設計計算

1．回分冷却晶析装置

■基本条件

溶質	硫酸カリウムアルミニウム 12 水和物	溶媒密度 ρ_ℓ	1000 kg/m^3
溶媒	水	結晶密度 ρ_c	1760 kg/m^3
操作方式	[回分]・半回分・連続	体積形状係数 ϕ_V	0.471(正八面体)
過飽和生成法	[冷却]・蒸発・反応・貧溶媒添加	面積形状係数 ϕ_S	3.46(正八面体)
水和物の分子量($AlK(SO_4)_2$・$12H_2O$)	474	製品結晶の代表粒径 L_p($L_{p,50}$)	1.0 mm
無水物の分子量($AlK(SO_4)_2$)	258	結晶生産量 P	1000 kg/batch
溶媒の分子量(H_2O)	18		

■装置条件

胴形状	[円筒胴]・円錐胴・球形胴	設計圧力(内圧)P_i	1 MPa
鏡板形状	全半球形・半楕円形・[皿形]	許容引張応力設計時の材質温度	100℃
装置容積 V_T	最大懸濁液量の 1.5 倍	溶接継手効率 η (JIS)	1
撹拌槽形状	別表に記載	腐れ代 α_c	2 mm
装置材質	[炭素鋼(SS400)]・ｽﾃﾝﾚｽ鋼(SUS304)	原動機総合効率 η_{MT}	0.7

■原料条件

原料濃度 w_F	初期温度の溶解度	初期温度 T_0	58℃
母液濃度 w_M	最終温度の溶解度	最終温度 T_f	28℃
溶液密度 ρ	最終の母液密度に等しい	種晶の代表粒径 L_s($L_{s,50}$)	0.10 mm
溶液粘度 μ	0.001 Pa・s	種晶のふるい下 15.87%径 $L_{s,15.87}$	0.02 mm
溶液の平均比熱容量 C_p	4200 J/(kg・K)	種晶のふるい下 84.13%径 $L_{s,84.13}$	0.18 mm
溶液の熱伝導度 k	0.60 W/(m・K)	種晶形状	製品結晶に等しい
晶析熱 ΔH_{crys}	42420 J/mol-溶質		

■撹拌条件

翼形状	[パドル]・タービン・プロペラ・アンカー	重力加速度 g	9.81 m/s^2
翼ひねり角 θ	45°	気体定数 R	8.314 J/(mol・K)
羽根段数 N	1	物質移動の活性化エネルギー ΔE_d	15000 J/mol
撹拌速度 n	完全浮遊撹拌速度の 10%増し	総括成長速度式のべき数 g	1
邪魔板	有		

■伝熱条件

伝熱方式	平板ｼﾞｬｹｯﾄ・[渦巻ｼﾞｬｹｯﾄ]・コイル	渦巻ジャケットの邪魔板間隔 p_{sj}	ｼﾞｬｹｯﾄ長の 1/10

ジャケット間隔ΔX_j　100 mm
伝熱操作方式　**制御冷却**・自然冷却
伝熱媒体　**冷却水**・スチーム・加熱油
伝熱媒体の密度 ρ_h　1000 kg/m^3
伝熱媒体の粘度 μ_h　0.001 Pa・s
伝熱媒体の比熱容量 C_{ph}　4200 J/(kg・K)
伝熱媒体の熱伝導度 k_h　0.60 W/(m・K)
伝熱媒体の体積膨張率 β　0.0003 1/K

伝熱媒体の入口温度 T_{in}　8℃
伝熱媒体の平均温度変化ΔT　2℃
固体壁の厚み ℓ_w　胴の板厚に等しい
固体壁の熱伝導度 k_w　60(炭素)・20(ｽﾃﾝ) W/(m・K)
伝熱媒体側の汚れ係数 h_{s1}　5000 W/(m^2・K)
撹拌液側の汚れ係数 h_{s2}　5000 W/(m^2・K)
粘度補正項 μ/μ_w　1

別表１　撹拌槽形状

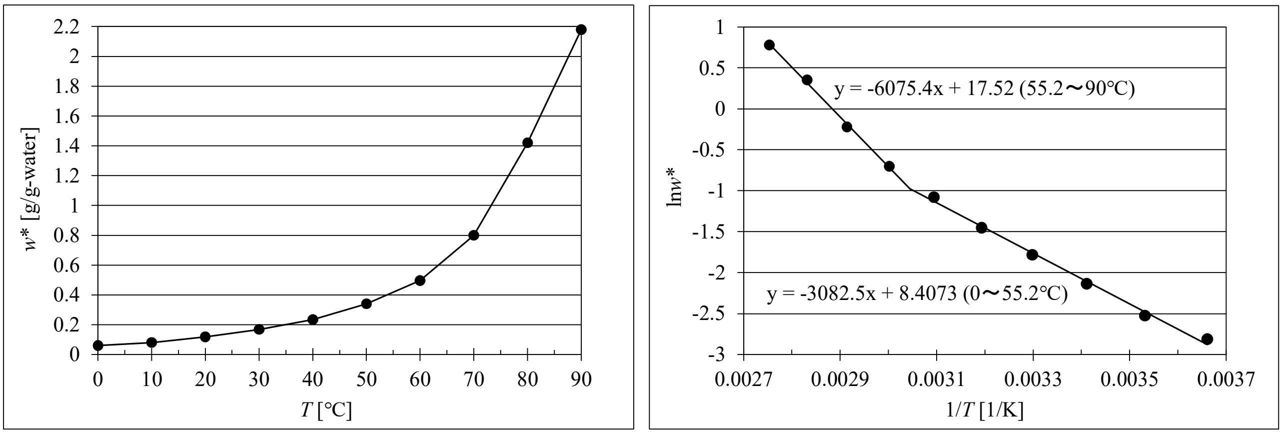
d/D_T	C/D_T	b/D_T	B_w/D_T	d_{co}/D_T	D_c/D_T	p_c/D_T	H/D_T	n_p	n_B
1/3	1/4	1/15	1/10	1/30	0.70	1/15	1	4	4

b:撹拌翼幅, B_w:邪魔板幅, C:翼取付位置, d:撹拌翼径, d_{co}:コイル管外径, D_c:コイル中心径, D_T:槽径, H:液深, n_B:邪魔板枚数, n_p:羽根枚数, p_c:コイル管間隔

別表２　カリミョウバン 12 水の溶解度データ

R.H. Perry, D.W. Green; Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th Ed.(1997), Table2-120

T [℃]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
w^*[kg-溶質/kg-水]	0.06	0.08	0.118	0.1678	0.234	0.34	0.495	0.8	1.42	2.18



付図１　カリミョウバン 12 水の溶解度データ

①母液濃度 w_M [kg-溶質/kg-溶媒]

$\ln w_M=(-3082.5)/(273.15+T_f)+8.4073=(-3082.5)/(273.15+28)+8.4073=-1.8284$

$w_M= e^{-1.7609}$=0.16067 kg-溶質/kg-溶媒≒**0.161 kg-溶質/kg-溶媒**

②母液密度 ρ [kg/m^3]

