



導電材料の基礎



千星 聡

東北大学 金属材料研究所 産学官広域連携センター / 准教授

大阪府立大学 工学研究科 マテリアル工学分野 / 客員准教授

導電材料とは

導電材料とは

電気を種々の分野で利用するために、電流を特定の個所に伝え導くのに用いられる材料。電流をできるだけ小さい損失で伝える必要があるため、まず第1に**電気抵抗率が小さいこと**が要求される。常温では銀が最も電気抵抗率が小さく、次いで銅、アルミニウムの順に大きくなる。銀は高価であるから接点材料のように少量で間に合う分野に使用されているだけである。したがって、現在は**銅が導電材料として最も広く使用されている**。銅はそのままでは強度が低いので、多くの場合、電気抵抗率があまり上昇しない程度に少量の合金元素を添加したうえで熱処理を施して使用する。

【出展】： 世界大百科事典（第二版）

種々の材料の抵抗率, 導電率 (20°C)

* %IACS: 国際標準軟銅(抵抗率 $1.7241 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$)の導電率を100%とした指標.

材料	抵抗率 ($10^{-6} \Omega\text{m}$)	導電率 (% IACS*)	引張強度 (MPa)	材料	抵抗率 ($10^{-6} \Omega\text{m}$)	導電率 (% IACS*)	引張強度 (MPa)
Ag	0.0162	106.4	150	Fe	0.098	17.6	250
Cu	0.0172	100	220	Pt	0.106	16.3	150
Au	0.0240	71.8	100	Sn	0.114	15.1	25
Al	0.0275	61.7	80	Pb	0.210	8.2	15
Mg	0.045	38.3	120	Ti	0.420	4.1	340
W	0.055	31.3	1100	SUS304	0.740	2.3	710
Mo	0.056	30.8	---	Nichrome	~ 1.0	~ 1.7	---
Zn	0.059	29.2	150	Graphite	16	0.1	---
Ni	0.072	23.8	400	導電性 ポリマー	20~200	0.01~0.1	*ポリアセチレン

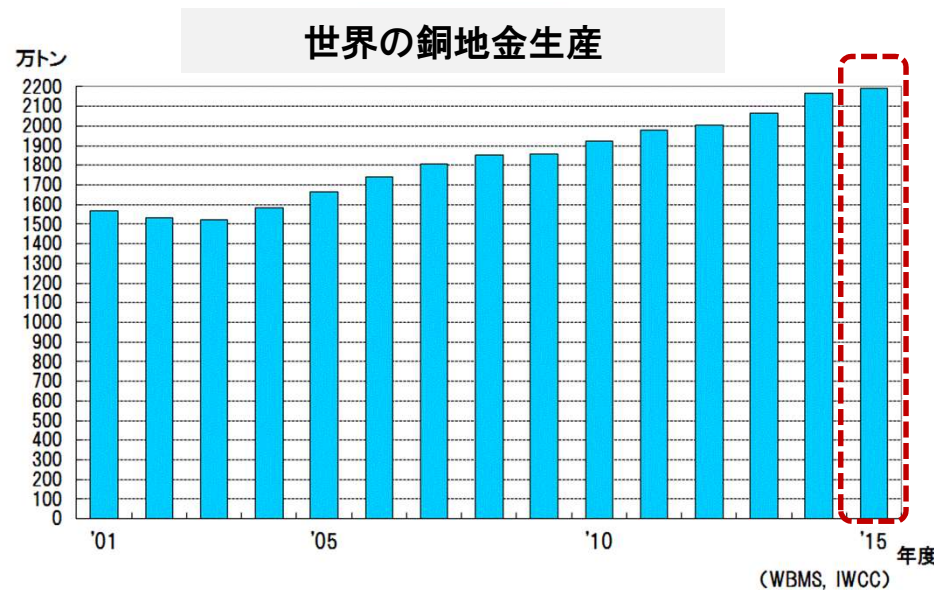
導電材料に求められる特性

	Ag	Cu	Au	Al
導電率が高い	106.4% IACS	100 % IACS	71.8 % IACS	61.7 % IACS
加工性に優れている	◎	◎	◎	◎
耐食性に優れている	○	○	◎	◎
機械的強度が大きい	150 MPa (引張強さ)	220 MPa	100 MPa	80 MPa
線膨張率が小さい	$18.9 \times 10^{-6}/K$ (20°C)	$16.5 \times 10^{-6}/K$	$14.2 \times 10^{-6}/K$	$23.1 \times 10^{-6}/K$
価格が安く、入手しやすい	△	○	×	○



導電材料 → 一般的に、銅，アルミニウム，その合金が利用

銅地金の生産【世界】



・地金生産 → ～2200万t

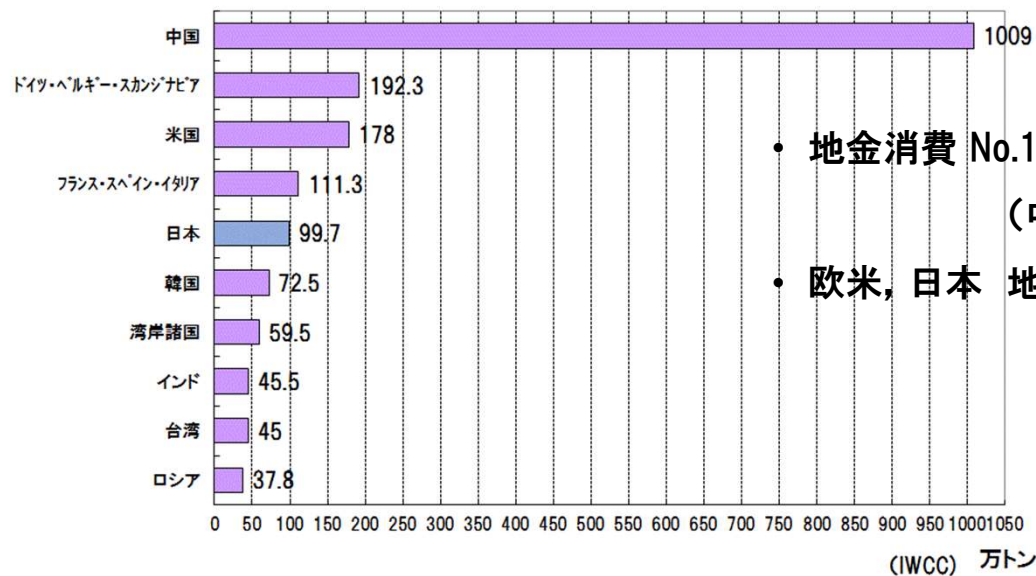
(鉄の約1.3%)



・ No.1 中国 32%

・ No.2 チリ (銅鉱石生産量はNo.1)

世界の銅地金消費 (2015)

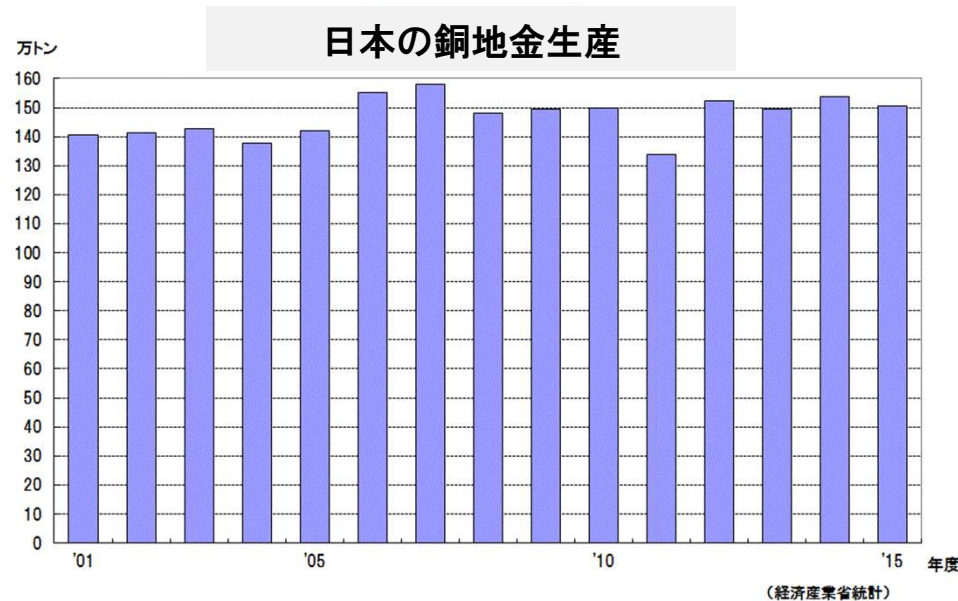


・ 地金消費 No.1: 中国 (世界の46%) 増加傾向

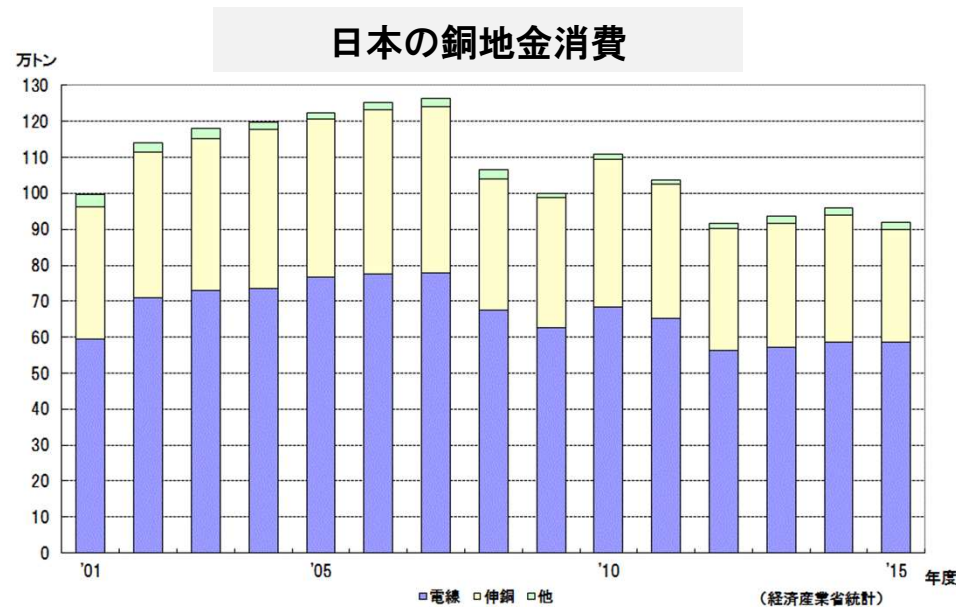
(中国は生産も輸入もNo.1)

