

ヘリウム回収率の計算方法

東京大学物性研究所 低温液化室 土屋 光

はじめに

液体ヘリウムを使用する機関では、ほとんどの場合ヘリウムの再利用が前提となっているだろう。その際に、一体どのくらいの率で再利用されているのかを計算しているはずである。現に東京大学物性研究所（以下、物性研）では、毎月在庫量を調べ、回収率を計算している。おおよそ80%前後である。

さて、物性研の80%という数値は他の機関と比べて良いのか悪いのか、現状では比べようがない。なぜなら、計算方法が機関毎に異なっているからである。このままでは、「機関の回収率が良いのでそこを見習うように！」などということは言えない。そのように比べる必要があるかどうかとも疑問ではあるが...

ここでは、物性研が行ったアンケート¹を元にヘリウム回収率の計算方法について考えてみる。

色々な機関の計算方法

とりあえず、アンケート結果から回収率の計算方法について抜粋してみた。回収率の計算方法について回答があったのは、14機関であり、以下に計算式を示す。

$$1 \quad \frac{\text{購入ヘリウムガス量}}{\text{液体ヘリウム供給量} \times 0.789}$$

$$2 \quad \frac{\text{リーク量}}{\text{購入量}} \times 100$$

$$3 \quad \frac{\text{回収量(m}^3\text{)}}{\text{使用量(L)}} \times 100$$

$$4 \quad 1 - \frac{\text{購入液量}}{\text{供給液量}}$$

$$5 \quad \frac{\text{回収ガス体積(m}^3\text{)}/0.75}{\text{供給液体積(L)} + \text{期間始めの在液体積(L)} - \text{期間終わりの在液体積(L)}} \times 100$$

$$6 \quad \frac{\text{回収量 (回収ガスメーターカウント時温度20℃ 換算)}}{\text{供給量}} \times 100$$

$$7 \quad 1 - \frac{\text{ヘリウムガス購入量}}{\text{液体ヘリウム供給量} \times 0.7}$$

$$8 \quad \frac{\text{購入ガス量} - \text{ボンベ供給} - \text{大気放出}}{\text{年間供給量}}$$

$$9 \quad \frac{\text{回収量}}{\text{供給量 (月終わり在庫} - \text{月初め在庫)}}$$

$$10 \frac{\text{回収量}}{(\text{供給量} + \text{前月初在庫}) - \text{当月初在庫}}$$

$$11 1 - \left(\frac{\text{He(ガス又は液体)購入量} + \text{He保有量の差}}{\text{液体ヘリウム供給量}} \right) \times 100$$

$$12 \frac{\text{回収ガス量}}{\text{供給量 (ガス換算)}}$$

$$13 \frac{(\text{液化量} - \text{消耗ガス量})}{\text{液化量}}$$

$$14 \frac{\text{回収前提の供給量} - (\text{補充量(液で購入)} - \text{使い捨ての供給量})}{\text{回収前提の供給量}}$$

各機関でこんなにも計算方法が違うのかと驚かされた。しかし、よくよく見ると同じような計算式が幾つかあり、また、「回収量と供給量の関係」、「損失(購入)量と供給量の関係」の2種類の考え方があると言えるだろう。そこで、同じような式をまとめ、式の数減らしてみた。

計算式をまとめる

同じと思われる計算式をまとめ、14種類を9種類にしてみた。独特の計算式が多く、あまり少なくならなかったが、まとめた式を以下に示す。

$$1 - \frac{\text{ヘリウム購入量}}{\text{液体ヘリウム供給量} \times \text{係数}} \quad \text{係数：0.7, 0.789, 1(液体購入の場合)}$$

$$\left(1 - \frac{\text{He(液体又はガス)購入量} + \text{He保有量の差}}{\text{液体He供給量}} \right) \times 100$$

$$\frac{\text{購入ガス量} - \text{ボンベ供給} - \text{大気放出}}{\text{年間供給量}}$$

$$\frac{\text{リーク量}}{\text{供給量}} \times 100$$

$$\frac{\text{回収量}}{\text{供給量} - \text{在庫の差}} \times 100 \quad \text{ガス} \rightarrow \text{液体} : 0.75 \quad \text{液体} \rightarrow \text{ガス} : 0.738(15 \quad)$$

