

# Annual Report 2015 Cryogenic Research Center The University of Tokyo

技術ノート

## ウェットかドライか？ 低温センターの TSCP 活動

pp. 120-125

東京大学 低温センター 液化供給部門、共同利用部門、研究開発部門  
寺岡 総一郎、戸田 亮、福山 寛

# 技術ノート

## ウェットかドライか？ 低温センターの TSCP 活動

低温センター・液化供給部門<sup>1</sup>、共同利用部門<sup>2</sup>、研究開発部門<sup>3</sup>

寺岡 総一郎<sup>1</sup>、戸田 亮<sup>2</sup>、福山 寛<sup>3</sup>

### 1. 概要

近年、液体ヘリウムの再充填作業が不要で簡便に  $T = 4 \text{ K}$  の極低温環境を実現できるパルス管冷凍機や GM 冷凍機など、いわゆる個別「冷凍機」の普及が急速に進んでいる。低温センターのようなヘリウム再液化施設がなく、液体ヘリウムが安定して安価に調達できない一般の企業や病院、研究機関では、冷凍機導入のメリットは大きい。しかし、冷凍機の消費電力は冷却能力に比してかなり大きく、その安易な導入は本学が進める地球環境負荷低減のための東大サステナブルキャンパスプロジェクト(TSCP)の理念に逆行するだけでなく、維持経費の点でも大きな財政負担となることを具体的に把握している研究者は意外と少ない。

そこで、現在、本郷地区キャンパスで低温センターから液体ヘリウムの供給を受けている浸漬式冷却装置(ウェット方式)をすべて冷凍機(ドライ方式)に置き換えた場合、キャンパス全体で年間どのくらい所要電力量と維持費が増加するかを試算することにした。そのためには、個々の装置の液体ヘリウム消費量や稼働時間を知る必要があるが、それらは千差万別であり、登録されている装置数は 160 台もあって、定量的に信頼できる試算を行うことは容易でない。そこで我々は、全装置を 4 つのカテゴリーに大別し、月初の装置毎のヘリウム残量報告データから装置カテゴリー別の平均の稼働月数を、実験室毎の寒剤供給状況から同じくヘリウム使用量を推定した。

試算の結果、現状のウェット方式が、TSCP、維持経費いずれの点でも圧倒的にメリットが大きく、キャンパス全体で年間 800 万 kWh 以上の節電、2 億円以上の節約になっていることがわかった。これを第 7 回低温センター研究交流会[1]で発表したところ、参加者から大きな反響をいただいた。本稿ではその具体的な算出方法について説明する。なお、この試算は特に記す以外、平成 27 年度における各種データに基づき、低温センターが寒剤供給する本郷・弥生・浅野の本郷地区 3 キャンパスに対して行ったものである。

### 2. 学内の浸漬式冷却装置の分類

まず、低温センターから液体ヘリウムの供給を受けている浸漬冷却方式の実験装置を、液体ヘリウム蒸発率、補充頻度、装置稼働率などによって次の A~D の 4 つのカテゴリーに大別する。