$\rho=(1+w_M)/[(1/\rho_\ell)+(w_M/\rho_c)]=(1+0.16067)/[(1/1000)+(0.16067/1760)]=1063.5$ kg/m^3≒**1064 kg/m^3**

③母液量あたりの結晶収量 P_c/M [kg-溶質/kg-溶液]

$\ln w_F=(-6075.4)/(273.15+T_0)+17.52=(-6075.4)/(273.15+58)+17.52=-0.82636$

$w_F=e^{-0.82636}$=0.43763 kg-溶質/kg-溶媒

$R=M_{hyd}/M_{anh}=474/[474-(18)(12)]=1.8372$

$P_{hyd}/M=[R/\{1+(1-R)w_F\}][(w_F-w_M)/(1+w_M)]$

$P_{hyd}/M=[(1.8372)/\{1+(1-1.8372)(0.43763)\}][(0.43763-0.16067)/(1+0.16067)]=0.69189≒\boxed{0.692}$

④種晶添加量 W_s [kg]

$W_s=P(L_s/L_p)^3=(1000)(0.10/1.0)^3=\boxed{1\ \mathrm{kg}}$

⑤結晶収量 P_c [kg]

$P_{hyd}=P-W_s=1000-1=\boxed{999\ \mathrm{kg}}$

⑥母液量 M [kg]

$M=P_{hyd}/(P_{hyd}/M)=999/0.69189=1443.8\ \mathrm{kg}≒\boxed{1444\ \mathrm{kg}}$

⑦原料溶液量 F [kg]

$F=M+P_{hyd}=1443.8+999=2442.8\ \mathrm{kg}≒\boxed{2443\ \mathrm{kg}}$

溶液密度と液体積と乗じる方法だと数値は合わない。これは、溶液密度を操作前の原料溶液に対してではなく、操作後の母液に対して定義しているためである。

⑧撹拌液から除去すべき熱量 Q_c [MJ]

$Q_c=FC_p(T_0-T_f)+P_{hyd}\Delta H_{crys}$

$Q_c=(2442.8)^{kg}(4200)^{J/(kg\cdot K)}[(273.15+58)-(273.15+28)]^{K}+(999)^{kg}(42420)^{J/mol}(1/0.474)^{mol/kg}$

$Q_c=3.9719\times10^8\ \mathrm{J}≒\boxed{397\ \mathrm{MJ}}$

⑨所要冷却水量 W_c [t]

$W_c=Q_c/(C_{ph}\Delta T)=(3.9719\times10^8)^{J}/\{(4200)^{J/(kg\cdot K)}(2)^{K}\}=47284\ \mathrm{kg}≒\boxed{47.3\ \mathrm{t}}$

⑩最大懸濁率$(1-\varepsilon)_{max}$ [－]

$(1-\varepsilon)_{max}=(P/\rho_c)/[(M/\rho)+(P/\rho_c)]=(1000/1760)/[(1443.8/1063.5)+(1000/1760)]=0.29504≒\boxed{0.295}$

$(1-\varepsilon)_{max}=0.25$～$0.40$ であることから、妥当な範囲内である。

⑪最大懸濁密度 $M_{T,max}$ [kg/m³]

$M_{T,max}=\rho_c(1-\varepsilon)_{max}=(1760)(0.29504)=519.27\ \mathrm{kg/m^3}≒\boxed{519\ \mathrm{kg/m^3}}$

⑫装置容積 V_T [m³]

$V_T=\alpha V_{sl,max}=(1.5)(P/M_{T,max})=(1.5)(1000/519.27)=(1.5)(1.9257)=2.8885\ \mathrm{m^3}≒\boxed{2.89\ \mathrm{m^3}}$

⑬槽径 D_T [mm]

$D_T=[V_T/(0.39675\pi)]^{1/3}=[2.8885/(0.39675\pi)]^{1/3}=1.3233\ \mathrm{m}≒\boxed{1323\ \mathrm{mm}}$

⑭胴長 L_T [mm]

$L_T=1.3350D_T=(1.3350)(1.3233)=1.7666\ \mathrm{m}≒\boxed{1767\ \mathrm{mm}}$

⑮鏡板高さ h_T [mm]

$h_T=0.194D_T=(0.194)(1.3233)=0.25672\ \mathrm{m}≒\boxed{257\ \mathrm{mm}}$

⑯槽深 Z_T [mm]

$Z_T=1.7230D_T=(1.7230)(1.3233)=2.2800\ \mathrm{m}≒\boxed{2280\ \mathrm{mm}}$

⑰仕込み時の液体積 V_L [m³]

$V_L=\pi D_T^3[(H/D_T)/4+0.0145]=\pi(1.3233)^3[(1/4)+0.0145]=1.9255\ \mathrm{m^3}=\boxed{1.92\ \mathrm{m^3}}$

⑱胴の板厚 t_T [mm]

$\sigma_a=100$ MPa(許容応力線図;SS400)

(JIS)$t_T^{mm}=P_i^{MPa}D_T^{mm}/(2\sigma_a^{MPa}\eta-1.2P_i^{MPa})+\alpha_c^{mm}=(1)(1323.3)/[(2)(100)(1)-(1.2)(1)]+2.0=8.6564\ \mathrm{mm}≒\boxed{8.66\ \mathrm{mm}}$

⑲鏡板の板厚 t_h [mm]

σ_a=100 MPa(許容応力線図;SS400)

$M_h=(1/4)[3+(R_c/r_k)^{0.5}]=(1/4)[3+(10)^{0.5}]=1.5405$

(JIS)$t_h^{mm}=P_i^{MPa}D_T^{mm}M_h/(2\sigma_a^{MPa}\eta-0.2P_i^{MPa})+\alpha_c^{mm}=(1)(1323.3)(1.5405)/[(2)(100)(1)-(0.2)(1)]+2.0=12.202$ mm

t_h≒ 12.2 mm

⑳攪拌翼径 d [mm]

$d=(1/3)D_T=(1/3)(1.3233)=0.44110$ m≒ 441 mm

㉑翼取付位置 C [mm]

$C=(1/4)D_T=(1/4)(1.3233)=0.33082$ m≒ 331 mm

㉒翼幅 b [mm]

$b=(1/15)D_T=(1/15)(1.3233)=0.088220$ m≒ 88.2 mm

㉓邪魔板幅 B_w [mm]

$B_w=(1/10)D_T=(1/10)(1.3233)=0.13233$ m≒ 132 mm

㉔攪拌速度 n [rpm]

S=4.6(傾斜パドル, 皿形槽底)

$\nu=\mu/\rho=0.001/1063.5=9.4029\times10^{-7}$ m^2/s

$X=100(M_S/M_L)=100(P/M)=(100)(1000/1443.8)=69.261$ wt%

$N_{JS}=S\nu^{0.1}d_p^{0.2}(g\Delta\rho/\rho)^{0.45}X^{0.13}/d^{0.85}$

$N_{JS}=(4.6)(9.4029\times10^{-7})^{0.1}(0.001)^{0.2}[(9.81)(1760-1063.5)/1063.5]^{0.45}(69.261)^{0.13}/(0.44110)^{0.85}=(2.3175)^{1/s}(60)^{s/min}$

