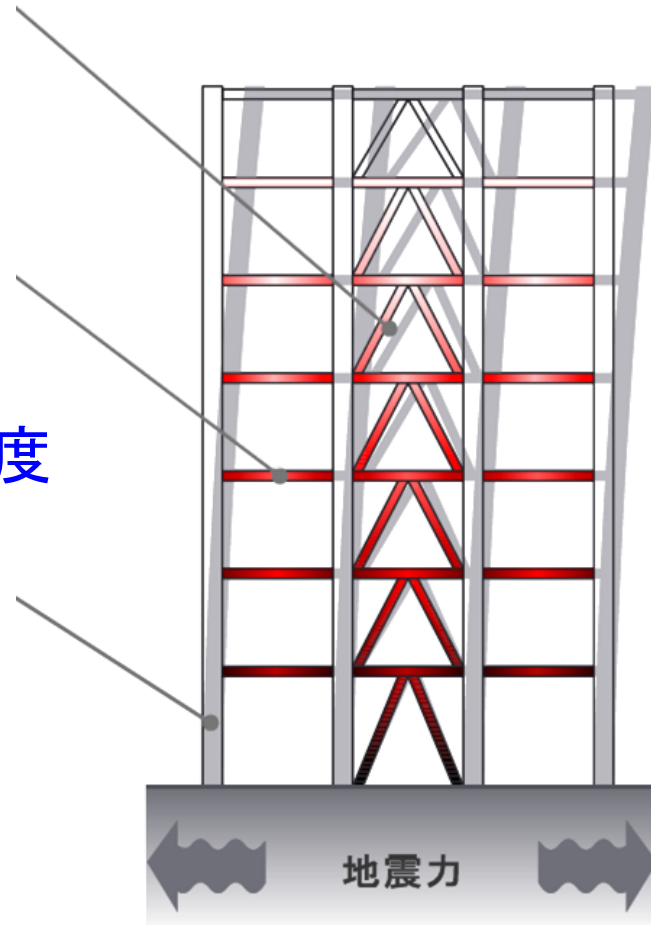
極低降伏強度
高伸び延性

梁部材

高強度
低降伏強度

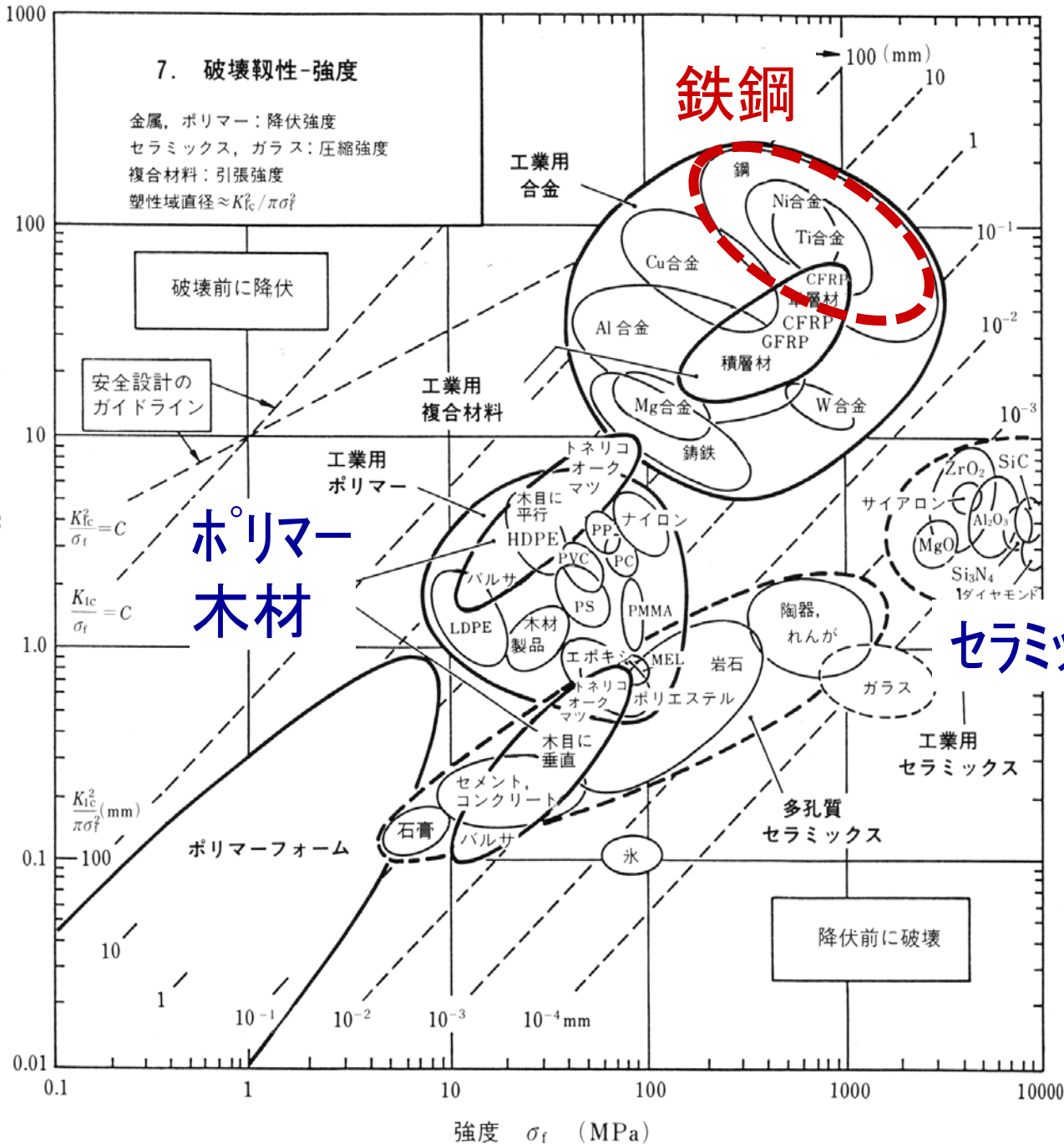
柱部材

高強度
高靱性



靱性

破壊靱性 K_{Ic} (MPa m^{1/2})



* 画像出典: M.F.Ashby 『機械設計のための材料選定』金子純一・大塚正久訳、内田老鶴圃、1997年、p.44 図4.8

強度

破壊靱性

材料の脆性破壊—巨視的な延性変形なしに
降伏強度以下で高速で破断

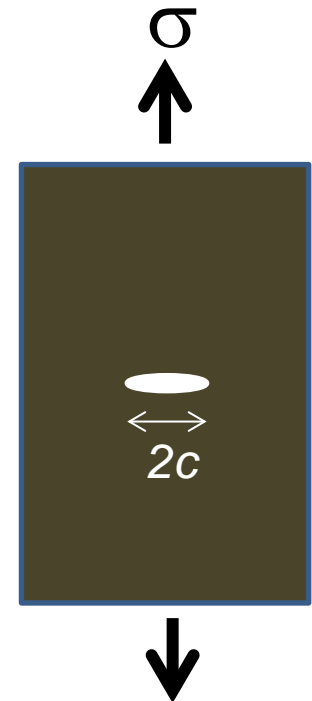
脆性破壊の発生基準

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c}$$

$$K_I \begin{cases} > K_{IC} : \text{成長する} \\ < K_{IC} : \text{成長せず} \end{cases}$$

$$K_{IC} = \sqrt{2E\gamma_s} : \text{破壊靱性}$$

K_I 材料の破壊靱性
 σ 荷重
 c 内在欠陥サイズ



脆性破壊を防ぐには K_{IC} の大きな材料+小さな内部欠陥

なぜ金属が構造用材料に選ばれるか

- セラミックス： 高強度 , but 低靱性 + 低延性
- ポリマー： 低強度・低靱性・低ヤング率
- 金属： 強度と靱性・延性のバランス
 - 高強度 → 軽く高強度の構造体
 - 高靱性 → 信頼性
 - 高延性 → 加工性、エネルギー吸収特性



Image by Kakidai, from Wikimedia Commons (2013/10/15)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tokyo_Sky_Tree_2012.JPG?uselang=ja
CC BY-SA 3.0



* 写真提供: 東京都港湾局



Image by FeZn, from Wikimedia Commons (2013/7/31)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:LNG_Carrier.jpg
CC BY-SA 3.0



