

エネルギー機器学
- 相変化を伴う伝熱 -

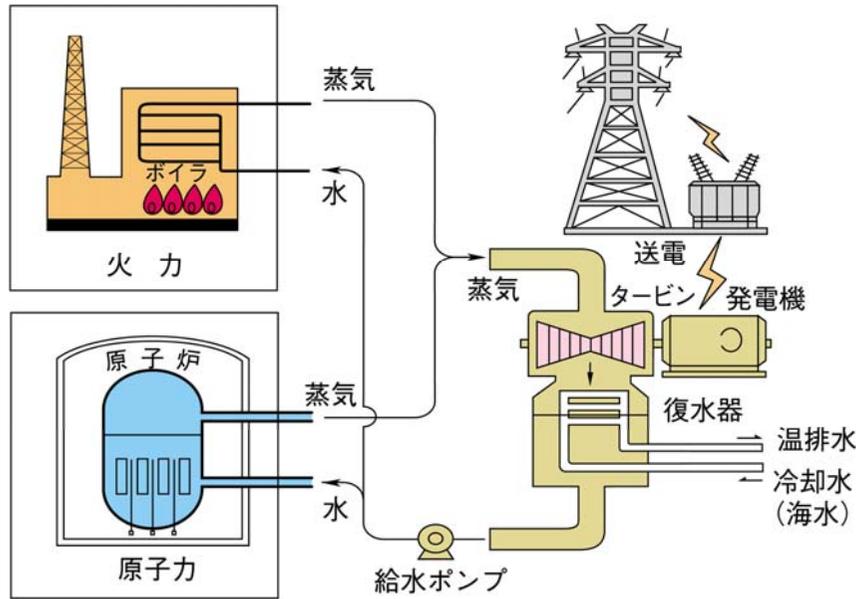
平成29年度講義予定

1. (10/ 4) 伝熱の応用と伝熱機器
2. (10/11) 輻射伝熱
3. (10/18) 相変化を伴う伝熱
4. (10/25) 沸騰伝熱
5. (11/ 8) 流動沸騰
6. (11/15) 凝縮を伴う伝熱
7. (11/22) 熱交換器の基礎
8. (11/27(月)) [水曜日課] 物質伝達
9. (12/ 6) 蒸気タービン・ガスタービン複合発電
10. (12/13) 冷凍・空調・コジェネレーション
11. (12/20) 定期試験

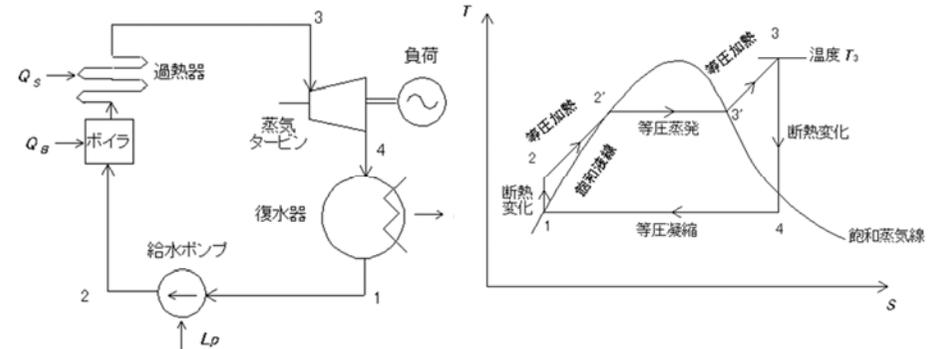
相変化を利用したシステム

相変化を利用したシステム
— ランキンサイクル —

火力発電と原子力発電の違い



Rankineサイクル(蒸気サイクル)

