

X線の基礎

ものづくり基礎講座（第59回技術セミナー）

『金属の魅力をみなおそう 第三弾 観察・分析編 第六回 X線』

東北大学金属材料研究所

正橋直哉

masahasi@imr.tohoku.ac.jp

2019. Jan. 30 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



Trans-Regional
Corporation Center



X線手荷物検査



X線異物検査



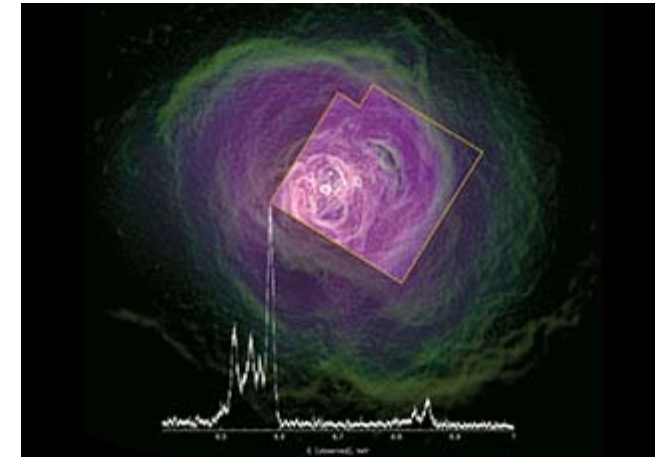
胸部X線撮影



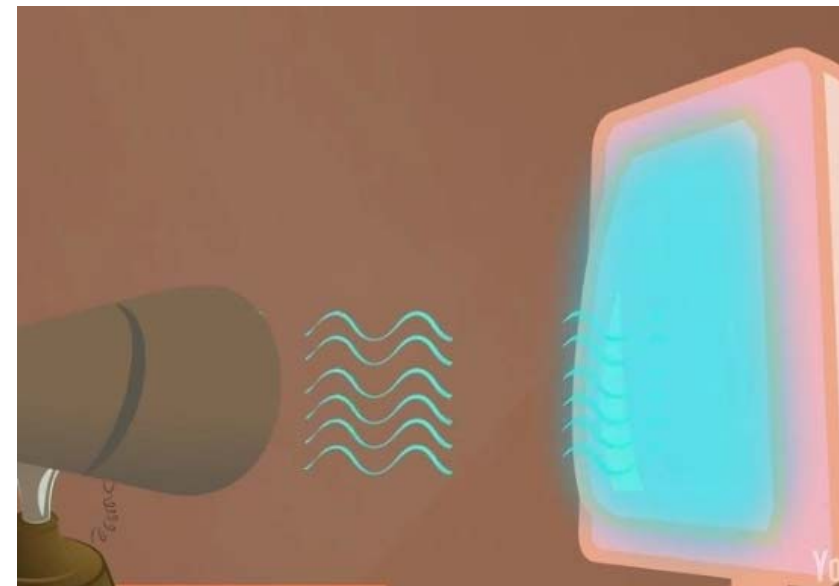
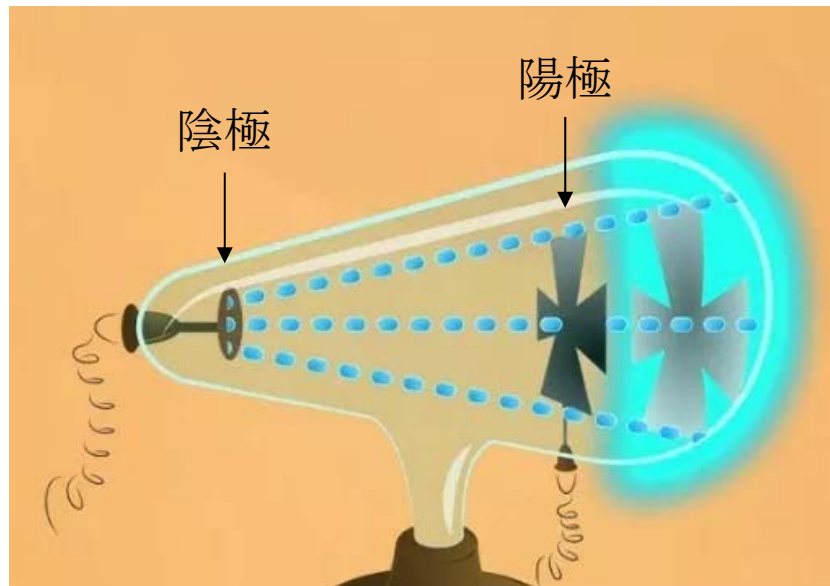
X線透視検査



X線非破壊検査



X線天文衛星「ひとみ」



蛍光色の光が漏れないようボール紙で包んだ陰極管内部を電子線で照射

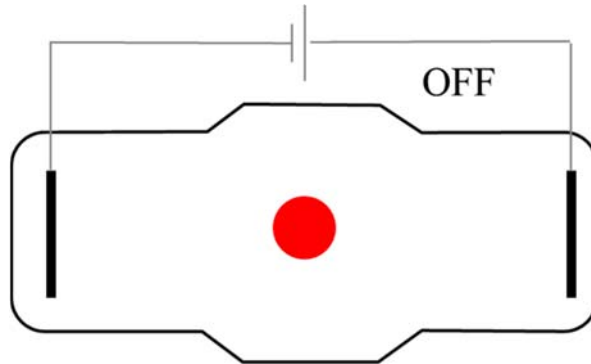
管の外の別の蛍光紙が緑に光り、目に見えない光がボール紙を貫通した

<https://logmi.jp/business/articles/82721>

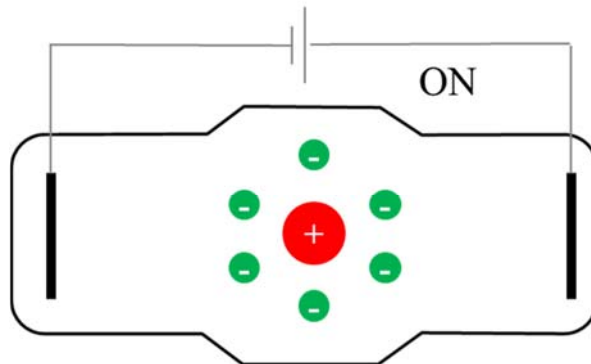
レントゲンは、陰極線（電子線）のあたる陽極から放射線が出ていると考え、未知を表す「X」からこの光線を「X線」と命名。この発見により、レントゲンは1901年に第一回ノーベル物理学賞を受賞。



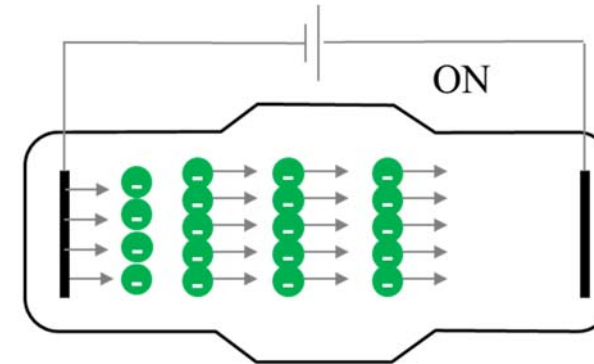
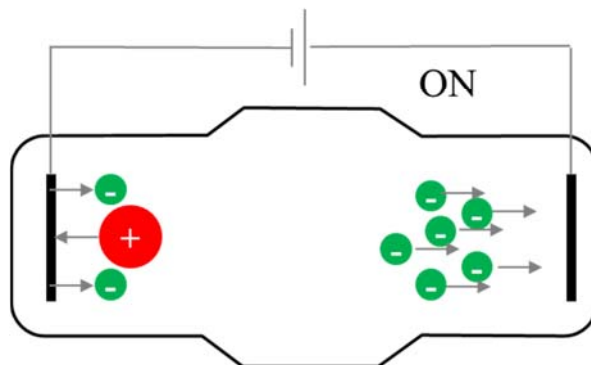
①低真空ガラス管内で電極を結線