A : NMR 分析装置

B : PPMS<sup>a)</sup>、MPMS<sup>b)</sup>などの汎用物性測定装置

C : 温度可変インサート、超電導電磁石、<sup>3</sup>He冷凍機、希釈冷凍機などの一般クライオスタット

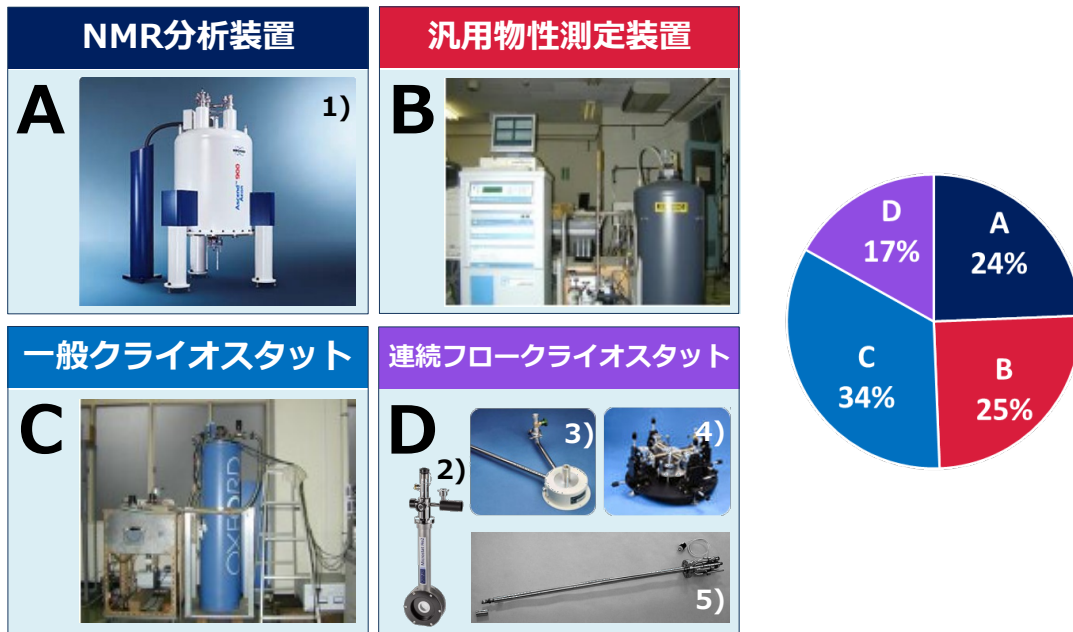
D : 連続フロークライオスタット

各カテゴリーの装置数はそれぞれ 39、40、54、27 台と比較的近い(図 1 参照)<sup>c)</sup>。

カテゴリー A の NMR 分析装置では、定常磁場発生用の超電導電磁石を冷却するのに液体ヘリ

a),b) Quantum Design 社の登録商標。

c) カテゴリー別装置台数は平成 26 年度のデータを用いた。



- 1) <https://www.bruker.com/products/mr/nmr/magnets/magnets.html> より転載
- 2) <http://www.oxford-instruments.jp/products/cryogenic-systems/> より転載
- 3),4) <http://www.janis.com/Products/productoverview/> より転載
- 5) <http://arscryo.com/> より転載

図1：学内で使用されている実験装置を、運転形態や断熱性能などの違いからA～Dの4つのカテゴリーに分類する。右はカテゴリー別の台数分布。

ウムを用いる。近年の液体窒素シールド式 NMR クライオスタットの液体ヘリウム蒸発率の典型的な値は 10 cc/h 程度と低い。通年冷却で使用され、液体ヘリウムの補充は 1 ヶ月～数ヶ月に 1 回程度である。なお、800 MHz の NMR 分析装置は高磁場超電導電磁石を 2.2 K に減圧冷却（ラムダ冷却）するオペレーションがなされるので、減圧しないタイプより液体ヘリウムの消費量が多い。そのためこれは次のカテゴリーBに含めた。

カテゴリーBの汎用物性測定装置はPPMS (Physical Property Measurement System)、MPMS (Magnetic Property Measurement System)に代表される電気伝導率、比熱、熱伝導率、磁化率等の物性測定を一台で行うことができる装置で、一研究グループで複数台所有する例も少なくない。装置稼働率が高いことに加えて準低損失型のクライオスタットを採用していることから、保守作業に伴う休止期間を除いてほぼ通年冷却される場合が多い。液体ヘリウムの補充は印加磁場の強さや掃引の仕方にもよるが、週に1～2回程度である。

カテゴリーCの一般クライオスタットは大抵、冷凍機本体や超電導電磁石を上方に抜き取ることができるオープンデューワー方式で、特殊なケーブル追加や超電導電磁石の更新など実験目的に応じた仕様変更が容易で柔軟性に富む反面、液体ヘリウム蒸発率はカテゴリーBと比べて多い。そのため稼働率が低い利用例もある一方、研究分野によっては数ヶ月から1年単位で連続冷却することも少なくない。液体ヘリウムの補充は運転方法や機種によってかなり異なるが、週に2～3回程度である。

カテゴリーDの連続フロークライオスタットには、光学実験用クライオスタット、光学顕微鏡

用冷却ステージ、低温プローバ、超高真空用 XYZ ステージ(マニピュレータ)などが相当する。液体ヘリウム可搬容器とトランスファーチューブ(移送管)で接続し、クライオスタット出口側をポンプ排気するなどして低温ヘリウムガスと試料ステージを熱交換させて冷却するタイプで、液体ヘリウム槽は有しない。実験のたびに室温から冷却する。定常状態での典型的な液体ヘリウム消費量は 0.5~1.0 L/h である。

