

## 片平地区ヘリウム液化システムの更新

金属材料研究所・極低温科学センター 野島 勉 (t.nojima@tohoku.ac.jp)  
細倉和則、緒方亜里

### 1. はじめに

極低温科学センター低温科学部(片平地区)では、2021年12月から2022年3月にかけて、ヘリウム液化システムの大規模な更新工事を行った。このシステムは、1971年の低温センター発足時に導入されたものから数えて4代目(1952年、日本で最初に本学金属材料研究所へ導入されたヘリウム液化機を含めると5代目)となる[1,2]。前回(3代目)の更新は2009年度末であり[3]、その後12年目半ばにして、今回の更新が行われたことになる。ヘリウム液化機およびその周辺機器の寿命はフル稼働状況を続けると、概ね10年と言われているが、実際に3代目の液化機は、導入直後から、年間供給量10万~16万リットルといった高い稼働率を維持したせいか、9年目を迎えた2018年くらいから、

小さな故障が多発するようになった。学内の関係者の多大な協力(予算申請に向けたアンケートを含む低温関連研究者からの資料提供、および事務の方の予算獲得に向けた精力的な働き)のおかげで、4年間にわたった予算申請が認められ、今回の更新が実現した。

本稿では、新しくなった4代目ヘリウム液化システムの特徴について、特に技術的改善点に焦点をあてて紹介する。

### 2. 更新したヘリウム液化システムの概要

図1に更新された低温科学部のヘリウム液化システムの概要図を示す。ヘリウム液化システムは、大きく分けて(i)ヘリウム液化のための機器から成る「液化部」、(ii)ガス回収およびその貯蔵に係る「回

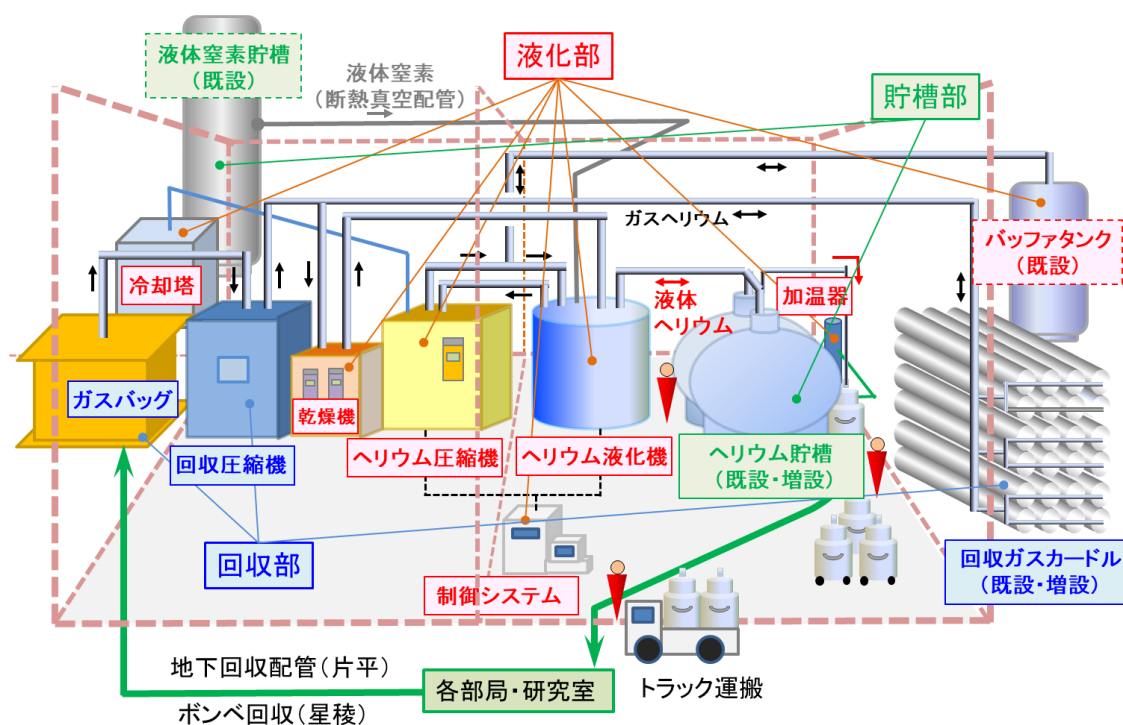


図1 更新したヘリウム液化システム(片平地区)の概要図

収部」、(iii)作製した液体ヘリウムを一時的に貯めておく「貯槽部」といった3つのセクションで構成される。今回の更新では、これらの内、液体窒素貯槽と液化用バッファタンク（液化機運転時の圧力安定性を維持するためのタンク）を除く、すべてのセクションでの機器を更新もしくは増設することができた。