$$\frac{\text{回収量(m}^3\text{)}}{\text{使用量(L)} \times 0.7} \times 100$$

$$\frac{\text{回収ガス量}}{\text{供給量}} \quad \text{供給量をガス換算したり、回収ガスを20換算したり}$$

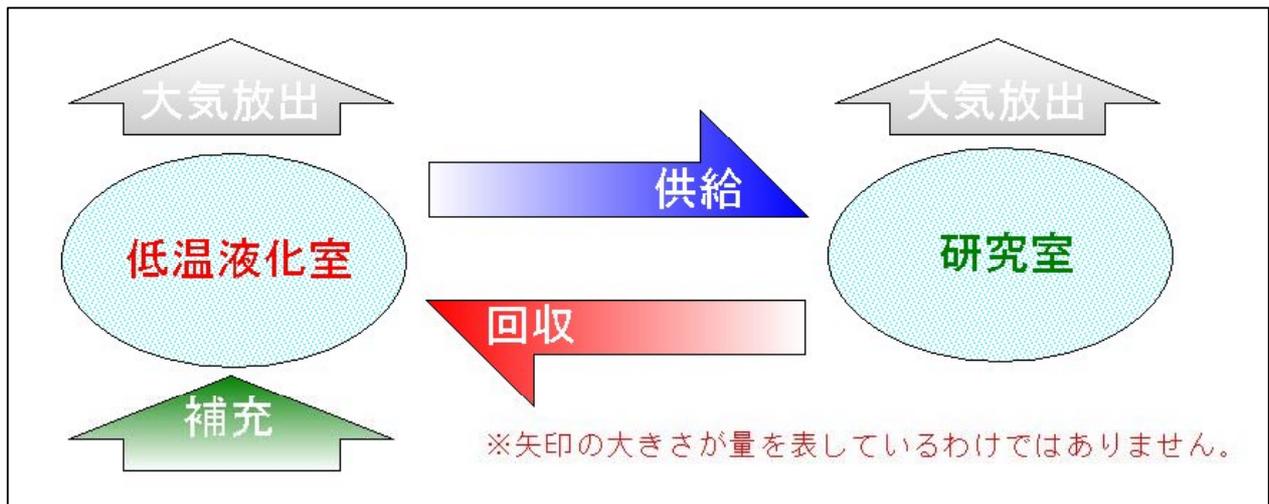
液化量 - 消耗ガス量
液化量

回収前提の供給量 - (補充液量 - 使い捨ての供給量)
回収前提の供給量

式 、 、 は、「購入量と供給量の比」で、式 では在庫までを加味し、式 ではもう少し踏み込んで計算していると思われる。式 は、「損失量と供給量の比」と考えられるが、リーク量はどのようにして量っているのだろうか。次に、式 、 、 であるが、これらは「回収量と供給(使用)量の比」であり、物性研で使用している計算式(式)と同じ種類のものと考えられ、回収率の定義(後述)に一番合っているのではないかと思う。

もう少し考えてみると、「購入量」と「損失量」は、言葉は違うけれども表している内容は同じであると考えられる。なぜなら失ったヘリウムを購入するからである。とすると、上記の式は、「購入量と供給量の比」及び「回収量と供給量の比」の2種類であると言える。式 、 は、不明。

このように考えた場合に重要なのが「回収率とは何ぞや?」ということではないだろうか。



図・1 ヘリウムの循環

回収率

さて、様々な機関の回収率の計算式を見てきたが、ここで回収率について考えてみようと思う。

まずヘリウムは、図・1のように循環していると考えられ、供給元からも、供給先からも何らかの理由により大気に逃げているし、無くなった分は補充しなければならない。ここで、「100%回収して下さいね～」と言っているのは、供給元から供給先へである。となると、問題となるのは、青矢印の供給と赤矢印の回収の比と言えるのではないだろうか。供給と回収が、同じ量なら「頑張りましたね。回収率100%です。」、回収が少ないなら、「飛ばしましたね。次は気を付けて下さいね。」という具合である。

そこで、回収率とは、

「研究室に供給したヘリウムの内、どのくらいのヘリウムが回収されたのかを示したもの」

と言って良いのではないだろうか。ここでは、とりあえず上記を回収率の定義としてみた。

とりあえず、回収率を定義したのでもう一度前述の9つの式を見てみることにすると、幾つかの式は、この定義に当てはまらないと言えるだろう。式 から式 がそれにあたり、式 も液化量を使った式なので定義からはずれていると言える。とすると残るのは式 、 、 (、)であり、これらは回収量を考えているので定義には当てはまる。

そこで、それらの式をもう少し詳しく考えてみる（式 は除く）。

式 、 は、同じだろうと思われ、これらは単純に供給量と回収量を比べたものだろう。しかし、次のような場合にどうなるだろう。例えば、「供給がないのに、ガスが帰ってきた」時の状況を適当な数値を上げて考えてみる。

供給量が0Lで、回収量が2Lとなったものとして計算式に代入すると、

$$\frac{\text{回収量}}{\text{供給量}} = \frac{2\text{ L}}{0\text{ L}} = \text{計算できません！}$$

となってしまう。しかし、回収されているのに、回収量が計算できないなんて...

