

原子力分野での金属材料 導入教材

金属材料の基礎

担当
北海道大学 坂入正敏

発電用原子炉のおさらい

日本の商業用原子力発電は軽水炉

BWR :

原子炉容器の中で直接蒸気を発生させ、この蒸気をタービン発電機に導入して発電する
炉心で沸騰している原子炉冷却材（軽水）を循環させるため、再循環ポンプにより流量を制御して循環させる

PWR :

原子炉容器の中で高温高圧水をつくり、これを蒸気発生器内の伝熱管（内側、一次系）に導入し、伝熱管の外側（二次系）に熱を伝えて蒸気を発生させ、この蒸気をタービン発電機に導入して発電する

原子力分野での金属材料

- ・ **鉄系材料**

炭素鋼, ステンレス鋼

- ・ **非鉄系材料**

ジルコニウム合金, アルミニウム合金, チタン合金, 銅合金

金属とは

元素周期表の約7割の元素が含まれる

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	ランタノイド	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	アクチノイド	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
	ランタノイド	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
	アクチノイド	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

金属とは

単体のうち、

金属光沢をもち、**熱や電気をよく伝え**、**展性や延性**に富む物質の総称

比重が四ないし五以下のものを軽金属(Al, Mg等)、それより大きなものを重金属 (Cu, Fe, Cr, Ni等) という

金・銀・白金族元素あるいはこれらにイオン化傾向が水素より小さい銅・水銀なども加えて**貴金属**といい、イオン化傾向が大きい金属を**卑金属**という