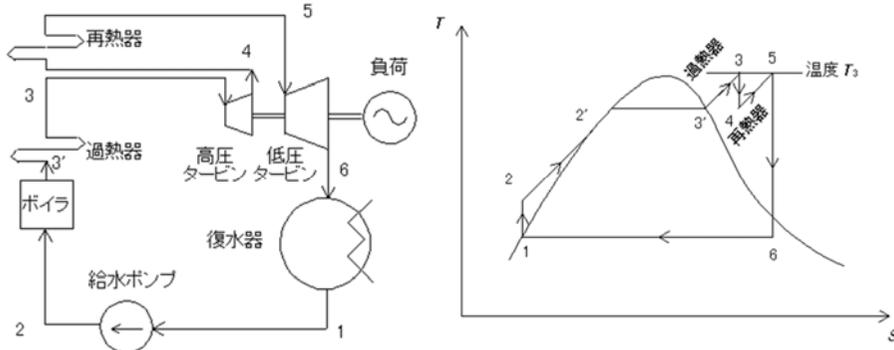


各要素内を作動流体が定期的な流れに流れているとする。
各要素の入り口、出口などの位置で流体の運動エネルギー、位置エネルギーは無視する。

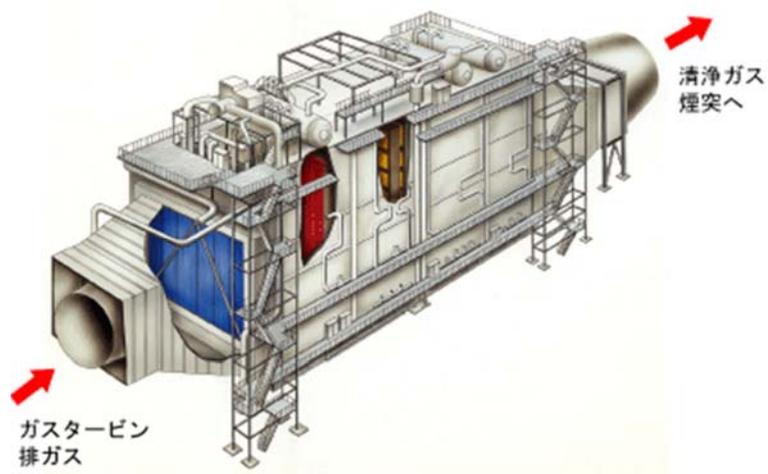
1→2 ポンプ吸収仕事: $L_p = W(h_2 - h_1)$
 2→3' ボイラ加熱: $Q_B = W(h_{3'} - h_2)$
 3'→3 過熱器加熱: $Q_S = W(h_3 - h_{3'})$
 3→4 タービン発生仕事: $L_T = W(h_3 - h_4)$
 4→1 復水器放熱: $Q_C = W(h_4 - h_1)$

再熱サイクル

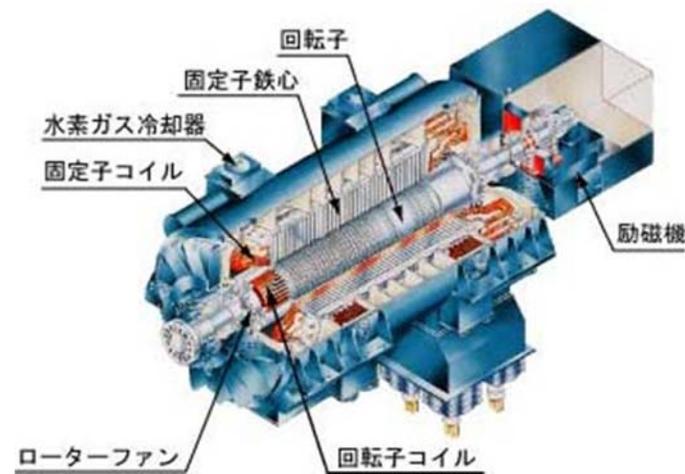
- 蒸気タービンを高圧、低圧の2段に分ける。
- 高圧タービン内で膨張する蒸気が、湿り蒸気の状態に入る前に高圧タービンから出て再熱器に至り、ここで加熱された後、低圧タービンに流入するようにした方式。
- 湿り度の大きな湿り蒸気の発生が巧みに避けられている。



排熱回収ボイラー



発電機



相変化を利用したシステム — 冷凍空調サイクル —

様々なエネルギーシステム

コージェネレーション



家庭用燃料電池
コージェネレーションシステムHP

エコキュート



オール電化 HP

エアコン



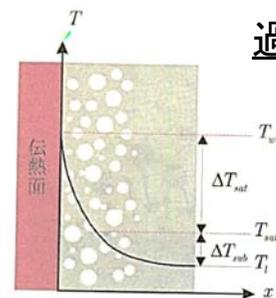
パナソニックHP

エネルギー効率が高いものの...