・ 欧米, 日本 地金消費は停滞気味

銅地金の生産【日本】



- 地金生産量: ~150万トン (世界の7%)
- 銅精鉱の輸入元
 - No.1 チリ (40%)
 - No.2 ペルー (12%)
 - No.3 インドネシア (12%)
 - No.4 カナダ (12%)
 - No.5 オーストラリア (10%)



- 地金消費: ~90万トン (世界の4%)
- 地金生産の40%は輸出
- 銅素材の内訳
 - 電線 (純銅) : 62%
 - 伸銅品 (銅合金) : 36%
 - その他 : 2%

銅のマテリアルフロー（2006年度）

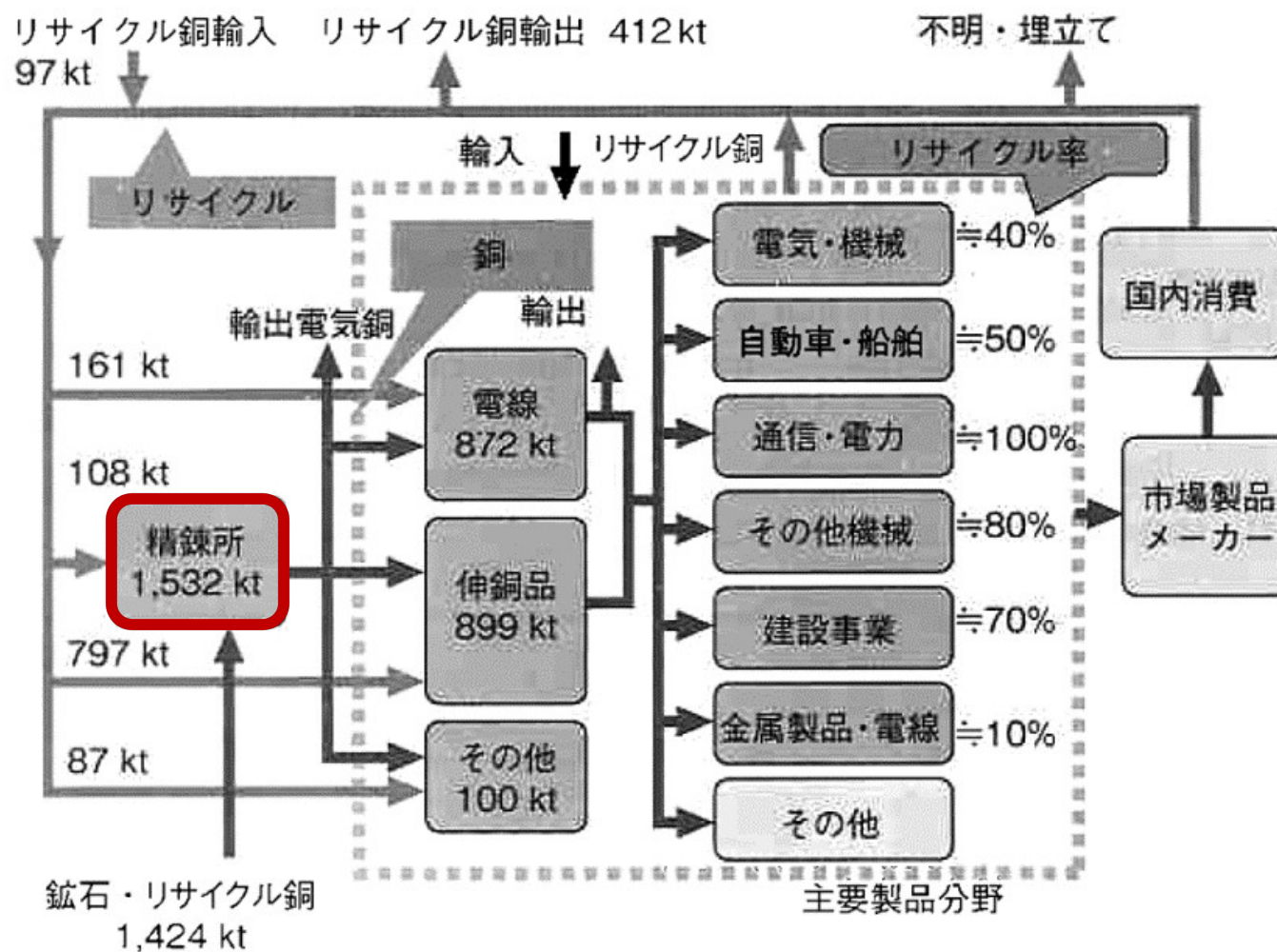
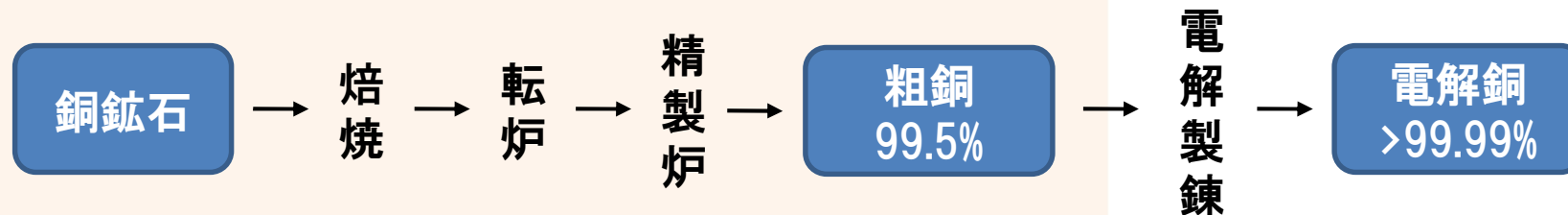


図1 銅・銅合金のマテリアルフロー

銅の製錬①（乾式法）

【乾式法】… 高温での化学反応を利用した手法



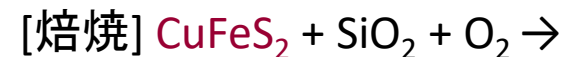
【硫化鉱】

黄銅鉱 (CuFeS_2) (低品位),
輝銅鉱 (Cu_2S), 銅藍 (CuS), ...

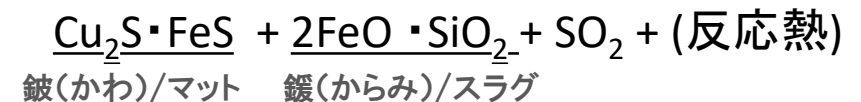
【酸化鉱】

赤銅鉱 (Cu_2O) (高品位),
孔雀鉱 ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$), ...

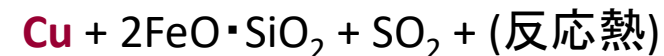
(1) 焙焼/転炉工程 … 硫化銅から硫黄を除去



銅品位
65 %



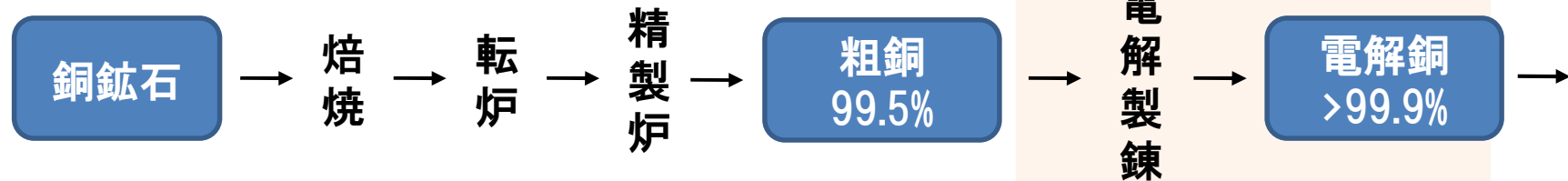
銅品位
99 %



(2) 精製炉工程 … ブタンガスにて粗銅中の酸素を除去

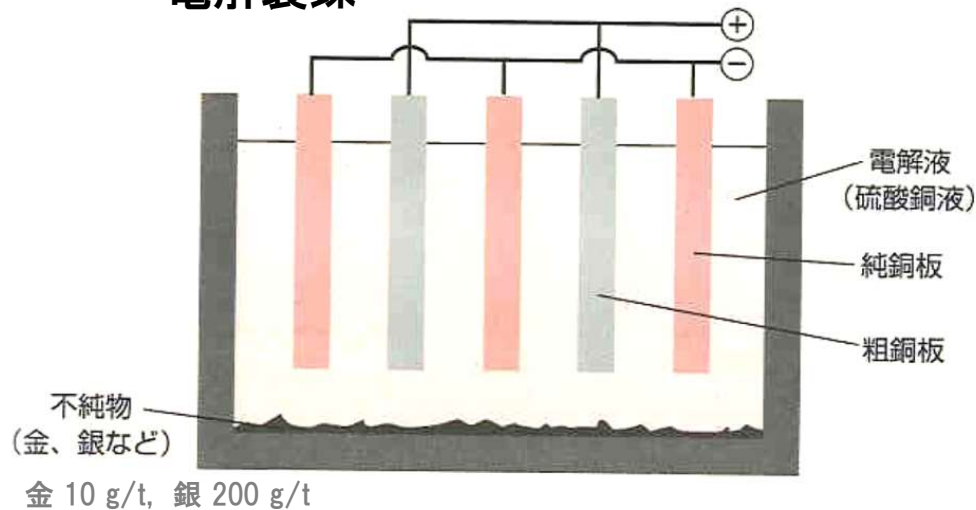
* 浮遊選鉱法にて銅品位20～40%の銅精鉱にする
(銅精鉱生産: No.1 チリ(30%), 2. ペルー(9%), 3. 中国(8%))