実際に導入されたヘリウム液化機本体と2台の貯槽、ヘリウム液化圧縮機、回収圧縮機といった主要機器の写真を図2(a)-(c)にそれぞれ示す。ヘリウム液化機本体は前回と同じ型名の L280 型（Linde 社製）であるが、液化用タービン型膨張エンジンや内部精製機に改良が加えられている。さらに、新たな機能として後述する EJ モードと JT モードという2種類の液化運転方式が選べるようになっている。この液化機にインバータ方式を採用した液化用圧縮機（Keizer 社製）を組み合わせることにより、前回より20%減の200 kWhの電力消費で15%増の230 L/hの液化能力（99%純度のガスで運転時）を持つ高効率な液化機の構成となっている。

回収用圧縮機（田邊空気機械製作所製）は、最大圧力14.7 MPa、130 m<sup>3</sup>/h（大気圧換算）での処理能力を有し、1時間あたり最大約200リットルの液体ヘリウムの蒸発に対応可能である。比較的大型であることから、運転時の騒音低減と排熱効率を重視して水冷式を採用した。またこれまで問題となっていた回収圧縮機の運転時に発生する建物の振動を抑えるため、床に新規の基礎工事を行った後、圧縮機を据え付けた。回収ガスカードルも既設の56本に加えて16本増設されている。

液体ヘリウム貯槽は、既設の5000 L容器に加え新たに5000 L容器を増設した。後述するように、将来ヘリウムの輸入が困難になった場合でも、一年程度は学内供給が継続できるような貯槽量を目指したものである。両貯槽ともに内部にヘリウムポンプが内蔵されており、これらを使うことで100 Lの小分け容器への汲み込みを、約5分で完了できる。液化機の能力に加えて、この汲み込み時の利便性向上は、供給量の更なる増加への対応および技術職員の労力低減の決め手となるため、今回の更

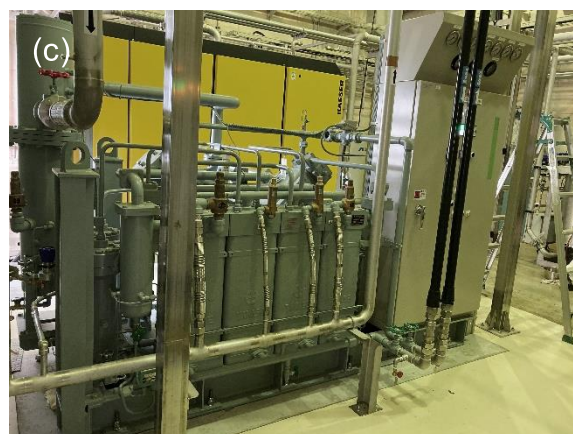


図2 更新した (a) ヘリウム液化機と貯槽、(b) ヘリウム液化圧縮機、(c) 回収圧縮機

新で重視した部分の一つである。

このような数字上のスペックだけでなく、今回のヘリウム液化システムでは、様々な細かいソフト・ハード面で改良・能力強化が図られた。次章に新システムの特徴としてその内容を紹介する。

### 3. 新システムの特徴

#### 3.1 2種類の運転方式：EJモードとJTモード

大学等の研究機関で使われているヘリウム液化機の多くでは、2段の膨張エンジンを用いた断熱膨張に

よる冷却と、ジュールトムソン (JT) 効果による自由膨張 (ここで最終的な液化が起こる) を組み合わせた機構によりヘリウムの液化を行っている (図3)。この動作原理の基本概念は 1952 年当時のコリンズ式液化機から変わっていない [2]。今回更新した液化機では、図3 のガス回路図 (右側) に示すよう、2つの JT 弁から構成される2種類の液化運転方式を持つ。