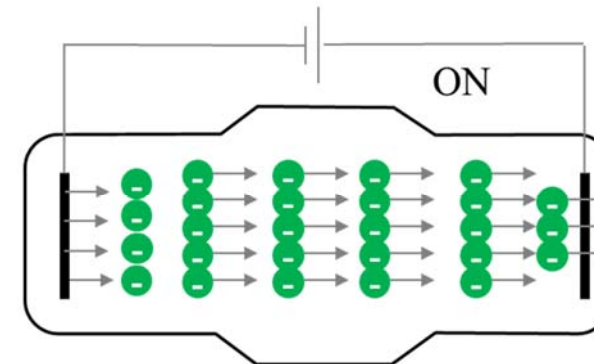
②高圧を印加すると残留気体が電離開始



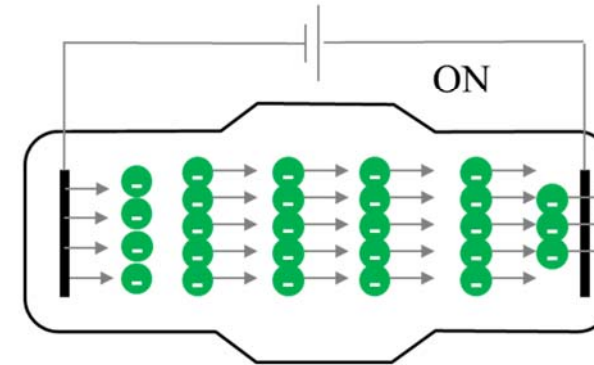
③陽イオンが陰極に衝突し大量二次電子生成



④二次電子は陽極に向かって飛行



⑤電子が陽極を透過しガラス管内壁に衝突



⑥X線発生

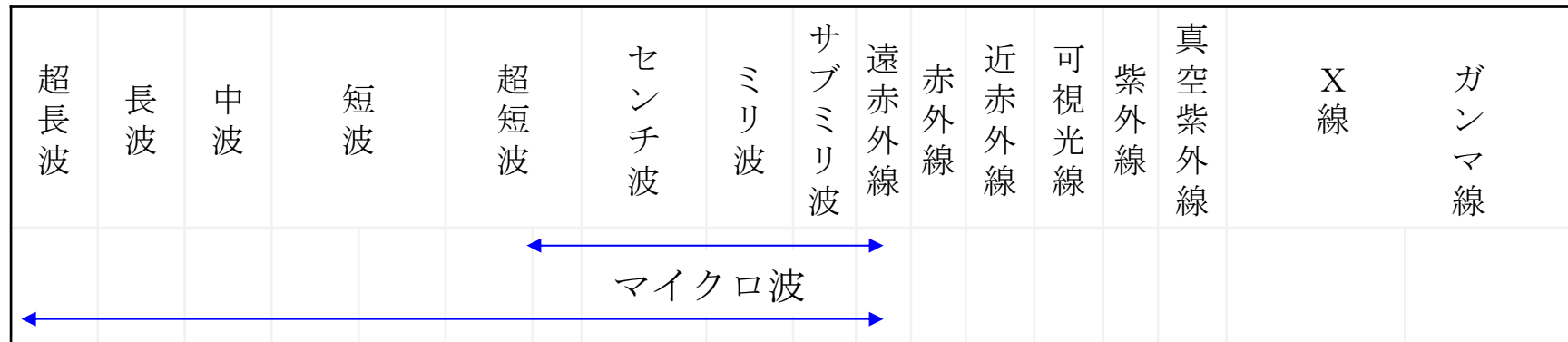
【X線とは】

1. X線は、電波や太陽光と同じ電磁波の一種で、空気や物質の中を直進する。
2. 波長は1 pm-10 nmと短いため物質を透過するが、高密度な物質ほど透過しにくい。
3. X線は電荷をもたないが、反応で生じた電子が物質に影響を及ぼす。
4. 原子と衝突すると電子を弾き飛ばし、陽イオン化する（光電効果）。

【電磁波】

波長 10^5 10^4 10^3 10^2 10^1 10 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8} 10^{-9} 10^{-10} 10^{-11} 10^{-12} 10^{-13}

m



電波



700nm 600nm 500nm 400nm



Wilhelm Conrad Röntgen
(1845-1923)



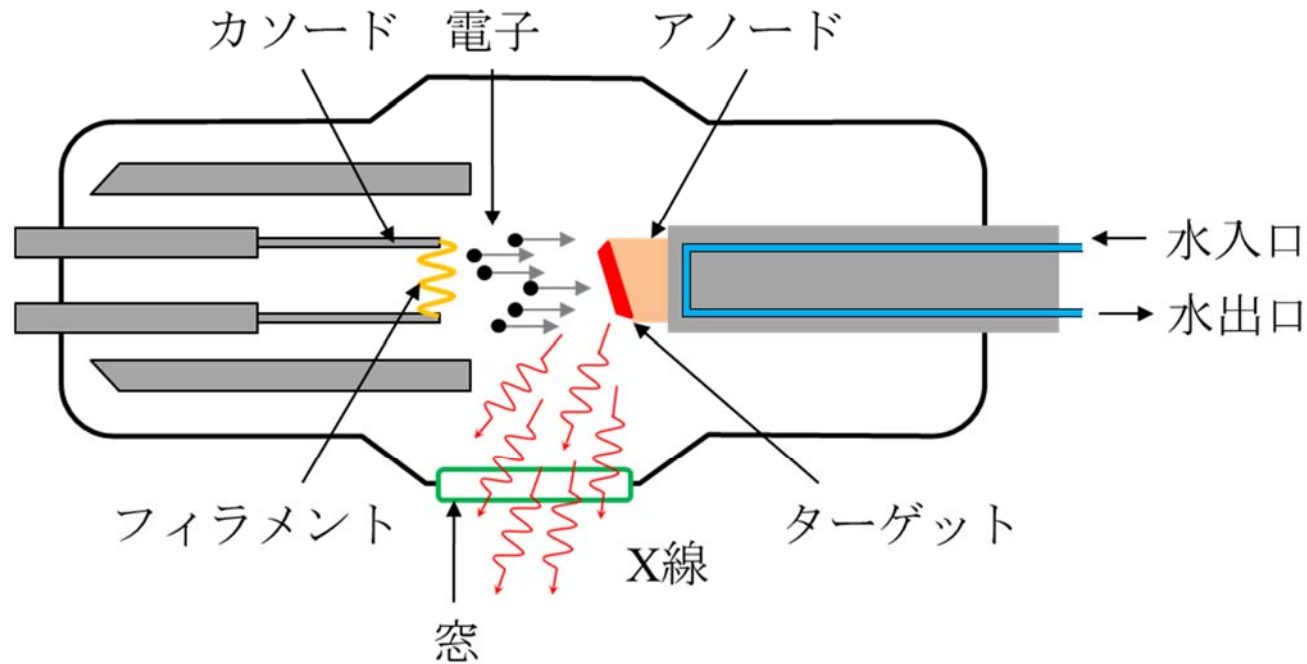
1895年、フライベルク大学の物理学教授Wilhelm Conrad Roentgenは「X線」を発見した。レントゲンは、X線の波長を測定しようとしたがうまくいかなかったが、妻の手のX線画像を撮影しX線が人間の体を貫通し、密度に依存してコントラストを示すことを見つけた。透過する光の発見により、1901年に最初のノーベル物理学賞を受賞した。

1912年、ミュンヘン大学の物理学教授Max von Laueは、助手 (Walter Friedrich) と学生 (Paul Knipping) に、硫酸銅のX線回折を命じた。Laueは、X線波長は結晶の原子間距離と近く、結晶が格子となってX線を回折すると予想し実証した。この業績で1914年にノーベル物理学賞を受賞した。

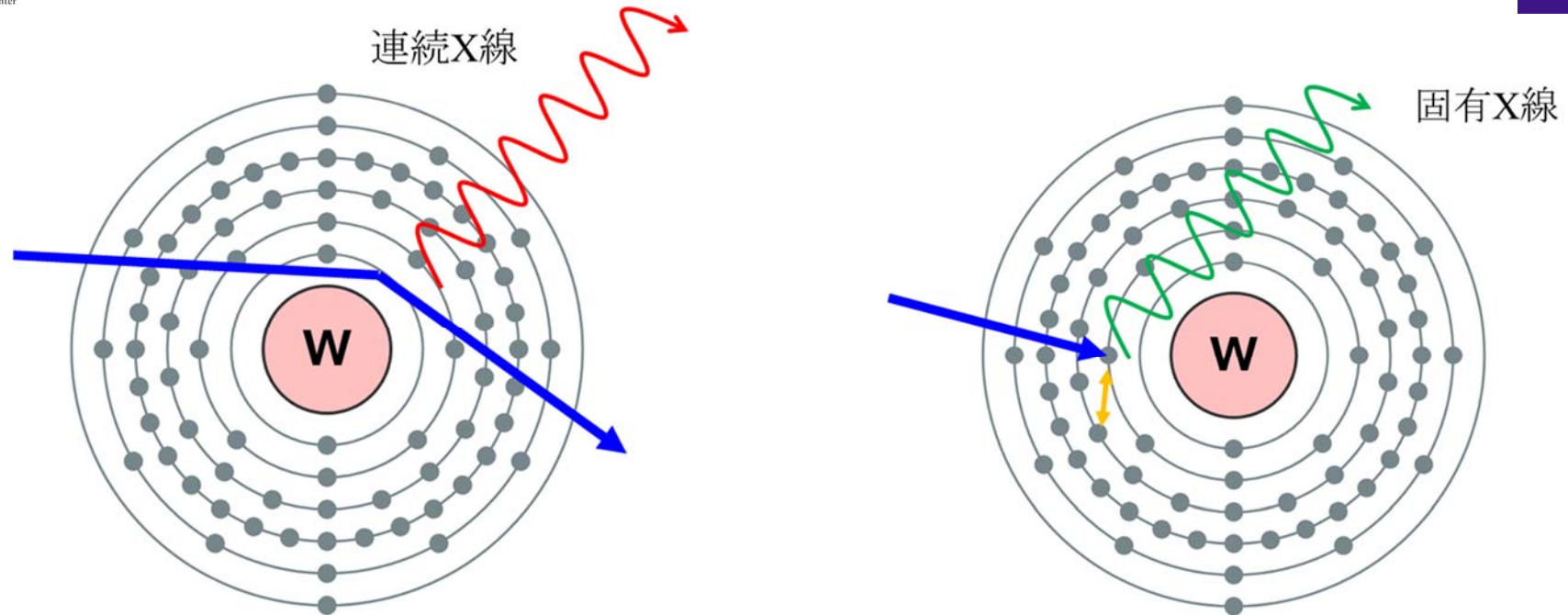


Max von Laue
(1879-1960)





