

『氷を操る』

1. はじめに

弊社における汲水の冷却は、醗冷却に使用している冷水をタンクジャケットに通水して冷却を行っている。それだけでは 5~6°C までしか下がらないため氷を用いて汲水の水温を調整している。以前は氷を感覚で入れていたため冷やしすぎた時はザルで掬い、足りなければ追加で入れることは常であった。水温調整の時間が有効に使えるように計算での解決を試みた。

2. 考え方

※区別のため、氷が溶けた後の”水”を『水』、最初から汲んでいる”水”を『原水』とする。

原水に氷を入れ、目標の温度になる。この工程を分解すると次のようになる。

- ① 氷が溶けるまで
- ② 氷が溶けて水になる瞬間
- ③ 水が原水と平衡状態になるまで

氷は溶けるまでに原水から熱を奪い、溶ける際に融解熱を原水から奪い、溶けた後に平衡温度（最終の温度）に到達するまでに原水から熱を奪う。これを式に書くと、

原水が奪われる熱量 + 氷が溶けるまでに原水から奪う熱量 + 氷が溶ける際に奪う熱量

$$+ \text{水が原水から奪う熱量} = 0 \quad \dots (1)$$

【計算】 -----

熱量の変化 $\Delta Q[\text{kJ}]$ は以下のようになる。

$\Delta Q = MC \cdot \Delta T$ C は比熱 $[\text{kJ}/\text{kgK}]$ 、 ΔT は温度の変化 $[\text{K}]$ ここで、 M_w : 水の重量 $[\text{kg}]$ 、 M_i : 氷の重量 $[\text{kg}]$

T_w : 原水の温度 $[\text{K}]$ 、 T_i : 氷の温度 $[\text{K}]$ 、 T : 平衡温度（最終の温度） $[\text{K}]$

C_w : 水の比熱 $[\text{kJ}/\text{kgK}] = 4.19[\text{kJ}/\text{kgK}]$ 、 C_i : 氷の比熱 $[\text{kJ}/\text{kgK}] = 2.05[\text{kJ}/\text{kgK}]$

H : 融解熱 $[\text{kJ}/\text{kg}] = 333.5[\text{kJ}/\text{kg}]$ とすると、(1) は以下のようになる。

$$M_w C_w (T - T_w) + M_i C_i (0 - T_i) + M_i H + M_i C_w (T - 0) = 0 \quad \dots (2)$$

(2) において温度の単位は $[\text{K}]$ だが、差なので $[\text{°C}]$ の表記で問題ない。(2) を変形して、

$$M_i = \frac{M_w C_w (T_w - T)}{-C_i T_i + H + C_w T} \quad \dots (3)$$

使いやすい形にするため分母分子をそれぞれ C_w で割ると、

$$M_i = \frac{M_w (T_w - T)}{\frac{-C_i T_i + H}{C_w} + T} \quad \dots (4)$$

ここで氷の温度を $-5[\text{°C}]$ とすると、

$$\frac{-C_i T_i + H}{C_w} = \frac{-2.05 \times (-5) + 333.5}{4.19} \cong 82$$

これを (4) に代入して、

$$M_i = \frac{M_w (T_w - T)}{82 + T} \quad \dots (5)$$

現場においては(3)式では切れ味が鋭すぎて使いにくく、(5)式で十分に使用感を得られる。まとめると以下ようになる。

$$\text{氷量 kg} = \frac{\text{原水の量 } \ell \times (\text{原水水温 } ^\circ\text{C} - \text{目標水温 } ^\circ\text{C})}{82 + \text{目標水温 } ^\circ\text{C}} \dots (A)$$