一つはイジェクター (Ejector : EJ) モードと呼ばれる方式である。この方式では、JT 弁で液化されたヘリウムが、イジェクターを通して噴射されながら液化機内部にある、気液分離器に一旦貯まり、ここから低差圧で貯槽へ移送される。移送の際、発生する貯槽内 (ロス分) の蒸発ガスは、イジェクター効果により貯槽から吸いあげられ、一部は気液分離器、その他は液化機のガス回路に戻され再液化される構造となる。この工程により、液化中においても貯槽内の圧力がほぼ大気圧 (ゲージ圧で 0.01 MPa 以下) に保たれることになる。貯槽で汲み込み時に働くヘリウムポンプは、液体の内圧に敏感な (0.02 MPa 程度で働かなくなる) ため、EJ モードはヘリウムポンプを用いて、液化運転中に小分け容器に充填する場合に不可欠な方式である。

もう一つは、JT モードと呼ばれるもので、JT 弁から直接貯槽に送液される方式である (図3 中の橙線)。

この方式では蒸発ガスのエジェクターによる吸い上げがないので、液化時の貯槽の内圧が 0.02-0.03 MPa 程度に上昇することになる。この内圧は液化運転中にポンプを使わず差圧式で貯槽から小分け容器等に汲む場合にむしろ好都合な圧力となる。JT モードのもう一つの特徴は、気液分離器を通らない (貯槽からの戻りガスを冷却しない) ため、液化効率がさらに上昇することである。実際、初期試験では EJ モードで 230 L/h であったヘリウム液化能力は 260 L/h (高純度ヘリウムガスを使うと 280 L/h) まで上昇した。

この2つの運転方式があることにより、液化しながら汲み込みをする定常運転時は、小分け容器への汲み込み時間を重視した EJ モード、貯槽のみに短時間で貯めこみたい時やヘリウム液化中もう一つの貯槽へ移送したい時 (この場合、貯槽間の移送は差圧方式を利用)、ヘリウムポンプが故障した時等の非定常運転時に JT モードを使用する、というケースバイケースでの使い分けが可能となる。また2つの JT 弁を同時に使って、EJ モードの開始時、JT モード用のラインから少しヘリウムを流し、移送管を予冷するという裏技的な使い方もあり、これが貯槽への移送中のロス分まで含めた液化効率の向上に一役買っている。