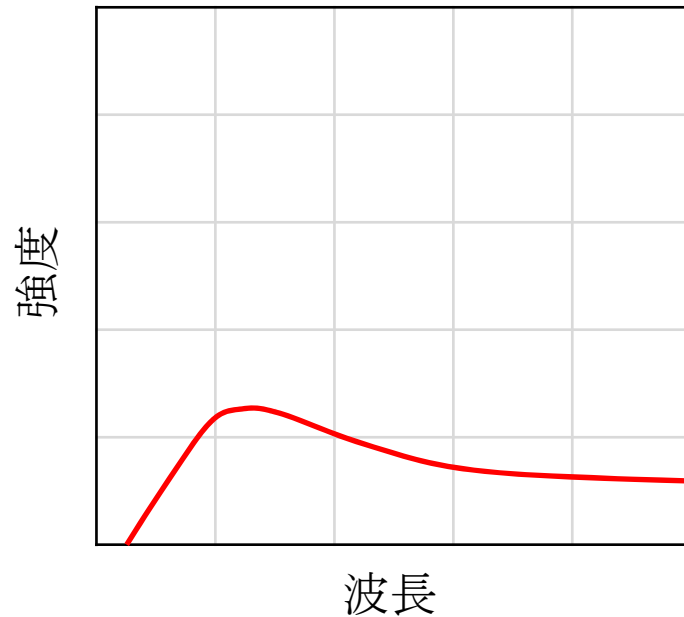
1. フィラメントを加熱し、電子（熱電子）を飛び出しやすくする。
2. アノードとカソードに電位をかける（電位を管電圧、流れる電流を管電流）。
3. 両極間の電位差を利用して、放出電子がターゲットに衝突する。
4. ターゲット（一般にタングステン）からX線が発生する。
5. X線の吸収の小さいベリリウム窓からX線を取り出す。



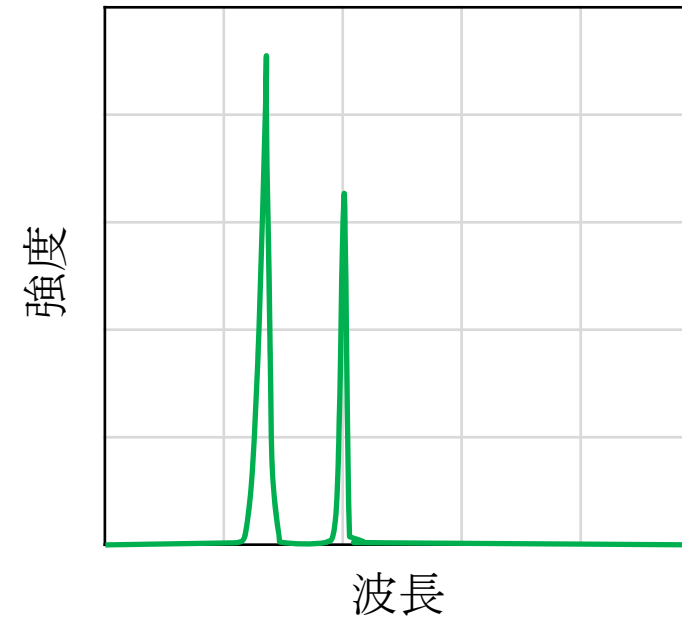
1. アノードに引き寄せられた電子は、原子核に寄せられ急激に方向を変える。
2. 方向を変えた電子は、エネルギーを外に出す。
3. 大部分のエネルギーは熱で、一部はX線となり、これを連続X線という。

1. 電子は原子核周りの電子に衝突する。
2. ぶつけられた電子はエネルギーをもって外側の軌道に移動するが、不安定なので元の軌道に戻ろうとする。
3. この時X線を放出するが、エネルギーは元素固有でこれを特性X線という。

連続X線（白色X線）

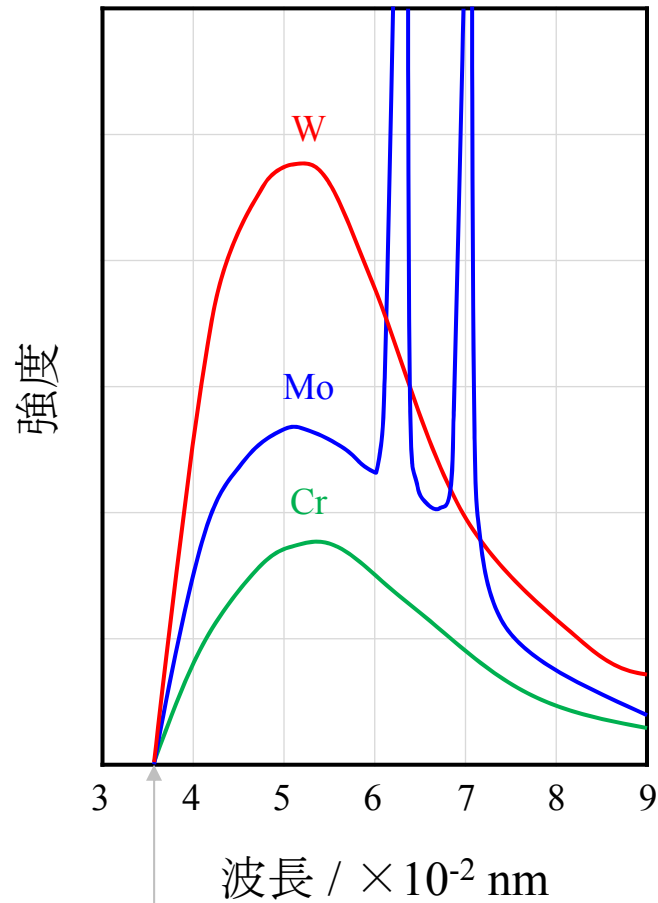


固有X線（特性X線）

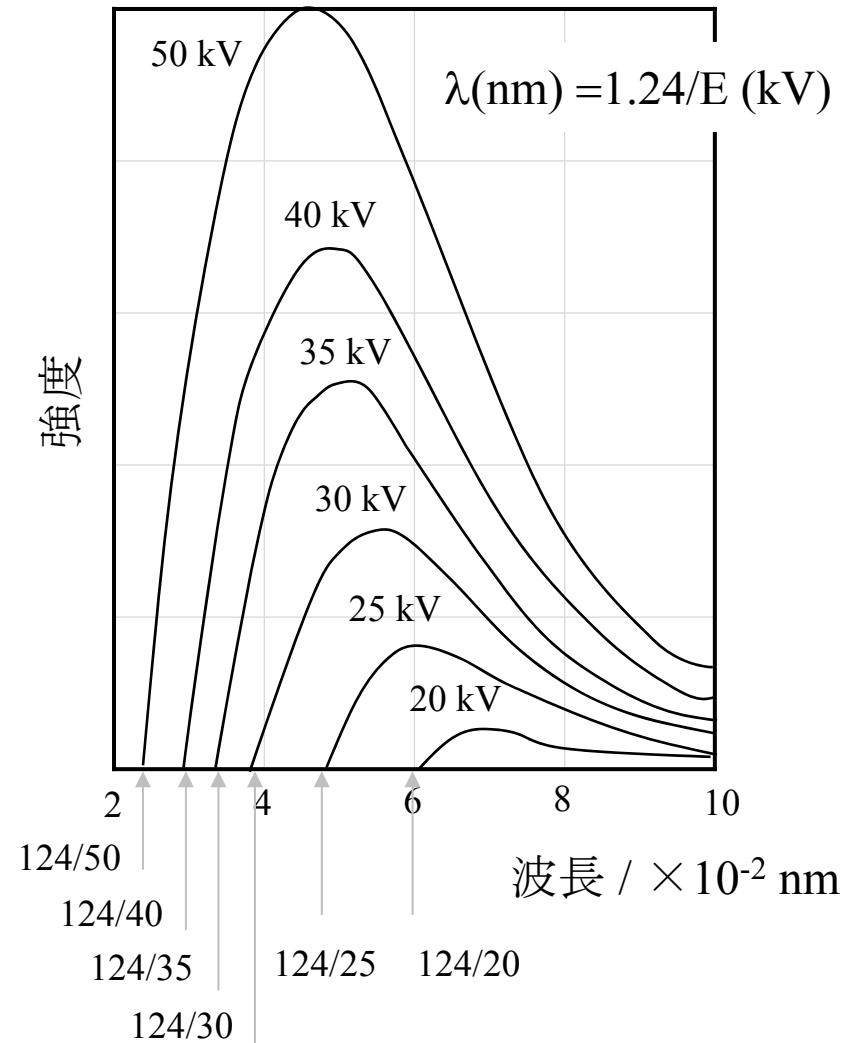


管電圧が高いほど、原子核と引き合いX線強度は高い。電子は原子核の任意の場所を通るので、エネルギー分布は連続スペクトルになる。原子核の最短部を通る時に力が強く最短波長が決まる。

