

熱応力(Thermal stress)

熱膨張, 熱収縮が拘束されると、物体に外力を加えなくても内部に応力が発生する. この様な内部応力を熱応力と呼ぶ.

外的な拘束がなくても物体内に温度分布がある場合には熱応力が発生する.

$$\sigma = E\alpha_{\ell}(T_0 - T_f) = E\alpha_{\ell}\Delta T$$

熱衝撃 (Thermal shock)

激しい温度変化によって物体内に衝撃的な熱応力が発生する現象. 非定常な温度場で、温度分布により熱膨張・収縮が拘束されると、その程度と物体の弾性係数に依存した熱応力が発生する.

熱伝導率が低い材料でその影響が大きい。

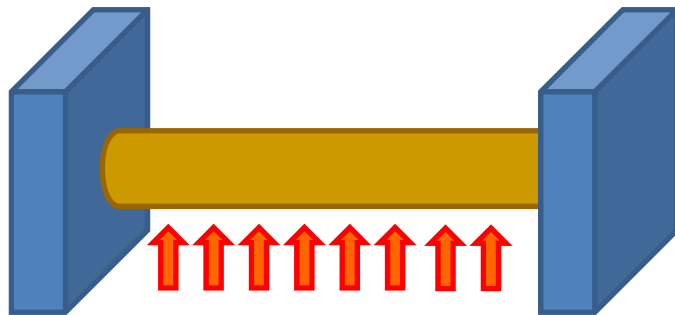
$$\text{TSR} = \frac{\sigma_f k}{E\alpha_{\ell}}$$

TSR (Thermal shock resistance): 熱衝撃耐性

Soda-lime glass: 線膨張率 = $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Boro-silicate (Pyrex): 線膨張率 = $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

A brass rod is to be used in an application requiring its ends to be held rigid. If the rod is stress free at 20 °C, what is the maximum temperature to which the rod may be heated without exceeding a compressive stress of 200 MPa ? Assume a constant modulus of elasticity of 100 GPa and a linear coefficient of thermal expansion of $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.



$$\alpha \Delta T \times 100 \text{ GPa} < 200 \text{ MPa}$$

$$\Delta T = 200 \text{ MPa} / (100 \text{ GPa} \times 20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})$$
$$= 100 \text{ K}$$

$$100 + 20 = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

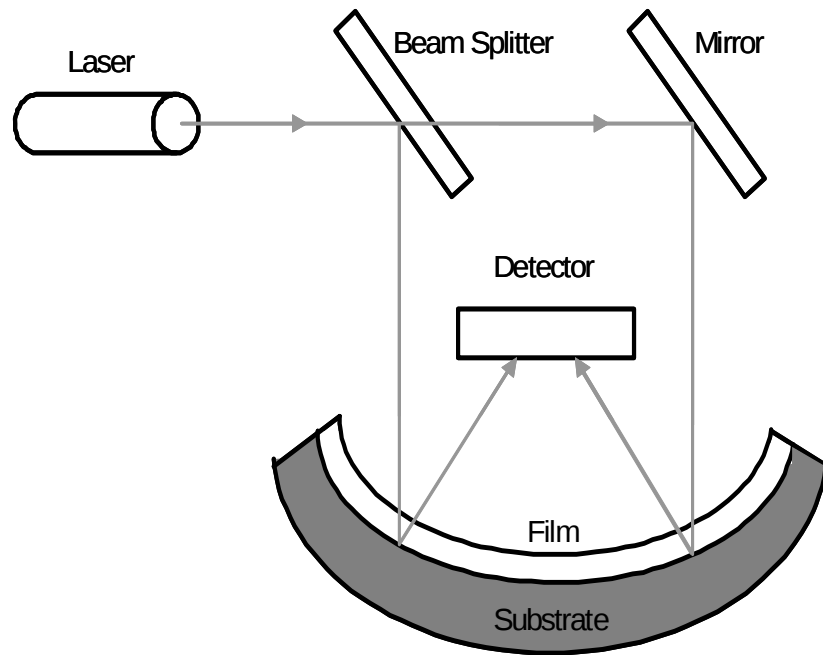
熱応力の実例

透明導電膜の製造 (ITO膜: Indium Tin Oxide)

FPD用電極(液晶ディスプレイ) スパッタリングにより製造

FPD: flat panel display

内部応力測定法



$$\sigma_f = \frac{1}{6} \frac{E_s t_s^2}{(1 - \nu_s) t_f} \left(\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_\infty} \right)$$