$=139.05^{1/min}$≒139 rpm

$n=1.1N_{JS}=(1.1)(2.3175)^{1/s}=(2.5492)^{1/s}(60)^{s/min}=152.95^{1/min}$≒ 153 rpm

㉕攪拌レイノルズ数 Re

$Re=\rho nd^2/\mu=(1063.5)(2.5492)(0.44110)^2/0.001=527491$≒ 5.27×10^5

㉖動力数 N_p

(動力特性線図)

N_P≒ 1.7

(永田の式)

$b'=n_pbN/2=(4)(b)(1)/2=2b$

$b'/D_T=2b/D_T=(2)(1/15)=2/15$

$d/D_T=1/3$

$B_w/D_T=1/10$

$H/D_T=1$

$(B_w/D_T)^{1.2}n_B=(1/10)^{1.2}(4)=0.25\neq0.35$(部分邪魔板条件)

$A=14+(b/D_T)[670\{(d/D_T)-0.6\}^2+185]=14+(2/15)[670\{(1/3)-0.6\}^2+185]=45.019$

$B=10^{[1.3-4\{(b/D_T)-0.5\}^2-1.14(d/D_T)]}=10^{[1.3-4\{(2/15)-0.5\}^2-1.14(1/3)]}=2.4111$

$p=1.1+4(b/D_T)-2.5[(d/D_T)-0.5]^2-7(b/D_T)^4=1.1+(4)(2/15)-(2.5)\{(1/3)-0.5\}^2-(7)(2/15)^4=1.5616$

$R_c=[25/(b/D_T)][(d/D_T)-0.4]^2+(b/D_T)/[0.11(b/D_T)-0.0048]$

$=[25/(2/15)][(1/3)-0.4]^2+(2/15)/[(0.11)(2/15)-0.0048]=14.346$

$R_\theta=10^{4(1-\sin\theta)}R_c=10^{4(1-\sin45°)}(14.346)=212.96$

$N_{Pmax}=A/R_\theta+B[(10^3+1.2R_\theta^{0.66})/(10^3+3.2R_\theta^{0.66})]^p(H/D_T)^{(0.35+(b/D_T))}(\sin\theta)^{1.2}$

$=(45.019/212.96)+(2.4111)[\{1000+(1.2)(212.96)^{0.66}\}/\{1000+(3.2)(212.96)^{0.66}\}]^{1.5616}(1)^{0.35+(2/15)}(\sin45)^{1.2}$

$=1.6508$

$N_{P\infty}=B(0.6/1.6)^p=(2.4111)(0.6/1.6)^{1.5616}=0.52122$

$(N_{Pmax}-N_P)/(N_{Pmax}-N_{P\infty})=[1-1.29(B_w/D_T)^{1.2}n_B]^2$

$N_{Pmax}-N_P=(N_{Pmax}-N_{P\infty})[1-1.29(B_w/D_T)^{1.2}n_B]^2$

$N_P=N_{Pmax}-(N_{Pmax}-N_{P\infty})[1-1.29(B_w/D_T)^{1.2}n_B]^2=1.6508-(1.6508-0.52122)[1-1.29(1/10)^{1.2}(4)]^2=1.1370\fallingdotseq\boxed{1.14}$

(亀井・平岡の式)

$b/d=1/5$

$b/D_T=1/15$

$d/D_T=1/3$

$B_w/D_T=1/10$

$H/D_T=1$

$b/H=b/D_T=1/15$

$d/H=d/D_T=1/3$

$\beta=2[\ln(D_T/d)]/[(D_T/d)-(d/D_T)]=2\ln3/[3-(1/3)]=0.8239$

$\eta=0.711[0.157+\{n_p\ln(D_T/d)\}^{0.611}]/[n_p^{0.52}\{1-(d/D_T)^2\}]=0.711[0.157+\{4\ln3\}^{0.611}]/[4^{0.52}\{1-(1/3)^2\}]=1.02216$

$C_L=0.215\eta n_p(d/H)[1-(d/D_T)^2]+1.83(b\sin\theta/H)[n_p/(2\sin\theta)]^{1/3}$

$=(0.215)(1.02216)(4)(1/3)[1-(1/3)^2]+(1.83)(\sin45°/15)[4/(2\sin45°)]^{1/3}=0.38246$

$Re_d=\rho nd^2/\mu=(1063.5)(2.5492)(0.44110)^2/0.001=527491$

$Re_G=[\{\pi\eta\ln(D_T/d)\}/(4d/\beta D_T)]Re_d=[\{\pi(1.02216)\ln3\}/\{(4)(1/3)/0.8239\}](527491)=1149910$

$\gamma=[\eta\{\ln(D_T/d)\}/(\beta D_T/d)^5]^{1/3}=[(1.02216)\{\ln3\}/\{(0.8239)(3)\}^5]^{1/3}=0.23003$

$X=\gamma n_p^{0.7}b\sin^{1.6}\theta/H=(0.23003)(4^{0.7})(1/15)(\sin45°)^{1.6}=0.023244$

$C_t=[(1.96X^{1.19})^{-7.8}+(0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}=[\{(1.96)(0.023244)^{1.19}\}^{-7.8}+(0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}=0.022292$

$C_{tr}=23.8(d/D_T)^{-3.24}(b\sin\theta/D_T)^{-1.18}X^{-0.74}=(23.8)(1/3)^{-3.24}(\sin45°/15)^{-1.18}(0.023244)^{-0.74}=497479$

$f_\infty=0.0151(d/D_T)C_t^{0.308}=(0.0151)(1/3)(0.022292)^{0.308}=0.0015598$

$m=[(0.71X^{0.373})^{-7.8}+(0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}=[\{(0.71)(0.023244)^{0.373}\}^{-7.8}+(0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}=0.17439$

$f=C_L/Re_G+C_t[\{(C_{tr}/Re_G)+Re_G\}^{-1}+(f_\infty/C_t)^{1/m}]^m$

$f=(0.38246/1149910)+(0.022292)[\{(497479/1149910)+1149910\}^{-1}+(0.0015598/0.022292)^{1/0.17439}]^{0.17439}$

$=0.024170$

$N_{P0}=[(1.2\pi^4\beta^2)/\{8d^3/(D_T{}^2H)\}]f=[\{(1.2)(\pi^4)(0.8239)^2\}/\{(8)(0.44110)^3/\{(1.3233)^2(1.3233)\}\}](0.024170)=6.4726$

(傾斜パドル)$N_{Pmax}=8.3(2\theta/\pi)^{0.9}n_p^{0.7}b(\sin\theta)^{1.6}/d=(8.3)[(2)(45\pi/180)/\pi]^{0.9}(4^{0.7})(1/5)(\sin45)^{1.6}=1.3483$

(完全邪魔板条件)$(B_w/D_T)n_B^{0.8}=0.27(N_{Pmax})^{0.2}$

$(B_w/D_T)n_B^{0.8}=(1/10)(4^{0.8})=0.30314$

$0.27(N_{Pmax})^{0.2}=(0.27)(1.3483)^{0.2}=0.2866\neq0.30314$(部分邪魔板条件)

