

圧延の基礎

ものづくり基礎講座（第37回技術セミナー）
『金属の魅力をみなおそう 第二弾 プロセス技術編 第一回』

東北大学金属材料研究所
正橋直哉
masahasi@imr.tohoku.ac.jp
2014.6.5 14:05~14:35

クリエイション・コア東大阪 南館3階 技術交流室A

Kansai Center

東北大学

圧延とは

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

圧延加工は、回転する複数のロールの間に板状または棒状の材料を通し、その厚さまたは断面積を減じ、同時に断面を目的形状に成形する加工法。材料はロールからの摩擦力によってロール間隙に引込まれ、そこでロールからの圧縮力を受けて変形する。



熱間圧延

- ・素材が軟化し高加工可能
- ・高温のため酸化する
- ・寸法精度が悪い
- ・加熱エネルギーが必要



冷間圧延

- ・扱い易く、寸法精度が高い。
- ・表面がきれい
- ・加工硬化し焼鈍が必要



圧延ロール

- ①ワークロール
材料に接する
- ②バックアップロール
ワークロールを支持する

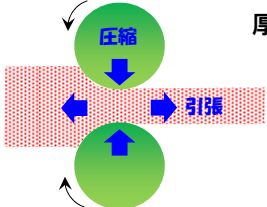


圧延の種類

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
2014, June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



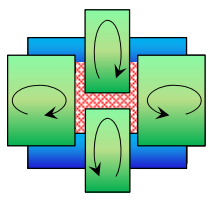
ロール圧延



厚板・コイル製造

一対の円柱状のロールを配置し、ロールを回転しながら素材を巻き込んで成型する加工

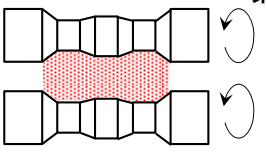
ユニバーサル圧延



H型鋼等製造

上下一対の水平ロールと左右一対の垂直ロールを組み合わせて成型する加工

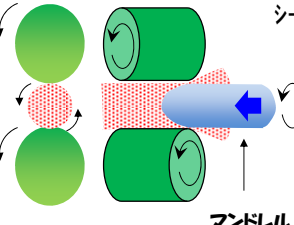
孔型圧延



素材・異形棒製造

上下のロールに幾つもの孔型を作り、圧延時に通る経路を変えて目的の素材に加工

マンネスマン穿孔圧延



シームレスパイプ製造

斜めに配置した一対のロールで断面が丸い素材を回転しながら圧延することで中央に孔をあけそこにマンドレルを挿入

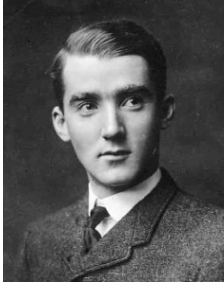
3



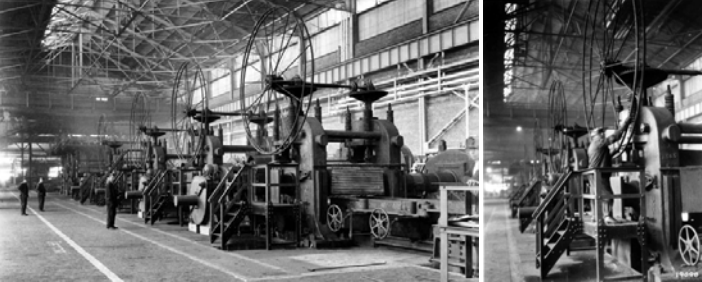
圧延技術の進歩

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
2014, June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉





J.B. Tytus, 1875-1944



American Rolling Mill Companyが製造した最初の連続圧延機

1. 圧延品の機械的性質や組織に及ぼす、圧延ロールの形状や材質、圧延時の圧下率や圧延パスの回数、鋼材の板厚・板幅の影響を実験で調べる。
2. 連続制御圧延技術を発明し、広幅の圧延板を短時間製造に成功する。