さて、同じように式 にも当てはめてみると、この場合、「在庫の差」が必要であり、例えば、-4Lとしてみると

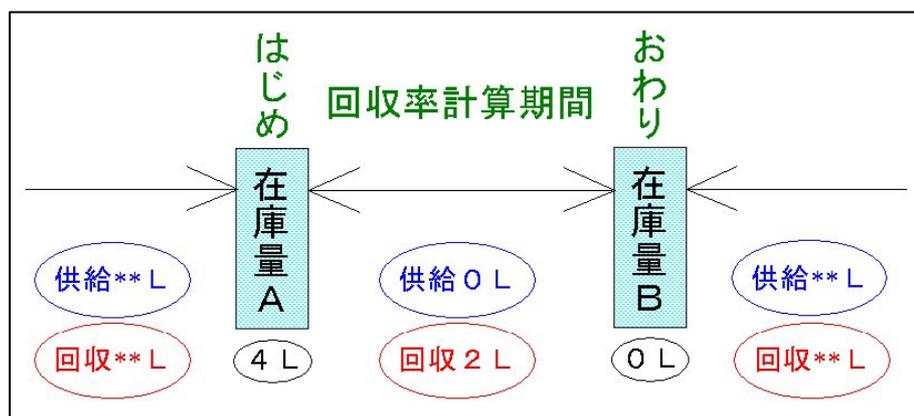
$$\frac{\text{回収量}}{\text{供給量} - \text{在庫の差}} = \frac{2\text{ L}}{0\text{ L} - (-4\text{ L})} = \frac{2}{4} = 0.5$$

となります。問題なく計算できます。

違いは、計算式中の「在庫の差」であり、これは回収率を計算するある期間の「初めと終わりに研究室が保有するヘリウムの量の差」です。

供給、回収、在庫がどのように関連しているのかは、図・2のようになっている。

回収率計算期間の前後に「在庫」が存在し、それらの在庫の間の「供給量」と「回収量」が回収率を計算する為の量となる。



図・2 回収率計算例

在庫が常にゼロであれば、式 、 でも問題ないが、2つの回収率計算期間をま

たくようにヘリウム容器を持っていたり、実験装置内に液体ヘリウムが残っていたりするの、ほぼ間違いなく在庫が存在すると思う。したがって、それらを加味しなければ、より正確な回収率を計算することはできないだろう。

問題点

さて、より正確な回収率を計算する為に必要なのは、在庫量だけだろうか。そんなことはないのである。供給する時には液体であり、回収する時には、ほとんどがガスであるゆえに単位を同じにしなければ意味のないものになってしまう。また、その時には、温度も非常に重要な要素になる。

ちなみに、液体ヘリウム 1L は、ヘリウムガス 0.738m³(15 、 1atm)となる。

回収率を計算する上で考えられる問題点は、

- 1) 温度換算は、何 にすればいいのか
- 2) 返却容器に残されている液体ヘリウムは、回収量に入るのかどうか
- 3) 回収されているガスの純度は、何%にすればいいのか

であろう。

これらは、どのようにすればいいのだろうか。

まず温度換算だが、回収されているガスの温度を測定して換算するのが一番良いのだが、なかなか大変なので、回収量を計測している流量計が設置されている場所の平均気温を元に換算してやれば良いと思われる。ちなみに物性研では液体をガスに変換しているが、係数に 0.738 を使用している。

次に返却された液体ヘリウムであるが、第一に回収の定義からすると、当然回収量となるべきものである。第二に、物性研のように、持ち出す時と回収する時で日にちが違っているので、回収率計算期間中に持出と返却が処理されるとは限らないから、当然持出時の量と回収時の量を別々に取り扱うべきなので、回収量となる。

右記の参考を見れば分かるように、返却量の取り扱いで計算式が随分変わってしまう。当然回収率も大きく変わってくることになる。

最後に回収純度は、正圧回収をしているところではほとんど低下することがない²ので、100%にしても問題ないと思われる。

参考 [式 の供給量、回収量が異なる例]

・ 持出と返却を一緒に考える場合

供給量 = 持出量 - 返却量
回収量 = ガス回収量

・ 持出と返却を別々に考える場合

供給量 = 持出量
回収量 = ガス回収量 + 返却量

最後に

以上のようなことから、勝手に以下の式を作ってみた。在庫や温度換算なども加味されていて完璧！？な式ではないかと自負してみたりする。皆様は、この式をどのように思うのか？率直なご意見・ご感想を討論会でお聞かせ下さい。

$$\text{回収率}[\%] = \frac{\text{ガス回収量}[\text{m}^3] + \text{液回収量}[\text{L}] \times \text{係数}}{\text{持出量}[\text{L}] \times \text{係数} + (\text{期間始めの在庫}[\text{m}^3] - \text{期間終わりの在庫}[\text{m}^3])} \times 100$$

ガス回収量 = 期間終わりの流量計の値 - 期間始めの流量計の値
係数は、0.738 (15)

注釈

- 1 液化室・低温センターの運営関連のアンケート
2002年10月に、他機関の運営方法などを知る為に低温ネットを通じて関係機関にお願いしたもの。
鷺山技官がアンケートの集計を行った。
- 2 真空ポンプなどで減圧して実験をしている場合は、この限りではないので注意が必要である。

参考

- 1) 液化室・低温センターの運営関連のアンケート集計結果