(傾斜ﾊﾟﾄﾞﾙ・ﾌﾟﾛﾍﾟﾗ・ﾌｧｳﾄﾞﾗｰ)$x=4.5(B_w/D_T)n_B^{0.8}/\{(2\theta/\pi)^{0.72}(N_{Pmax})^{0.2}\}+N_{P0}/N_{Pmax}$

$=(4.5)(1/10)(4^{0.8})/[\{(2)(45\pi/180)/\pi\}^{0.72}(1.3483)^{0.2}]+(6.4726/1.3483)=6.9171$

$N_P=[(1+x^{-3})^{-1/3}]N_{Pmax}=[\{1+(6.9171)^{-3}\}^{-1/3}](1.3483)=1.3469≒\boxed{1.35}$

㉗懸濁液密度 ρ_{sl} [kg/m^3]

$\rho_{sl}=\varepsilon_{min}\rho+(1-\varepsilon)_{max}\rho_s=(1-0.29504)(1063.5)+(0.29504)(1760)=1268.9$ kg/m^3≒$\boxed{1269\ kg/m^3}$

㉘撹拌所要動力 P [W]

(永田式)$P=N_P\rho_{sl}n^3d^5=(1.1370)(1268.9)(2.5492)^3(0.44110)^5=399.10$ W≒$\boxed{399\ W}$

(亀井・平岡式)$P=N_P\rho_{sl}n^3d^5=(1.3469)(1268.9)(2.5492)^3(0.44110)^5=472.78$ W≒$\boxed{473\ W}$

㉙原動機規格 P_{MC} [kW]

(永田式)$P_M=P/\eta_{MT}=399.10/0.7=570.14$ W≒0.570 kW

(亀井・平岡式)$P_M=P/\eta_{MT}=472.78/0.7=675.40$ W≒0.675 kW

$\boxed{0.75\ kW}$の原動機を採用する。

(P_{MC}=0.2, 0.4, 0.75, 1.5, 2.2, 3.7, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 90, 110, 132, 160 kW)

$P_{MC}/V=0.75/1.9255=0.38950$ kW/m^3 より、妥当な範囲内(0.2～2 kW/m^3)である。

㉚撹拌軸径 d_s [mm]

$T=P_M/\omega=P_M/(2\pi n)=(750)/[(2\pi)(2.5492)]=46.824$ N・m

$\tau_a=0.8\sigma_a=(0.8)(100)$MPa=80 MPa(SS400)

$d_s=[16T/(\pi\tau_a)]^{1/3}=[(16)(46.824)/(80\times10^6\pi)]^{1/3}=0.014391$ m≒$\boxed{14.4\ mm}$

㉛液相拡散係数 $\mathscr{D}$ [m^2/s]

$T_{av}=\{(273.15+58)+(273.15+28)\}/2=316.15$ K

$\mathscr{D}=(7.4\times10^{-8})(\gamma M)^{0.5}T_{av}/(\mu\upsilon_m^{0.6})$

$\mathscr{D}=(7.4\times10^{-8})\{(2.6)(18)\}^{0.5}(316.15)/[(1)^{cP}\{474/(1760\times10^{-3})^{g/cm3}\}^{0.6}]=5.5729\times10^{-6}$ cm^2/s≒$\boxed{5.57\times10^{-10}\ m^2/s}$

㉜物質移動係数 k_d [m/s]

(Levins & Glastonbury 式)

$k_Ld_p/\mathscr{D}=2+(0.5)(\varepsilon^{1/3}d_p^{4/3}/\nu)^{0.62}(\nu/\mathscr{D})^{1/3}$

$k_{d0}L_{av}/\mathscr{D}=2+(0.5)(\varepsilon^{1/3}L_{av}^{4/3}/\nu)^{0.62}(\nu/\mathscr{D})^{1/3}$

$V(=V_L)=1.9255$ m^3(皿形鏡板槽)

$\varepsilon(=\varepsilon_T)=P_M/(\rho_{sl}V)=750/[(1268.9)(1.9255)]=0.30696$ W/kg

$L_{av}=(0.0001+0.001)/2=5.5\times10^{-4}$ m

$\nu=\mu/\rho=0.001/1063.5=9.4029\times10^{-7}$ m^2/s

$\mathscr{D}=5.5729\times10^{-10}$ m^2/s

$Re=\varepsilon^{1/3}L_{av}^{4/3}/\nu=(0.30696)^{1/3}(5.5\times10^{-4})^{4/3}/(9.4029\times10^{-7})=32.328$

$Sc=\nu/\mathscr{D}=(9.4029\times10^{-7})/(5.5729\times10^{-10})=1687.2$

$Sh=2+0.5Re^{0.62}Sc^{1/3}=2+(0.5)(32.328)^{0.62}(1687.2)^{1/3}=53.360$

$k_{d0}=(Sh)(\mathscr{D}/L_{av})=(53.360)(5.5729\times10^{-10}/5.5\times10^{-4})=5.4067\times10^{-5}$ m/s

$k_d=k_{d0}\exp[-\Delta E_d/(RT_{av})]=(5.4067\times10^{-5})\exp[-(15000)/\{(8.314)(316.15)\}]=1.7969\times10^{-7}$ m/s≒$\boxed{1.80\times10^{-7}\ m/s}$

(石井・藤田式)

$Sh=\alpha Re_0^{\beta}Sc^{0.5}$

$Re_0=N_p^{1/3}nd^{5/3}d_p^{4/3}/(D_T\nu)$

$Re_0=(1.1370)^{1/3}(2.5492)(0.44110)^{5/3}(5.5\times10^{-4})^{4/3}/[(1.3233)(9.4029\times10^{-7})]=24.629(<100)$

$Sh=1.00\times10^{-1}Re_0^{0.690}Sc^{0.5}=(0.1)(24.629)^{0.690}(1687.2)^{0.5}=37.469$

$k_{d0}=(Sh)(\mathscr{D}/L_{av})=(37.469)(5.5729\times10^{-10}/5.5\times10^{-4})=3.7965\times10^{-5}$ m/s

$k_d=k_{d0}\exp[-\Delta E_d/(RT_{av})]=(3.7965\times10^{-5})\exp[-15000/(8.314)(316.15)]=1.2617\times10^{-7}\fallingdotseq\boxed{1.26\times10^{-7}\ \mathrm{m/s}}$

より安全側にある石井・藤田式の計算結果を設計値とする。（成長速度が遅く、より緩やかに冷却できる。）

㉝最大許容線成長速度 G_{max} [m/s]

$K_G\fallingdotseq k_d=1.2617\times10^{-7}$ m/s

$\Delta w_{max}=[w_F/(1+w_F)]-[w_M/(1+w_M)]=[0.43763/(1+0.43763)]-[0.16067/(1+0.16067)]=0.16598$ kg-溶質/kg-溶液

$R_{m,max}=K_G\rho\Delta w_{max}=(1.2617\times10^{-7})(1063.5)(0.16598)=2.2271\times10^{-5}$ kg/(m^2・s)

$G_{max}=R_{m,max}/[3\rho_c(\phi_V/\phi_S)]=(2.2271\times10^{-5})/[(3)(1760)(0.471/3.46)]=3.0985\times10^{-8}\fallingdotseq\boxed{3.10\times10^{-8}\ \mathrm{m/s}}$