旧圧延設備
500~600 t/月
1920年代初頭

➡

連続圧延技術
9000 t/月
1924年1月

➡

連続圧延技術
40,000 t/月
1927年

連続鋳造：分塊鋳造する

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

底の開いた長い鋳型で溶融金属を凝固し、底部から連続的に引出して切断する鋳造法

300mm以上 130mm以上 130mm以下

スラブ ブルーム ビレット

分塊鋳造の形状

熱いうちに熱間圧延工程に送られるが、厳しい用途に使用される鋼は、表面・内部欠陥の検査のため、冷却後に圧延工程に送られる

熱間プロセス

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

金属の変形抵抗の低い高温で、圧延ロールの荷重で加工する

スラブ

加熱

1000℃以上

粗圧延

仕上圧延

矯正

制御冷却

板厚1.2mm程度まで薄くする

デスケーリング

タンデム仕上圧延

コイル巻取り

時速100km以上で圧延板が進む

圧延加工

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

【圧延】回転する複数のロールの間に、板状あるいは棒状の素材を通して、その厚さ又は断面積を減じ、同時に断面を目的の形状に成形する加工法。

- 寸法精度が良く、大量に製造することが可能
- × ロール扁平による不良を改善するため、ロール管理やバックアップロールが必要

2ロール縦圧延

3ロール縦圧延

2ロール傾斜圧延

3ロール傾斜圧延

素材は長さ方向に並進する

素材は軸の周りを回転しつつ前進する

7

各種圧延機のロール配置

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

2重圧延機

3重圧延機

4重圧延機

6本ロール
クラスターミル

20本ロール
クラスターミル

素材の板厚は、スラブの数百mmから箔の数十 μm まで、広範囲にわたる。一般に板厚が薄くなるにつれてロール直径も小さくしなければならないが、胴長はあまり変わらないので、ロールは細長くなり、弾性変形で曲り易くなる。したがって、小径のワークロールではそれを支持するバックアップロールが必要となる。

8

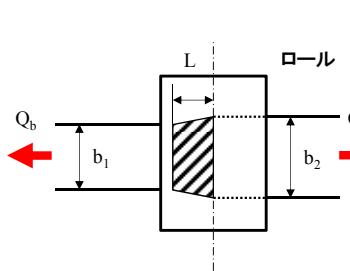


圧延加工による材料の変形

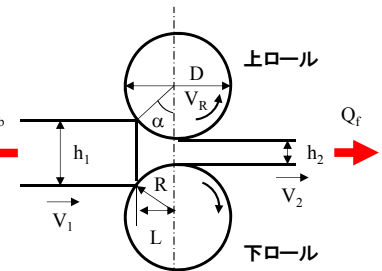
ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
2014, June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



h_1, h_2 : 入口と出口の板厚、 b_1, b_2 : 入口と出口の板幅、 V_1, V_2 : 入口と出口の速度
 R : ロール半径、 L : 素材がロールと接触する圧延方向の長さ、 α : L に対応するロール中心角



平面図



側面図

压下量 $\Delta h = h_1 - h_2$ 压下率 $r = \Delta h / h_1$ 幅拡がり量 $\Delta b = b_2 - b_1$ 拡がり率 $= \Delta b / b_1$
 ロール中心角 $\alpha = 2 \sin^{-1} \sqrt{\Delta h / (4R)} \approx \sqrt{\Delta h / R}$
 投影接触長 $L = \sqrt{R \Delta h - \Delta h^2 / 4} \approx \sqrt{R \cdot \Delta h}$

9



中立点と先進率

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
2014, June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



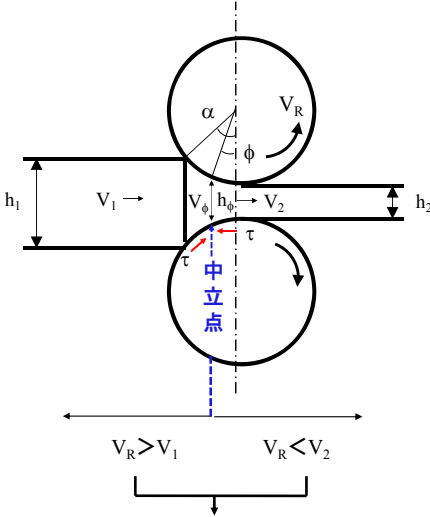
変形域の入口から出口に近づく、材料の断面積が減少し、素材速度は速くなる。**ロール周速と材料速度が一致する点を中立点**と称し、接触弧内に存在する。ロールから材料に働く面圧(s)が接触弧に沿って一定と仮定すると、中立点位置(ϕ)は以下のようになる。

$$\sin \phi = \{(\cos(\rho - \alpha) - \cos \rho) / (2 \sin \rho)\}$$

$$\rho = \tan^{-1} \mu : \text{摩擦角}, \mu : \text{摩擦係数}$$

材料がスリップしないで圧延するためには、 $\phi \geq 0$ であるから $\alpha \leq 2\rho$ となり、 $V_2 \geq V_R$ となる。そこで先進率 ψ を以下のように定義