自由電子による結合

* 特定の原子に束縛されずに、真空中または物質中を自由に運動できる電子

合金：さまざまな異種金属間の固溶体や金属間化合物

金属の性質

金属光沢：金属内部の自由電子と外部から入射した光子とが相互作用して発生



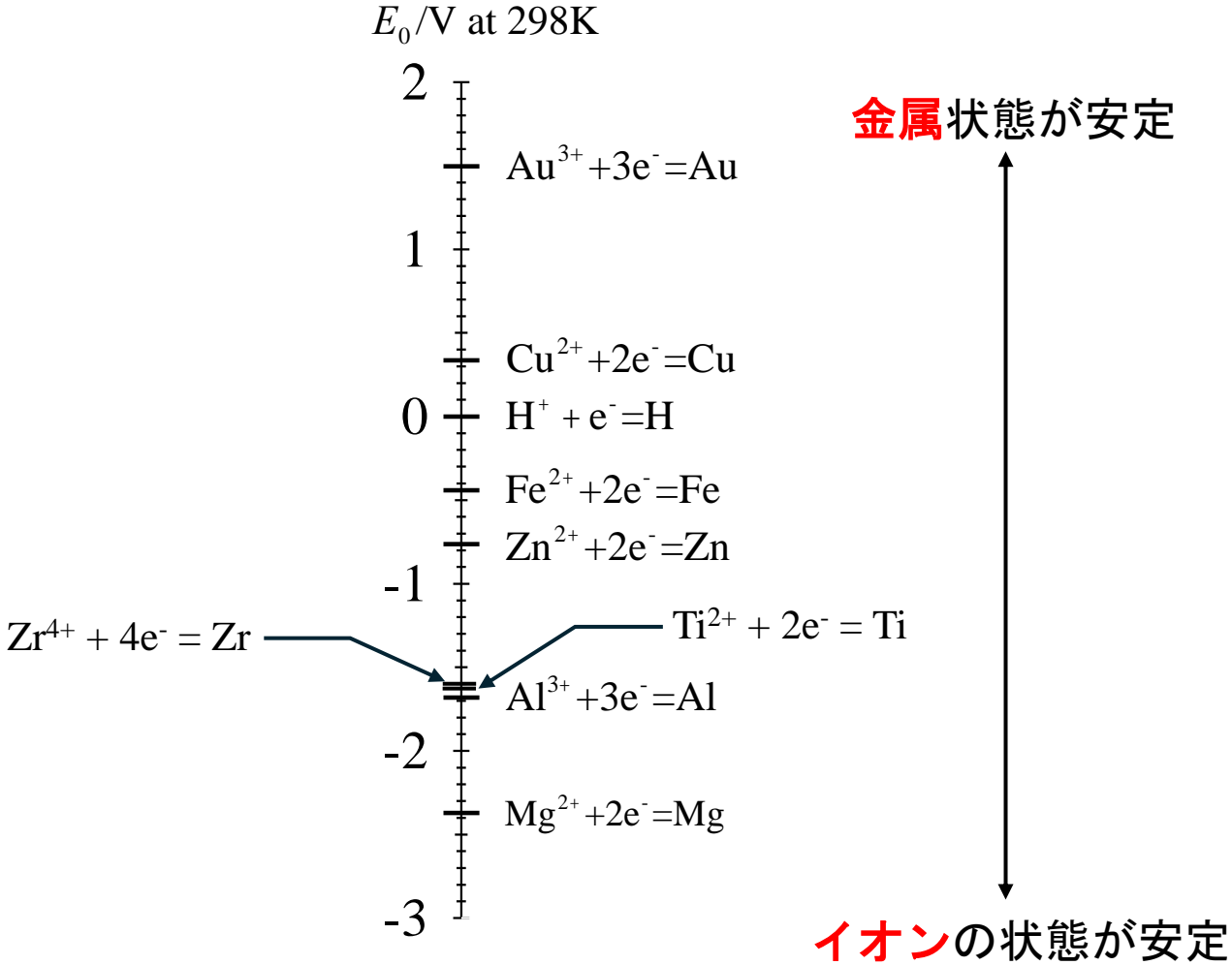
研磨した鋼による太陽光の反射

展性：圧延などにより破壊を伴わずに薄い板や箔（はく）になる性質

延性：弾性限界を超えた張力を受けても破壊されずに引き延ばされる性質

イオン化傾向

金属が水溶液中で陽イオン（カチオン）になって水溶液中に溶解する性質の度合



【1】 出典：表面処理鋼板の技術展開 日本鉄鋼協会育成委員会技術講座WG編, 日本鉄鋼協会編, P165, 図1

結晶構造

金属の結晶（金属結晶）では、金属原子が金属結合によって規則正しく配列し、結晶格子を形成

結晶格子：結晶の構成粒子の立体的な配列を示したもの

単位格子：結晶格子の最小の繰り返し単位

体心立方格子：body-centered cubic, bcc

面心立方格子：face--centered cubic, fcc

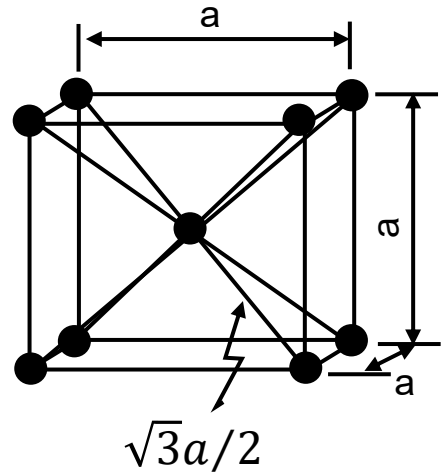
六方最密格子（構造）：hexagonal close-packed, hcp

体心正方格子：body-centered tetragonal, bct

体心立方格子中に炭素が入り込み特定の軸が伸びた構造,
この格子をもった組織は マルテンサイト組織

結晶構造

体心立方格子 (bcc)



bcc構造の金属例：

Cr, α Fe, Mo, β -Ti, V

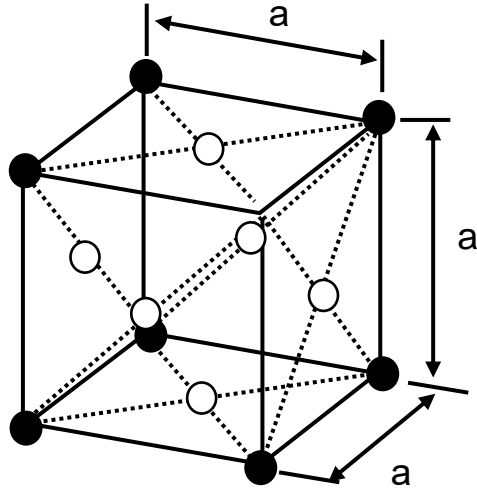
単位格子中の原子数：

2個(=1/8x8+1)