㉞回分冷却時間 τ [h]

$\tau=(L_p-L_s)/G_{max}=(1.0-0.10)\times10^{-3}/(3.0985\times10^{-8})=29046\ \mathrm{s}=8.0683\ \mathrm{h}\fallingdotseq\boxed{9\ \mathrm{h}}$

㉟冷却曲線

$T=T_0-(T_0-T_f)(t/\tau)^3=58-(58-28)(t/9)^3=58-0.041152t^3$(seeded)

t [h]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T [°C]	58.00	57.96	57.67	56.89	55.37	52.86	49.11	43.88	36.93	28.00

㊱伝熱速度 Q [W]

$Q=Q_c/\tau=3.9719\times10^8/[(9)(3600)]=12258$ W

㊲ジャケットの伝熱面積 A_J [m^2]

$A_J(=A_L)=\pi D_T^2[(H/D_T)+0.436]=\pi(1.3233)^2(1+0.436)=7.8998\ \mathrm{m^2}\fallingdotseq\boxed{7.90\ \mathrm{m^2}}$(皿形鏡板槽)

㊳伝熱媒体側境膜伝熱係数 h_1

$D_1=D_T+2t_T=D_T+2\ell_w=1323.3+(2)(8.6564)=1340.6\ \mathrm{mm}=1.3406\ \mathrm{m}$

$D_2=D_1+2\Delta X_j=1340.6+(2)(100)=1540.6\ \mathrm{mm}=1.5406\ \mathrm{m}$

$p_{sj}=(1/10)L_j=(1/10)H=(1/10)(H/D_T)D_T=(1/10)(1)(1.3233)=0.13233$ m

$1/D_{eq}=1/(D_2-D_1)+1/(2p_{sj})=1/(1.5406-1.3406)+1/[(2)(0.13233)]=8.7784$

$D_{eq}=0.11391$ m

$A_w=p_{sj}(D_2-D_1)/2=(0.13233)(1.5406-1.3406)/2=0.013233\ \mathrm{m^2}$

$W_{hsj}=W_c/\tau=47284/\{(9)(3600)\}=1.4593$ kg/s

$W_{hsj,eff}=0.6W_{hsj}=(0.6)(1.4593)=0.87558$ kg/s

$u_{hsj}=W_{hsj,eff}/(\rho_hA_w)=0.87558/[(1000)(0.013233)]=0.066166$

$Re=D_{eq}u_{hj}\rho_h/\mu_h=(0.11391)(0.066166)(1000)/0.001=7536.9$

$Pr=C_{ph}\mu_h/k_h=(4200)(0.001)/0.60=7$

$L_{sj}=A_J/(\pi D_{eq})=7.8998/0.11391\pi=22.075$ m

$Nu=0.116(Re^{2/3}-125)Pr^{1/3}[1+(D_{eq}/L_{sj})^{2/3}](\mu_h/\mu_w)^{0.14}$

$Nu=(0.116)[(7536.9)^{2/3}-125](7)^{1/3}[1+(0.11391/22.075)^{2/3}](1)^{0.14}=59.282$

$h_1=Nu(k_h/D_{eq})=(59.282)(0.60/0.11391)=867.38\fallingdotseq\boxed{867\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}}$

㊴撹拌液側境膜伝熱係数 h_2

$Re=\rho nd^2/\mu=(1063.5)(2.5492)(0.44110)^2/0.001=527491$

$Pr=C_p\mu/k=(4200)(0.001)/0.60=7$

(パドル・ジャケットの伝熱式)$Nu=0.36Re^{2/3}Pr^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0.14}f=(0.36)(527491)^{2/3}(7)^{1/3}(1)^{0.14}(1)=4495.8$

$h_2=Nu(k/D_T)=(4495.8)(0.60/1.3233)=2038.4$≒ **2038 W/(m^2・K)**

⑩総括伝熱係数 U [W/(m^2・K)]

$1/U=1/h_1+1/h_{s1}+\ell_w/k_w+1/h_{s2}+1/h_2=(1/867.38)+(1/5000)+(0.0086564/60)+(1/5000)+(1/2038.4)=0.0021877$

U=457.10 W/(m^2・K)≒ **457 W/(m^2・K)**

⑪対数平均温度差ΔT_{lm} [K]

$\Delta T_{lm}=Q/(UA_J)$=12258/[(457.10)(7.8998)]=3.3946 K≒ **3.4 K**

⑫製品結晶の粒径分布

$\mu_p=L_{p,50}$=1 mm=1000 μm

$\sigma_p=(L_{s,84.13}-L_{s,15.87})/2$= (0.18－0.02)/2=0.08 mm=80 μm

$y=1/\{\sigma_p(2\pi)^{0.5}\}\exp[-(L-\mu_p)^2/(2\sigma_p^2)]=1/\{(80)(2\pi)^{0.5}\}\exp[-(L-1000)^2/\{(2)(80)^2\}]$

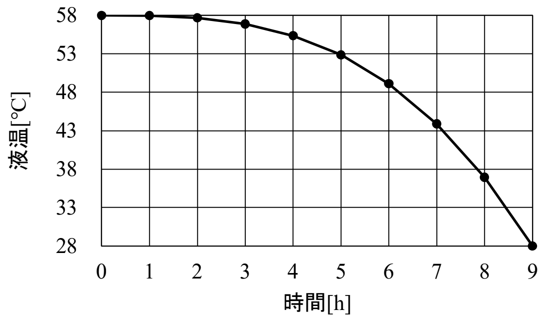
$y=4.9867\times10^{-3}\exp[-(L-1000)^2/12800]$

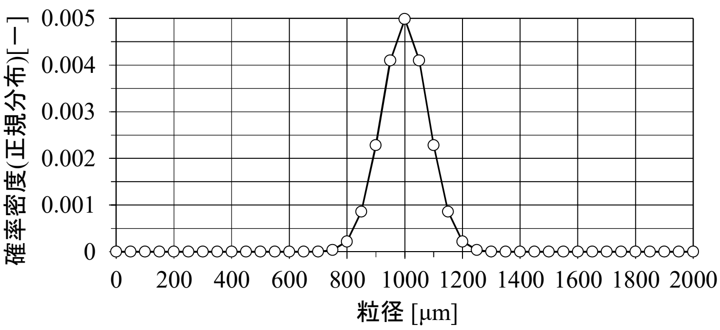
L [μm]	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
y [－]	0.00000	0.00004	0.00022	0.00086	0.00228	0.00410	0.00499	0.00410	0.00228	0.00086	0.00022	0.00004	0.00000

⑬製品結晶の CV [%]