3. 現場での使用

<例1>

500ℓ 15.0℃の水を 2.0℃にしたい場合の氷量は？

$$\text{氷量} = \frac{500 \times (15.0 - 2.0)}{82 + 2.0} \cong 77[\text{kg}]$$

<例2>

500ℓ、10.0℃に氷を入れて、溶け残らない氷量の上限は？

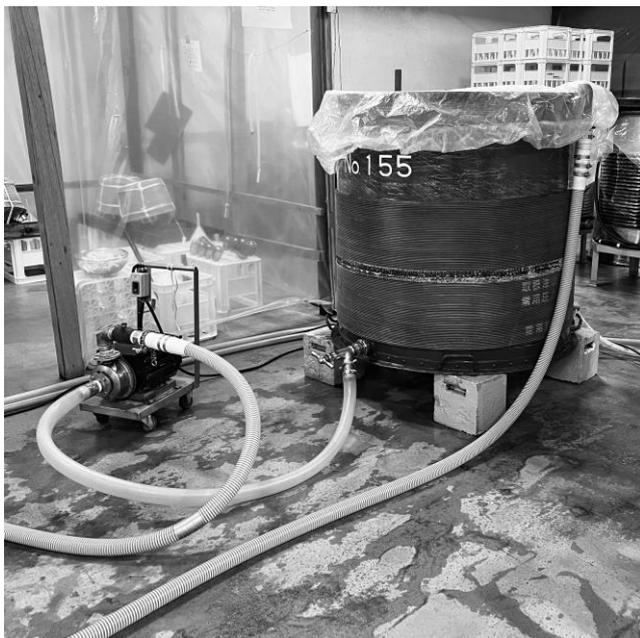
溶け残らない→目標温度を 0℃としたときの氷量なので、

$$\text{氷量} = \frac{500 \times (10.0 - 0)}{82 + 0} \cong 60[\text{kg}]$$

「試桶すりきり1杯で0kg」「ひしゃく1杯0kg」等、あらかじめ氷を計量しておけば、いちいち計量する必要もない。多少の誤差は出るものの、(A)式の使用感は想像以上に良い。以下に実際の作業内容を紹介する。

弊社では前日に仕込み水を汲み置き、使用当日の朝に(A)式で計算した氷を入れ、ポンプで循環させて氷を溶かしている(写真①)。溶けるまでの時間は醗のサンプル採りや水麴の準備を行えば時間も無駄にならない。ブロック状の氷(写真②)を使用しており、下記の条件で氷をすべて入れてから溶け切るまでに約4分掛かっている。

写真①



写真②



条件

室温：10.8℃、原水温度：7.0℃、
原水量：450ℓ、目標温度：3.8℃
(氷：19kg (小数点以下切り捨て)、

$$\text{計算上の氷量} = \frac{450 \times (7.0 - 3.8)}{82 + 3.8} \cong 17[\text{kg}]$$

上記条件で最終 3.6°Cとなり目標の -0.2°Cとなった。

弊社では試桶すりきり 1 杯で 12kg としている。実際の現場使用と同様に計量は行わずに目分量で試桶すりきり 1.4 杯の水を用意した。

4. 考察

(A)式を印刷して電卓とともに汲水タンク横の壁にでも貼っておけば、目標とする汲水温度の指示があれば誰でも現場で計算を行い所定の水温に調整できる。調整の際、「ざっくり」とした目分量の計量であっても良い精度で調整できることは作業現場にとって非常に有効な武器となる。

<例 1>において①氷が溶けるまでの熱量、②融解熱、③溶けた氷が最終温度になるまでの熱量、とするとその熱量比は①：②：③=3：95：2 となり、その大部分が融解熱となっている。氷を使用する際に個数計算で考えない方がよい理由がこの点となっている。

普段は計量していないが目分量の 1.4 杯の実際の重量も記した。2kg の差はあったものの、計算値による目安があることで目分量の精度が増す。この程度の水量があれば目分量の計量でも予定温度に合わせられる。

念のため計量した氷量から水温を逆計算すると、

$$\frac{450 \times (7.0 - T)}{82 + T} = 19 \Leftrightarrow T = 3.4[^\circ\text{C}]$$

となる。実測の 3.6°Cとの差は、(2) 式においては室温や風の影響は考慮されておらず、目標水温より高い室温の中でポンプ循環を行ったため 0.2°Cの差が出たものと推測される。目標水温と室温との差が大きくなる場合は計算値と誤差が生じることがわかっていれば調整の際に氷を加減できる。室温との差が気になるのであれば断熱マットを使用することで誤差は小さくなるだろうがこの程度の差であれば現場使用に差し支えない。

5. おわりに

今回の目的は計算問題を解くことでもなく物理の実験でもなく、作業現場の武器として使うことを想定している。人の感覚を重視する部分と実はそうでもない部分との境界線をはっきりさせたことで、弊社では経験年数に関係なく誰でも良い精度で水温調整が行えるようになっている。

個人の経験や能力に依存する部分が余りに多すぎると結果の検証や次世代への引継ぎ、不測の事態が起こった際にチームとしての機能を失いかねない。すべてのことが計算できるとは思わないが今回のような内容であれば作業現場で切れ味の良い武器として使ってもらえる。そうすることで経験や勘が本当に必要な部分を伝える時に十分な時間を掛けることができ、結果として全体の戦力は上がると考えている。

現在は今回の考え方を発展させ、仕込作業においても氷を用いて水麴温度や仕込温度の調整も問題なく行えている。