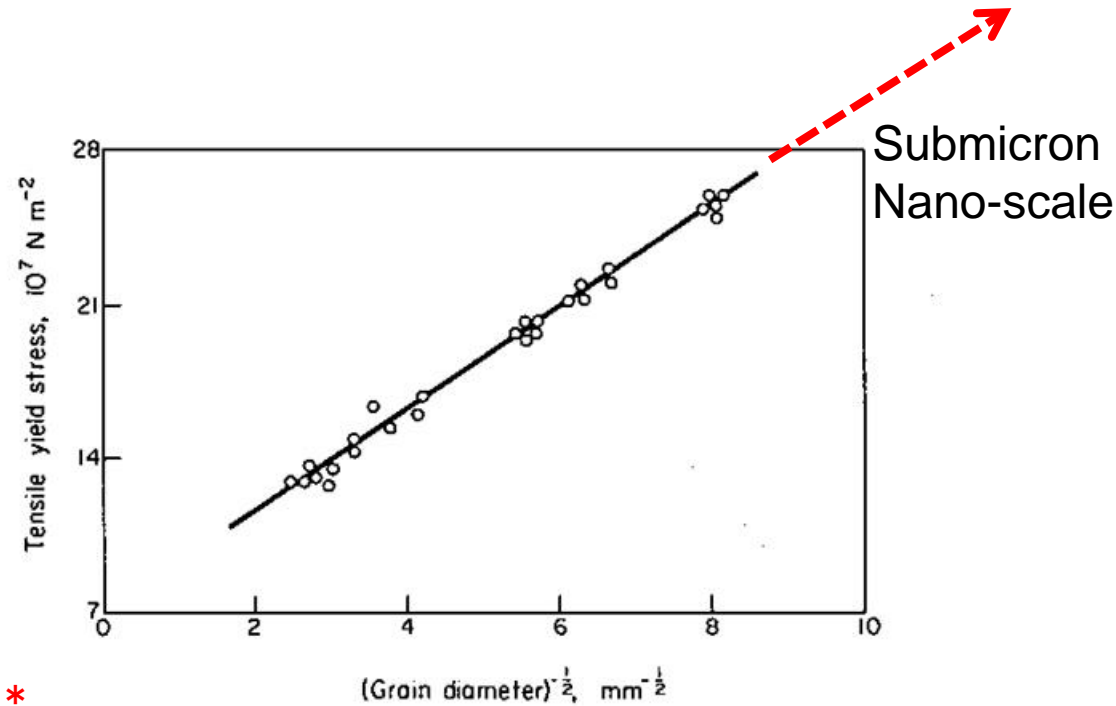
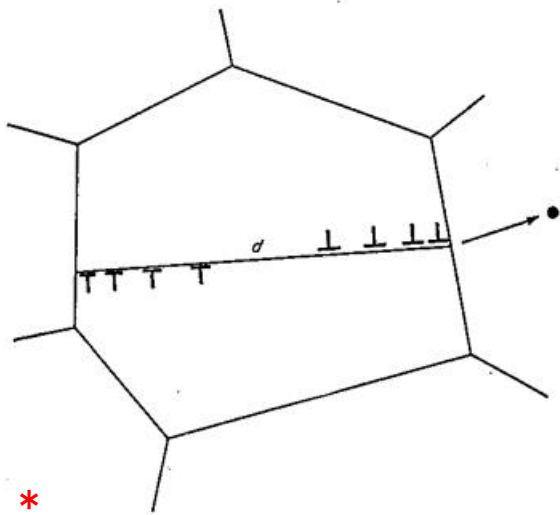
Image by Floydrosebridge, from Wikimedia Commons (2013/8/7)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lng_adriatic.jpg
CC BY-SA 3.0

金属材料へのさらなる要求

- より一層の高強度化
 - 構造体の軽量・高性能化
 - 構造体の軽量化による省エネ、低CO₂
- より一層の信頼性
 - 高靱性・高延性と高強度の両立
 - 耐食性、耐熱性、耐疲労性など高耐久化
- より一層の環境性能
 - 希少金属を使わない高性能化(資源戦略・リサイクル)
 - 金属生産の環境負荷低減