銅の精錬②（電解製錬）

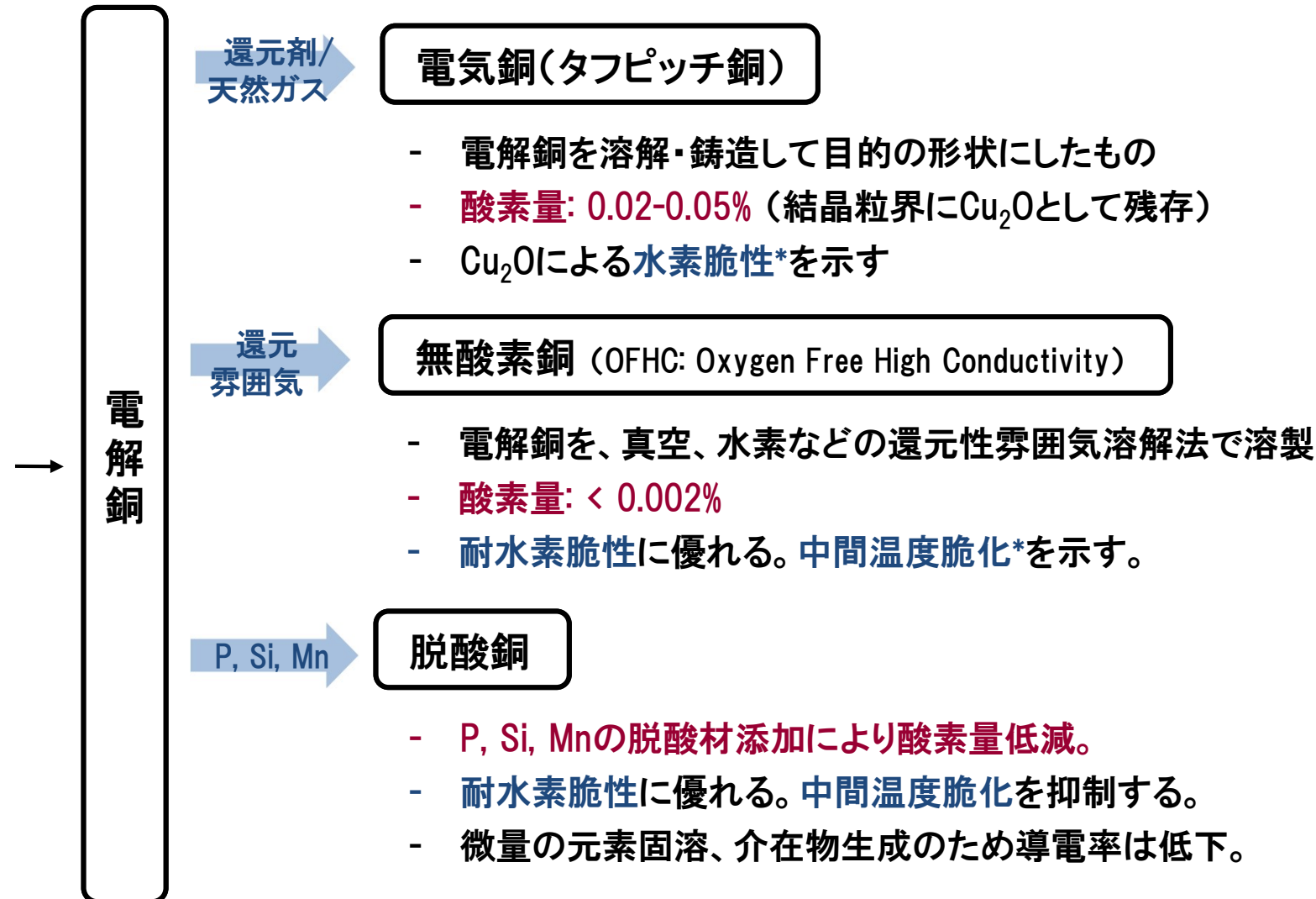


【電解精錬】

電解製錬



純銅の種類



* 水素脆性(水素病) … 高温(600℃以上)において、銅中の酸素と環境中の水素が反応して H_2O を生じ、粒界が破壊し、母材が脆化する現象。

* 中間温度脆性 … 中間温度(200～700℃以上)の低ひずみ条件において、純銅(無酸素銅)が脆化する現象。

銅・銅合金の特徴

長 所

- 高い導電率（低い電気抵抗率）
- 高い熱伝導性
- 良好な耐食性
- 美しい外観、色彩
- 比較的高い強度、硬さ
- 優れた塑性・切削加工性
- 良好な溶接性
- 優れた耐摩耗性・摺動性
- 非磁性
- めっき、はんだ付けが容易
- 抗菌性がある

短 所

- 重い（比重が大きい）
- 鉄鋼材料より強度が低い
- 表面酸化が早い
- 価格が高い
(スクラップ鉄: 20 円/kg, 銅: 500円/kg)
- 入手しにくい
- 熱膨張率が大きい
(鉄: $10.8 \times 10^{-6}/K$, 銅: $16.5 \times 10^{-6}/K$)

銅の強度性質（純銅）

純銅の機械的特性_温度依存性

* 低温脆化しない（fcc金属）

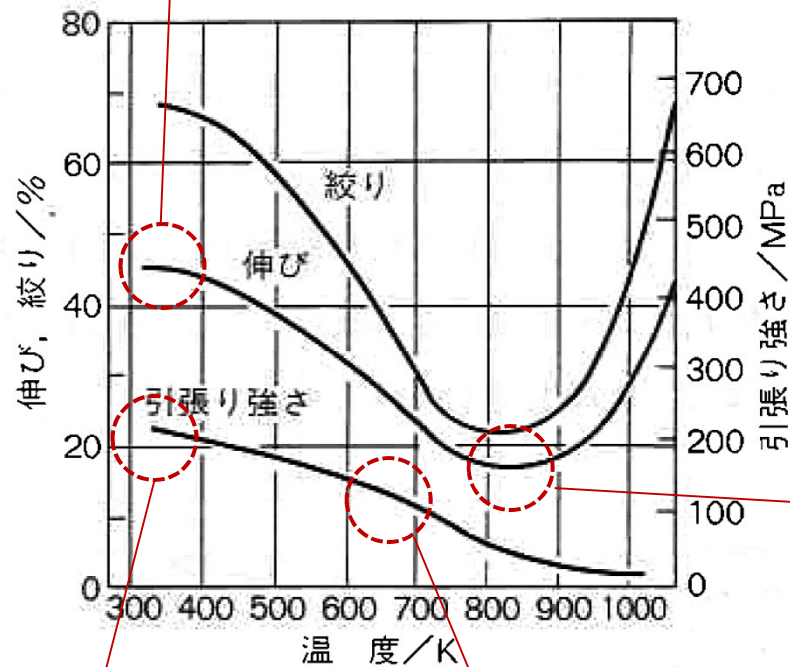


図 4-6 電気銅の高温機械的性質
(タフピッチ)

* 純銅の引張強度: 220MPa~

* 高温ほど軟化

* 中間温度脆性

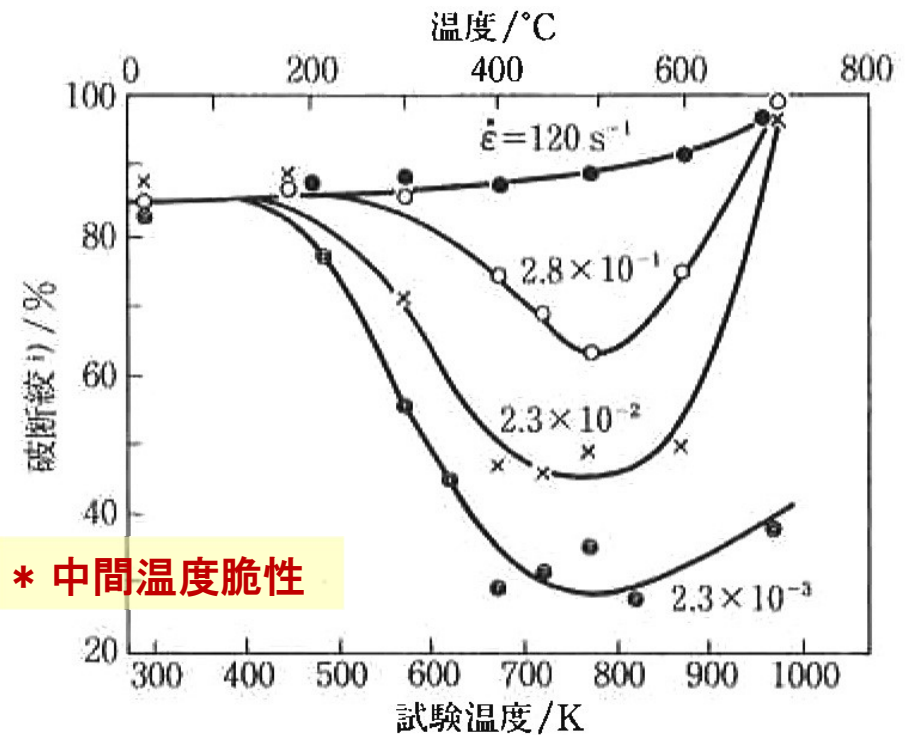


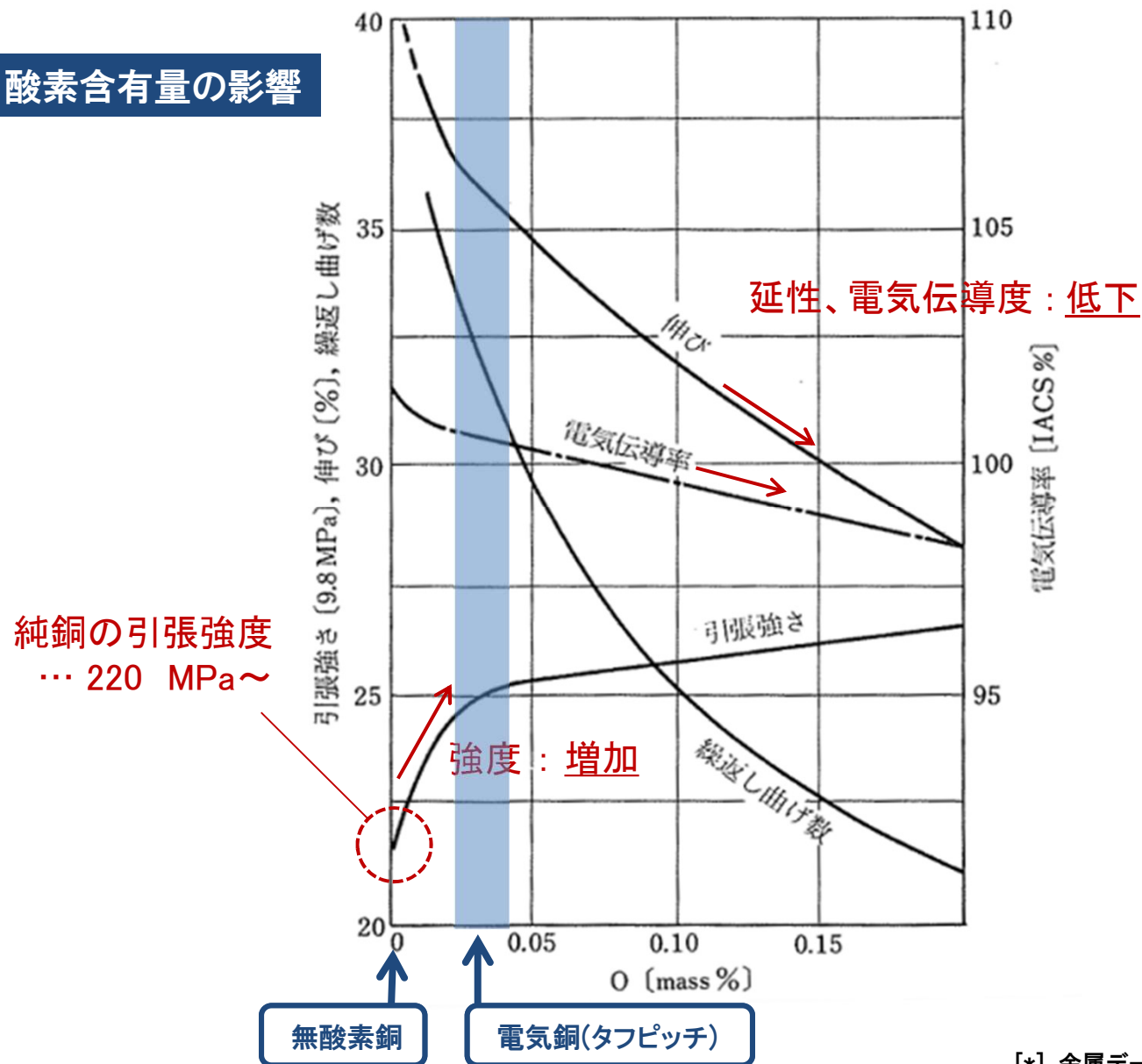
図 1 純銅の延性に及ぼす試験温度，歪速度($\dot{\epsilon}$)の影響．結晶粒径($\bar{d}$)は $80 \mu\text{m}^{(3)}$ ．