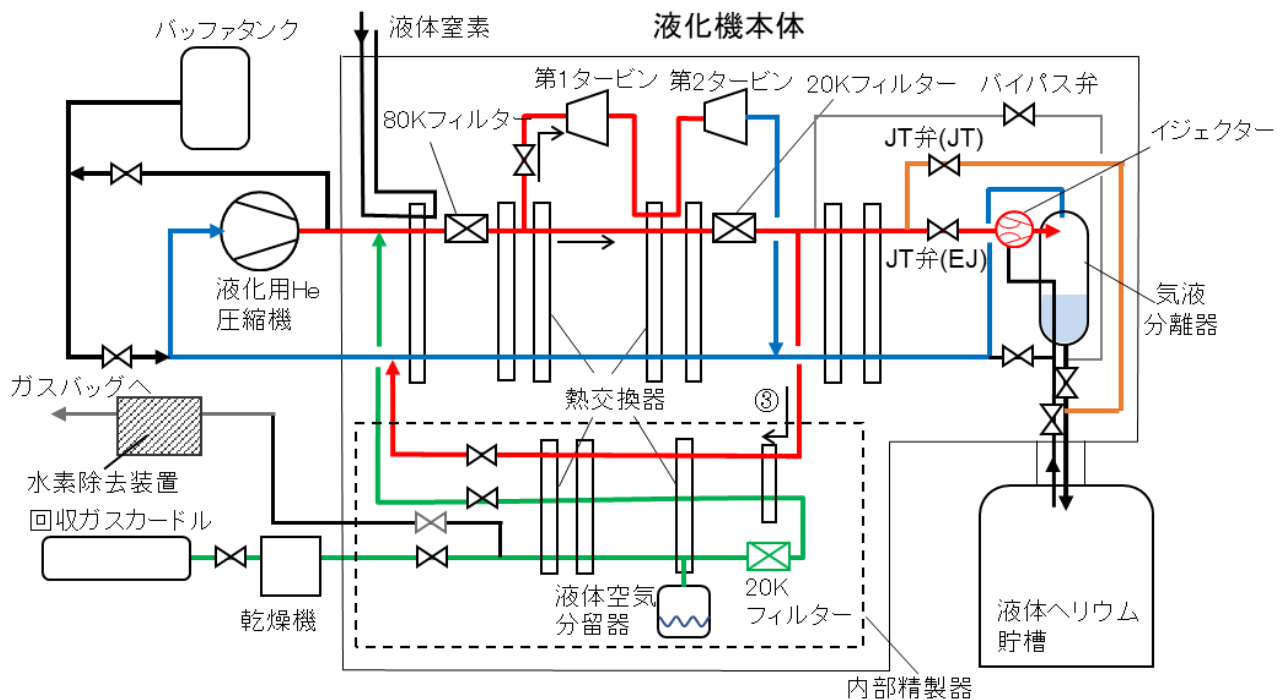


図3 更新したヘリウム液化機 (片平地区) のガス回路概略図

### 3.2 小分け容器自動充てんシステムの進化

前章および前節でも述べたように、本ヘリウム液化システムの一つの特徴は、貯槽内にヘリウムポンプを導入し、短時間での小分け容器への汲み込みを可能にしていることである。しかしこれまでの液化システムでは、充填の完全な自動化は実現できていなかった。自動充てんシステムは、図4のように小分け容器をロードセルにのせ、その重量を計測する構造になっている。従来の方式は、満タン重量になったら汲み込みを止めるという方式であった。しかし容器重量に比べ液体ヘリウムの重量の方が軽く（ヘリウムの密度が小さいため）誤差が大きいこと、また汲み込み時に上昇する圧力変動によって実質的にロードセルが感じる重さが増えることといった理由で、結果的に誤作動をしてしまう問題を抱えていた[4]。さらに容器ごとに満タン重量を装置のメモリーに覚えさせなければならないという煩雑さもあった。

この欠点を改善するため、今回の更新では、満タン時に対する2種類の判定方式を用いた。一つは計測された重量の時間微分値が一定になるという重量の判定、もう一つは満タン時に必ず容器圧力が上昇することを利用した圧力値による判定である。このどちらかの条件が満たされると汲み込み弁を閉じるという論理回路をつくることで、前回と同じハードウェア構成

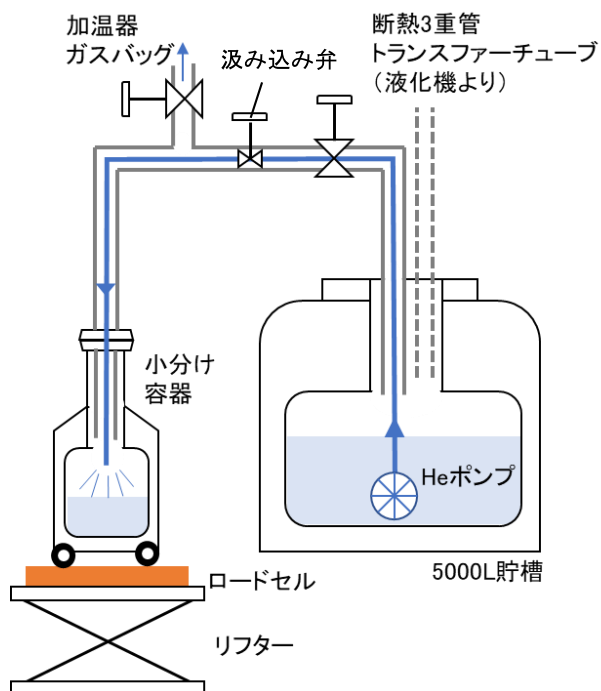


図4 液体ヘリウム自動充てんシステムの概略図

で、ソフト的に安定な自動充てんシステムの動作が可能となった。さらにこの方法では、容器の満タン重量を必要としないため、今後新たな小分け容器を購入しても、初期重量設定なしですぐ使えるという利点もあり、充てん作業に対する利便性は向上した。