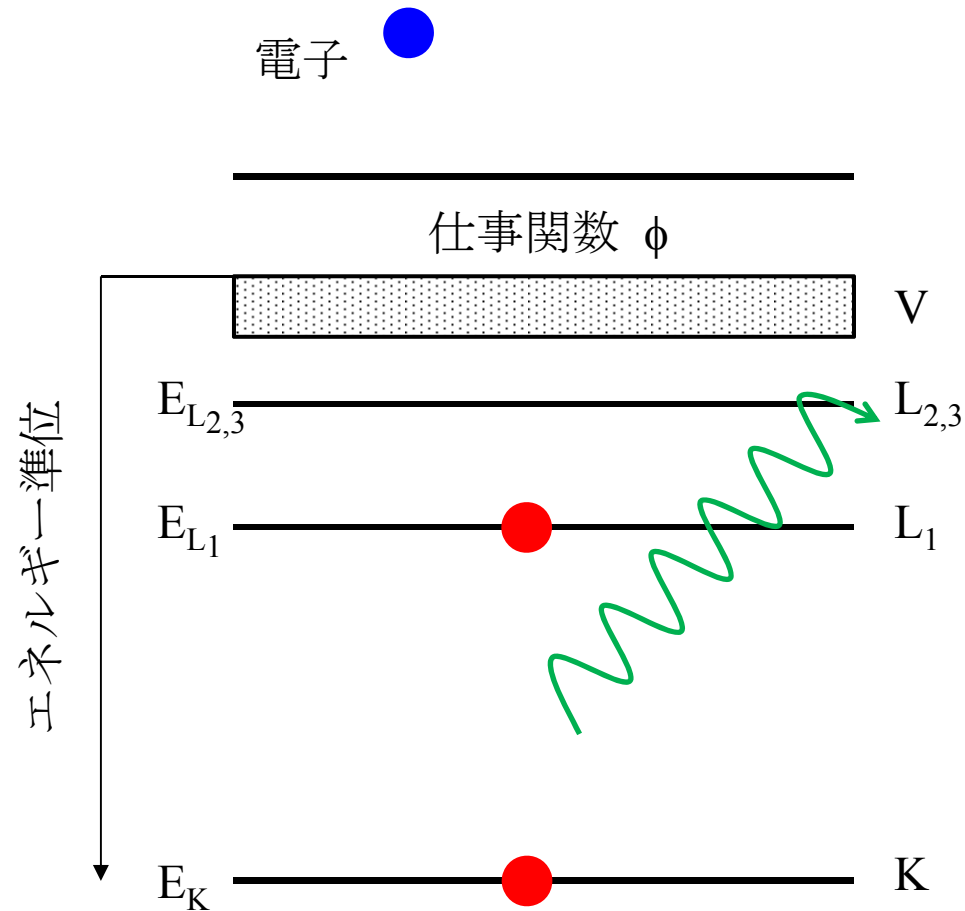
電子で弾かれた軌道電子は一つ高準位に上がった後に、元準位に戻り、準位間エネルギーのX線が発生。X線のエネルギーEは振動数 ν (光速 c /波長 λ) \times プランク定数 h で、 $\lambda(\text{nm}) = 1.24/E(\text{kV})$



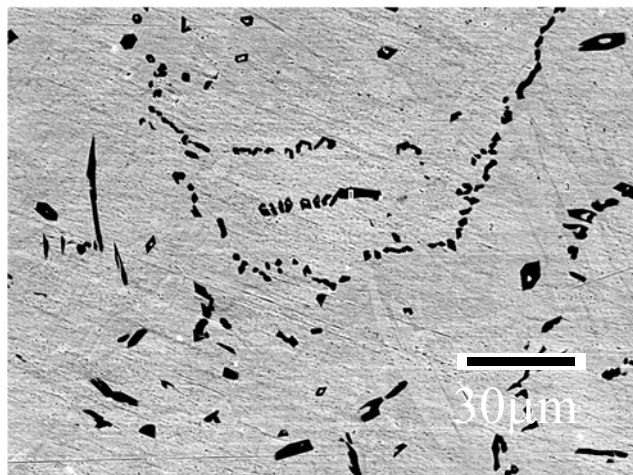
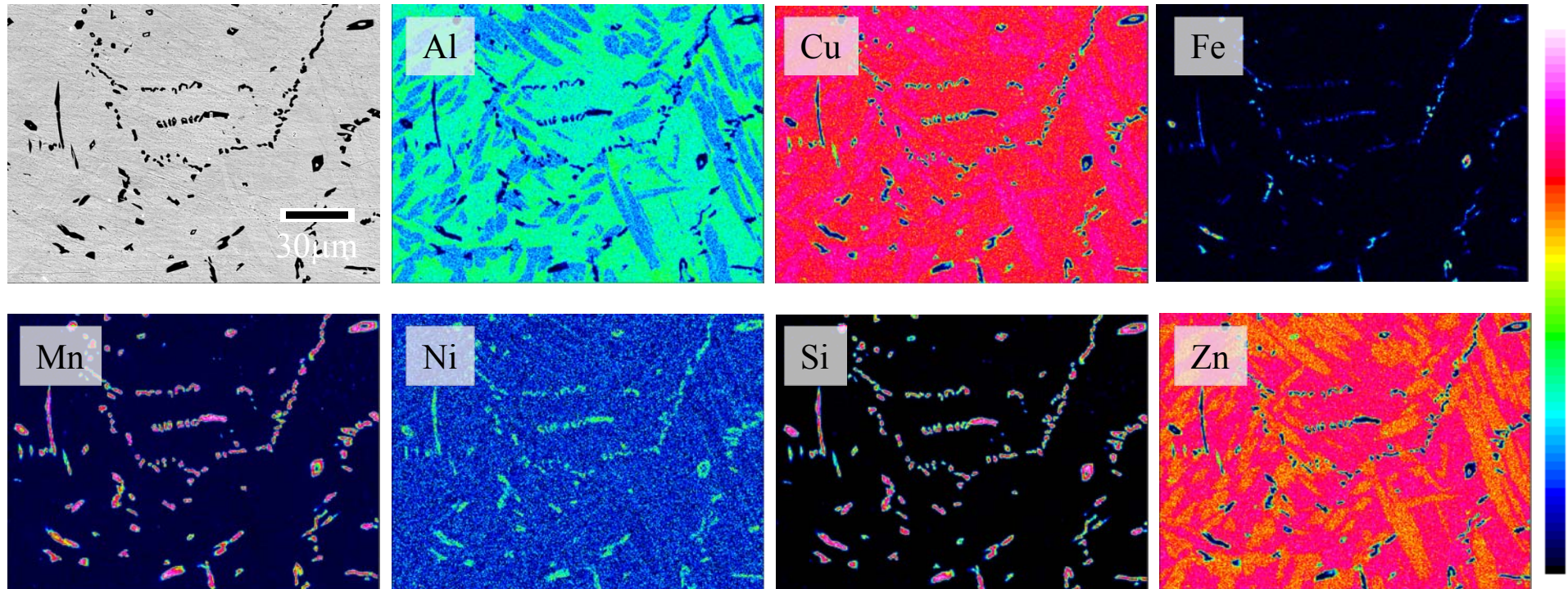
最短波長：電子の持つ全運動エネルギーがX線に変わった場合



ターゲットに依存せず印加電圧のみに影響される

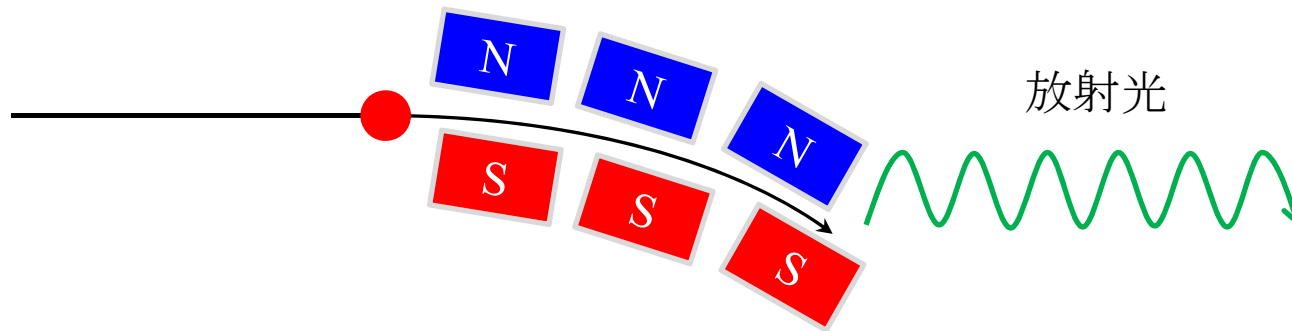


1. 電子が試料に衝突すると軌道 (K殻) 電子がエネルギーを得、上の準位に励起する。
2. 上の準位 (L殻) に励起した電子は不安定で下の準位 (K殻) に戻ろうとする。
3. この準位間のエネルギーは特性X線として放出される。



1. 画像（二次電子像）ではよく観察できないが、組成分析の結果、実際には数十µm~100µm程度の棒状の第二相が存在する
2. 棒状の第二相は、CuとNiとSiとMnが濃化し、AlとZnは少ない

光速で直進する電子が、磁石などで向きを変えられたとき発生する電磁波を放射光と称し、進む方向の変化が大きいかほど、X線などの短い波長の光を含む。



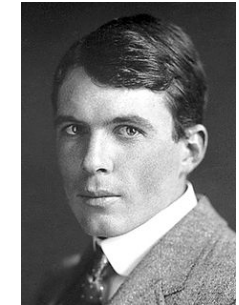
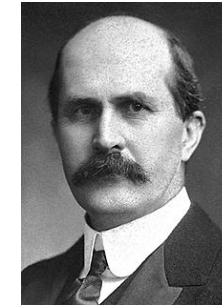
Spring-8