### 3. 装置カテゴリー別の年間稼働月数の評価

既存の浸漬式冷却装置をすべて冷凍機に置き換えたときの消費電力量を試算するには、装置カテゴリー別の年間稼働時間(月数)を何らかの方法で評価する必要がある。低温センターでは、毎月初、ユーザーに各装置内の液体ヘリウム残量(装置在庫量)をガスデータとして報告していただいている。「装置在庫量」が有限値なら前月その装置は稼働状態、ゼロなら休止状態だったと考え、個別装置の年間稼働月数( $M_i$ :  $i$ は各装置の通番)を推定した。統計性を向上させるため、ここでは当該装置の登録開始時から平成 27 年度末までの全データを参照した。その結果、カテゴリー A、B、C の平均の年間稼働月数( $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$ )は図 2(左)に示すようにそれぞれ 11.2、10.5、3.1 月となった。一方、連続フロークライオスタットという特性上、カテゴリー D にこの方法は使えないので(液体ヘリウムの装置内在庫は常にゼロ)、カテゴリー D の装置しか使用しない実験室への液体ヘリウム供給実績をもとにして  $M_D = 0.9$  月と推定した。

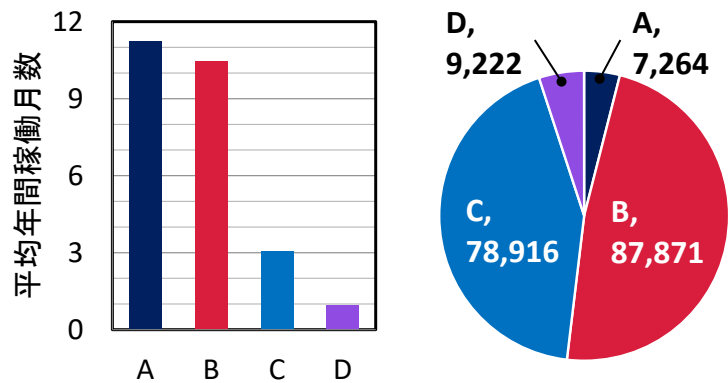


図 2 : 本郷地区キャンパス内浸漬冷却式装置のカテゴリー別の平均年間稼働月数(左)および液体ヘリウム年間使用量(単位リットル)(右)。

### 4. 浸漬式冷却(ウェット)方式の液体ヘリウム使用料金と消費電力

次に、装置カテゴリー別の平均の年間液体ヘリウム使用量を推定する方法を説明する。低温センターでは実験装置毎ではなく実験室(使用場所)毎にヘリウム使用量(=配達量-回収量)を集計しており、一つの実験室で複数のカテゴリーの装置が混在している場合も多く、同じカテゴリー内でも装置によって蒸発量も運転形態も異なるので、その推定には少し工夫がいる。我々が知りたいのは個々の実験室や装置の値ではないので、カテゴリー別に平均した装置 1 台あたりの「通年」液体ヘリウム使用量( $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ ,  $V_D$ )を以下に説明する繰り返し計算から求めることにした。ここで、通年使用量とは「仮に」その装置を通年運転したときに使用する液体ヘリウム量のことである。

例えば、ある実験室には装置 1(カテゴリー A)と装置 2(カテゴリー B)のみがあるとすると。この実験室の液体ヘリウム使用量  $v_{FY}$  は既知であり、それぞれの装置の年間稼働月数  $m_{1A}$ ,  $m_{2B}$  も前章で説明したように装置在庫量データから推定できている。いま  $V_A$ ,  $V_B$  に適当な初期値を与えれば、次の按分式を使って  $v_{FY}$  から個別装置の「年間」使用量  $v_{1A}$ ,  $v_{2B}$  に換算できる。

$$v_{1A} = v_{FY} \times (m_{1A} \times V_A) / (m_{1A} \times V_A + m_{2B} \times V_B)$$

$$v_{2B} = v_{FY} \times (m_{2B} \times V_B) / (m_{1A} \times V_A + m_{2B} \times V_B)$$