原子間距離： $\sqrt{3}a/2$

充填率：約0.68 $\left(= \frac{4\pi}{3} \left(\frac{\sqrt{3}a}{4} \right)^3 \times 2 \times \frac{1}{a^3} \right)$

面心立方格子(fcc)



fcc構造の金属例：

Al, Cu, γ -Fe, Ni

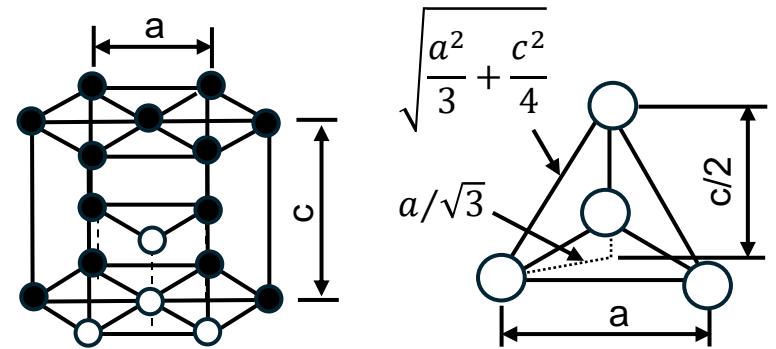
単位格子中の原子数：

4個(=1/8x8+1/2x6)

原子間距離： $\sqrt{2}a/2$

充填率：約0.74 $\left(= \frac{4\pi}{3} \left(\frac{\sqrt{2}a}{4} \right)^3 \times 4 \times \frac{1}{a^3} \right)$

六方最密格子(hcp)



hcp構造の金属例：

α -Ti, Zn

単位格子中の原子数：

6個(=1/2x2+1/6x12+3)

原子間距離： $\sqrt{\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}}$ (c/a < 1.633)
a (c/a > 1.633)

充填率：0.74

$\left(= \frac{4\pi}{3} \left(\frac{2a}{4} \right)^3 \times 6 \times \frac{1}{(3\sqrt{3}a^2/2) \times 1.633a} \right)$

ミラー指数(Miller index)

x, y, z 軸を α, β, γ で横切る面

$a/\alpha : a/\beta : a/\gamma$ の最小の整数比 $h:k:l \rightarrow (hkl)$ (例) x, y, z 軸を $a/2, a/3, a$ で横切る面 $\rightarrow (231)$

原点から座標 (α, β, γ) へ向かう方向

$\alpha : \beta : \gamma$ の最小の整数比 $h:k:l \rightarrow [hkl]$ (例) 原点から座標 (a, a, a) へ向かう方向 $\rightarrow [111]$

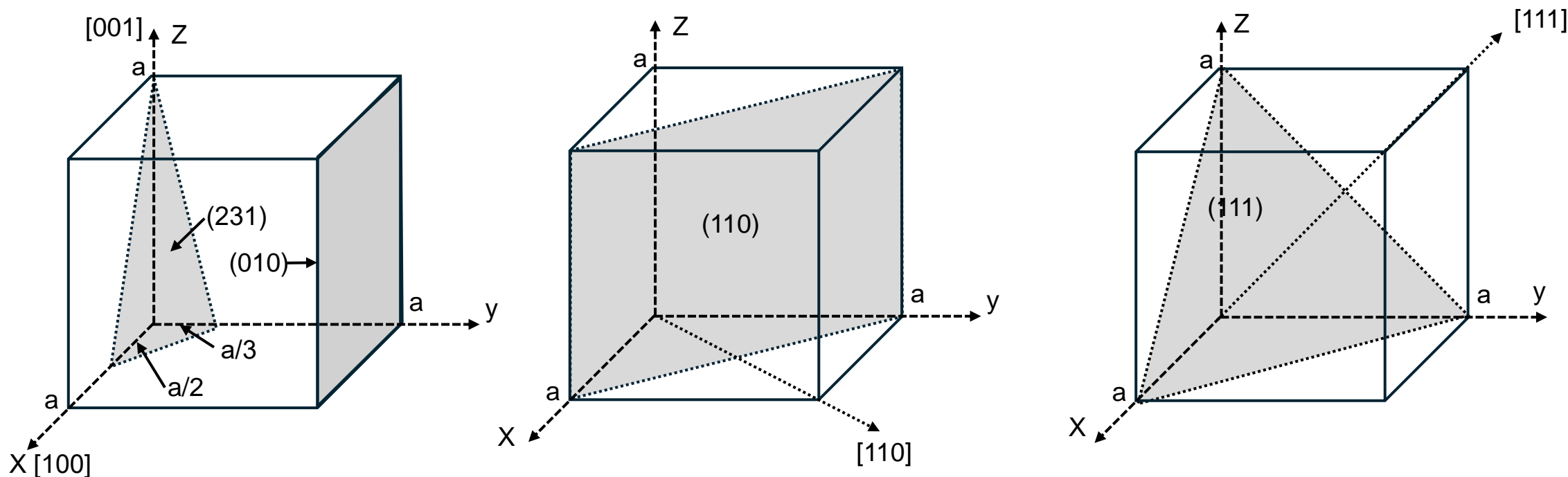
座標軸の負側で交わる面 \rightarrow オーバーライン (例) $(\bar{1}10)$