これからの金属材料 - 超細粒化

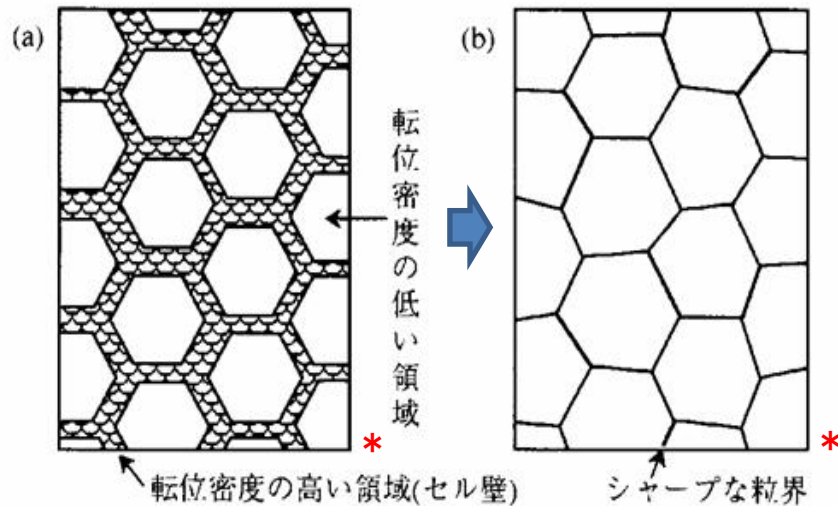
(高強度化の追求と高靱性・延性の両立)



ホール・ペッチの関係 $\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$

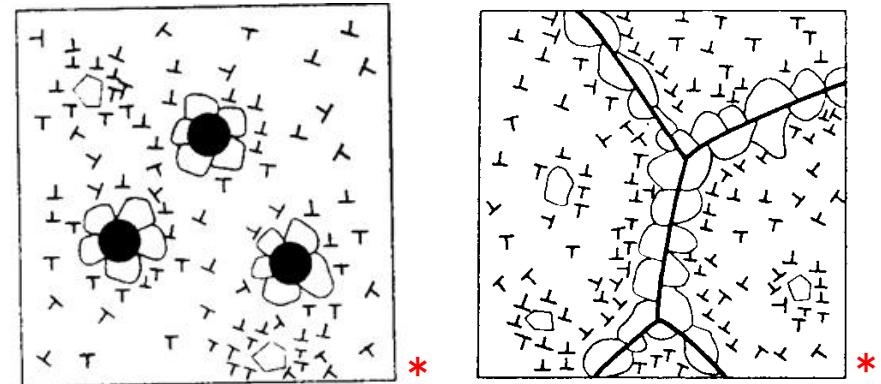
超細粒金属の作成

超強加工→回復・再結晶、相変態による極細粒化



出典: 高木節雄・津崎兼彰
『材料組織学』朝倉書店、2000年、p.75 図4.8

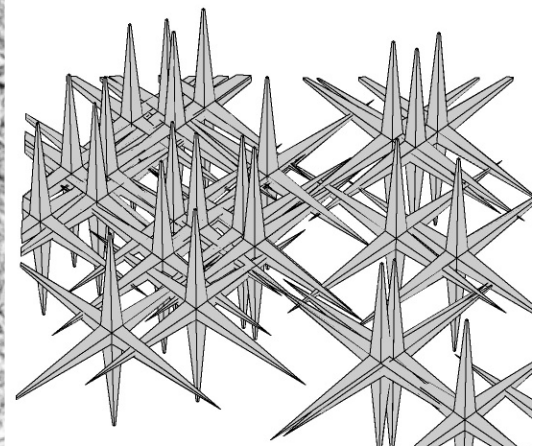
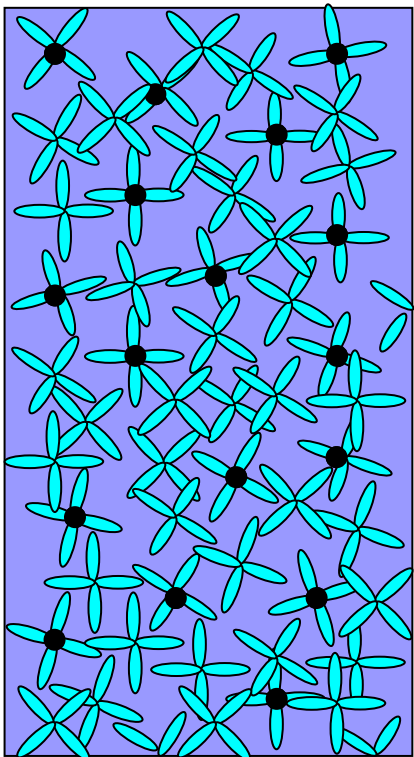
高転位密度→結晶粒界



