

1. 緒言

液状食品を冷却し、液中に含まれる純水を凝固させることで濃縮する凍結濃縮法は最も低温で濃縮を行うため、現在主流となっている加熱濃縮法に比べ高品質な濃縮液を得ることができる。また、凝固潜熱と蒸発潜熱の違いからも、より省エネルギーが見込める。本研究では、製氷部の伝熱面に生成された氷膜を、攪拌翼を兼ねた掻き取り刃で削ることにより、微小氷片を発生させたのち氷片を取り除くことで濃縮を行う懸濁結晶法を用いている。しかし、氷膜の熱伝導特性が明確化されていないため、システムのスケールアップや製氷能力の推定が困難であるという課題がある。その中でも主に用いられる冷媒はフルオロカーボンと潤滑油が混合し、熱交換時に相変化にて冷却を行う。したがってそれに接するステンレス面の温度は冷却の効率化に重要な位置を占めながら計測が難しいという現状がある。本研究では先行実験で得たデータを基に冷媒と接するステンレス伝熱面の温度を解析によって推測した。

2. 濃縮装置概要

本研究の解析対象である濃縮装置の製氷部を図1に示す。製氷部は二重円筒と掻き取り刃によって構成されている。外側の円筒を冷媒が通ることで、内側の円筒を流れるスクロース水溶液と熱交換を行い、水溶液が凝固温度に達すると伝熱面に氷膜が形成され、それをかき取り刃で切削する。

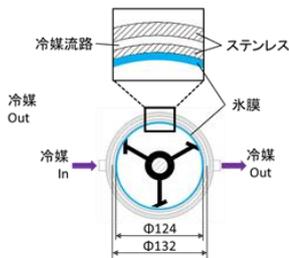


図1 製氷部

3. 条件式

本解析では Ansys 社の汎用有限要素法解析ソフト Mechanical を用い伝熱解析を行った。条件式は水溶液から氷膜

$$q_1 = h_1(T_0 - T_1) \quad \dots \textcircled{1}$$

h_1 : 熱伝達係数 [W/m²°C] T_0 : 水溶液温度 [°C]
 T_1 : 氷膜表面温度 [°C]

氷膜内の熱伝導

$$q_2 = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \dots \textcircled{2}$$

λ_2 : 氷膜熱伝導率

ステンレス内の熱伝導

$$q_3 = -\lambda_3 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \dots \textcircled{3}$$

λ_3 : ステンレス熱伝導率

$$q_1 = q_2 = q_3 = const. \quad \dots \textcircled{4}$$

q_1, q_2, q_3 : 領域での熱流束

によって示される。

4. 解析概要

解析概要図を図2に示す。熱伝達係数 h_1 は Mohamed Ben Lakhdar の文献を参考に、15%濃度スクロース水溶液の凍結における攪拌翼と熱交換の関係に関する熱伝達係数を 1428.6 [W/m²°C] とした。モデルは高さ 150mm の円柱状であるが4分割している。冷媒に接するステンレス外壁面(A)には冷媒の温度である -16.903 [°C] を基準として、実験の熱流束に近いステンレス伝熱面の温度を調べた。

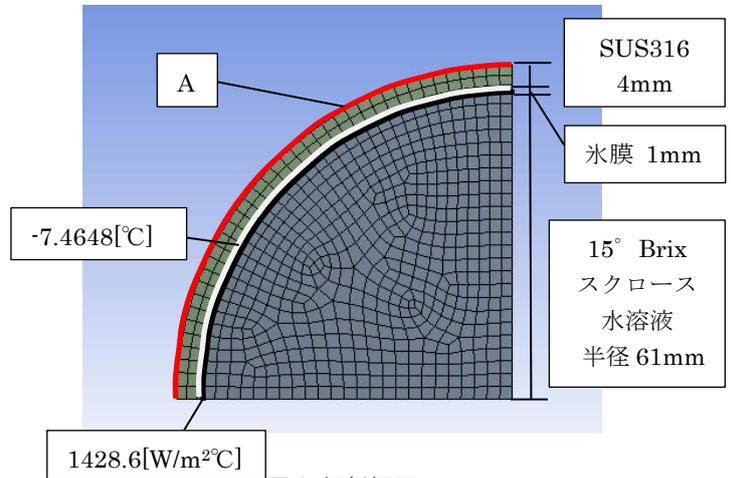


図2 解析概要

5. 解析結果

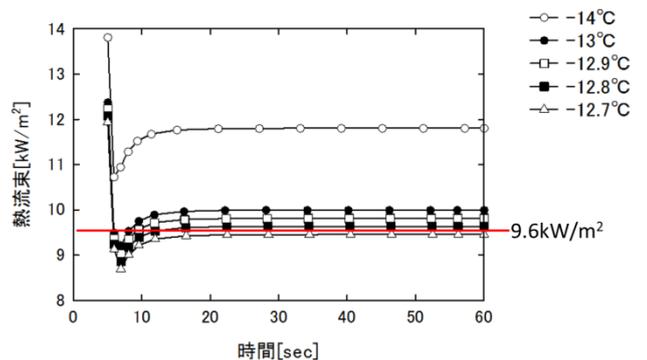


図3 解析結果

解析結果は図3のようになった。このことから、実験で求められた熱流束 9606.6 [W/m²] の値に一致する温度は -12.78 [°C] であることが示された。本結果からステンレス外壁面温度の推算が実験で得られた熱流束より行えた。

参考: Mohamed Ben Lakhdar, Heat transfer with freezing in a scraped surface heat exchanger