$$\psi = \frac{V_2 - V_R}{V_R}$$



ロールから材料に中立点方向に摩擦力(τ)が作用する。

10

圧下力を高めるには

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

圧下力(圧延荷重)P: 材料から圧延ロールに作用する力の合力

$$P = 1.15Y_m b_1 L' Q_p = 1.15Y_m b_1 \sqrt{R' \Delta h} \cdot Q_p$$

$$R' = R \{1 + C_0 P / (b_1 \Delta h)\} \quad L' = \sqrt{R' \Delta h}$$

$$Q_p = 1.08 + 1.79 r \mu \sqrt{R' / h_1} - 1.02 r$$

Y_m : 平均変形抵抗、 Q : 圧下力関数、 λ : トルクアーム係数(約0.5)、 r : 圧下率、 μ : 摩擦係数
 L' : ロールの扁平変形により接触弧の曲率半径が R から R' に増加した時の投影接触長

圧下力を大きくするには、 Q_p を大きくすればよいから、 R/h_1 , r , μ が大きくすればよい

ロールの曲率半径 R は? →大きくする
加工前の素材の板厚 h_1 は? →小さくする
圧下率 r は? →大きくする
摩擦係数 μ は? →大きくする(ロールを粗く加工する)

11

タデウス・センジミア

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

Tadeusz Sendzimir
July 15, 1894 – Sept. 1, 1989

"Let's imagine a piece of a hard pastry. We are rolling it on the pastry-board to decrease its thickness. However it would be faster and easier if we asked someone to stretch it by holding the edges".

1920 年代 亜鉛メッキ鋼板の研究
 1931 年 連続式亜鉛めっきライン開発
 1936 年 同技術特許を取得したアームコ社が実生産
 1940 年 T. Sendzimir, Inc., 設立
 1953 年 八幡製鉄戸畑が同ラインを導入し稼働

Tadeusz Sendzimir 製鐵所(ポーランド)
2005年Arcelor - Mittalの傘下となる

【構造略図】

日本センジミアHPより <http://www.sendzimir.co.jp/products/index.html> ¹²

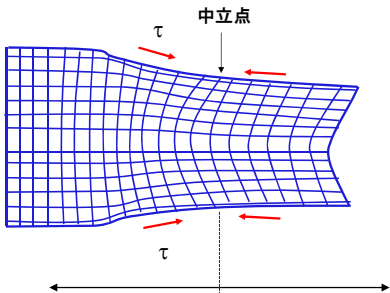


圧延におけるメタルフロー

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

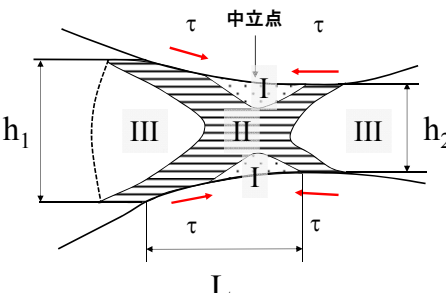


東北大学



中立点

τ



中立点

τ

h_1

h_2

L

ロールからの摩擦力 τ で、表面に垂直な格子線は表面が中心部より進んで湾曲し、表面程せん断変形が大きい

摩擦力の反転により、入口側と逆向きのせん断変形が生じ、格子線は入口側で生じた湾曲を少し戻すように変形する

領域I 材料は変形しない
 領域II 大きな変形を生ずる
 領域III 小さな変形を生じる

13



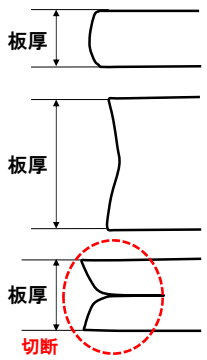
圧延の不均一変形

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



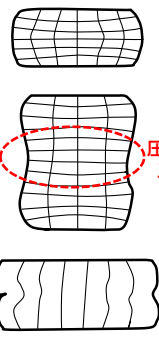
東北大学

後端



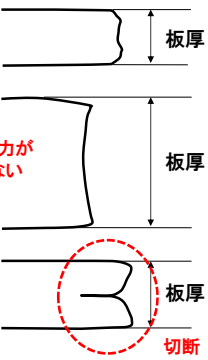
板厚

断面



圧縮応力が及ばない

前端



板厚

バレルリング

ダブルバレルリング

ダブルバレルリングの進展

切断

ロール間隙の平均板厚 $h_m = (h_1 + 2h_2) / 3$

① $h_m/L < 2$: 圧延材横断面と先後端形状はバレルリングを形成
 ② $h_m/L > 2$: 板厚中央が先進するよう変形し横断面と先後端形状はダブルバレルリング形成
 ③ ダブルバレルリング材の繰返圧延: 板の先後端と側端にオーバーラップ発生