[出典] 非鉄材料（日本金属学会編）

* 中間温度脆性 … 200~700℃以上、低ひずみ条件において、純銅（無酸素銅）が脆化する現象。元素添加により低減（リン脱酸素銅では抑制）

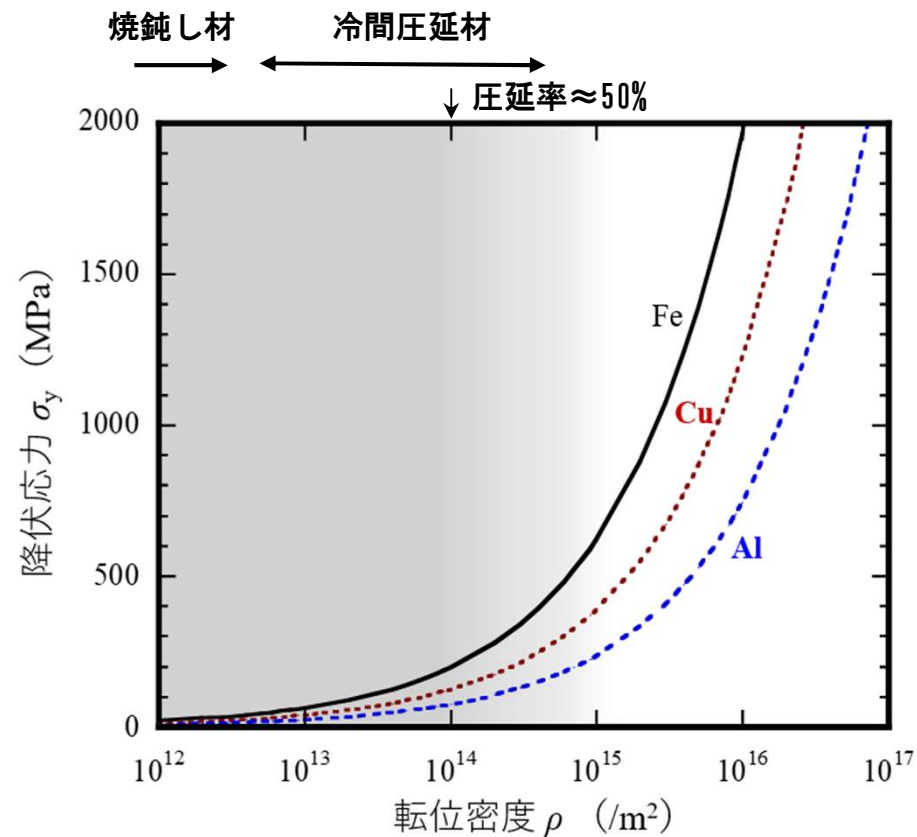
銅の強度性質（不純物元素の影響）

酸素含有量の影響



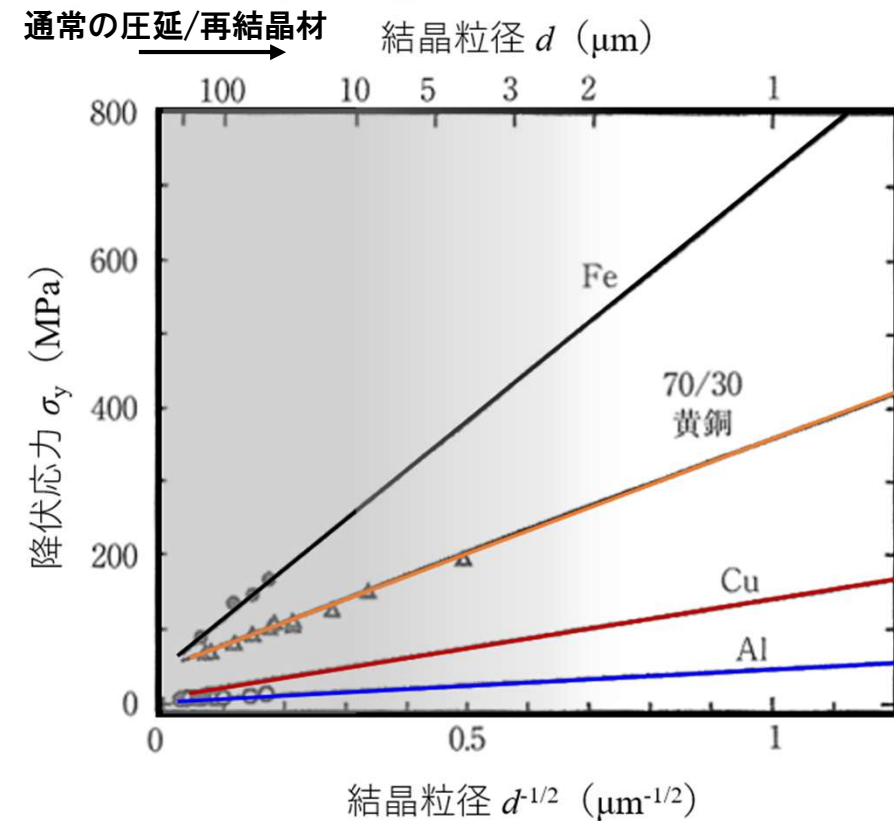
強度性質の向上（純銅の強化 ①）

加工硬化



➤ 転位密度が大きくなるほど高強度化

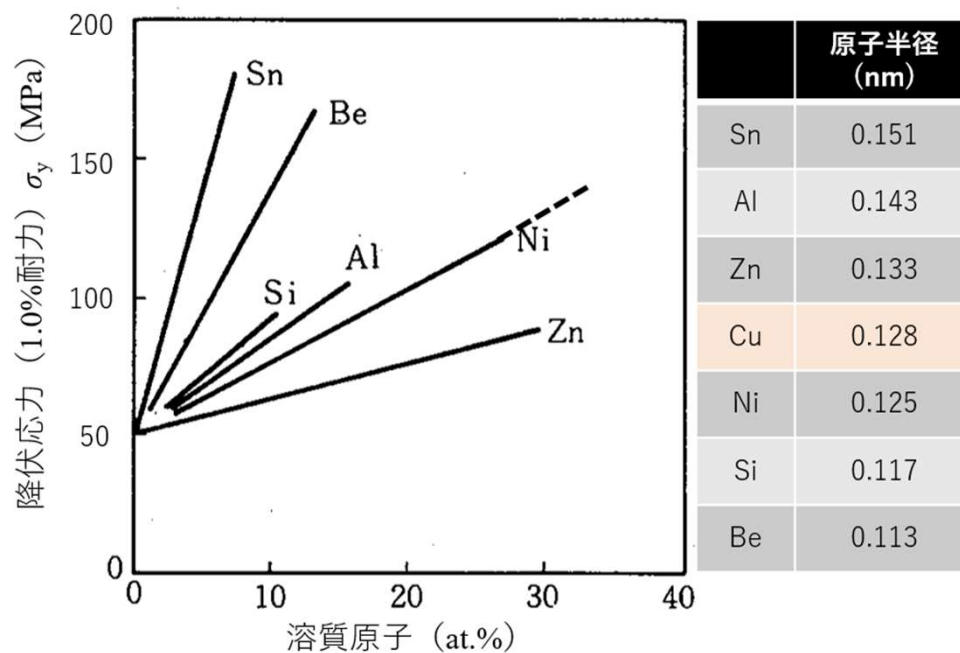
結晶粒微細化による強化（粒界強化）



➤ 結晶粒径が細くなるほど高強度化

強度性質の向上（合金の強化 ②）

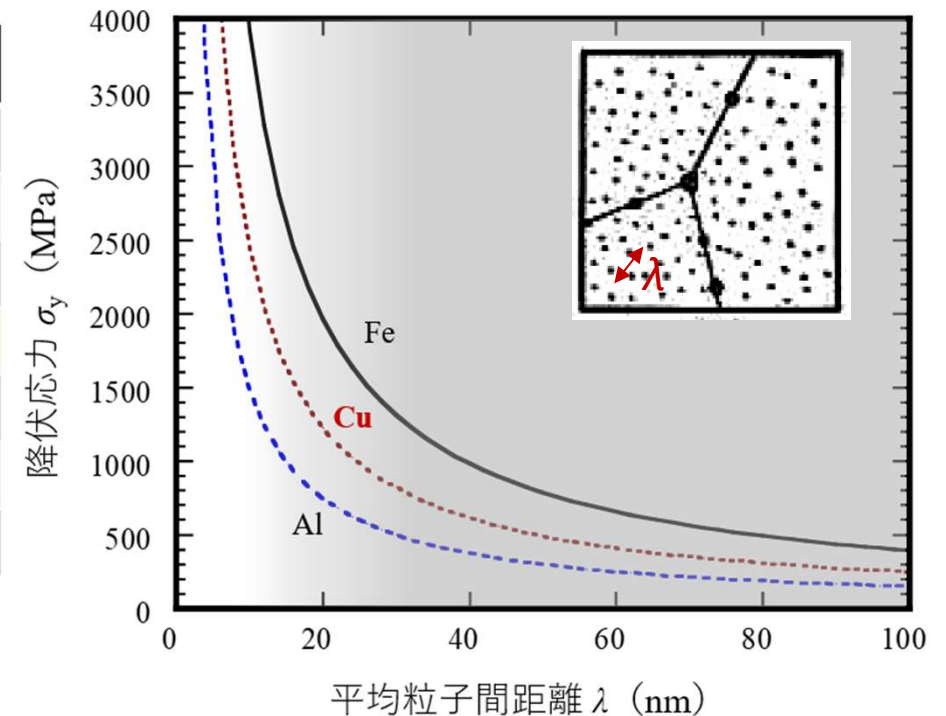
固溶硬化



【*】 銅および銅合金の基本と工業技術（日本伸銅協会）

➤ 固溶元素、添加量に依存して高強度化

分散強化（析出強化）



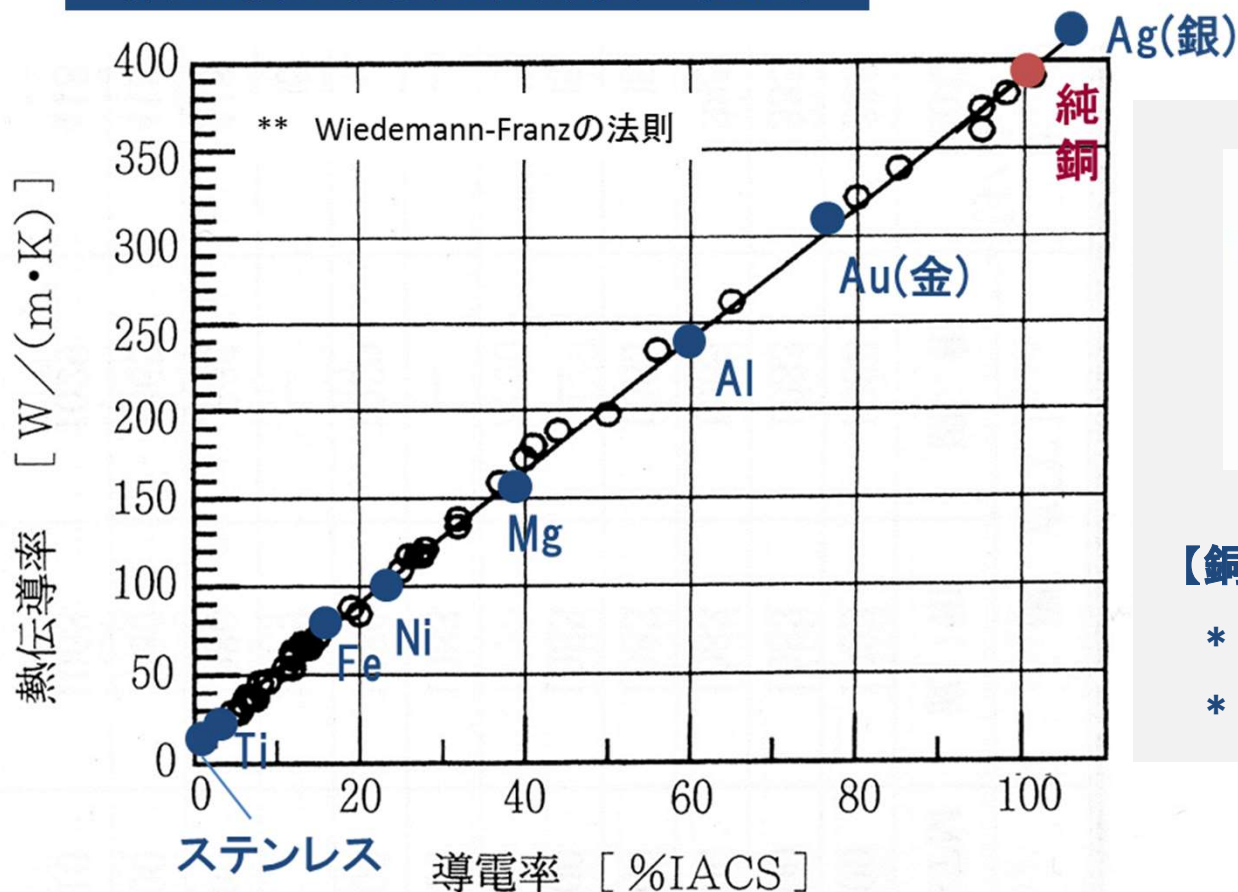
➤ 分散粒子の数密度が大きくなるほど強化



【強度特性】：各種強化機構，特に分散強化（析出強化）の活用

純銅の物理的性質(電気・熱伝導率)

各種金属の導電率と熱伝導率 (室温)



【銅製スプーン】(新潟県燕市)

- * カチカチのアイスもするりと!
- * 美しく、しなやかなデザイン!!



電気、熱伝導率ともに銅は実用材料でNo. 1