座標軸に平行な面 \rightarrow その指数は $0 (= 1/\infty)$ (例) (010)

結晶学的に等価な面や方向

(例) $(100), (010), (001)$ など \rightarrow まとめて $\{100\}$ (例) $[100], [010], [001]$ など \rightarrow まとめて $\langle 100 \rangle$

立方格子(bcc, fcc)



ミラー指数(Miller index)

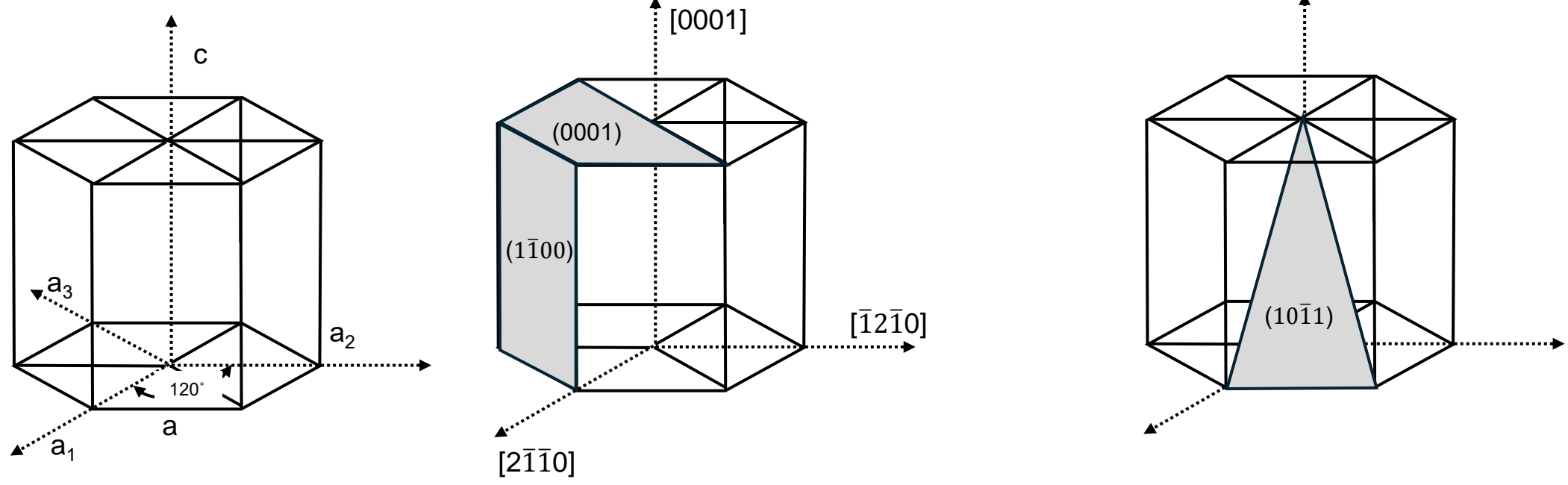
六方格子のミラー指数

a_1, a_2, c 軸を α, β, δ で横切る面
 $a/\alpha : a/\beta : c/\delta$ の最小の整数比 $h:k:m$ を求め、次に最後の指標を $l = -(h+k)$ のように決定

(例) 3 軸を $a, a/\infty, c$ で横切る面 $h:k:m=1:0:1$
 $l = -(h+k) = -1$ よってこの面の指標は $(10\bar{1}1)$

原点から a_1, a_2, c 軸の座標で (α, β, δ) へ向かう方向 $\alpha : \beta : \delta$ の最小の整数比 $h:k:m$ を求め、最後の指標を $l = -(h+k)$ のように決定.