14

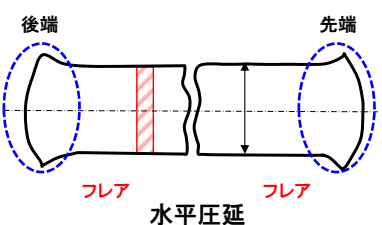


圧延の不均一変形

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

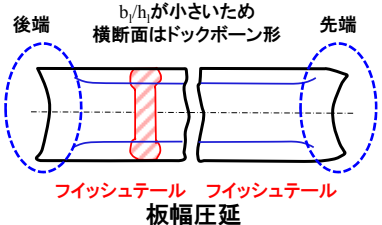


長方形スラブから板に圧延する時、板厚圧下(水平圧延)と板幅圧下(幅圧延)を行う。この時、長方形板の平面形状は、先後端の非定常変形のためきれいな長方形にはなりにくい。

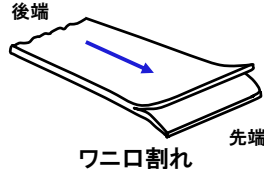


水平圧延

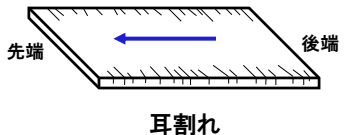
b/hが小さいため
横断面はドックボーン形



板幅圧延



ワニ口割れ



耳割れ

表面より板厚中心が伸び易いため、先端の板厚中心部に板厚方向の引張応力が生じる(バレーング)

板縁は材料が幅方向に流れるために延伸が不足して、圧延方向の張力が生じる

15



ロールの変形と板の形状

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

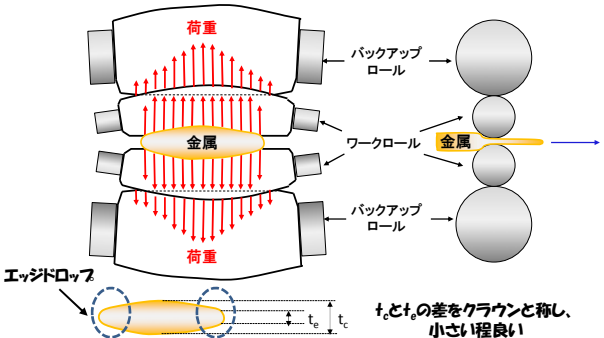


弾性体のロールは圧下力がかかると弾性変形し、軸方向に不均等な熱膨張による変形(サーマルクラウン)によりロールギャップが変化し、板厚精度や平坦度が悪くなる。

ロールの弾性変形は、

- ① 軸心たわみ(bending): 板の中央が厚くなる板クラウンを生じる
- ② 偏平変形(flattening): 板の両端部で板厚が急激に減少するエッジドロップを生じる

があり、過大なクラウンは歩留り低下と、耳伸び(edgewave)を生じ平坦度を悪くする

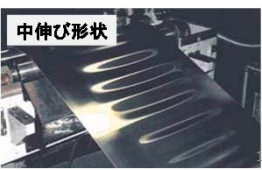


t_bとt_cの差をクラウンと称し、小さい程良い

耳伸び形状



中伸び形状



16

ロール圧延

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

t_c と t_e の差をクラウンと称し、小さい程良い

金属を押さえる力を大きくすると大きな荷重が発生し、ワークロールが変形する。変形したワークロールで圧延された鋼板は、中央部が厚く端部が薄くなる

17

クラウンに勝つ:6重圧延機

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

- ① 中間ロールを板幅に応じて幅方向で動かす
- ② 端部におけるバックアップロールとワークロールの直接的な接触を防ぐ
- ③ ワークロールの変形をコントロールする
- ④ ワークロールは撓(たわ)まず強圧下でもクラウン値の小さい圧延が可能となる

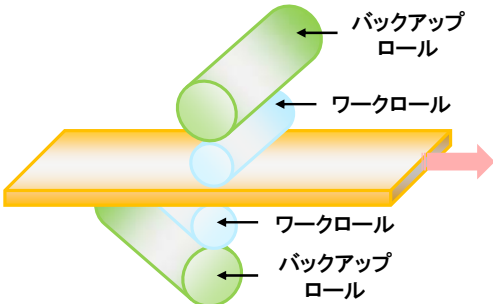
18



クラウンに勝つ:ペアクロス圧延

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



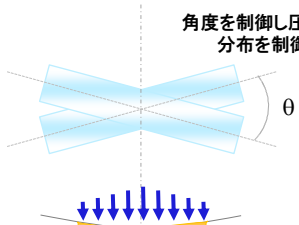


バックアップ
ロール

ワークロール

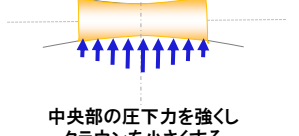
ワークロール

バックアップ
ロール



角度を制御し圧下力
分布を制御

θ



中央部の圧下力を強くし
クラウンを小さくする

- ① 上下それぞれのバックアップロールとワークロールをペアで前後クロスさせる
- ② 幅方向の上下ロール間隙を変えて、幅中央部の圧下力を強くする。
- ③ クラウン値の小さい板を圧延で成形できる。