σ_f : 膜中の応力

t_f : 膜厚

E_s : 基板のヤング率

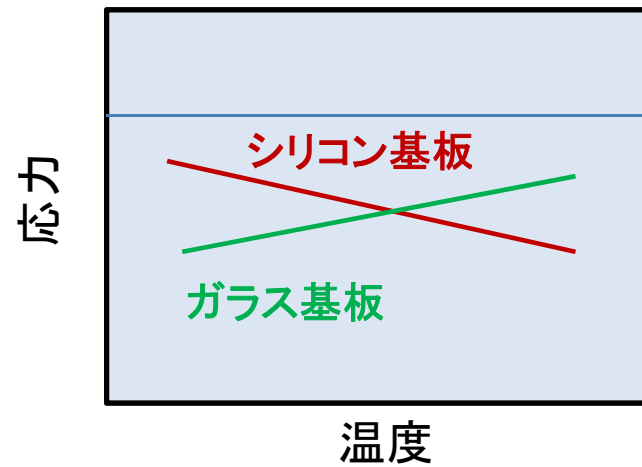
ν_s : 基板のポアソン比

t_s : 基板の厚み

R_f : 被膜後の曲率半径

R_∞ : 被膜前の曲率半径で

低温成膜



線膨張率

シリコン < ITO膜 < ガラス

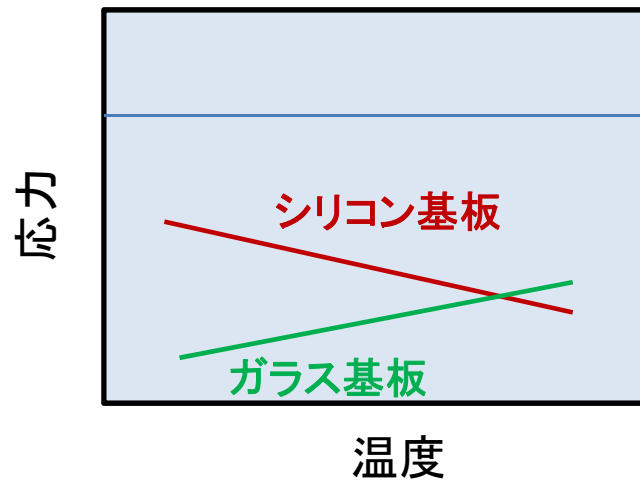
負の応力: 膜に圧縮力

高温で成膜

高導電率、高熱応力の発生

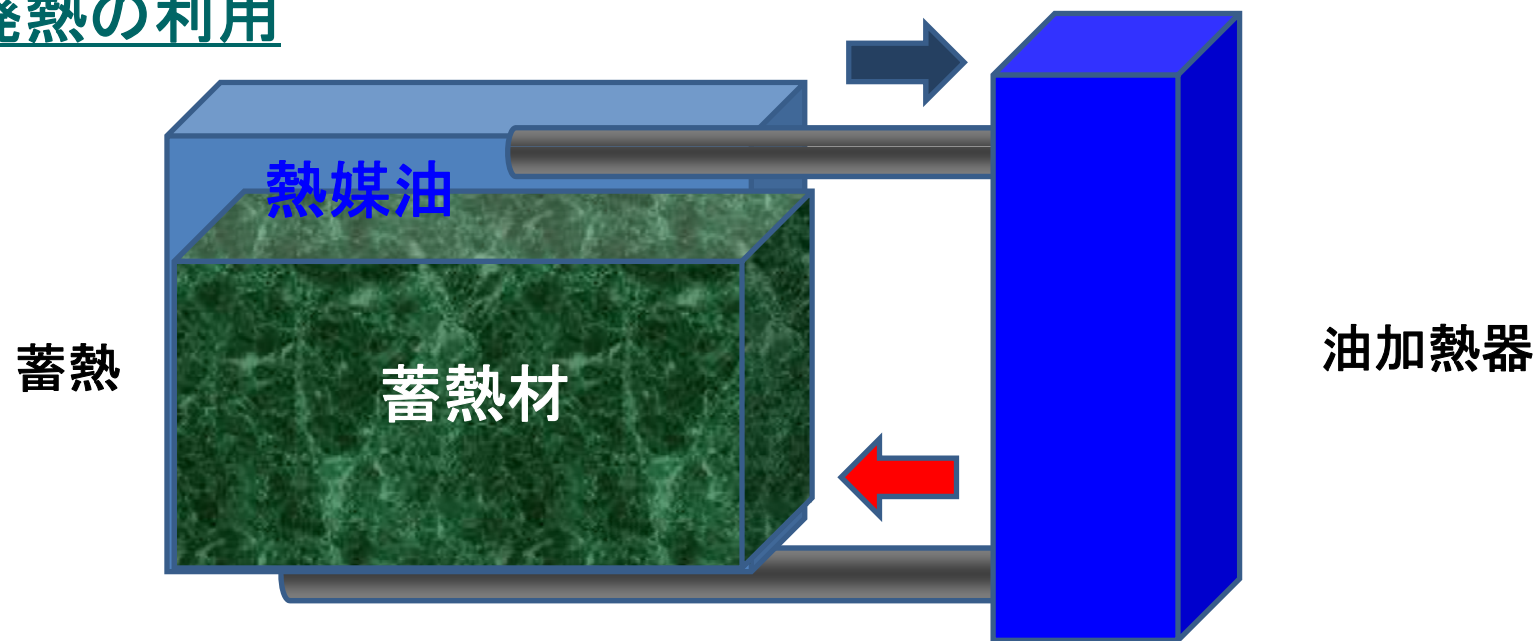
= クラックが発生しやすい

高温成膜