熱交換器などの機器が大容量であるため、
システム全体が大きくなり、スペースの制約が支障となっている

システムの小型化が進められることによって普及が加速し、
現在のエネルギー消費を格段に抑えられることが期待される。

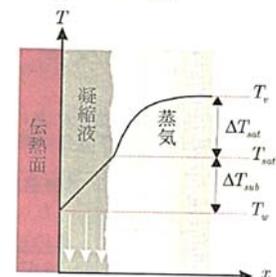
相変化の科学 沸騰現象のマイクロメカニズム



過冷度と過熱度

液体温度 : T_l
 蒸気温度 : T_v
 飽和温度 : T_{sat}
 伝熱面温度 : T_w

(a) 沸騰の場合



(b) 凝縮の場合

<沸騰の場合>

過熱度 : $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$

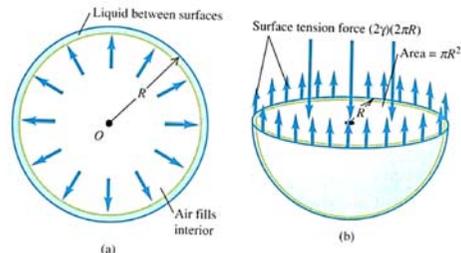
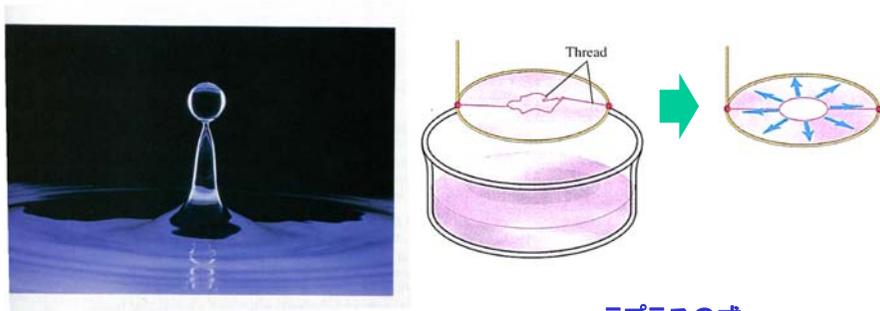
過冷度 : $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_l$

<凝縮の場合>

過熱度 : $\Delta T_{sat} = T_v - T_{sat}$

過冷度 : $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_w$

表面張力



ラプラスの式

泡の場合

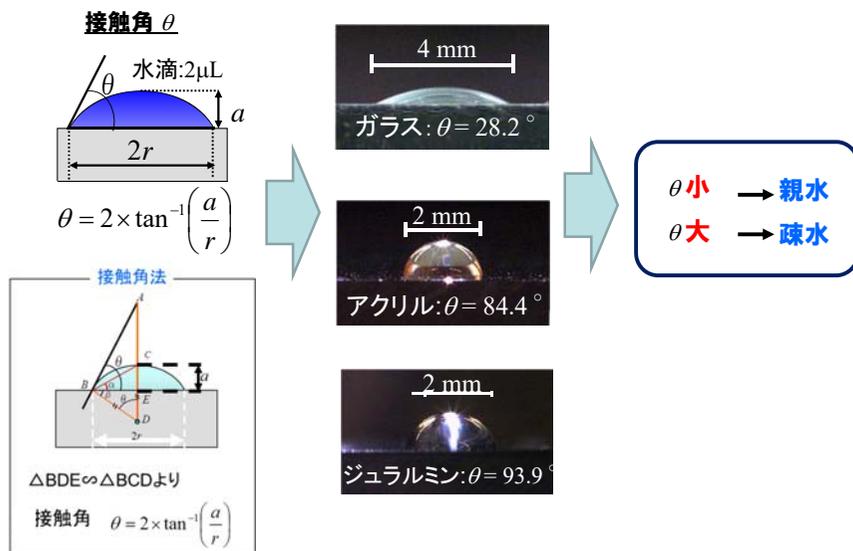
$$\Delta P = P_v - P_l = \frac{4\sigma}{r}$$