[出典] 伸銅品データブック (日本伸銅協会)

** Wiedemann-Franzの法則 ... 熱伝導と電気伝導はともに自由電子に強く依存するため、金属材料では両者は一定比で表せる。

銅・銅合金の物理的性質(電気・熱伝導率)

純銅の電気比抵抗への添加元素の寄与

元素	$\Delta \rho_i$ [$10^{-8} \Omega\text{m/at\%}$]	元素	$\Delta \rho_i$ [$10^{-8} \Omega\text{m/at\%}$]
Ag	0.14	Cr	3.6
Zn	0.32	Si	3.95
Au	0.55	Co	6.35
Be	0.62	P	6.70
Mg	0.65	As	6.8
Al	1.25	Zr	~7.6
Ni	1.25	Fe	9.35
Sn	2.88	Ti	10.2

【Nordheimの法則】

$$\rho = \rho_0 + \Delta \rho_i C_i$$

ρ : 純銅の抵抗率 ($1.72 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$)
 ρ_0 : 左表の値
 $\Delta \rho_i$: 左表の値
 C_i : 固溶元素量(at.%)

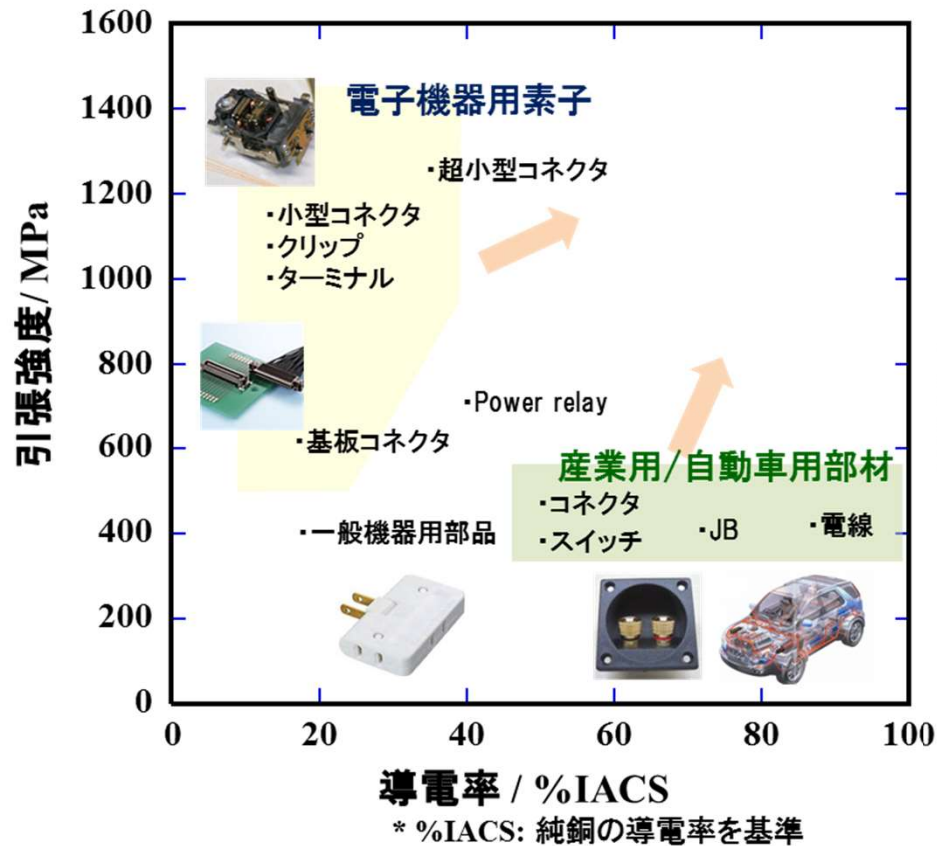
	導電率 (%IACS)
無酸素銅	100~102
電気銅	~100
リン脱酸銅	85~98
Cu-0.8Cr	37 (*熱処理により >80)