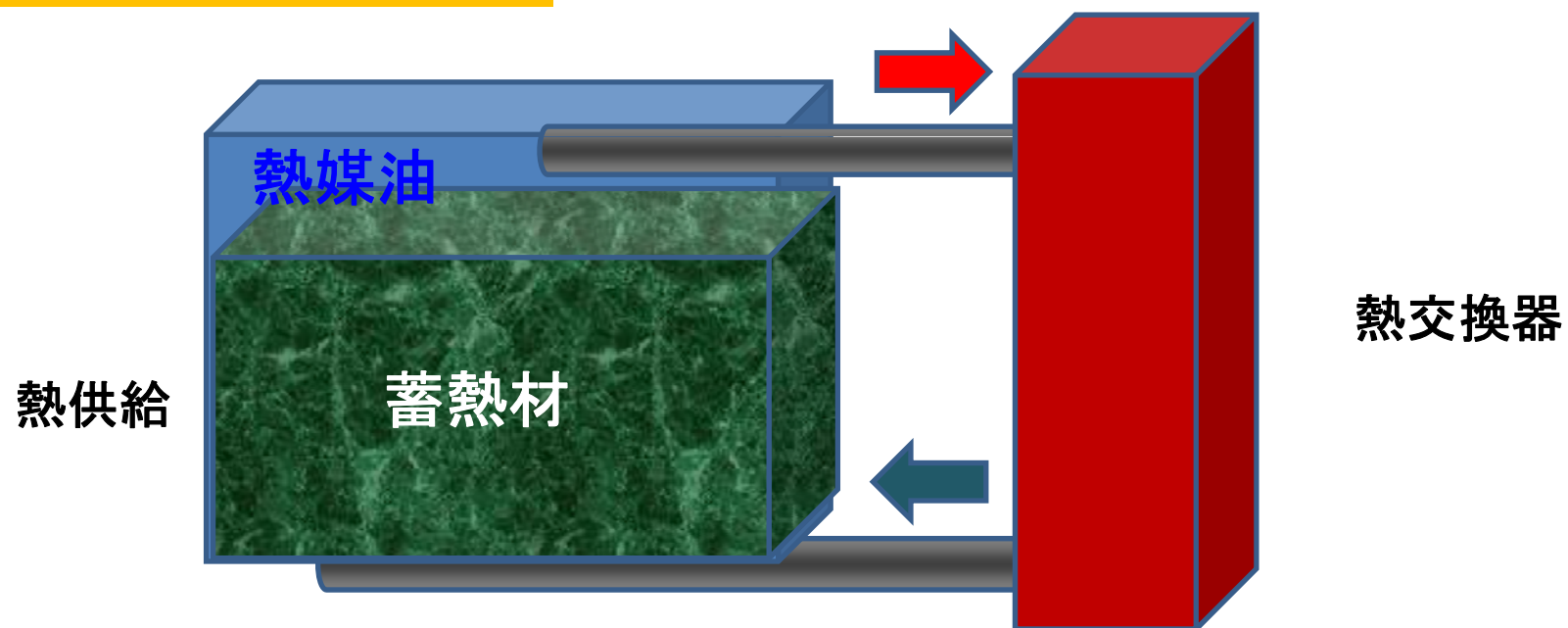


物質の熱的性質に関わるトピックス

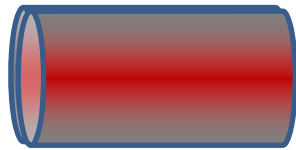
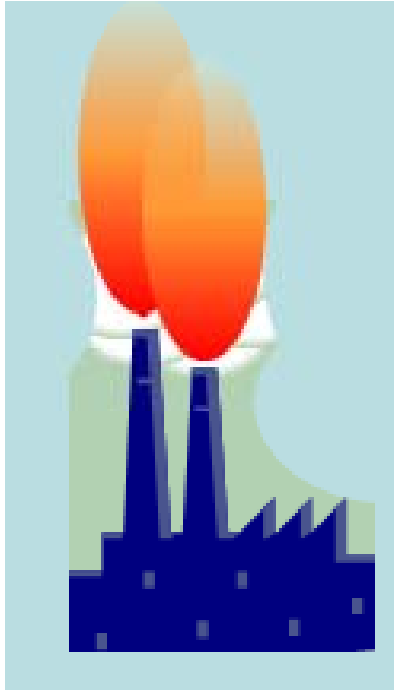
低温廃熱の利用



潜熱(相転移熱), 顕熱



熱エネルギー輸送



蓄熱



輸送
輸送



熱供給

物質	融点 (°C)	融解熱(kJ/kg)
エリスリトール	119	340
塩化カルシウム6水和物	30	150
水	0	333

Erythritol: $\text{OH-CH}_2\text{-CH(OH)-CH(OH)-CH}_2\text{-OH}$