液滴・気泡の場合

$$\Delta P = P_v - P_l = \frac{2\sigma}{r}$$

接触角計測の実際

— 様々な材料上の水滴 —



気泡内外の圧力差

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r}$$

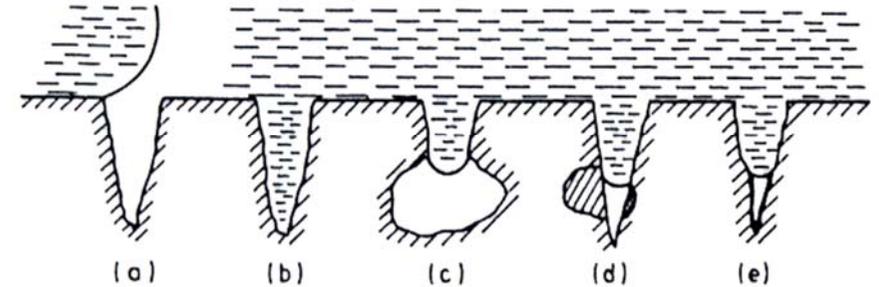
半径 (mm)	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002
圧力差 (mbar)	12	24	59	118	236	589

- ◆ 気泡内の圧力は、常に周囲流体の圧力より高い。
- ◆ 小さい気泡ほど、高い圧力が必要となる。
- ◆ 何も無いところからの発泡には、無限大の圧力差が必要となる。

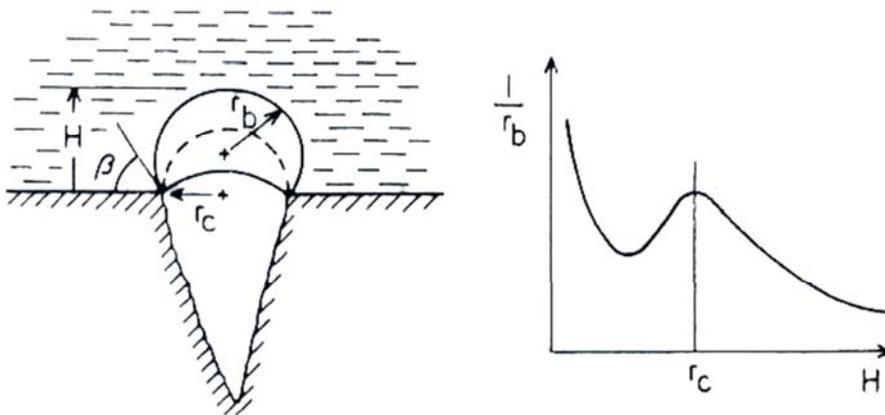


- ◆ 実際の沸騰には、ある大きさの**発泡核**が必要。
非均質核生成

発泡核の形成



発泡開始点での気泡曲率と気泡体積



発泡の開始と最小沸騰核半径

- ◆ 周囲流体より高い気泡内の圧力の発生源は？
- ◆ 圧力と温度は一對一の関係にある。
- ◆ 高い圧力を得るためには、発泡核のある壁面の温度が飽和温度より高いことが必要となる → **壁面加熱度**
- ◆ 壁面加熱度が高い程、より小さな発泡核から沸騰可能。