他のカテゴリーや任意の台数がある実験室についても同様に書き下せる。これを学内すべての個別装置  $i$  に対して行い、それぞれの年間使用量  $v_i$  を算出して、次式を使ってカテゴリー別の通年使用量  $V_A', V_B', V_C', V_D'$  を計算してみる。

$$V_{A,B,C,D}' = \sum [(12/m_i) \times v_i] / N_{A,B,C,D}$$

和はカテゴリーA, B, C, D 毎に  $i$  について取る。ここで、 $N_A \sim N_D$  はカテゴリー毎の装置総数である。こうして求めた  $V_A' \sim V_D'$  を新しい初期値として上記の計算を再び行う。これを 10 回も繰り返せば結果はよく収束し、最も確からしい  $V_A \sim V_D$  の値を求めることができる。収束した  $V_A \sim V_D$  に年間平均稼働月数 ( $M_A \sim M_D$ ) を 12 で除した稼働率を乗ずれば、最終的に求めたい装置カテゴリー別 1 台あたりの年間液体ヘリウム使用量が得られる。結果を図 2 (右) に示す。それに、平成 27 年度の液体ヘリウム平均単価 311 円/L (平均回収率 91.0% に対応) をかければ、同じく年間寒剤使用料金を算出することができる。表 1 にはこれを「装置 1 台の維持費」としてカテゴリー別に示した。

浸漬式の消費電力は、低温センター内で回収ヘリウムガスを再液化するときに使う回収設備や液化機の運転によるもので、いずれも圧縮機の消費が主である。平成 27 年度の消費電力量は 49 万 kWh である。表 1 に記した装置カテゴリー別の電力使用量(電力量)は、49 万 kWh を上記で求めた寒剤使用量で按分した値である。なお、低温センターの場合、この電力料金も寒剤使用料金の中に含まれており、ユーザーが負担している。

| 装置カテゴリー             | 装置台数 | 浸漬冷却方式<br>(低温センター平成 27 年度実績) |                             |                      | 冷凍機方式<br>(パルス管での試算) |                             |                      |
|---------------------|------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------|
|                     |      | 電力量<br>(千 kWh/年)             | 維持費 <sup>6)</sup><br>(千円/年) | 装置 1 台の維持費<br>(千円/年) | 電力量<br>(千 kWh/年)    | 維持費 <sup>7)</sup><br>(千円/年) | 装置 1 台の維持費<br>(千円/年) |
| <b>A</b>            | 39   | 19                           | 2,259                       | 58                   | 2,940               | 82,700                      | 2,120                |
| <b>B</b>            | 40   | 234                          | 27,328                      | 683                  | 3,890 <sup>8)</sup> | 100,100                     | 2,500                |
| <b>C</b>            | 54   | 210                          | 24,543                      | 455                  | 1,540               | 70,100                      | 1,300                |
| <b>D</b>            | 27   | 24                           | 2,868                       | 106                  | 240                 | 25,700                      | 950                  |
| 本郷地区<br>キャンパス<br>合計 | 160  | 487                          | 56,998                      |                      | 8,610               | 278,600                     |                      |

6) 寒剤費(電力料金や損失ヘリウムガス補填代金を含む)と同等。

7) 電気料金と保守点検費の合計。

8) 水冷チラー付再凝縮タイプの PPMS と MPMS のカタログ値に基づく。

表 1 : 低温センターが再液化する液体ヘリウムを利用する現行の浸漬冷却方式による本郷地区キャンパス全体の消費電力量と維持費の平成 27 年度実績値と、キャンパス内実験装置をすべて液体ヘリウムの補充を要しないパルス管冷凍機に置き換えた場合(冷凍機方式)の消費電力量と維持費の試算。



## 5. 冷凍機(ドライ)方式の消費電力と維持費

低温センターに登録されている学内の全ての浸漬式冷却装置を、すべて冷凍機での冷却に置き換えた場合の消費電力と維持費を試算してみる。冷凍機としては  $T=4\text{ K}$  での冷却力が  $1.0\text{ W}$  のパルス管冷凍機を想定し、代表的なメーカー2社(C社とS社)の製品を半数ずつ使用するとした。消費電力は両メーカーのカタログ値を用いたが、そのほとんどは圧縮機ユニットの消費(7.9, 7.2 kWh)である。両社とも水冷式圧縮機なので、これに冷却水用チラーの電力(5.2 kWh)が加わる。年間稼働月数は第3章で求めた値をそのまま使う。こうして装置カテゴリー別に試算した年間消費電力量を表1に示す。いずれのカテゴリーも桁違いに電力量が増し、キャンパス全体では800万 kWh 以上増加することが分かる。TSCPの観点からは決して容認できない大きな数字である。