その他の表記方法は立方格子の場合と同様



結晶中の欠陥

金属の結晶では原子が規則的に整列しているが、
結晶が成長していく過程で、

不純物を取り込む、

本来とは違う位置に原子が配列する、

別な角度で結晶が伸びる

といったことが起こる

* 結晶の成長：原子が規則的に整列している領域が大きくなること

規則的に原子などが並んでいない部分を**格子欠陥**と呼ぶ

点欠陥：ある部分が点状に配列が崩れている欠陥

線欠陥：配置がズレている部分が一行に直線状になる欠陥

面欠陥：二つの領域の境界面が欠陥

変態(transformation)

温度や応力などの外因的条件によって結晶構造が変化すること

変態点 (transformation point) : 変態が生じる温度

鉄およびチタンの変態

Fe: $\alpha(\text{bcc}) \leftarrow 912^\circ\text{C} \rightarrow \gamma(\text{fcc}) \leftarrow 1394^\circ\text{C} \rightarrow \delta(\text{bcc})$

Ti: $\alpha(\text{hcp}) \leftarrow 882^\circ\text{C} \rightarrow \beta(\text{bcc})$

(温度が低い側から $\alpha, \beta, \gamma, \delta \dots$ の順に相の名前をつける)

炭素鋼の焼入れ

α 相(低温相)と γ 相(高温相)における炭素濃度の固溶度の相違を使って炭素を過飽和に固溶させ、硬くする

資源量が豊富で精錬しやすく，強靱であり加工もしやすい上に安価であるため世界中で広く利用され，産業上重要な位置を占める

このため生産量も非常に多く，世界の金属材料生産量の約95%は鋼となっている

炭素を0.04から2 mass %程度含む鉄の合金

炭素のみを加えた炭素鋼とニッケル・クロムなどを加えた合金鋼に大別される

純粋な鉄に比べ強靱で加工性に優れ、鉄の利用の大部分は鋼によって占められているため、鉄と鋼を合わせ鉄鋼とも呼ばれる

炭素鋼

炭素含有量（質量パーセント濃度）による分類

低炭素鋼：0.25%以下

中炭素鋼：0.25 - 0.6%

高炭素鋼：0.6%以上

硬さによる分類

特別極軟鋼

極軟鋼

軟鋼

半軟鋼

半硬鋼

硬鋼

極硬鋼（最硬鋼）

用途による分類

一般構造用鋼材：SSXXX

•SS330 P 0.050%以下 S 0.050%以下

•SS400 P 0.050%以下 S 0.050%以下