$CV=(L_{s,84.13}-L_{s,15.87})(100)/2L_{p,50}$= (0.18－0.02)/{(2)(1.0)}= **8.0%**

二次核発生と成長速度の粒径依存性を無視していることから、実感としてかなり小さい値になっている。





２．回分定圧濾過機

スラリー濃度 s	8 wt%	試験機の濾過面積 A	0.025 m^2
ケーク湿乾質量比 m	1.5	実機の種類	フィルタープレス
固体密度 ρ_s	2710 kg/m^3	実機の濾材	試験機に同じ
粒子比表面積 S_w	15000 cm^2/g	実機のスラリー処理量 V_{sl}	20 m^3
濾液密度 ρ	1000 kg/m^3	実機の濾過圧力Δp’	試験機に等しい
濾液粘度 μ	0.001 Pa・s	実機の濾枠面積 A_f	1.5 m^2
試験機の種類	ヌッチェフィルタ	実機の濾枠厚み L_f	5 cm
試験機の濾材	濾布	バッチ間の作業時間 θ_d	30 分
試験機の濾過圧力Δp	0.275 MPa(加圧)		

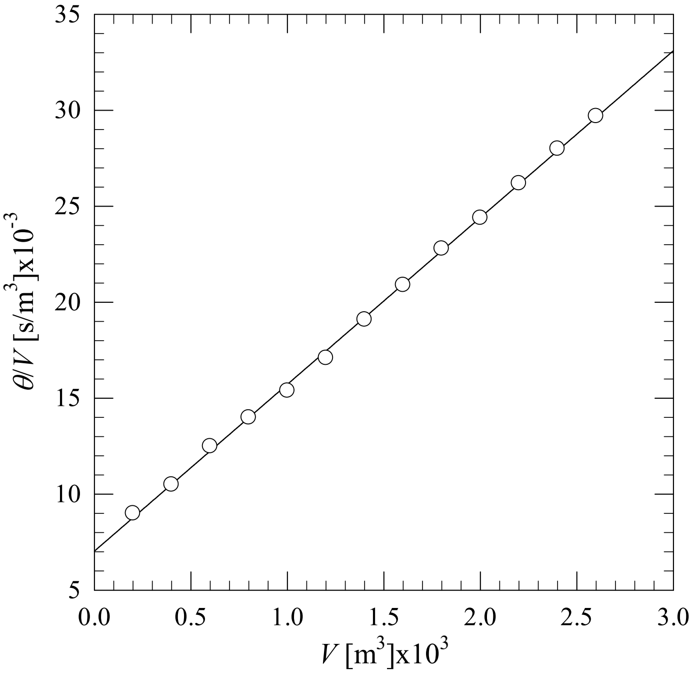


図１　定圧濾過試験結果（Ruth plot）

①スラリー密度 $\rho_{\rm sl}$ [kg/m^3]

$\rho_{\rm sl}$=1/[($s/\rho_{\rm s}$)+(1－s)/ρ]=1/[(0.08/2710)+(1－0.08)/1000]=1053.1 kg/m^3≒ **1053 kg/m^3**

②湿潤ケーク密度 $\rho_{\rm c}$ [kg/m^3]

$m/\rho_{\rm c}$=(1/$\rho_{\rm s}$)+(m－1)/ρ

$\rho_{\rm c}$=m/[(1/$\rho_{\rm s}$)+(m－1)/ρ]=1.5/[(1/2710)+(1.5－1)/1000]=1726.1 kg/m^3≒ **1726 kg/m^3**

③湿潤ケーク体積 $V_{\rm c}$ [m^3]

$V_{\rm c}$=$m\rho_{\rm sl}sV_{\rm sl}/\rho_{\rm c}$=(1.5)(1053.1)(0.08)(20)/1726.1=1.4642 m^3≒ **1.46 m^3**

④平均空隙率 $\varepsilon_{\rm av}$ [－]

$\varepsilon_{\rm av}$=1－($\rho_{\rm c}/\rho_{\rm s}$)/$m$ =1－(1726.1/2710)/1.5=0.57537≒ **0.575**

⑤濾液量あたりの固体量 c [kg-固体/m^3-濾液]

c=ρs/(1－ms)=(1000)(0.08)/[1－(1.5)(0.08)]=90.909 kg-固体/m^3-濾液≒ **90.9 kg-固体/m^3-濾液**

⑥試験機の定圧濾過係数 K [m^6/s]

1/K=8.7×10^6 (Ruth plot)

K=1.1494×10^{-7} m^6/s≒ **1.15×10^{-7} m^6/s**

⑦試験機の相当濾液量 V_0 [m^3]

(2/K)V_0=7.0×10^3 (Ruth plot)

V_0=(1/2)(1.1494×10^{-7})(7.0×10^3)=4.0229×10^{-4} m^3≒ **4.02×10^{-4} m^3**

⑧比抵抗 α [m/kg]

α=2$A^2\Delta p$(1－ms)/($\mu\rho sK$)=(2)(0.025)^2(0.275×10^6)[1－(1.5)(0.08)]/[(0.001)(1000)(0.08)(1.1494×10^{-7})]

α=3.2897×10^{10} m/kg≒ **3.29×10^{10} m/kg**

(実機)α=2$A'^2\Delta p$(1－ms)/($\mu\rho sK'$)=(2)(60)^2(0.275×10^6)[1－(1.5)(0.08)]/[(0.001)(1000)(0.08)(0.66205)]

α=3.2897×10^{10} m/kg≒3.29×10^{10} m/kg(試験機と同じ性状のスラリーを用いているため)

(理論値)S_v=$S_w\rho_s$=(1500)$^{m2/kg}$(2710)$^{kg/m3}$=4065000$^{m2/m3}$

α=5$S_V{}^2$(1－ε_{av})/($\rho_s\varepsilon_{av}{}^3$)=(5)(4065000)^2(1－0.57537)/[(2710)(0.57537)^3]=6.7965×10^{10} m/kg≒6.80×10^{10} m/kg

⑨濾材抵抗 R_m [1/m]

R_m=$\rho s\alpha V_0$/[A(1－ms)]=(1000)(0.08)(3.2897×10^{10})(4.0229×10^{-4})/[(0.025){1－(1.5)(0.08)}]=4.8124×10^{10}

R_m≒4.81×10^{10} 1/m

(実機)R_m’=$\rho s\alpha V_0$’/[A’(1－ms)]=(1000)(0.08)(3.2897×10^{10})(0.96549)/[(60){1－(1.5)(0.08)}]=4.8123×10^{10} 1/m

R_m’≒4.81×10^{10} 1/m(試験機と同じ濾材を用いているため)

⑩実機の濾枠枚数 N_f [－]

N_f=V_c/(A_fL_f)=(1.4642)/[(1.5)(0.05)]=19.5≒20 枚

⑪実機の所要濾過面積 A’ [m^2]

A’=2A_fN_f=(2)(1.5)(20)=60 m^2

⑫実機の定圧濾過係数 K’ [m^6/s]

K’=K(A’/A)^2(Δp’/Δp)=(1.1494×10^{-7})(60/0.025)^2(1)=0.66205 m^6/s≒0.662 m^6/s

⑬実機の相当濾液量 V_0’ [m^3]

V_0’=V_0(A’/A)=(4.0229×10^{-4})(60/0.025)=0.96549 m^3≒0.965 m^3

⑭実機の濾液量 V’ [m^3]

V’=(1－ms)(ρ_{sl}/ρ)V_{sl} =[1－(1.5)(0.08)](1053.1/1000)(20)=18.534 m^3≒18.5 m^3

⑮実機の濾過時間(θ+θ_d) [min]