### 3.3 精製運転モードの改善

ユーザーにより使用され蒸発した回収ヘリウムガスには、多少なりともヘリウム以外の不純物が含まれる（本学片平青陵地区の平均的な回収ヘリウムガスの純度は99%程度であり、不純物の主成分は空気である）。これが膨張エンジンを含む高压液化ラインに入ると、少量でも固化して深刻な物理的故障を引きおこす。このため、本システムを含む最近のヘリウム液化機の多くには、内部精製器が附属されている（図3の点線で囲まれた部分）。この内部精製器内では精製過程（冷却して不純物を固化し残った高純度ヘリウムを液化高压ラインに入れる過程）と加温再生過程（精製機を暖めて不純物を含むガスを液化機の外に出す過程）という2つの過程が常に繰り返されている。

これまでのヘリウム液化システムでは、液化高压ラインにつながるバッファタンクの圧力の時間変化を計測し、(i)昇圧時の圧力がある上限値になるまでを精製過程とし、(ii)その後、すぐに加温再生過程に移行する（高压ラインへの精製ヘリウムガス供給を止め、加温しながらバッファタンク圧力がある下限値になるまで不純物を排出する）、といういわゆる三角型の制御方法をとっていた（図5(a)に示すようバッファタンクの圧力の時間依存性が三角の形となる）。今回更新された液化機では、バッファタンクだけでなく、精製機内の圧力（不純物が溜まると徐々に上昇する）を計測し、精製機内の圧力がある基準圧力になるまで、バッファタンクの高圧状態を保つという台形型の制御ができるようになっている（図5(b)に示すよう圧力の時間依存性が台形の形となる）。これにより、これまでと同じヘリウム液化圧縮機の性能で、より長い実効的な液化時間が得られることになり、これが高い液化能力につながっている。

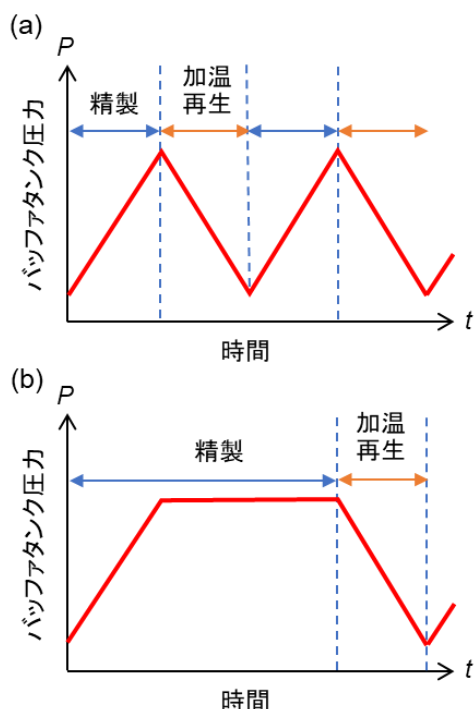


図 5 (a) 旧液化機と(b) 新液化機における内部精製器の運転モードの比較 (精製および加温再生過程はバッファタンク圧力の時間変化に反映される)

### 3.4 液体・ガスヘリウム貯蔵力の強化

今回の更新で、5000Lの液体ヘリウム貯槽、回収ガス貯蔵用の長尺カードル（大気圧の容量 500 L）を 16 本増設した（図 6）。これにより液体ヘリウム貯槽と回収ガスカードルを加えたヘリウム貯蔵可能総量は液体換算で 17500L となった。低温科学部での年間購入量に相当する、この貯蔵能力の大幅な向上は、ヘリウムの深刻な調達難の際も学内供給が比較的長期に持続可能になることを図ったものである。しかし、本システム完成から本稿を書いている現在においても、長期にわたる世界的なヘリウム不足の状況が続いており[5]、まだ貯蔵空間を満たすのに十分なヘリウムが入手できていない（現状では総量の少ないヘリウムガスの液化と回収を自転車操業で回している状況である）。今後、機会があるたびにヘリウムガス購入を最優先し、この貯蔵能力の効果をフルに発揮できる状態にしたいと考えている。

### 3.5 水素除去に関する仕組み

更新前のヘリウム液化システムでは、回収ガス中の不純物に水素が含まれる場合、内部精製機で



図 6 増設された回収ヘリウムガス長尺カードル群

これを取り切れず、固体となった水素が液化機本体の液化ラインに蓄積し、液体ヘリウム貯槽、小分け容器へと移った後、ユーザーの装置を閉塞させるという、いわゆる水素問題が発生した[6-8]。同様な事例は、日本だけでなく世界中で起こり、筆者のところにも多くの問い合わせがあったことは記憶に新しい。学内のヘリウム回収ラインのどこから水素が混入するかということに関しては、例えば大気中やポンプオイルからといった様々な予測があるが、現在でもそれほど明確でない。ただ回収ヘリウムガス中に水素は少量でも必ずあるものとして、この除去に十分対処できる仕組みが新システムでは強く要求された。