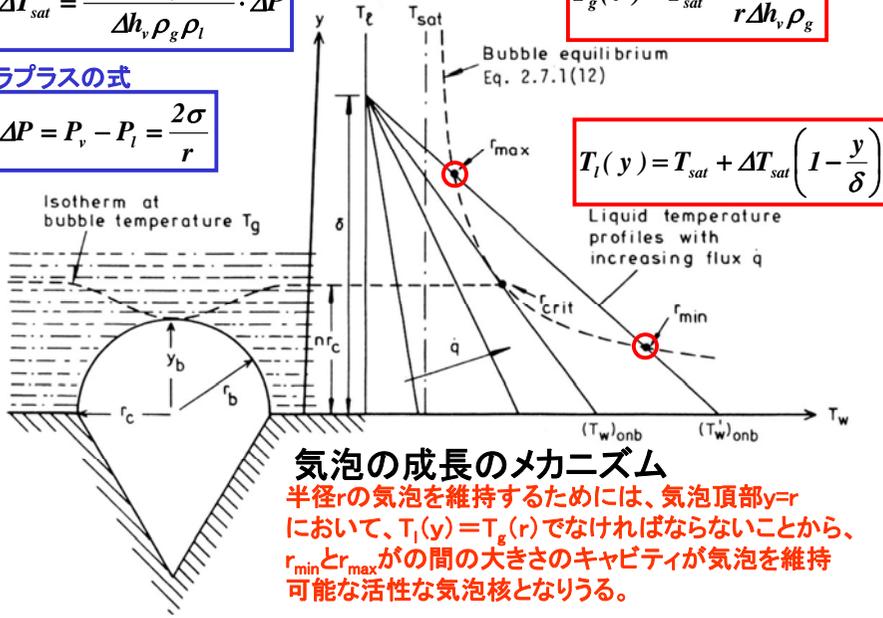
飽和温度(°C)	100	102	104	106	108	110
飽和圧力 (mbar)	1013	1088	1176	1250	1339	1433
圧力差(mbar)	0	75	154	237	326	420
最小沸騰核 半径(μm)	∞	15.6	7.55	4.87	3.52	2.71

クラジウス-クラペイロンの式

$$\Delta T_{sat} = \frac{(\rho_l - \rho_g) T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l} \cdot \Delta P$$

ラプラスの式

$$\Delta P = P_v - P_l = \frac{2\sigma}{r}$$



$$\Delta T_{sat} = (T_w')_{onb} - T_{sat}$$

$$T_g(r) = T_{sat} - \frac{2\sigma T_{sat}}{r \Delta h_v \rho_g}$$

$$T_l(y) = T_{sat} + \Delta T_{sat} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)$$

クラジウス-クラペイロンの式より気泡内外の圧力差に対する加熱度は

$$\Delta T_{sat} = \frac{(\rho_l - \rho_g) T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l} \cdot \Delta P$$

また、ラプラスの式より、気泡内圧は気泡外の圧力より大きくなければならないから

$$\Delta P = P_v - P_l \geq \frac{2\sigma}{r}$$

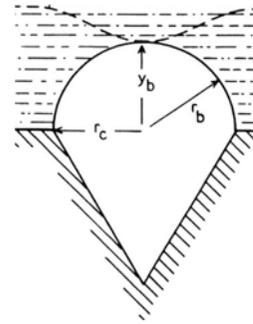
より

$$\Delta T_{sat} \geq \frac{(\rho_l - \rho_g) T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l} \cdot \frac{2\sigma}{r} = \frac{\rho_l \cdot T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l}$$

$$\Delta T_{sat} = T_v - T_{sat} \geq \frac{\rho_l \cdot T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l}$$

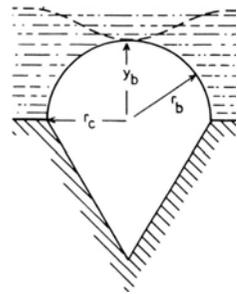
$$T_v \geq T_{sat} + \frac{\rho_l \cdot T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l}$$

が満足されなければならない



気泡が安定に存在することのできる限界の気泡径(臨界気泡径)は

$$r \geq \frac{2\sigma \rho_l T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l \Delta T_{sat}}$$



また、伝熱面近傍での液体が高さ方向に直積的な温度分布になっていると仮定すると

$$T_l(y) = T_{sat} + \Delta T_{sat} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)$$

半径 r の気泡を維持するためには、気泡頂部 $y=r$ において、 $T_l(y) = T_g(r)$ でなければならないことから、 r_{min} と r_{max} がの間の大きさのキャビティが気泡を維持可能な活性化気泡核となりうる。

$$\begin{aligned} T_l(y) &= T_{sat} + \Delta T_{sat} \left(1 - \frac{r_c}{\delta} \right) \\ &= T_{sat} + \Delta T_{sat} \left(1 - \frac{q \cdot r_c}{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}} \right) \end{aligned}$$

