



季刊誌

NO. 15

# J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

2020

インタビュー

COMET実験用超伝導磁石システム

吉田誠 飯尾雅実 岡村崇弘

ノーベル賞級の研究を支える

ニユートリノ超伝導ビームラインの建設と維持

荻津透 槇田康博 大畠洋克 佐々木憲一

J-PARCでの低温実験を可能にする

液体ヘリウム回収・供給設備の建設と維持

飯田真久 大畠洋克

特集

## J-PARCの 実験を支える 極低温技術

# J-PARCの実験を支える 極低温技術

J-PARCのメインリングで加速された陽子は、300km先のニュートリノ検出器・スーパーカミオカンデへと向きを変えニュートリノを生成するターゲットステーションに入射されます。このニュートリノビームラインには超伝導磁石が150mにわたって配置されていますが、そこでは絶対零度近くまで冷却された超伝導磁石が30GeVの陽子ビームを10cmに満たない距離で囲み、メインリングより小さな曲率でビームの向きをコントロールしています。電気抵抗がゼロの超伝導コイルは、銅コイルより大きな電流が流れて強い電磁石になる上、励磁電源の電力も小さくてすむのでニュートリノビームラインに採用されました。

このように効率的に高磁場を発生する装置として超伝導磁石は、卓上サイズからメインリング全体を超伝導化したものまで幅広く普及しています。ここJ-PARCでも、ニュートリノ以外の場所、物質・生命科学実験施設やハドロン実験施設でビーム輸送用や測定器用として超伝導磁石が活躍しています。

一方で、超伝導磁石は、コイルを超伝導状態となる極低温まで冷却しなければいけません。スイッチを入れるだけの蓄冷式冷凍機を内部に組み込んだ超伝導磁石がある一方、冷凍機の振動を嫌う実験装置の超伝導磁石では、液体ヘリウムを外部から供給す

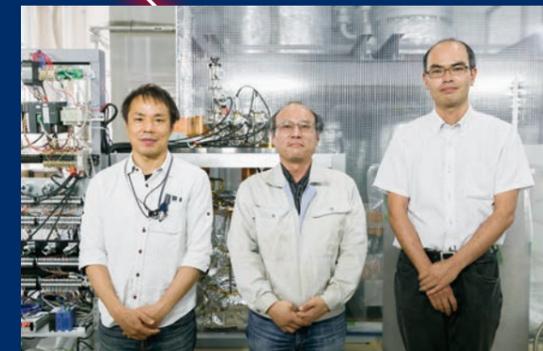
る必要があります。またニュートリノビームライン用超伝導磁石のように負荷の大きな大型の超伝導磁石システムでは、ヘリウム液化機タイプの冷凍機が専属で整備されています。ヘリウム液化機は圧縮機、膨張タービン、熱交換器、貯液槽、精製器及び自動弁などの様々な計装品で構成される複雑な設備で、その運転と保守には熟練を要します。

液体ヘリウムの需要は超伝導磁石だけに限りません。様々なビーム利用実験の現場では、極低温下まで試料検体や高感度のセンサー\*を冷却するために液体ヘリウムが必要とされています。実験装置によっては、供給された液体ヘリウム温度(-269℃)を基点に減圧、希釈や断熱消磁など様々な手法を用いてさらに低い温度「超低温」環境を作りだしています。J-PARCでは様々な用途での液体ヘリウムの需要が年間20000リットル程度ほどあり、ヘリウム液化供給システムを整備して、昨今のヘリウム不足にも動じる事無く、その需要に応じています。