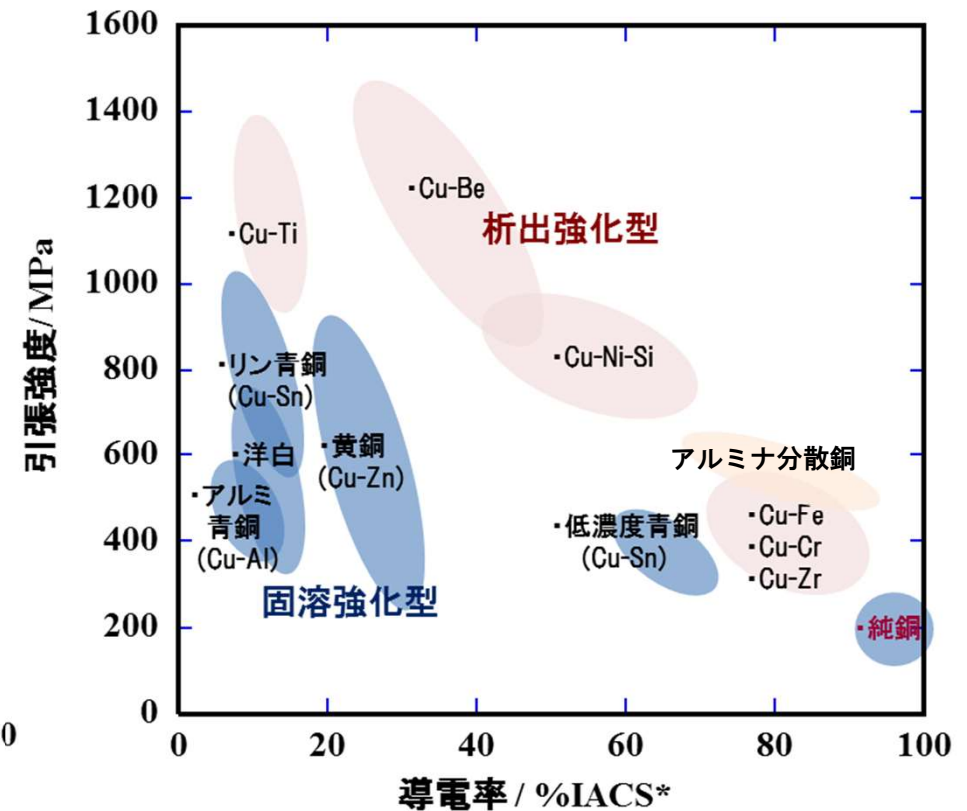
【電気，熱伝導率】 不純物の混入，固溶元素の添加により低下

銅合金の利用

コネクタ部材・電線の要求特性



代表的な銅合金の強度と導電率

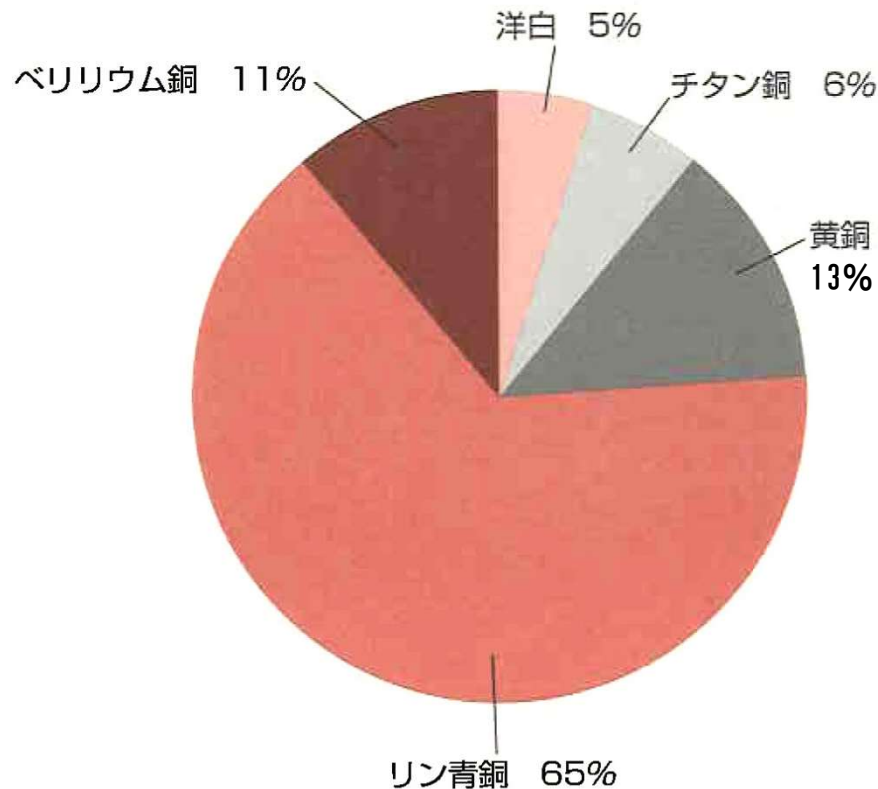


軽量化, 高密度実装化 → 高強度, 高導電率化への要求

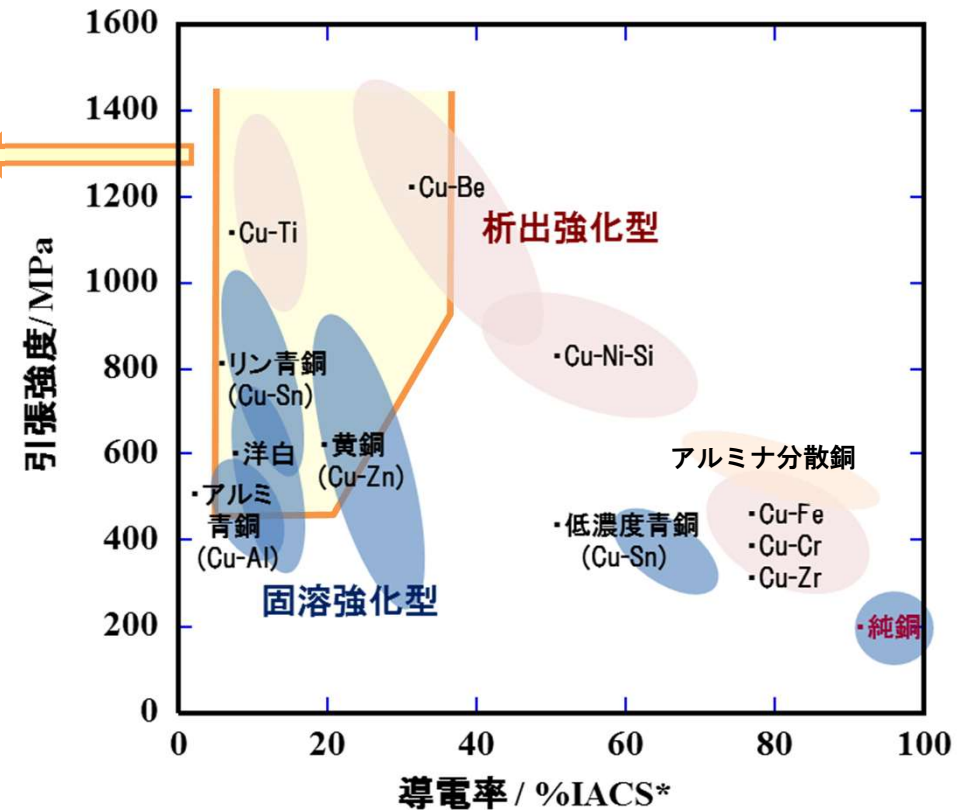
銅合金の利用 「小型電子部品用端子・コネクタ」

携帯電話のコネクタに使用される素材と割合*

[ref]最新 銅の基本と仕組み(秀和システム) 2010



代表的な銅合金の強度と導電率

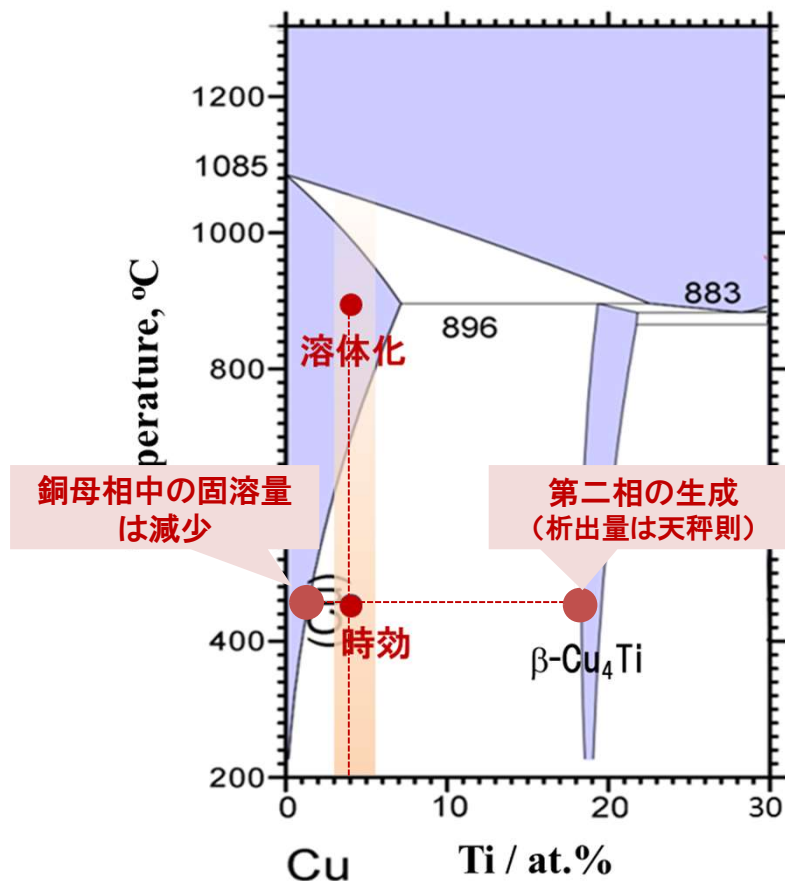


「汎用」「廉価」: リン青銅, 黄銅 → 「高品位」: ベリリウム銅, チタン銅, コルソン銅(Cu-Ni-Si)