より

$$T_l(y) - T_{sat} = \Delta T_{sat} \left(1 - \frac{q \cdot r_c}{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}} \right) \geq \frac{2\sigma T_{sat}}{\rho_v h_v r_c}$$

$$r_c^2 - \frac{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}}{q} \cdot r_c + \frac{2\sigma T_{sat} \kappa_l}{\rho_v h_v q} \leq 0$$

半径 r の気泡が維持されるためには、以下の式が満足されなければならない。

$$r_c^2 - \frac{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}}{q} \cdot r_c + \frac{2\sigma T_{sat} \kappa_l}{\rho_v h_v q} \leq 0$$

この式を解くことによって、以下の解が得られる。

$$\begin{aligned} (r_c)_{min}^{max} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}}{q} \pm \sqrt{\left(\frac{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}}{q} \right)^2 - \frac{8\sigma T_{sat} \kappa_l}{\rho_v h_v q}} \right] \\ &= \frac{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}}{2q} \cdot \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{8\sigma T_{sat} q}{\kappa_l \Delta T_{sat}^2 \rho_v h_v}} \right] \end{aligned}$$

活性化気泡が発生する核の限界は、上記の式が有意な実数となる場合に与えられることから、

$$1 - \frac{8\sigma T_{sat} q}{\kappa_l \Delta T_{sat}^2 \rho_v h_v} = 0 \quad \text{より} \quad \Delta T_{sat} = \sqrt{\frac{8\sigma T_{sat} q}{\kappa_l \rho_v h_v}}$$

また

$$r_c = \frac{\kappa_l \cdot \Delta T_{sat}}{2q} = \frac{\delta}{2} \quad \left(q = \kappa_l \frac{\Delta T_{sat}}{\delta} \approx \kappa_l \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

気泡離脱直径と離脱頻度

気泡離脱時において、気泡に働く浮力と伝熱面に付着しようとする表面張力が釣り合うと仮定して、Fritz がもとのめた気泡離脱直径の経験式は、ボンド数Bo を用いて、

$$Bo = \frac{d_b^2 \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} = 0.0209 \cdot \theta = 0.0209 \cdot (50) = 1.045 \approx 1$$

また、Cole によって求められた式は、

$$Bo = 0.04 \cdot Ja \quad \text{ここで} \quad Ja = \frac{\rho_l c_{pl} \Delta T_{sat}}{\rho_v L_{lv}}$$

したがって、離脱気泡直径は

$$d_b = \left[\frac{\sigma Bo}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{または} \quad d_b = \left[\frac{\sigma \cdot (0.04 Ja)}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Zuber によって与えられた離脱頻度は

$$f = \frac{0.59}{d_b} \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

演習問題3-1

大気圧の水の中に、半径10 μmの蒸気泡が存在するときの過熱度を計算せよ。
ただし、大気圧中における蒸発潜熱は2256.9 kJ/kg、飽和蒸気の密度は0.5977 kg/m³、表面張力は58.93 mN/mとする

演習問題3-1回答の方針

クラジウス・クラペイロンの式

$$\Delta T_{sat} = \frac{(\rho_l - \rho_g) T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l} \cdot \Delta P$$

ヤング・ラプラスの式

$$\Delta P = P_v - P_l = \frac{2\sigma}{r}$$

より

$$\Delta T_{sat} = \frac{(\rho_l - \rho_g) T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l} \cdot \Delta P = \frac{(\rho_l - \rho_g) T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g \rho_l} \cdot \frac{2\sigma}{r} \approx \frac{2\sigma T_{sat}}{\Delta h_v \rho_g r}$$

大気圧における飽和温度が、100°C=373.15Kであるから

$$\Delta T_{sat} = \frac{2\sigma T_{sat}}{\rho_v L_{lv} r} =$$

演習問題3-2

大気圧の水が30 kW/mの熱流束で加熱されており、過熱度は3.5 Kであった
この時活性化する気泡核の大きさの範囲を求めよ
ただし、大気圧中における蒸発潜熱は2256.9 kJ/kg、飽和蒸気の密度は0.5977 kg/m³、表面張力は58.93 mN/m、液体の熱伝導率0.6778 W/(m・K)である