1. 明るい。
2. 細く絞れる。
3. 広い波長を含む。
4. 偏光している。
5. 短いパルス光の繰返。

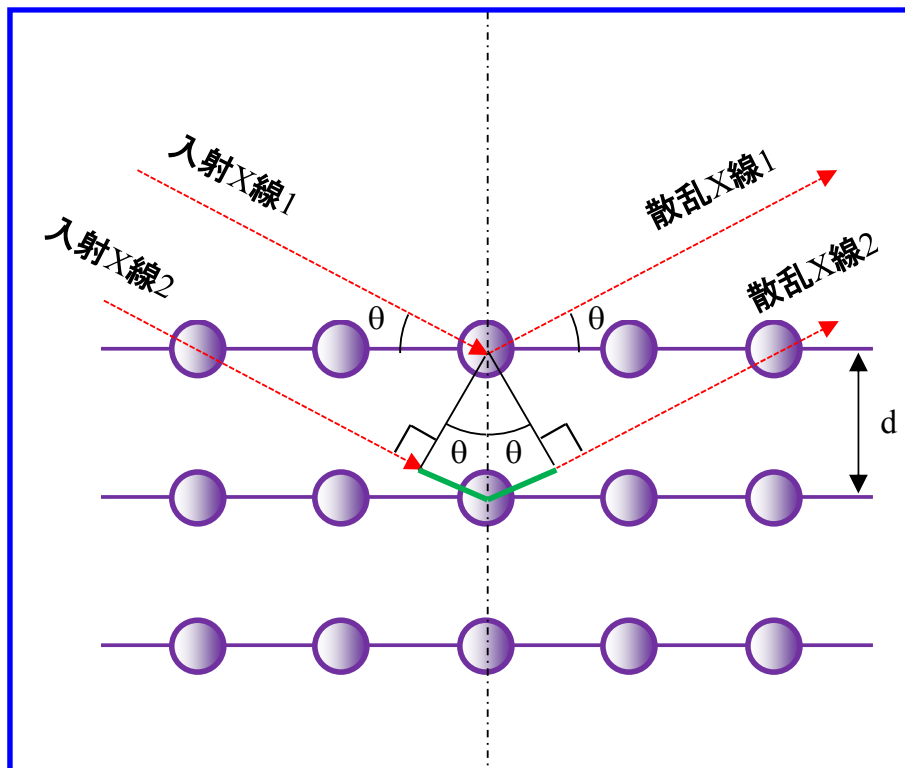


- ① 物質の種類や構造、性質が判る。
- ② 様々な環境での物質の構造や性質、時間変化が判る。
- ③ 化学反応や物質変化の起動力として使用できる。

結晶にX線を照射すると、結晶中の各原子によりX線が散乱される（散乱X線）。散乱されたX線は干渉し合い、特定方向に対して強い回折X線が生じる（ブラッグの法則と称する）。

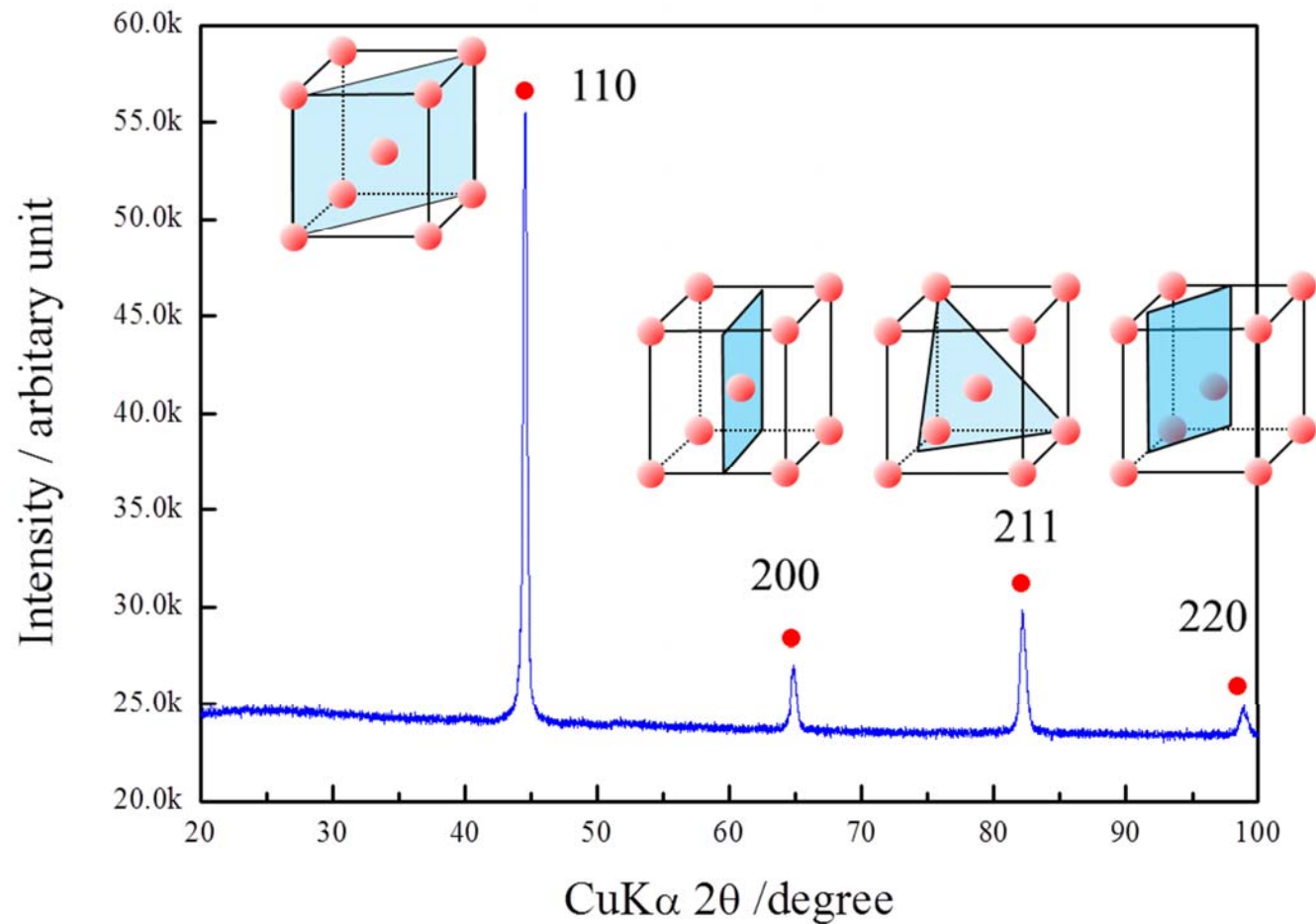


ヘンリーブラッグ ローレンスブラッグ

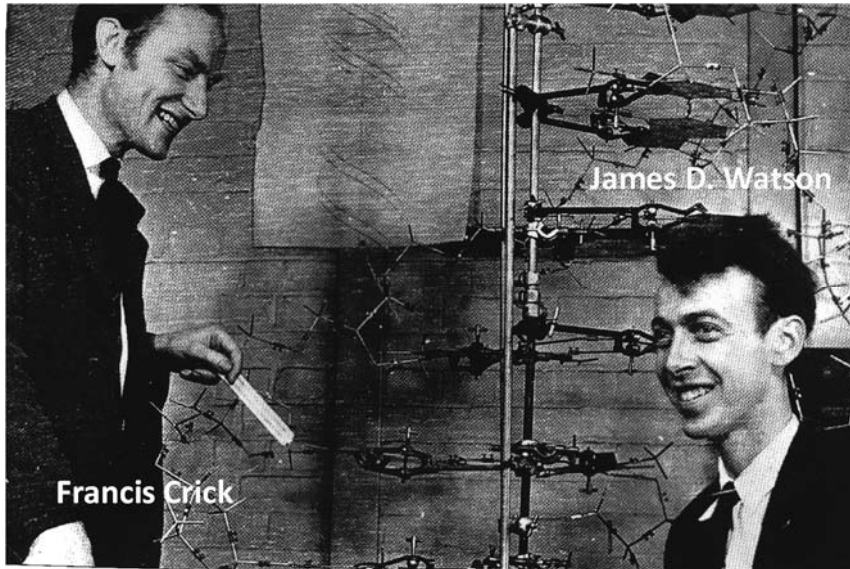


- ①格子面からの散乱したX線が強め合うのは、散乱X線1と散乱X線2の間隔による行路差（左図の緑線）に依存。
- ②原子の間隔を d 、入射角を θ とした場合、第1面と第2面の行路差は $2d\sin\theta$ となる。
- ③行路差が入射X線の波長 λ の整数倍の時強め合い次式が成立（ブラッグの法則）。

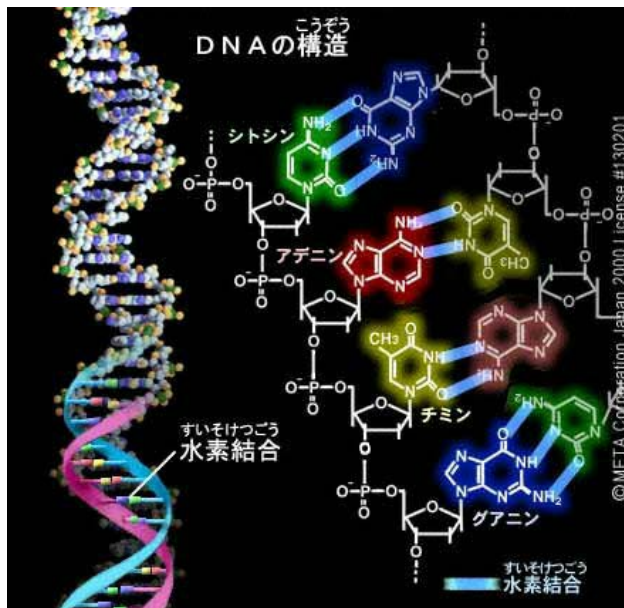
$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$



X線実験をすると上の様なプロフィールが得られ、ピーク角度 (θ) を読み取ることで、ブラッグの法則からこの試料がどのような構造であるかを調べることができる (上の図は鉄の場合で各ピークは図中の水色の面からの回折)。

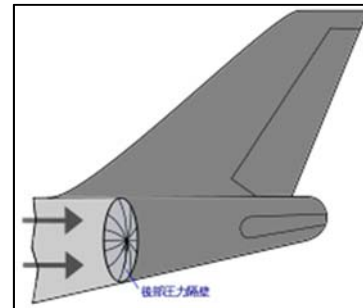


DNA model built by Crick and Watson in 1953, on display in the Science Museum in London.