今回更新された液化機の内部精製器では、20 K フィルターが復活した（図 3 中の緑線）。これにより回収ガス中の水素は内部精製機中で固体もしくは液体となってほとんど止まり、高圧ヘリウム液化ライン中（図 3 赤線）へ侵入できなくなった。加温再生過程で発生する水素を含んだヘリウムガスは、2020 年度に導入した水素除去装置を流用し[9]、ここを通過してガスバッグへ回収される構造とした（図 3 に位置を示す）。この水素除去装置は 2014 年に極低温物理学部（青葉山地区）に導入されたものと同じ吸着式の構造を持つ（サイズは一回り小さい）[7]。これにより、ヘリウムガスを損失することなく、内部精製器の段階で水素を効率的に取り除くことが可能となった。新システムでは当面は水素問題を心配する必要はないであろう。

#### 4. まとめ

極低温科学センター低温科学部（片平地区）で2021年度に更新されたヘリウム液化システムの概要と新たな特徴について紹介した。2022年3月に完成後、初期設定に係る調整に時間を要しながらも、システムはほぼ順調に稼働していると言ってよい。しかし、昨年度より続く、国内でのヘリウム調達難により、肝心のヘリウムガスの購入がままならず（実際、試運転用のヘリウム確保にも苦心した）、新システムのポテンシャルを十分に発揮できていないのが実に歯がゆいところである。この原稿を書いている現在も、ヘリウムの価格や電気料金の高騰が続いており、今後、学内の低温研究が縮小してしまうのではないかと危惧している。一日もはやく、現在の世界的なヘリウム不足の複合的要因（ヘリウムプラントの不調、新型コロナウイルス感染症や国際紛争による流通の遅延等々）が解決され、2018年以前の状況まで戻ることを心から願って止まない。

大規模なヘリウム液化システム更新のため、2021年12月から2022年3月の長期にわたって、片平地区のヘリウム供給と回収を完全に停止した。停止期間中、ユーザーの皆様には多大なご迷惑をおかけした。センターが中心となって外部からのヘリウムが購入できるよう手配はさせていただいたが、価格的にも量的にもとても満足いくものではなかったと感じている。ここにお詫びを申し上げたい。にもかかわらず、不平不満を言うこともなく、完成まで辛抱強く待っていただいたことに感謝を申し上げたい。

今回は、床の基礎工事や全ての機器につながる冷却系配管の更新工事、といったシステムの根本に係る変更があったため、全面停止を余儀なくされた。次の更新（さらに10年以上後になるとは思うが）では青葉山地区のセンターとの連携も活用しながら、セクション毎の更新をして、停止期間が最小限に抑えられるようにしたい。そのための綿密な準備を今からスタートしていこうと考えている。

#### 参考文献

- [1] 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 22 (2021)p. 31.
- [2] 野島勉, 伝熱 Vol. 61, No. 255, p. 46 (2022).  
[https://www.htsj.or.jp/wp/media/2022\\_4.pdf](https://www.htsj.or.jp/wp/media/2022_4.pdf)  
又は  
[http://www.wattandedison.com/hito\\_to\\_netsu\\_9.pdf](http://www.wattandedison.com/hito_to_netsu_9.pdf)
- [3] 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 11 (2010)p. 1.
- [4] 中村慎太郎, 丹野伸哉, 細倉和則, 緒方亜里, 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 11 (2010)p. 11.
- [5] 日本物理学会ホームページでの声明,  
<https://www.jps.or.jp/information/2019/12/helium.php>
- [6] 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 14 (2013)p. 11.
- [7] 木村憲彰, 菊池将史, 森山弘章, 吹上菜穂, 極低温科学センターだより vol. 17 (2016)p. 17.
- [8] 野島 勉, 木村憲彰, 固体物理 Vol.52, No.1, 47 (2017).
- [9] 「最近のできごと」, 極低温科学センターだより vol.21 (2020)p. 19.