演習問題3-3

大気圧の水が、過熱度は15.0 Kで沸騰している場合の気泡の離脱直径: d_b ならびに離脱頻度: f を求めなさい。計算にあたっては、以下の式ならびに数値を用いて良い。

$$d_b = \left[\frac{\sigma Bo}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad f = \frac{0.59}{d_b} \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$Ja = \frac{\rho_l c_{pl} \Delta T_{sat}}{\rho_v L_{lv}} \quad Bo = 0.04 \cdot Ja$$

$$\rho_l = 958.3 \text{ kg/m}^3, \rho_v = 0.5977 \text{ kg/m}^3, L_{lv} = 2256.9 \text{ kJ/kg}$$
$$c_{pl} = 4.217 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}, \sigma = 58.93 \text{ mN/m}$$

沸騰現象の極限(均質核生成) — 水蒸気爆発 —

分散混合型蒸気爆発実験(例)

スズを用いた蒸気爆発実験

1kg、800°Cのスズを水槽内に落下
⇒ 時間遅れを伴って蒸気爆発が発生

アルミニウムを用いた蒸気爆発実験

25kgの溶融アルミニウムを6m下の水槽内に落下
⇒ 水槽を破壊する規模の激しい蒸気爆発が発生

横浜国立大学(飯田、高島)特命リサーチ200X 「謎の大爆発はなぜ起こったか」

アルミニウムを用いた蒸気爆発実験

30kgのジルカロイとアルミナを1m下の水槽内に落下
⇒ 水槽を破壊する規模の激しい蒸気爆発が発生

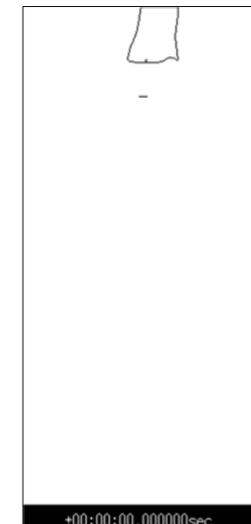
K. Moriyama, et al., JAERI-Research 2005-017, (2005)

水蒸気爆発現象の詳細可視化観測

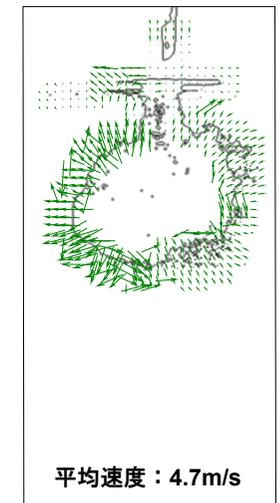
観測画像



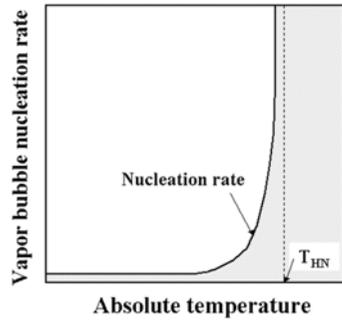
輪郭抽出画像



PIV解析結果



均質核生成温度:



液体同士の伝熱面のように**気泡核が存在しない**とき、低温液体側が飽和温度以上にまで加熱されていき、**自発的に核が生成**され、瞬間的に激しく気泡が発生する温度

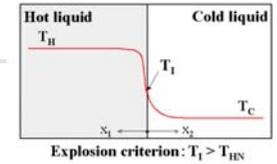
Lienhardの半理論式より

$$T_{HN} = T_{SAT} + (0.905 - \vartheta_{SAT} + 0.095\vartheta_{SAT}^8) T_{CRIT}$$

$$\vartheta_{SAT} = \frac{T_{SAT}}{T_{CRIT}}$$

大気圧下での水の均質核生成温度は、 = 315.6 [°C]

水蒸気爆発を記述する式: 均質核生成モデル



- 1次元非定常熱伝導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

- 初期条件と境界条件

$$T = T_o \quad (t = 0)$$

$$T = T_s \quad (x = 0)$$

$$T = T_o \quad (x = \infty)$$

- 半無限物体内温度は、

$$T = T_s + (T_o - T_s) \text{erf}(\eta)$$

- 2つの半無限物体が接触した接触後のそれぞれの温度分布は

$$T_u(x,t) = T_i + (T_u - T_i) \text{erf}\left(\frac{x_i}{2\sqrt{\alpha_u t}}\right)$$

$$T_c(x,t) = T_i + (T_c - T_i) \text{erf}\left(\frac{x_c}{2\sqrt{\alpha_c t}}\right)$$