ワトソンは、タンパク質の研究のためにケンブリッジ大学にきて、『生命』の解明には遺伝子が鍵と考えた。大学ではブラッグが創設した研究所で生物学を研究するクリックと同室となった。二人はDNAの話で意気投合し、DNA構造の解明のため、X線回折実験の結果 をもとに、部屋に大きな模型を組んでジグソーパズル のような謎解きを始めた。

1985年8月12日、羽田発伊丹行JAL123便 B747SR-46が、群馬県多野郡上野村の高天原山の尾根に墜落した事故。



圧力隔壁損壊は、隔壁接続部の金属疲労で発生した亀裂により、隔壁強度が低下し飛行中の与圧に耐えられなくなった。

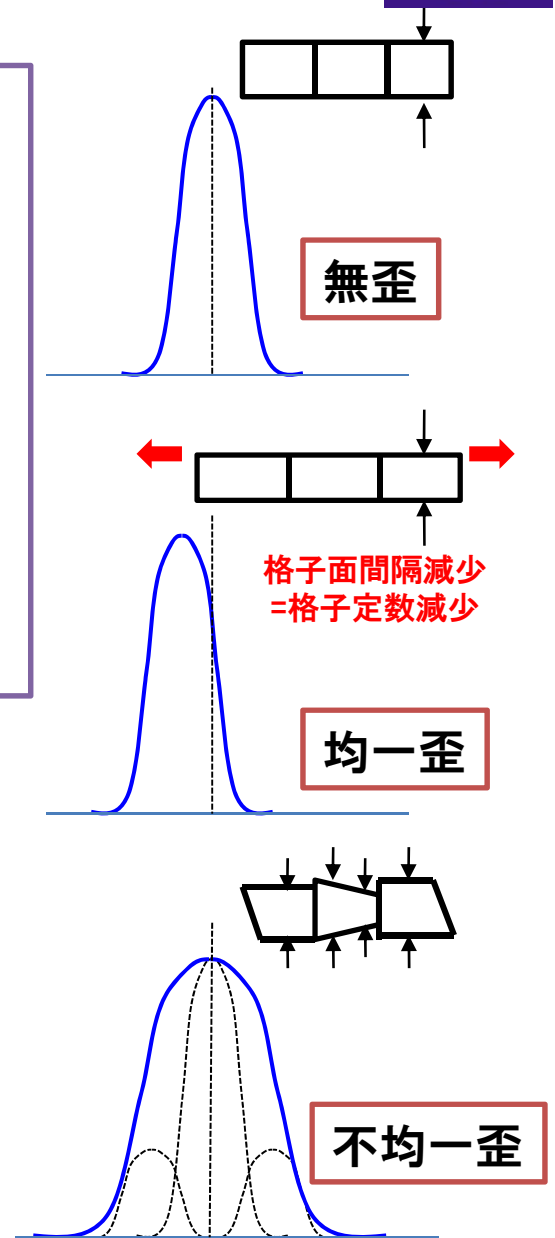
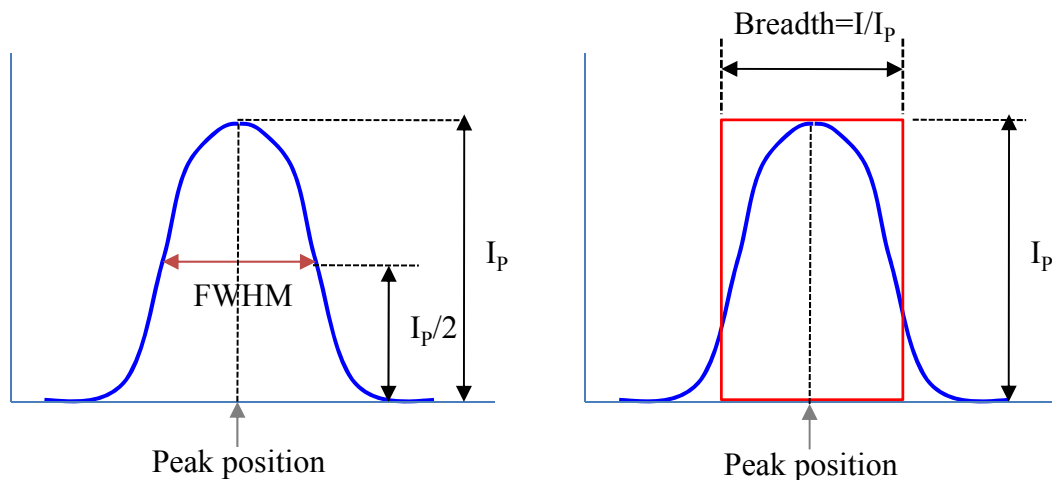
1954年1月10日、シンガポール発ロンドン行BOAC781便（コメットMk.I）がエルバ島上空 26,500 ft を巡航中、海上に落下。



与圧荷重はそれまでは最大差圧0.4気圧だったが、コメットは高空飛行のため0.58気圧（6 ton/ m²の圧力）された。

金属に力が蓄えられた時の負荷（人間の場合のストレス）は、多量に蓄積されると破壊（病気）に繋がる。そのようになる前の検査（治療）が必要→残留歪みの測定

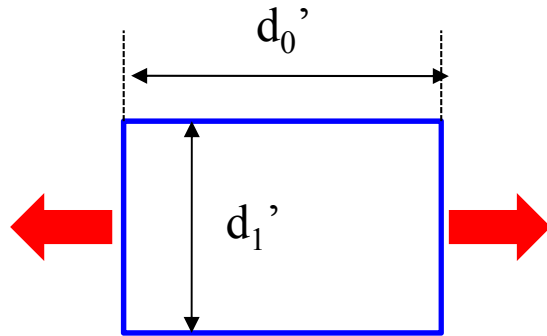
- ① 歪みには**均一歪み**と**不均一歪み**があり、前者は弾性限内の応力に比例する格子面間隔の変化で、後者は結晶格子の隣接結晶との間、または同一結晶内でも場所により異なる歪み。
- ② 残留歪みはマクロには前者で評価する。不均一歪みは、回折線の**広がり**から計算し、広がりには下図左のピーク強度の半分の強度に相当する半価幅（FWHM）と、下図右のピーク面積と同面積の長方形の積分幅（Breadth）で表記できる。



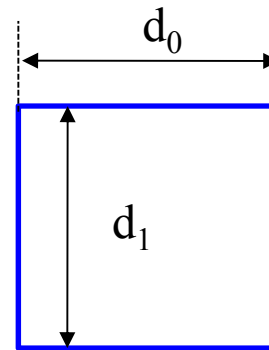
(a) 引張の場合

$$d_0' > d_0$$

$$d_1' < d_1$$



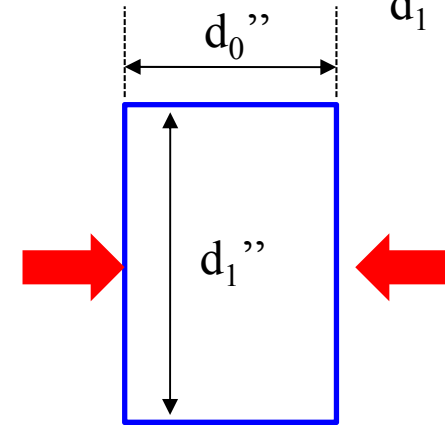
(b) 無歪の場合



(c) 圧縮の場合

$$d_0'' < d_0$$

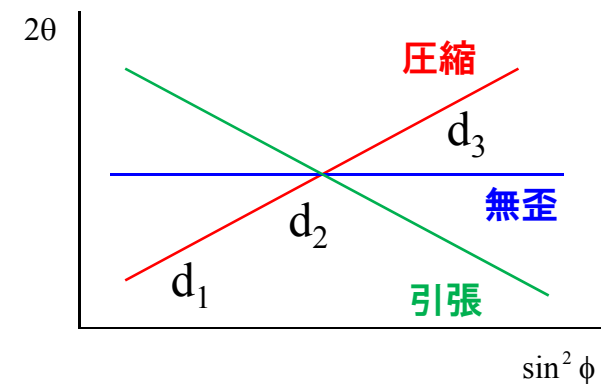
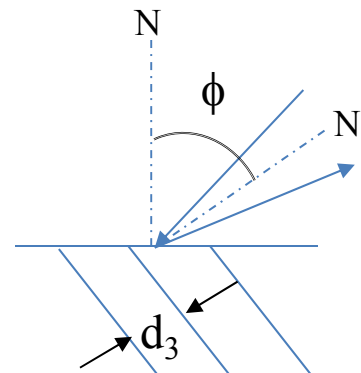
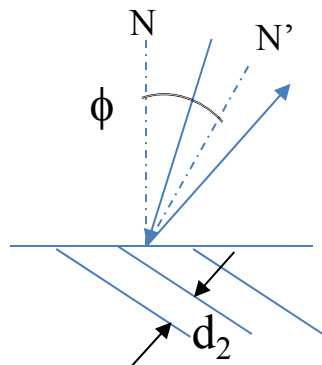
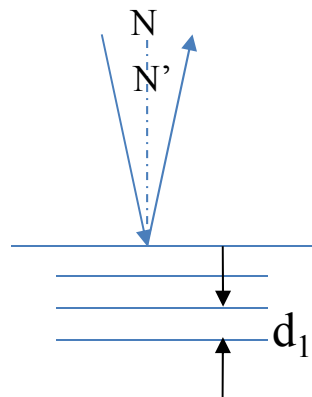
$$d_1'' > d_1$$