θ+θ_d=(V’^{2}+2V’V’$_0$)/K’+θ_d=[18.534^2+(2)(18.534)(0.96549)]/(0.66205)+(30)(60)=(2372.9)^s(1/60)$^{min/s}$=39.548 min

θ+θ_d≒39.5 min

⑯実機の最適濾過時間 θ_{opt} [min]

θ_{opt}=θ_d+2V_0’(θ_d/K’)$^{0.5}$=(30)(60)+(2)(0.96549){(30)(60)/0.66205}$^{0.5}$=(1900.6)^s(1/60)$^{min/s}$=31.676 min≒31.7 min

３．連続定圧濾過機

スラリー濃度 s	8 wt%	試験機の濾過面積 A	0.025 m^2
ケーク湿乾質量比 m	1.5	実機の種類	オリバーフィルタ
固体密度 ρ_s	2710 kg/m^3	実機の濾材	試験機に同じ
粒子比表面積 S_w	15000 cm^2/g	実機のスラリー処理量 Q_{sl}	20 m^3/h
濾液密度 ρ	1000 kg/m^3	実機の濾過圧力Δp’	0.070 MPa(減圧)
濾液粘度 μ	0.001 Pa･s	実機の寸法比 L_D/D_D	1.5
試験機の種類	ヌッチェフィルタ	実機の回転速度 N_D	2 rpm
試験機の濾材	濾布	実機の浸液角 Ψ	120°
試験機の濾過圧力Δp	0.275 MPa(加圧)	実機の残留ケーク厚み L_ℓ	5 mm

①スラリー密度 ρ_{sl} [kg/m^3]

ρ_{sl}=1/[(s/ρ_s)+(1－s)/ρ]=1/[(0.08/2710)+(1－0.08)/1000]=1053.1 kg/m^3≒1053 kg/m^3

②湿潤ケーク密度 ρ_c [kg/m^3]

$m/\rho_c=(1/\rho_s)+(m-1)/\rho$

$\rho_c=m/[(1/\rho_s)+(m-1)/\rho]=1.5/[(1/2710)+(1.5-1)/1000]=1726.1$ kg/m^3≒ 1726 kg/m^3

③湿潤ケーク体積 V_c [m^3]

$V_c=m\rho_{sl}sV_{sl}/\rho_c=(1.5)(1053.1)(0.08)(20)/1726.1=1.4642$ m^3≒ 1.46 m^3

④平均空隙率 ε_{av} [－]

$\varepsilon_{av}=1-(\rho_c/\rho_s)/m=1-(1726.1/2710)/1.5=0.57537$≒ 0.575

⑤濾液量あたりの固体量 c [kg-固体/m^3-濾液]

$c=\rho s/(1-ms)=(1000)(0.08)/[1-(1.5)(0.08)]=90.909$ kg-固体/m^3-濾液≒ 90.9 kg-固体/m^3-濾液

⑥試験機の定圧濾過係数 k [m^2/s]

$1/K=8.7\times10^6$ (Ruth plot)

$K=1.1494\times10^{-7}$ m^6/s

$k=K/A^2=(1.1494\times10^{-7})/(0.025)^2=1.8390\times10^{-4}$ m^2/s≒ 1.84×10^{-4} m^2/s

⑦試験機の相当濾液量 υ_0 [m^3/m^2]

$(2/K)V_0=7.0\times10^3$ (Ruth plot)

$V_0=(1/2)(1.1494\times10^{-7})(7.0\times10^3)=4.0229\times10^{-4}$ m^3

$\upsilon_0=V_0/A=(4.0229\times10^{-4})/0.025=0.016091$ m^3/m^2≒ 0.0161 m^3/m^2

⑧比抵抗 α [m/kg]

$\alpha=2A^2\Delta p(1-ms)/(\mu\rho sK)=(2)(0.025)^2(0.275\times10^6)[1-(1.5)(0.08)]/[(0.001)(1000)(0.08)(1.1494\times10^{-7})]$

$\alpha=3.2897\times10^{10}$ m/kg≒ 3.29×10^{10} m/kg

(理論値)$S_v=S_w\rho_s=(1500)^{m2/kg}(2710)^{kg/m3}=4065000^{m2/m3}$

$\alpha=5S_v^2(1-\varepsilon_{av})/(\rho_s\varepsilon_{av}^3)=(5)(4065000)^2(1-0.57537)/[(2710)(0.57537)^3]=6.7965\times10^{10}$ m/kg≒ 6.80×10^{10} m/kg

⑨濾材抵抗 R_m [1/m]

$R_m=\rho s\alpha V_0/[A(1-ms)]=(1000)(0.08)(3.2897\times10^{10})(4.0229\times10^{-4})/[(0.025)\{1-(1.5)(0.08)\}]=4.8124\times10^{10}$

R_m≒ 4.81×10^{10} 1/m

⑩浸液率 F [－]

$\Psi=(120°)(2\pi/360°)=2\pi/3$ rad

$F=\Psi/(2\pi)=(2\pi/3)/(2\pi)=$ 1/3

⑪実機の１回転あたり浸液時間 θ [s]

$N_D=2^{1/min}/60^{s/min}=1/30$ rps

$\theta=F/N_D=(1/3)/(1/30)=$ 10 s

⑫実機の定圧濾過係数 k' [m^2/s]

$k'=k(\Delta p'/\Delta p)=(1.8390\times10^{-4})(0.070/0.275)=4.6810\times10^{-5}$ m^2/s≒ 4.68×10^{-5} m^2/s

⑬実機の相当濾液量 υ_0' [m^3/m^2]

$\upsilon_0'=\upsilon_0=0.016091$ m^3/m^2≒ 0.0161 m^3/m^2

⑭実機の残留ケークの相当濾液量 υ_ℓ' [m^3/m^2]

$\upsilon_\ell'=\rho_c(1-ms)L_\ell/(m\rho s)=(1726.1)[1-(1.5)(0.08)](0.005)/[(1.5)(1000)(0.08)]=0.063290$ m^3/m^2≒ 0.0633 m^3/m^2

⑮実機の１回転あたり濾液量 υ' [m^3/m^2]

$\upsilon_0'+\upsilon_\ell'=0.016091+0.063290=0.079381$ m^3/m^2

$\upsilon'=[(\upsilon_0'+\upsilon_\ell')^2+k'\theta]^{0.5}-(\upsilon_0'+\upsilon_\ell')=[(0.079381)^2+(4.6810\times10^{-5})(10)]^{0.5}-0.079381=0.0028956$ m^3/m^2

$\upsilon'\fallingdotseq$ 0.00290 m^3/m^2

⑯実機の濾液流量 Q' [m^3/s]

$Q'=(1-ms)(\rho_{sl}/\rho)Q_{sl}=[1-(1.5)(0.08)](1053.1/1000)(20/3600)=0.0051484$ m^3/s$\fallingdotseq$ 0.00515 m^3/s

⑰実機の濾過面積 A' [m^2]

$A'=Q'/(\upsilon' N_D)=(0.0051484)/[(0.0028956)(1/30)]=53.340$ m$^2\fallingdotseq$ 53.3 m^2