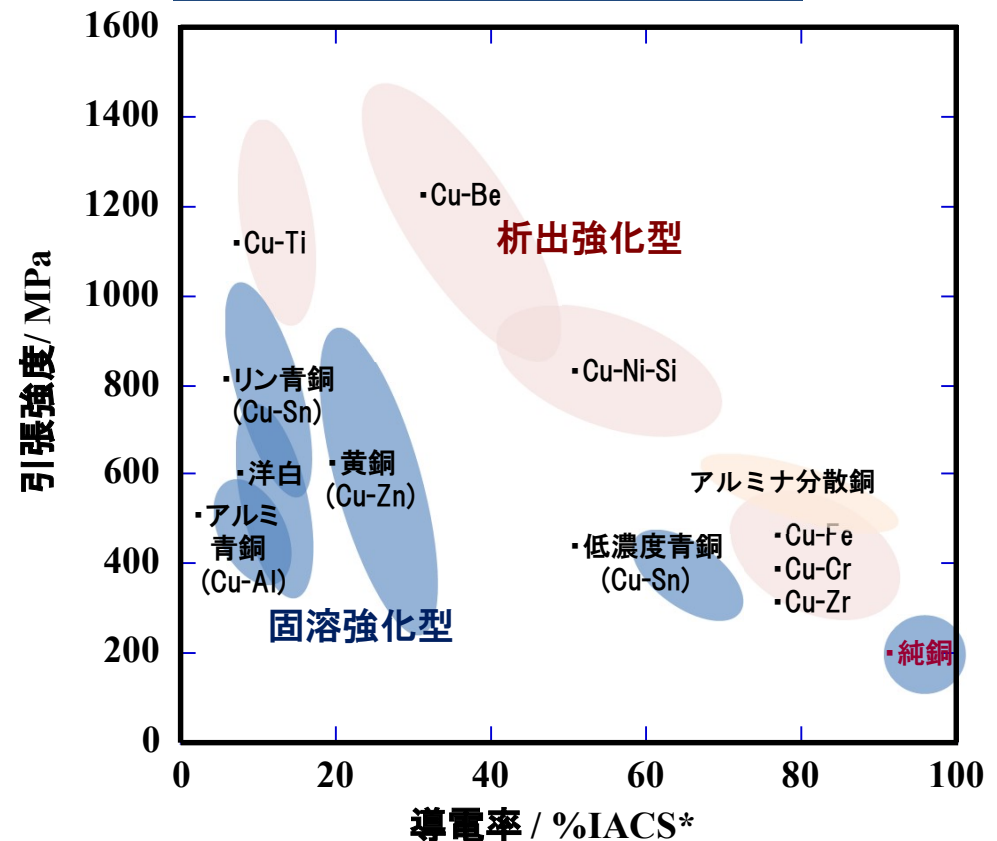
時効析出型銅合金

時効析出型銅合金

- 熱処理（時効）により母相中に析出物を分散
- 分散（析出）強化 → 効率的な強化
- 析出による溶質元素量の減少 → 導電率も良好

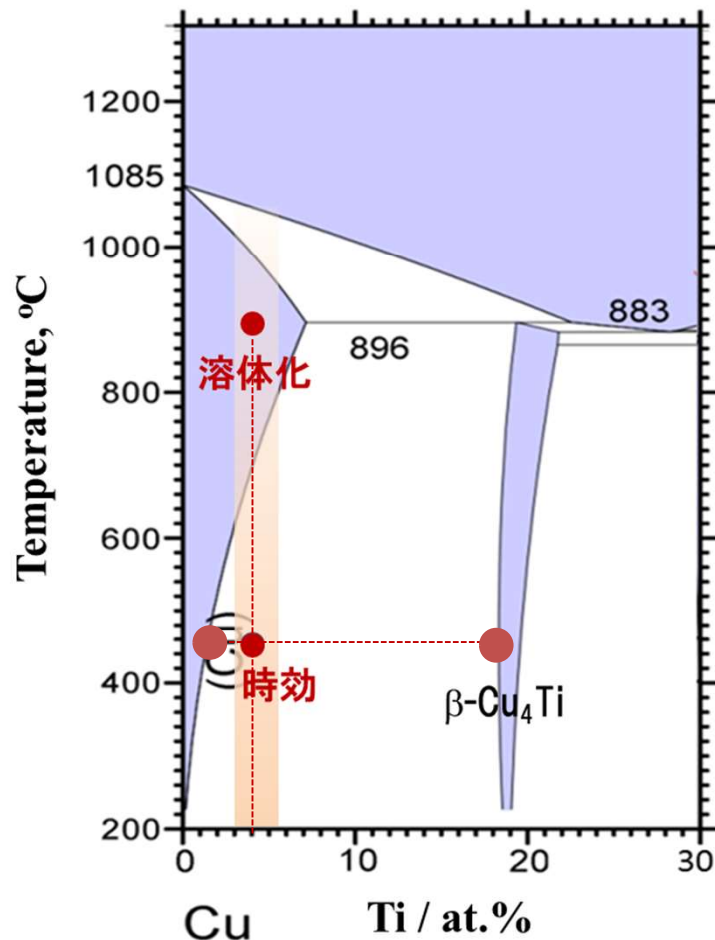


代表的な銅合金の強度と導電率



時効析出型銅合金 ① (組織変化)【Cu-Ti系】

Cu-Ti系状態図



溶体化材

母相単相(Ti固溶量: 4at.%)

20 μm

時効初期

(変調組織)

100 nm

中期

連続析出物
 $\beta'\text{-Cu}_4\text{Ti}$

100 nm

終期

不連続析出物の発達

5 μm

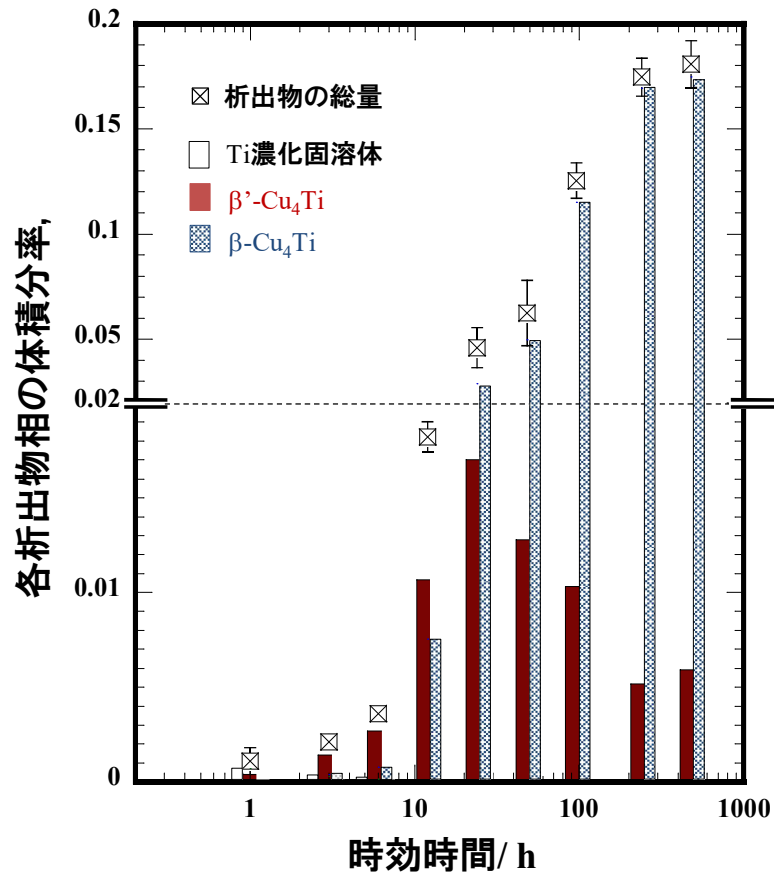
不連続析出物
セル組織($\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ /固溶体)

10 μm

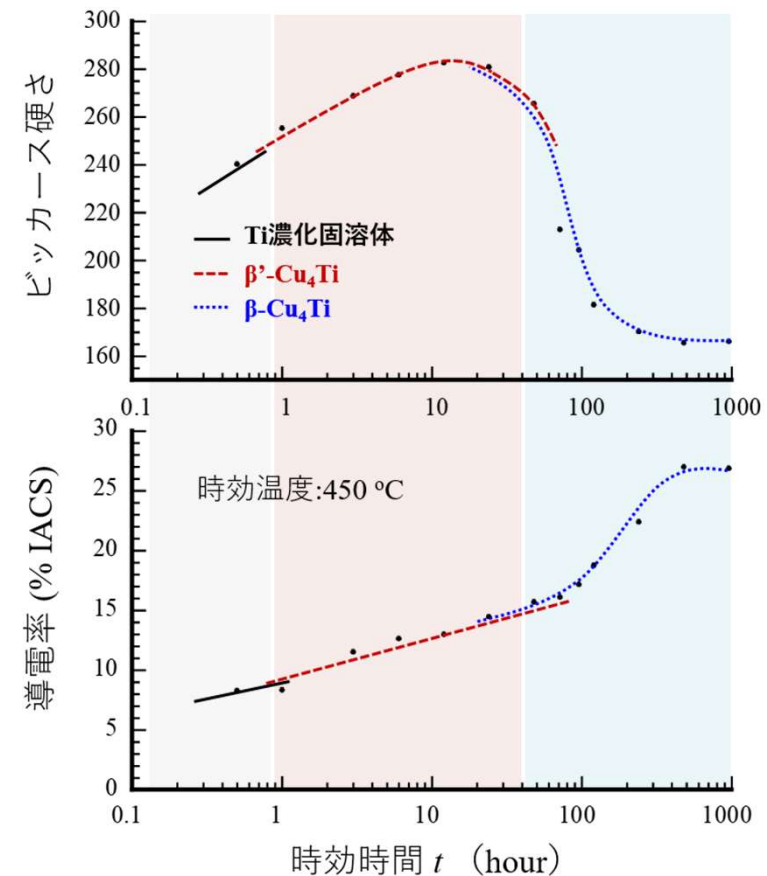
母相中のTi固溶量: < 1at.%)