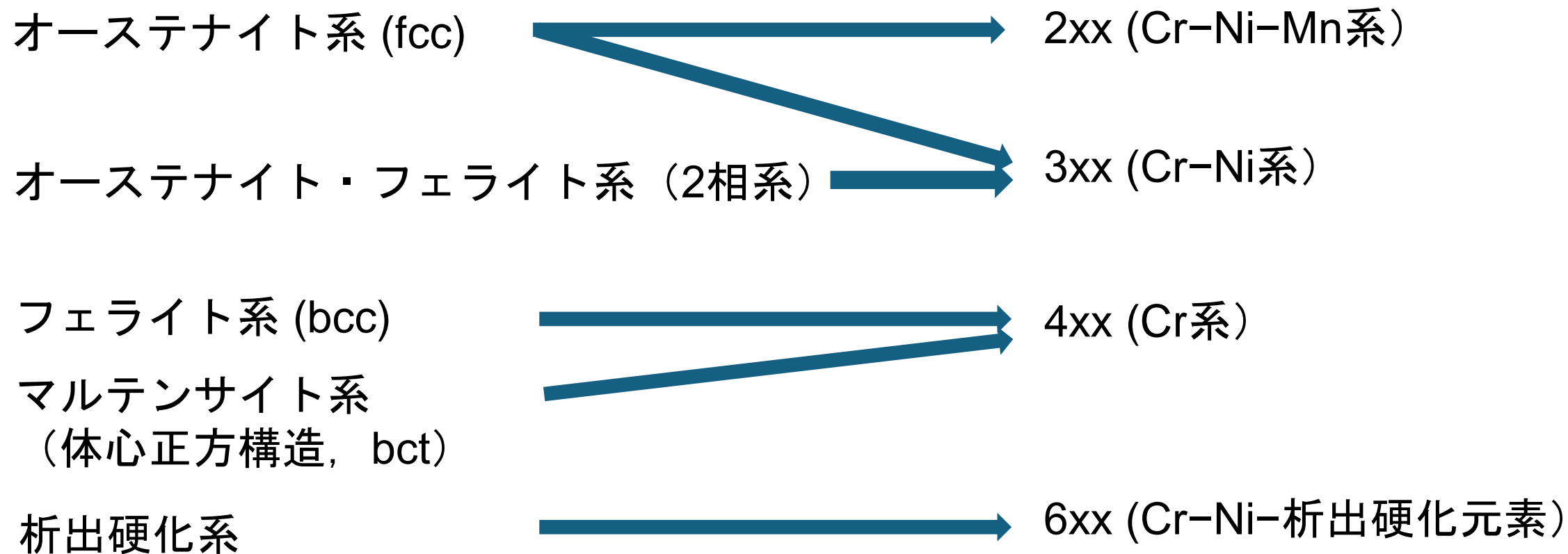
•SS490 P 0.050%以下 S 0.050%以下

機械構造用鋼材：

•SS540 C 0.30%以下 Mn 1.60%以下 P 0.050%以下 S 0.050%以下

ステンレス鋼

用途や性質を満たすため様々な元素の添加が行われた結果、著しく多様化している。JIS（SUS記号）に規定されているだけでも70種類以上あり、外国規格および各メーカー独自の鋼種を含めると、数百種類ある。



ステンレス鋼

金属組織による分類		鋼種の例 (%: mass%)
Fe-Cr系	マルテンサイト系	SUS403 (13 %Cr, < 0.15 %C, <0.50%Si)
	フェライト系	SUS430 (17%Cr, < 0.08%C)
Fe-Cr-Ni系	オーステナイト系	SUS304 (18%Cr, 8%Ni, 0.06%C)
		SUS316 (18%Cr, 12%Ni, 2%Mo)
	オーステナイト・フェライト系	SUS329J2L(22%Cr, 5%Ni, 3%Mo, N)
	析出硬化系	マルテンサイト系
オーステナイト系		SUS631(17%Cr, 7%Ni, 1%Al)

【2】 出典：薄膜作製応用ハンドブック2020版, 株式会社エヌ・ティー・エス, P282, 表3

ステンレス鋼：物理的性質

項目 (単位)	密度	融点	比熱 (273~373K)	熱伝導率 (373K)	線膨張係数 (273~373 K)	比電気抵抗 (室温)	透磁率 (室温)	縦弾性係数 (室温)
鋼種名	g/cm ³	K	kJ・kg ⁻¹ ・K ⁻¹	W・m ⁻¹ ・K ⁻¹	10 ⁻⁶ ・K ⁻¹	10 ⁻⁸ ・Ω・m	10 ⁻⁷ ・H・m ⁻¹	kN・mm ⁻²
マルテンサイト系 SUS403	7.8	1,480~1,530	0.46	24.2	9.90	57	高	200
フェライト系 SUS430	7.7	1,480~1,508	0.46	26.0	10.5	60	高	200
オーステナイト系 SUS304	7.93	1,394~1,453	0.50	16.3	17.3	72	12.8	193
	SUS316	8.0	1,370~1,397	0.50	16.3	16.0	74	12.6
二相系 SUS329J2L	7.80	1,420~1,462	0.46	16.3	10.5	88	高	196
析出硬化型 SUS630	7.78	1,397~1,435	0.46	16.3	10.8	98	高	196
	SUS631	7.81	1,414~1,447	0.42	16.3	15.3	79	高