⑱実機の円筒ドラム径 D_D [mm]

$A'=\pi D_D L_D=\pi D_D[(L_D/D_D)D_D]$

$D_D^2=A'/[\pi(L_D/D_D)]$

$D_D=[A'/\{\pi(L_D/D_D)\}]^{0.5}=[53.340/(1.5\pi)]^{0.5}=3364.3$ mm$\fallingdotseq$ 3400 mm

⑲実機の円筒ドラム幅 L_D [mm]

$L_D=(L_D/D_D)D_D=(1.5)(3364.3)=5046.4$ mm$\fallingdotseq$ 5100 mm

4．遠心脱水機

固体の種類	食塩	脱水機の種類	押出板型連続遠心脱水機
粒子密度 ρ_p	2160 kg/m^3	脱水機の内径 r_2	400 mm
粒子径 D_p	0.6 mm	脱水機の縁内径 r_1	200 mm
粒子形状	立方体	脱水機の深さ H_B	400 mm
液体の種類	希薄食塩水	脱水機の有効容積率 η	0.8
液体密度 ρ_f	1000 kg/m^3	脱水機の回転速度 n	960 rpm
液体粘度 μ	0.001 Pa・s	脱水機のストローク長 ℓ	120 mm
表面張力 γ	0.072 kg/s^2	押出板の振動数 f	0.5 1/s
空隙率 ε	0.4	重力加速度 g	9.81 m/s^2

①脱水機の有効容積

$V_{eff}=\pi(r_2^2-r_1^2)H_B\eta=\pi[(0.400)^2-(0.200)^2](0.400)(0.8)=0.12063$ m$^3\fallingdotseq$ 0.121 kℓ

②固体重量

$\rho_b=\rho_p(1-\varepsilon)=(2160)(1-0.4)=1296$ kg/m^3

$M_s=\rho_b V_{eff}=(1296)(0.12063)=156.33$ kg$\fallingdotseq$156 kg

③固体供給量

$Q_M=\rho_b\pi(r_2^2-r_1^2)\ell f=(1296\pi)[(0.400)^2-(0.200)^2](0.120)(0.5)=29.314$ kg/s$\fallingdotseq$ 29.3 kg/s

④固体の平均滞留時間

$\tau=M_s/Q_M=156.33/29.314=5.3329$ s$\fallingdotseq$ 5.33 s

⑤平均遠心効果

$Z=2\pi^2n^2(r_1+r_2)/g=(2\pi^2)(960/60)^2(0.200+0.400)/9.81=309.06\fallingdotseq$ 309

$Z_c=2k_c\gamma/(D_p^2\rho g)=(2)(10)(0.072)/[(0.0006)^2(2160)(9.81)]=188.77\fallingdotseq189(<Z=309)$遠心条件を満たしている。

⑥透過率

$\phi_V=V_p/D_p^3=D_p^3/D_p^3=1$

$\phi_S=S_p/D_p^2=6D_p^2/D_p^2=6$

$S_V= S_p/V_p=(\phi_S D_p^2)/(\phi_V D_p^3)=(\phi_S/\phi_V)/D_p=6/0.0006=10^4$ m²/m³

$k_p=[\varepsilon^3/(1-\varepsilon)^2]/(5S_V^2)=[(0.4)^3/(1-0.4)^2]/[(5)(10^4)^2]=3.5555\times10^{-10}$ m² ≒ $\boxed{3.56\times10^{-10}\ \mathrm{m}^2}$

⑦毛管脱水時間

$L=r_2-r_1=0.400-0.200=0.200$ m

$t_c=\mu\varepsilon L/(\rho Zgk_p)=(0.001)(0.4)(0.200)/[(1000)(309.06)(9.81)(3.5555\times10^{-10})]=0.074212$ s ≒ $\boxed{0.0742\ \mathrm{s}}$

⑧残留平衡飽和度

(大山・山口の式)$K_p=\rho ZgD_p^2/(\gamma\cos\theta)=(1000)(309.06)(9.81)(0.0006)^2/[(0.072)(1)]=15.159(<21)$

$n_{av}=12-27.8(\varepsilon-0.26)=12-(27.8)(0.4-0.26)=8.1080$

$S_\infty=S_W=(3/4)[(1-\varepsilon)/\varepsilon]n_{av}\phi=(3/4)[(1-0.4)/0.4](8.1080)(0.0064)=0.058377$ ≒ $\boxed{0.0584}$

(村瀬らの式)$K_c=\rho Zgk_p/(\gamma\cos\theta)=(1000)(309.06)(9.81)(3.5555\times10^{-10})/[(0.072)(1)]=0.014972(<0.02)$

$D_{pV}=(6V_p/\pi)^{1/3}=(6D_p^3/\pi)^{1/3}=(6/\pi)^{1/3}D_p=(6/\pi)^{1/3}(0.0006)=7.4442\times10^{-4}$ m

$\phi_c=6/(S_V D_{pV})=6/[(10^4)(7.4442\times10^{-4})]=0.80599$

$S_\infty=0.075(50K_c)^{-(0.37)\sqrt{(1-\phi_c)}}=(0.075)[(50)(0.014972)]^{-(0.37)\sqrt{(1-0.80599)}}=0.078623$ ≒ $\boxed{0.0786}$

設計上より安全側にある村瀬らの計算結果を採用する。

⑨平均飽和度

$S_{av}=S_\infty+0.33(t_c/\tau)^{0.5}=0.0786+(0.33)(0.074212/5.3329)^{0.5}=0.11752$ ≒ $\boxed{0.118}$

(別解)$S_{av}=S_\infty+0.33[\{\mu\varepsilon\ell f/(2\pi^2n^2\rho k_pH_B\eta)\}\{(r_2-r_1)/(r_2+r_1)\}]^{0.5}$

$=0.0786+0.33[\{(0.001)(0.4)(0.120)(0.5)/(2\pi^2(960/60)^2(1000)(3.5555\times10^{-7})(0.400)(0.8)\}$

$\times\{(0.400-0.200)/(0.400+0.200)\}]^{0.5}=0.11752$ ≒ $\boxed{0.118}$

⑩含液率

(湿量基準)$w_w=100\varepsilon\rho S_{av}/[(1-\varepsilon)\rho_p+\varepsilon\rho S_{av}]=(100)(0.4)(1000)(0.11752)/[(1-0.4)(2160)+(0.4)(1000)(0.11752)]$

$=3.500\%$ ≒ $\boxed{3.50\ \mathrm{wt\%}}$

(乾量基準)$w_d=100\varepsilon\rho S_{av}/[(1-\varepsilon)\rho_p]=(100)(0.4)(1000)(0.11752)/[(1-0.4)(2160)]=3.6271\%$ ≒ $\boxed{3.63\ \mathrm{wt\%}}$

[参考]数値の丸め方

(ア)切り捨てと切り上げの値を比較してより近い値を採用する。

12.31**3** → (切り捨て)12.31 ／ (切り上げ)12.32 → (採用)12.31

(イ)(ア)で差が等しい場合は、偶数値を採用する。

12.30**5** → (切り捨て)12.30 ／ (切り上げ)12.31 → (採用)12.30