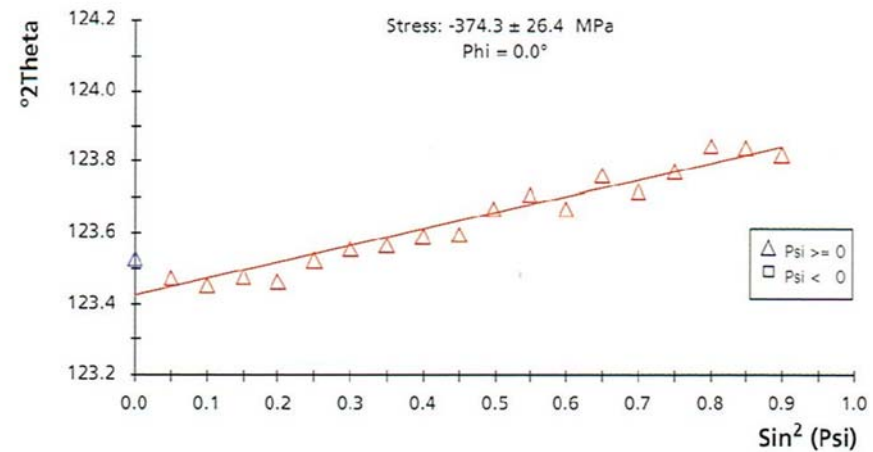
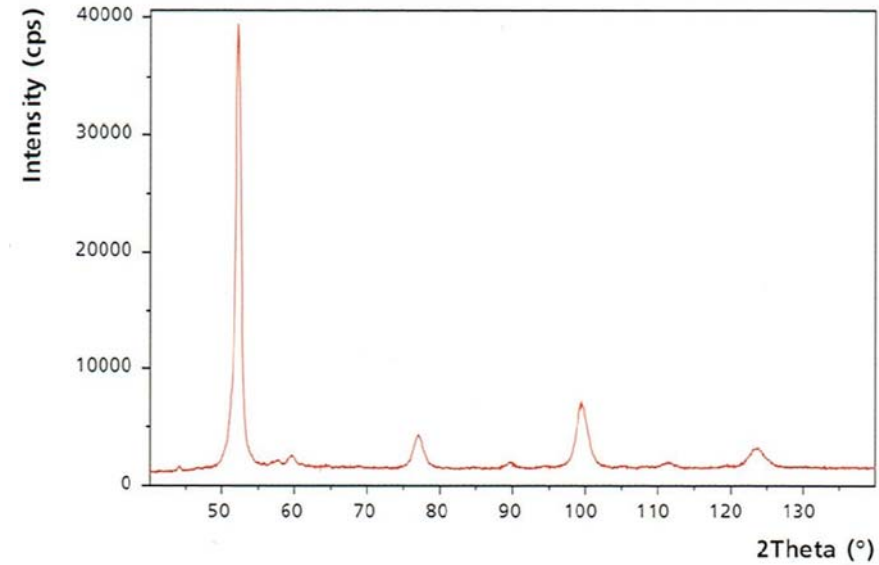
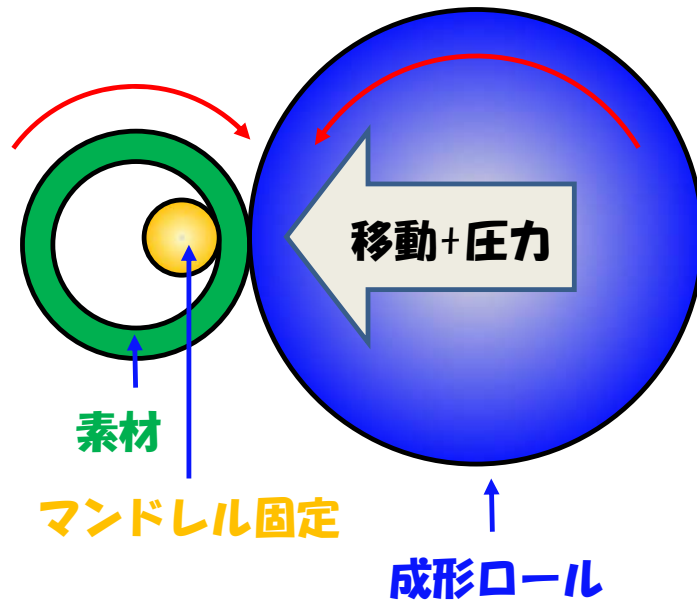
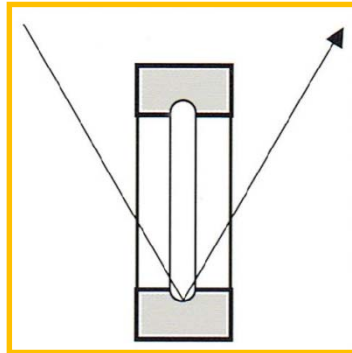


$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \cot \theta \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \phi)} = K \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \phi)}$$

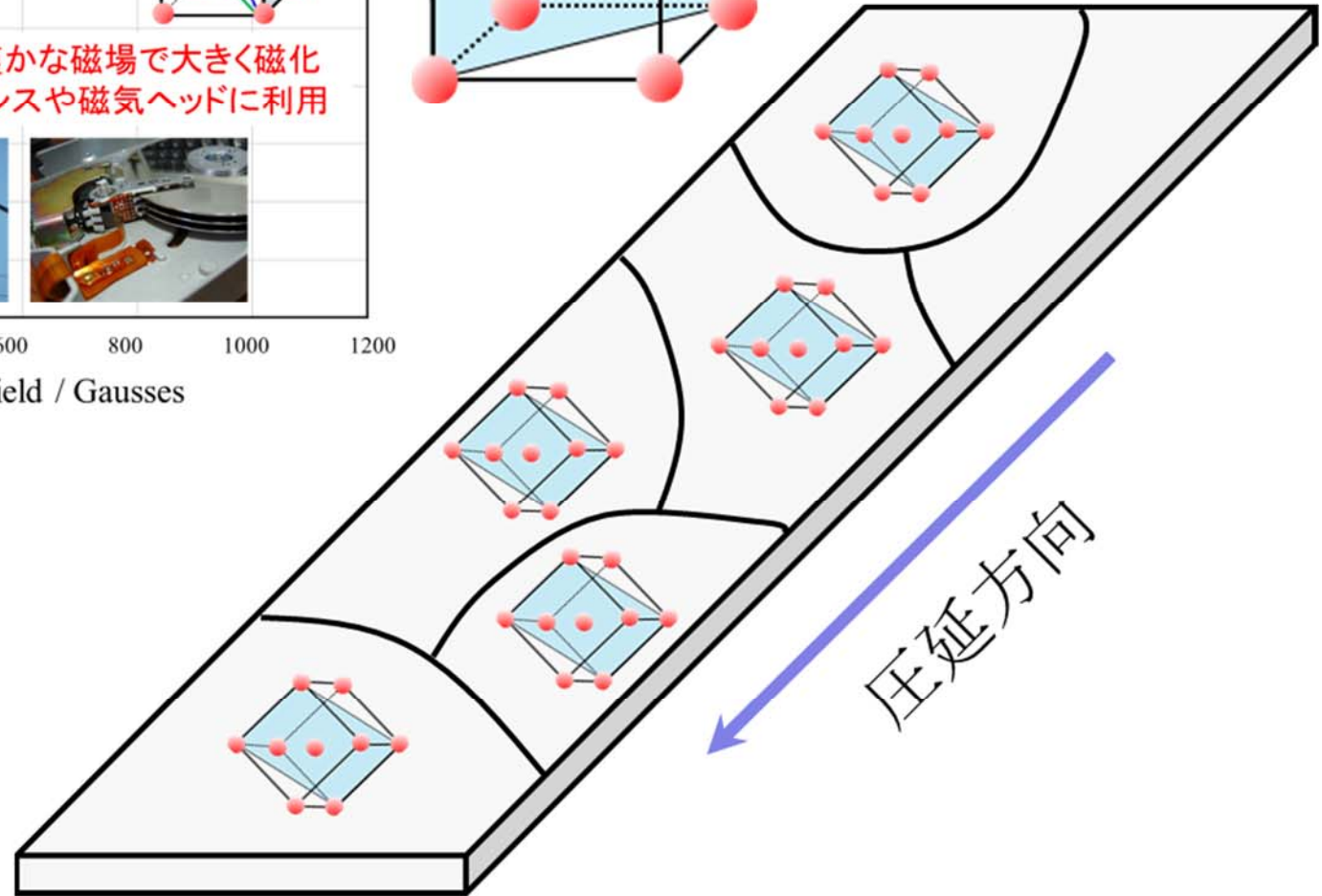
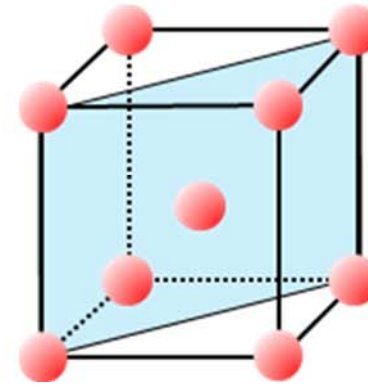
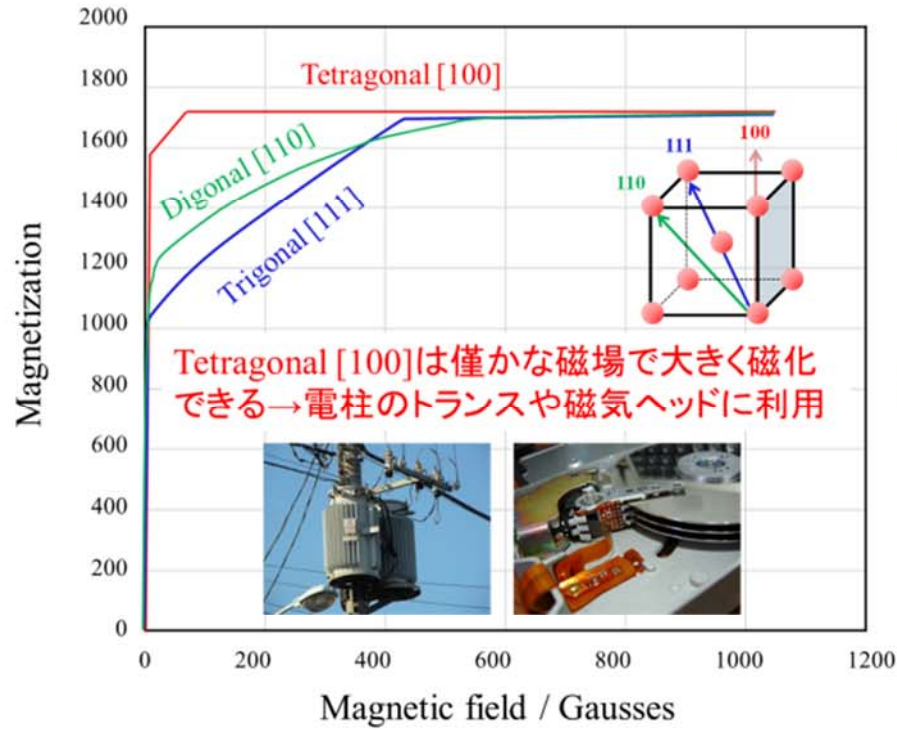
K:材料と波長で決まる定数