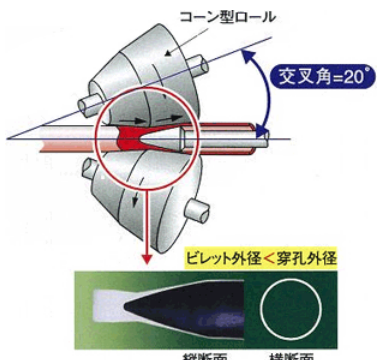
19



マンネスマン穿孔圧延

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉





コーン型ロール

交叉角=20°

ビレット外径<穿孔外径

縦断面 横断面

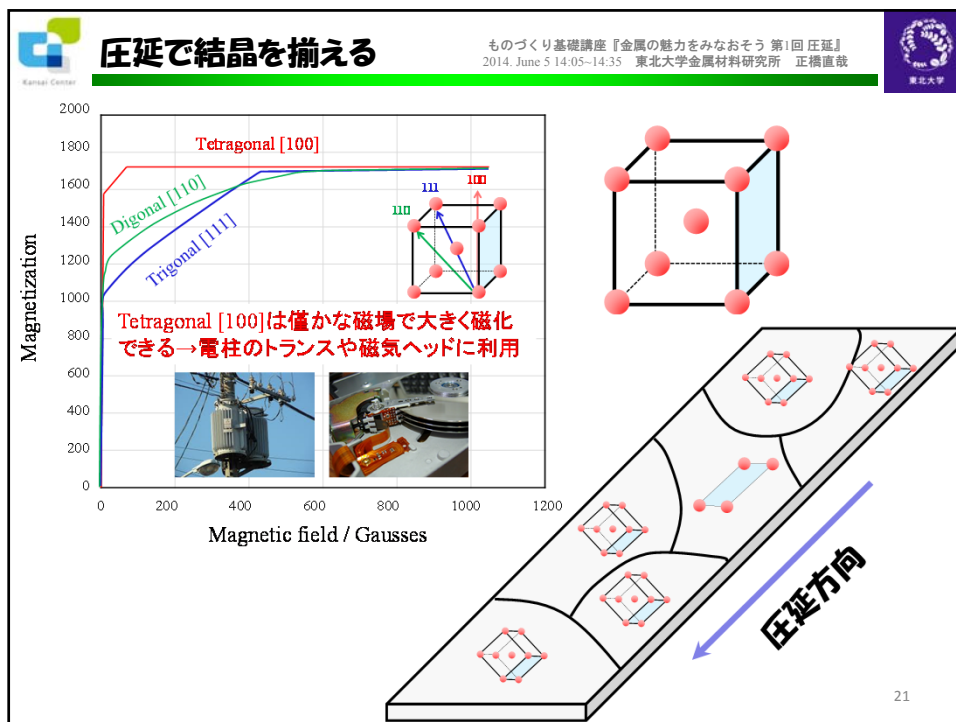
http://www.nssmc.com/tech/nssmc_tech/process/06.html



- ① コーン形のロールを傾斜角約10~20°で交差させて同方向に回転
- ② 前方から自由に回転するマンドレルバーの先に穿孔プラグを取りつけて、ロール間にセット
- ③ 後方から加熱した丸ビレットを送ることで、ビレットはロール間で回転圧縮されながら前進し、プラグによって穿孔される

穿孔直前のビレット中心部は半径方向に引張り応力が生じ、中心部の材料は其中で回転圧縮を受けるためミクロ的な空孔が形成され、穿孔され易い。そこにプラグを当てて穿孔する。

20



圧延再結晶を築いた日本人 ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』
 2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

寺田寅彦 (1878-1935) 西川正治 (1884-1952) 浅原源七 (1891-1970) 依田一 (1872-1958) 鮎川義介 (1880-1967)

Cu 圧延材 熱処理材

Sn 圧延材 熱処理材

Ag 圧延材 熱処理材

22