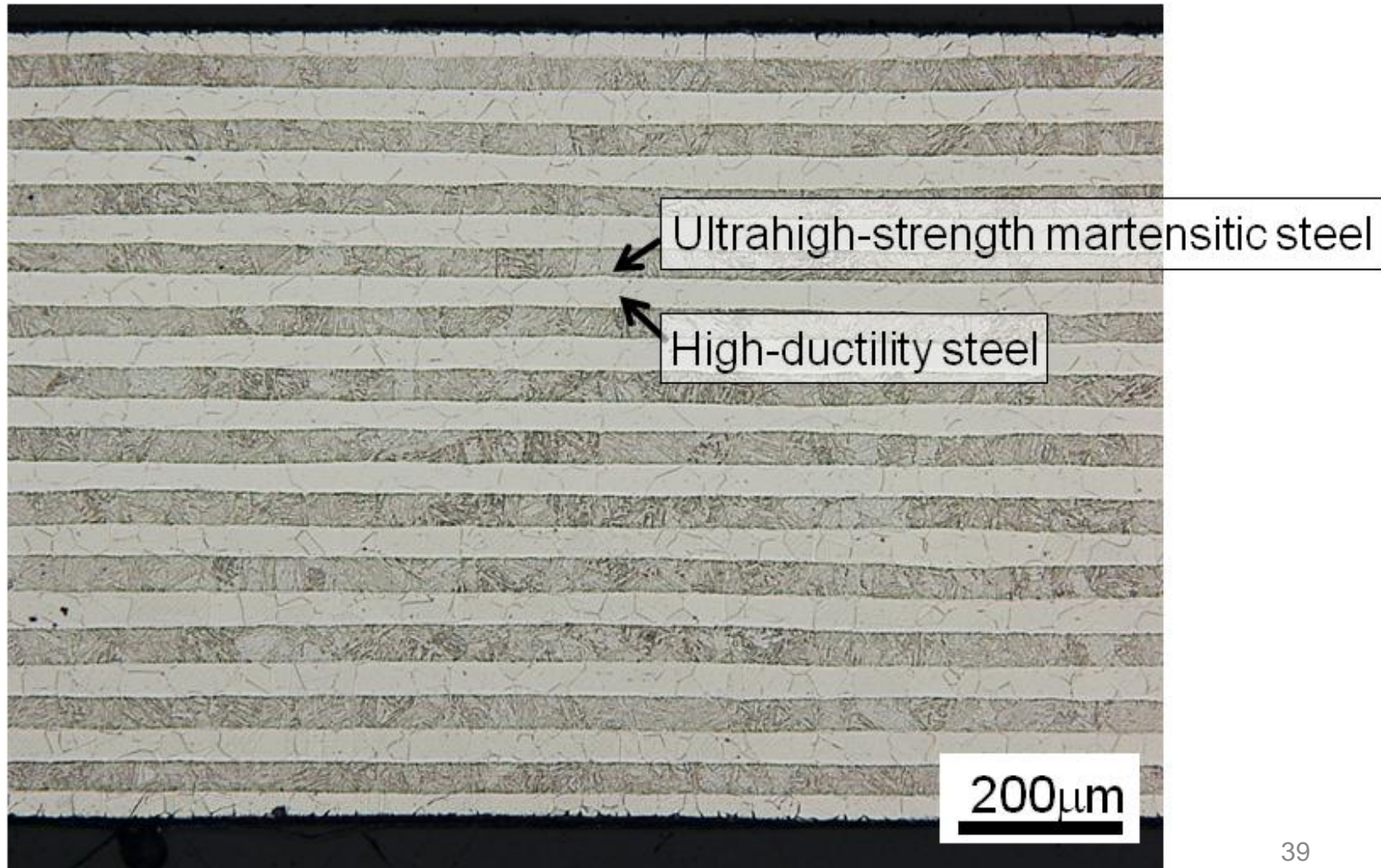
出典: 北田正弘『新訂 初級金属学』
内田老鶴圃、2006年、p.119 図8.18(c)[左] および
p.120 図8.19(b)[右]

高転位密度 → 新たな結晶粒
(高エネルギー)

全く新しい結晶粒の形 針状結晶の放射状成長、インターロック組織



全く新しい金属材料 金属-金属複層材料



まとめ

- 天然に存在する物質から役に立つ物質(金属材料)までの転換は多大なエネルギーと多段のプロセスにより実現されている。
- 金属の軟らかさや加工性は「転位」という線欠陥の移動によって実現し、それを妨げることにより金属の高強度化が達成される。
- 金属材料には更なる高強度化が求められるが、同時に靱性や延性など様々な特性との両立が重要である。