- 接触界面での熱流束が連続とすると、

$$-\lambda_u \left(\frac{\partial T_u(x,t)}{\partial x} \right) = \lambda_c \left(\frac{\partial T_c(x,t)}{\partial x} \right)$$

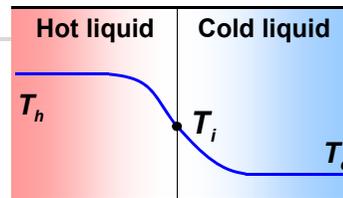
- 接触界面温度は次のように求まる。

$$T_i = \frac{T_u - T_c}{1 + \sqrt{\beta}} + T_c \quad \beta = \frac{(\rho C_p \lambda)_c}{(\rho C_p \lambda)_u}$$

水蒸気爆発の発生条件(TIZ)

[接触界面温度 T_i] \geq [水の均質核生成温度 T_{hn} (314°C)]

- 接触界面温度 T_i が均質核生成温度 T_{hn} 以上の場合、界面において蒸気が瞬間的に生成され、蒸気爆発に至る可能性がある。

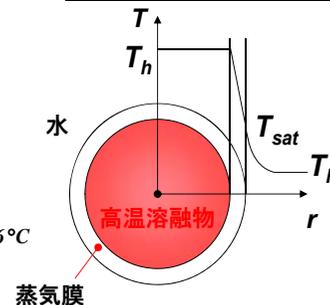


接触界面温度

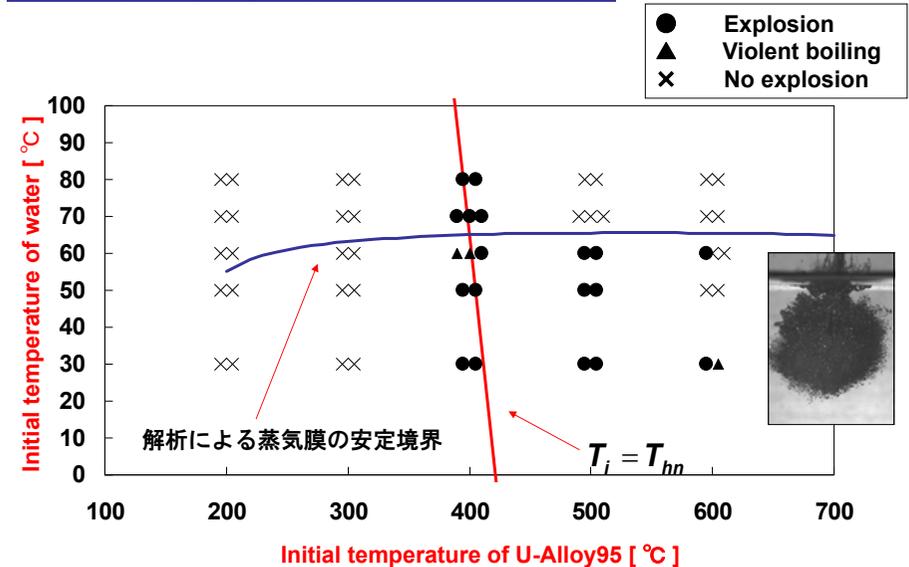
$$T_i = \frac{T_h - T_c}{1 + \sqrt{\frac{(\rho C_p \lambda)_c}{(\rho C_p \lambda)_h}}} + T_c$$

水の均質核生成温度(314°C)

$$T_{HN} = T_{SAT} + (0.905 - \vartheta_{SAT} + 0.095\vartheta_{SAT}^8) T_{CRIT} \Rightarrow 315.6^\circ\text{C}$$



蒸気爆発実験結果とTIZの比較



水蒸気爆発の発生条件

成合, 松村, "各種条件下における自発的蒸気爆発の発生条件",
蒸気爆発の動力学, 研究成果報告書 (1997)