【3】 出典：薄膜作製応用ハンドブック2020版, 株式会社エヌ・ティー・エス, P283, 表4

ステンレス鋼：用途

ステンレスの分類	主な鋼 (主成分)	特 徴	用 途
フェライト系	SUS430 (18%Cr, <0.08% C)	耐食性, 加工性, 溶接性に優れる	自動車部品, 厨房用品, 建築用内装, 化学プラント
	SUS444 (18% Cr, 2% Mo, 低C)	耐食性に優れる	貯水槽, 温水機器
マルテンサイト系	SUS410 (13% Cr, <0.15% C)	焼入れが可能	マフラー, ボルト
	SUS440 (18% Cr, 0.7~1% C)	耐摩耗性に優れる	刃物, ベアリング
オーステナイト系	SUS304 (18% Cr, 8% Ni)	耐粒界腐食性, 成形性, 溶接性に優れる	建築用内外装, 化学プラント
	SUS316 (18% Cr, 12% Ni, 2% Mo)	耐食性に優れる。 靱性, 低温, 高温強度が高い	圧力容器, 原子炉機器
オーステナイト・ フェライト系 (二相系)	SUS329J1 (25% Cr, 5% Ni, 1.5 % Mo, N)	耐海水性, 耐応力, 耐食性に優れる 高強度	化学プラント, バルブ
	SUS329J2L (25% Cr, 6% Ni, 3% Mo, N)	耐食性に優れる 高強度	石油開発用機器
析出硬化系	SUS630 (17% Cr, 4% Ni, 4%Cu, Nb)	析出硬化性, 高強度	ボルト, 航空機部品
	SUS631 (17% Cr, 7% Ni, Al)	耐食性, 溶接性に優れる	シャフト

原子力用ステンレス鋼の化学組成（重量％）

	Cr	Ni	C	Si	Mn	P	S	N	C+N
SUS304	18.00-20.00	8.00-10.50	0.020 以下	0.75以下	2.00以下	0.040以下	0.030以下	0.12以下	0.13以下
SUS316	16.00-18.00	10.00-14.00	0.020 以下	0.75以下	2.00以下	0.040以下	0.030以下	0.12以下	0.13以下

【5】 出典：片山義紀・峯村敏幸.(2014). 原子力(材料編). 溶接学会誌, 83(4), 275-279, 表3.

ジルコニウム (Zr) とその合金

原子番号40の元素, チタン族元素で遷移金属

比重 : 6.5, 融点 : 1852 °C

常温で安定な結晶構造 : 六方最密充填構造 hcp) のα型

862 °C以上 : 体心立方構造 (bcc) のβ型へ転移

化学的性質 : 常温で酸やアルカリに対して安定で耐食性がある

高温では, 酸素や窒素, 水素, ハロゲンなどと反応して多様な化合物を形成

熱中性子の吸収断面積が金属中で最小, Hfの分離が困難

ジルコニウム合金 (ジルカロイ) : 燃料被覆管等に

ジルカロイ-2 :

Zr 98.25 wt%, Sn 1.45 wt%, Cr 0.10 wt%, Fe 0.135 wt%, Ni 0.055 wt%, Hf 0.01 wt%

ジルカロイ-4 :

Zr 98.23 wt%, Sn 1.45 wt%, Fe 0.21 wt%, Cr 0.1 wt% Hf 0.01 wt%

微量のNi添加で耐食性が改善

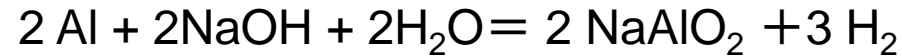
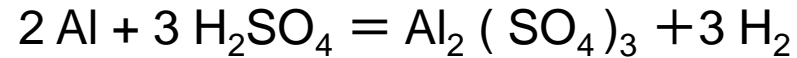
ジルカロイの製造方法や物性は, 原子力委員会の

<https://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V04/N08/19590810V04N08.html> 等を参照

アルミニウムとその合金

アルミニウムの標準電極電位が-1.662Vと低く、非常に活性であり精製することが困難なことから、約100年前から一般的に使用されるようになった金属である。しかし、密度が2.70g/cm³と鉄の約1/3であり、熱や電気伝導性も良いため、幅広く使われている。