上記の試算方法について少し補足する。カテゴリーAのNMR分析装置を冷凍機式に置き換える方法には、冷凍機がデューワー上部に直置きされたいわゆるゼロボイル型と冷凍機を装置外に別置きした再凝縮装置追加型の2通りある。ゼロボイル型の場合、室温からの熱流入は液体窒素槽の代わりに冷凍機の1stステージの冷却力で遮蔽するのでデューワーの構造が浸漬式とまったく異なる。液体窒素補充の必要がなく運転労力が少ない一方、冷凍機への熱負荷が大きいので消費電力のより大きい大容量の冷凍機を使う必要がある。一方、再凝縮装置追加型に置き換える場合は、既存の浸漬式装置に比較的短いトランスファーチューブで冷凍機再凝縮ユニットを外部連結するので、ゼロボイル型より改造費が安く、液体窒素シールドを併用するのでより小容量の冷凍機を使うことができる。したがって、カテゴリーAだけは  $0.5\text{ W}@4\text{ K}$  級の冷凍機で試算し、そのうち半数の研究室ではさらに消費電力の少ない空冷式圧縮機ユニットをもつ製品(C社)に置き換えるとした。

個別冷凍機に置き換えた場合の維持費を考えると、忘れてならないのは、電気料金の他に1台あたり年間50~200万円の機器保守点検費用がかかることである(運転時間に応じて交換する消耗品代を含む)。具体的な金額は装置カテゴリー、機種、保守契約内容によって大きく異なるので試算が難しいが、表1では、カテゴリーに依らず一律1台あたり年間80万円と少なめに見積もって維持費に含めた。それでも表1にあるように、キャンパス全体では浸漬方式に比べて2億円以上、維持費が増すという試算結果となる。

参考までに、装置1台当たりの両方式による平均年間維持費を図3にグラフでも比較しておく。電力の点でも維持費の点でも、すべてのカテゴリーでウェット方式の削減効果が極めて大きい。

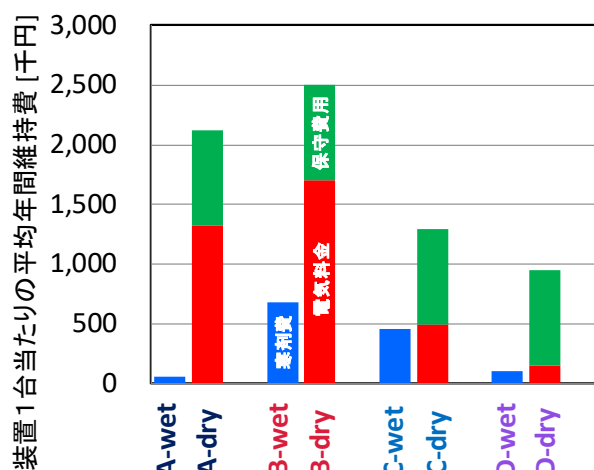


図3：装置カテゴリー別1台あたりの浸漬(wet)方式と冷凍機(dry)方式の年間維持費の比較。

## 6. まとめ

本学でも電気料金の部局負担から研究室負担への移行が進みつつある現在、これと似たような試算を研究室単位でされた方も多いであろう。本稿は、本郷地区キャンパスを例にとり、それをキャンパス全体に対してできるだけ現実的で定量的な試算を行ったものである。その結果、冒頭でも述べたとおり、ヘリウムを低温センターで再液化する現行のリサイクルシステム(浸漬冷却あるいはウェット方式)は、これを装置個別の冷凍機に代替した場合(ドライ方式)に比べ、本郷地区の3キャンパスだけでも年間800万kWh以上の節電、2億円以上の経費節約になっていることがわかった。一般に業務や機能を集約すれば節電、節約効果が期待できるものだが、これほど大きな集約効果(電力量が1/18、経費が1/5)がある分野もめずらしいのではなかろうか。今日、極低温を利用する先端実験装置は自然科学のほとんどの分野にユビキタスに行き渡っており、大学のようにそれが大規模に集積した事業所では、ヘリウムリサイクルシステムのメリットが一層増幅されるのである。このメリットは、液体ヘリウムの再充填作業に要する研究者の労力と時間を補って余りあると思うし、何よりCO<sub>2</sub>排出量を抑えることは大学が社会に率先して取り組むべき責務であろう。ヘリウムリサイクルシステムはTSCP活動の優等生と言える。

## 参考文献

- [1] 寺岡 総一郎、戸田 亮、福山 寛, 第7回低温センター研究交流会概要集 p66 (2015).