σ :応力, E:ヤング率, ν :ポアソン比, θ :ブラッグ角, ϕ :試料面法線Nと格子面法線N'の角度





ベアリング内側には加工による圧縮残留歪みが26.4MPaあることが判った。





寺田寅彦
(1878-1935)



西川正治(1884-1952)



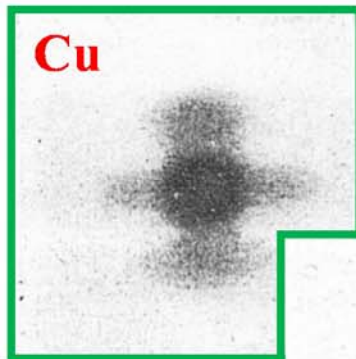
浅原源七(1891-1970)



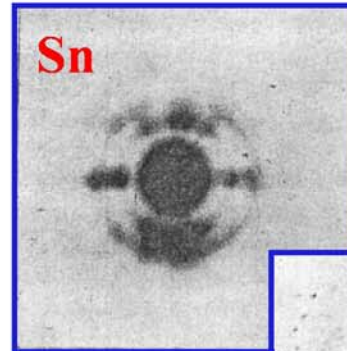
伊国一
(1872-1958)



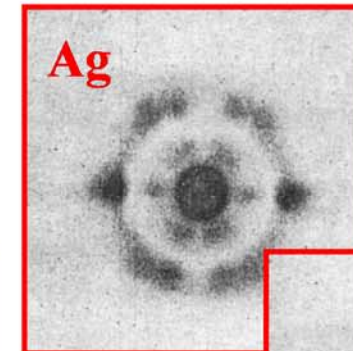
鮎川義介
(1880-1967)



圧延材

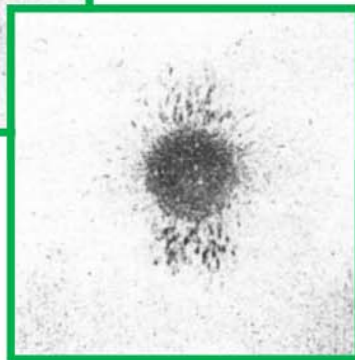


圧延材

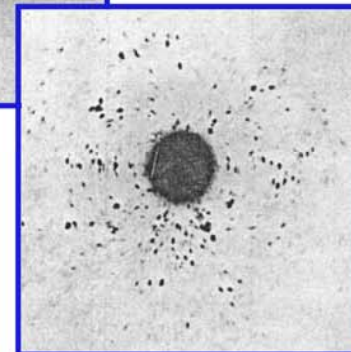


圧延材

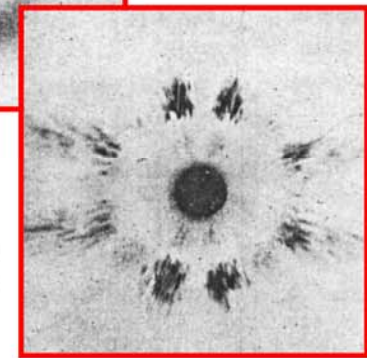
熱処理材

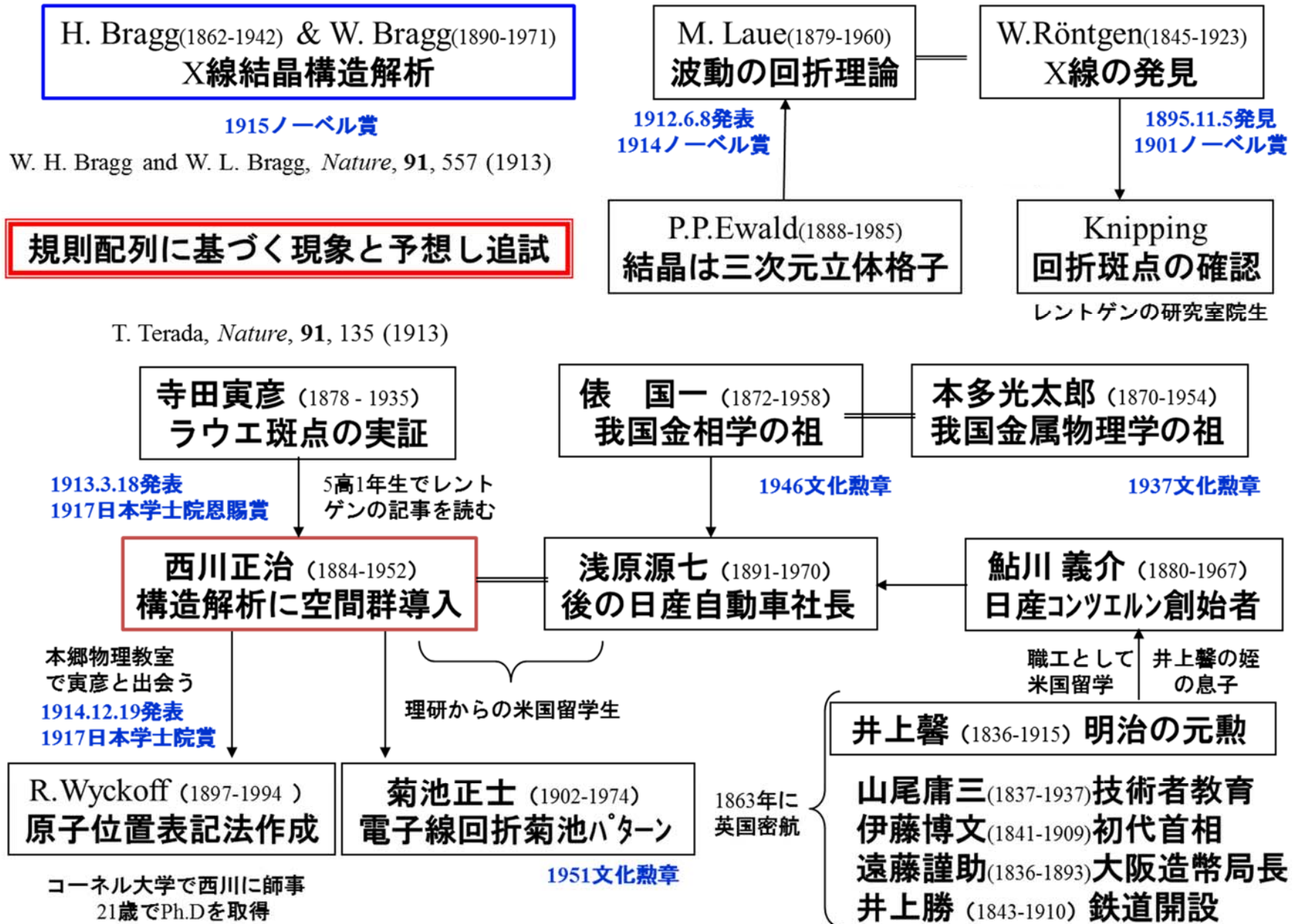


熱処理材



熱処理材





◎ X線とは

- ① 波長の短い電磁波で**物質を透過**するが、高密度な物質ほど透過しにくい。
医療診断・異物検査・非破壊検査などに利用される
- ② 電荷をもたないが、**反応で生じた電子**(光電効果)が物質に影響を及ぼす。
光電管、テレビジョンの撮像管などに利用される
- ③ 波長は原子間距離と同程度のため、原子散乱されたX線は**強く回折**する。
物質の構造を決めることができ、高輝度X線を使用すると高精度分析が可能

◎ 金属へのX線の利用

- ① 結晶構造(相)や組成がわかる
品質管理や新材料の開発に役立つ。
- ② 残留応力がわかる
引張応力はクラック伝搬を促進するので、**表面は圧縮応力を残す**。
- ③ 集合組織がわかる
機能によっては、**結晶をそろえることで特性を制御**できる

御清聴有難うございました