時効析出型銅合金② (組織と特性の関係)【Cu-Ti系】

450°C時効材中の析出物-体積分率



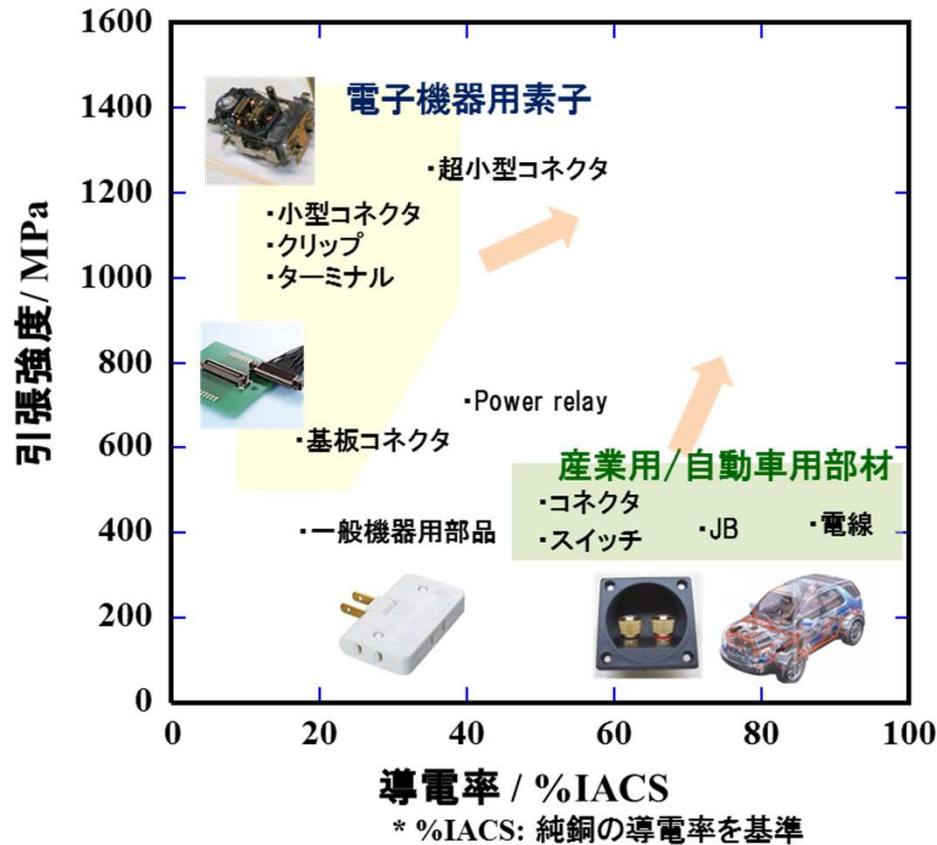
450 °C時効材のビッカース硬さ



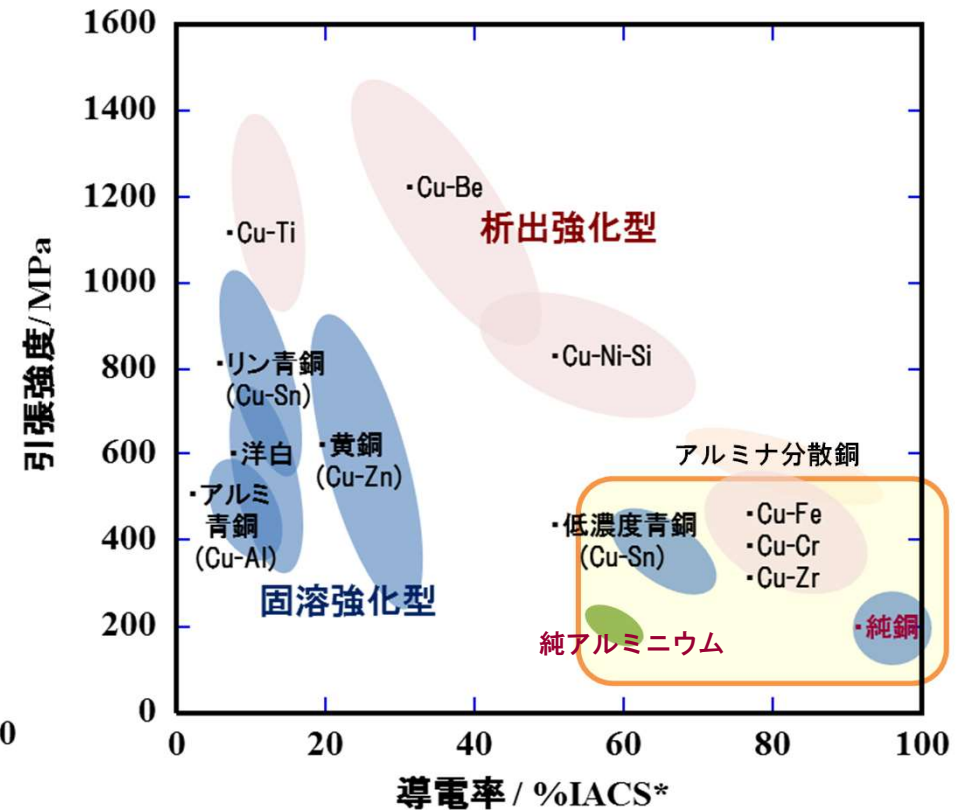
- β' -Cu₄Ti の微細分散 → 効率的な硬化,
- 析出相 (β' -Cu₄Ti + β -Cu₄Ti) の生成 → 母相中の固溶Ti量: 枯渇 → 導電率: 向上

銅合金の利用 「電線・ケーブル」

コネクタ部材・電線の要求特性

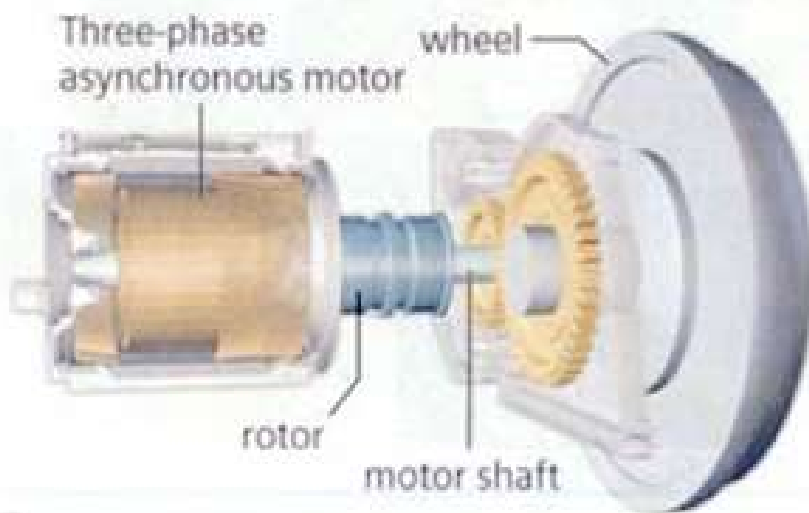


代表的な銅合金の強度と導電率



軽量化, 高密度実装化 → 高強度, 高導電率化への要求

銅合金の利用 「鉄道」



車両用モーターのエンドリング、ローターバー
Retaining rings and rotor bars of motors

鉄道架線用金具
Parts for trolley wires



銅合金の利用 「自動車」

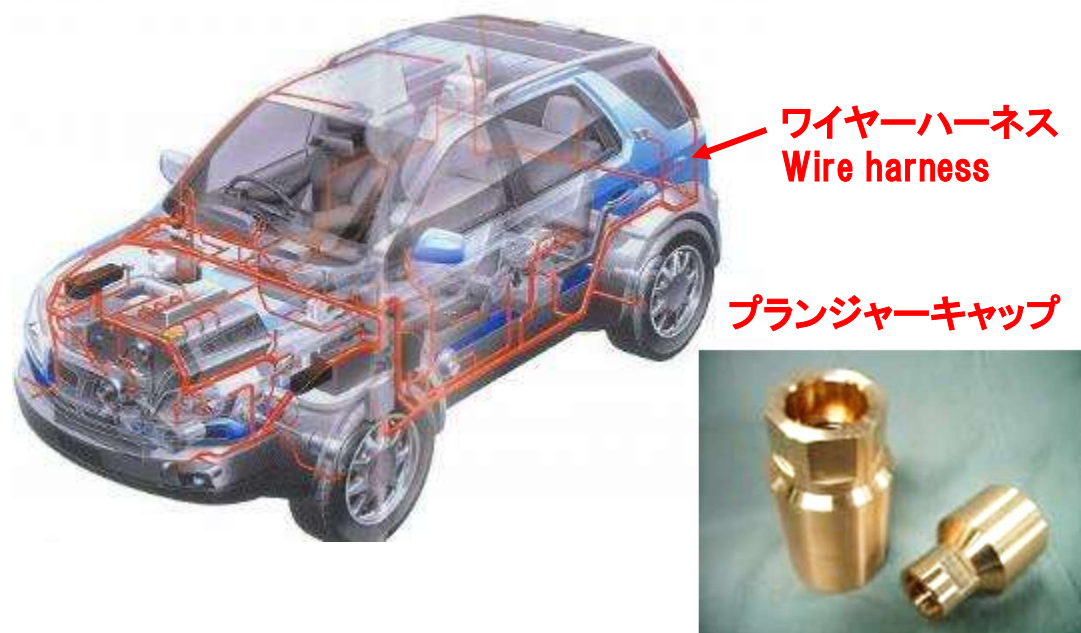
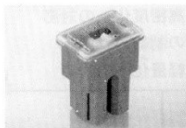


表9 その他の自動車部品の事例の紹介

部品名		要求品質	使用されている銅合金
リレー		・ばね性 ・導電性 ・疲労特性	①稼働片： ベリリウム銅、Cu-Mg系 ②固定片： 黄銅、純銅、Cu-Fe系 など
ヒューズ		・溶断特性	Cu-Fe系 Cu-Zn系 など
ランプ		・導電性 ・耐熱性 ・応力緩和特性	Cu-Ni-Si系 など
スイッチ (パワーウィンド)		・ばね性 ・耐摩耗性 ・導電性	リン青銅 Cu-Ni-Si系 Cu-Zn-Sn系 Cu-Ni-Sn系 など
オルタネーター		・導電性 ・放熱性	純Cu系 など
キー		・強度 ・切削性 ・打ち抜き性	Cu-Zn系 Cu-Zn-Ni系 Cu-Zn-Ni-Mn系 など

注) 表に示した事例は、使用部位や環境などにより個別に変わる場合がある。

スポット抵抗溶接電極

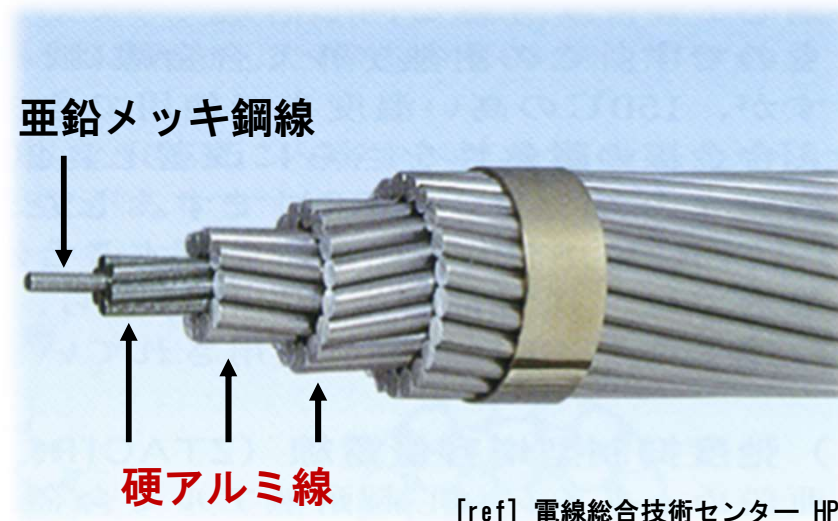


シーム溶接用円板電極



送配電用アルミ電線

	Cu	Al
導電率	100 % IACS	61.7 % IACS
加工性	◎	◎
耐食性	○	◎
強度(引張強さ)	220 MPa	80 MPa
線膨張率	$16.5 \times 10^{-6}/K$	$23.1 \times 10^{-6}/K$
価格(2016/1)	52 万円/t	18 万円/t
比重	8.9 g/cm^3	2.7 g/cm^3
Cuに対する 強度/比重	(1)	1.2
Cuに対する 導電率/比重	(1)	2.0



[ref] 電線総合技術センター_HP

まとめ

導電材料

高導電性	加工性	耐食性	強度	物理特性 (線膨張・比重)	価格
------	-----	-----	----	------------------	----

銅，アルミニウム，その合金の利用



リードフレーム



電子部品



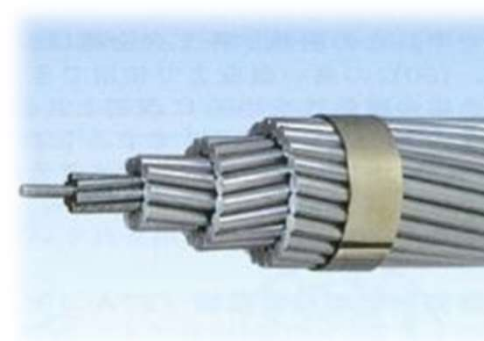
圧縮端子・電力用コネクタ



水熱交換器



配線、ケーブル



送配電用アルミ電線



IMR 東北大学金属材料研究所
Institute for Materials Research, Tohoku University



東北大学 金属材料研究所
附属研究施設関西センター
KANSAI CENTER for Industrial Materials Research,
Institute for Materials Research, Tohoku Univ.

ご清聴ありがとうございました

東北大学金属材料研究所

千星 聡

(semboshi@imr.tohoku.ac.jp)