アルミニウムやその酸化物は両性を示し、酸にもアルカリにも溶解する。アルミニウムは酸とアルカリに次の反応式に従って溶解する。



アルミニウムの酸化物や水酸化物は環境によって多くの種類があり、その構造も複雑である。そのため多種類の表面処理を施すことが可能である。

アルミニウム合金の分類

- 1 × × × Al 99.00%以上の純Al系
- 2 × × × Al-Cu系合金
- 3 × × × Al-Mn系合金
- 4 × × × Al-Si系合金
- 5 × × × Al-Mg系合金
- 6 × × × Al-Mg-Si系合金
- 7 × × × Al-Zn系合金
- 8 × × × 上記以外の合金

チタンニウム（チタン, Ti）とその合金

原子番号22, 第4族元素, 遷移金属

化学的性質と物理的性質はZrに類似

比重は4.5, 融点は1668°C

常温で安定な結晶構造：六方最密充填構造 (hcp)

880 °C以上：体心立方構造 (bcc)

酸素や水が存在すると保護性の高い不働態皮膜を形成するので、海水中などで高い耐食性を示す
一方、フッ化物イオンが存在する酸性溶液では激しく腐食する

チタン合金

種類	組成
α 型合金	Ti-5Al-2.5Sn
near α 型合金	Ti-8Al-1Mo-1V
α+β 型合金	Ti-3Al-2.5V
	Ti-6Al-4V
	Ti-6Al-4V-2Sn
near β 型合金	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo
β 型合金	Ti-13V-11Cr-3Al
	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr
耐食性チタン合金	Ti-0.15Pd

放射線照射の影響

照射損傷：材料が中性子や γ 線などエネルギーを持った放射線の照射を受けると損傷する

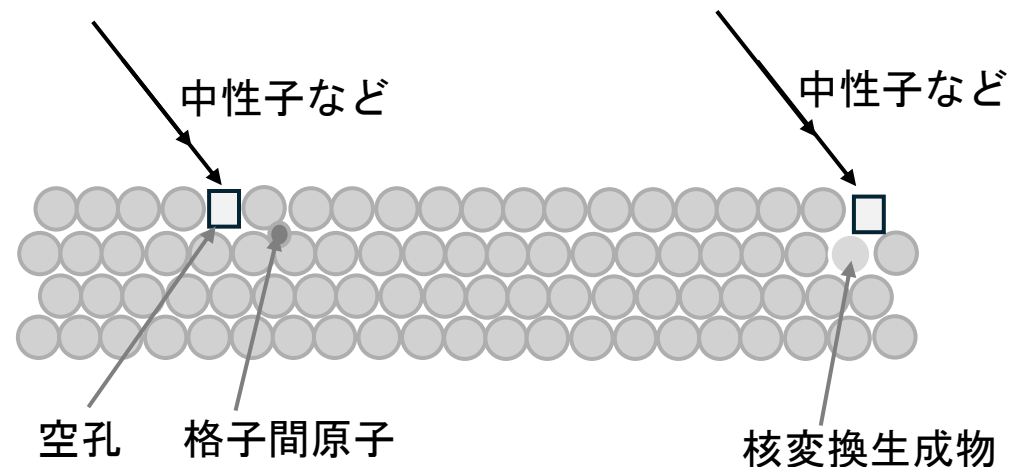
弾き出し損傷

核変換損傷

弾き出し損傷：結晶格子点に位置する原子が放射線によってはじき出される結果生ずる損傷

フレンケル対（空の格子点と格子間にはじき出された原子の対が照射損傷によって生ずる格子欠陥の基本単位）が基本単位

核変換損傷：中性子との衝突によって核変換を起し、他の種類の原子（ヘリウムや水素）になり物質中に不純物原子として存在することにより気泡などが生成すること



発電用原子炉のおさらい

- ・ 圧力容器

作製方法：圧延鋼板の成形加工，リング鍛造品を溶接して作製

要求項目：中性子照射特性，耐食性，溶接性など

- ・ 炉内構造物

BWR；低炭素ステンレス鋼（原子力用316，原子力用304）

シュラウドサポートにAlloy600

ジェットポンプの一部にAlloyX750

制御棒駆動機構などでXM-19

PWR；構造部材にSUS304，ボルトにSUS316，支持ピンにAlloyX750

- ・ 蒸気発生器

伝熱管にNi基合金（Alloy600, Alloy690）

受講 お疲れ様でした