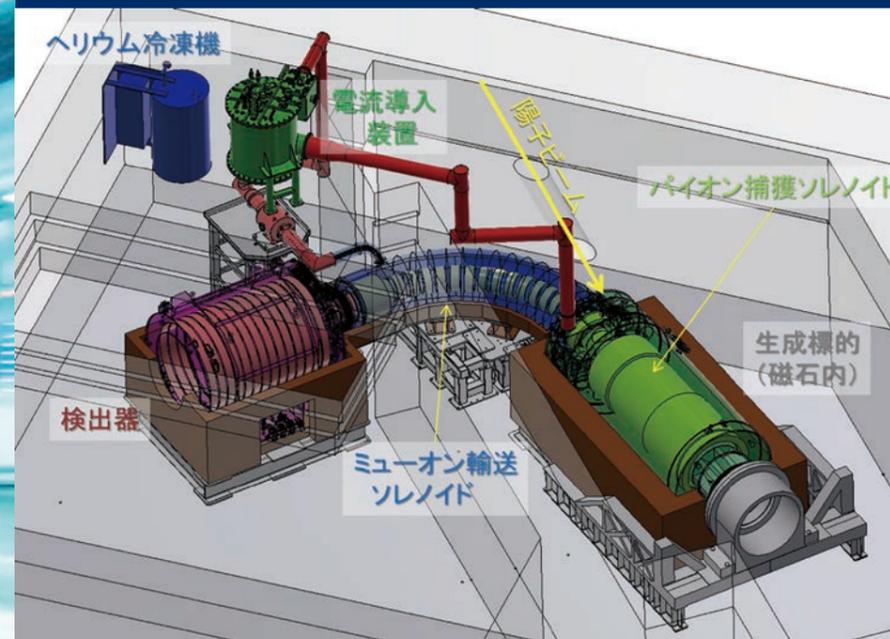
本号では、超伝導磁石をはじめとする極低温で性能を発揮する装置の開発者、極低温環境をつくる大規模で複雑なインフラの維持に精力を注ぐJ-PARC低温セクションの技術者にフォーカスをあてます。

\*例えば超伝導量子干渉計 (superconducting quantum interference device, SQUID) は非常に感度の高い磁気センサーとなる。他に超伝導相の転移を利用した熱量センサー (Transition Edge Sensor, TES) や常磁性体の磁化を測定する金属磁気カロリーメーター (Metallic Magnetic Calorimeter, MMC)、超伝導のインダクタンス変化を利用する光センサー (Kinetic Inductance Detector, KID) などがある。

## COMET 実験用 超伝導磁石システム



(左から) 飯尾 雅実氏、吉田 誠氏、岡村 崇弘氏



COMET 超伝導磁石システム

宇宙線観測の中で発見された素粒子「ミュオン ( $\mu^-$ )」は、真空中では約2マイクロ秒の寿命で崩壊し、ニュートリノと電子を放出する。J-PARCではこのミュオンを物質の構造を探るためのプローブとして活用するとともに、その崩壊過程を精査する基礎実験COMET計画を推進している。そこでは「標準理論」に則るニュートリノ放出を伴うミュオン崩壊ではなく、 $10^{16}$ 回に1回という極めて稀なニュートリノ放出を伴わない崩壊過程の探索を目指している。その実測は標準理論を超える物理法則の解明へと展開するであろう。

探索精度を上げるためには大量の負電荷ミュオンが必要とされ、COMET 実験では世界最大強度となる毎秒  $10^{11}$  個のミュオンを生成する計画である。ミュオンは、8GeV 陽子ビームを生成標的に入射し、パイオンの発生・崩壊を経て生成される。ミュオンを検出器まで効率よく輸送するために、生成標的から検出器まで

連続した超伝導ソレノイドで発生する磁場を利用する。標的から放出されるパイオンは、超伝導ソレノイドが発生する最大5テスラの磁力線に絡みついて集められ、後続の低い磁場の方に流れていく。輸送部は90度曲がった形状で、磁場を感じない中性子は除外される。また曲がりながら輸送されるうちにプラスの電荷とマイナスの電荷の粒子がその運動量に応じて上下に分離するので、マイナス電荷の低速ミュオンだけを選別することができる。

COMET 超伝導磁石は、耐放射線性の強化を特徴とする。ソレノイド内部の生成標的からはパイオンだけでなく中性子など大量の放射線が放出され、タングステン合金等の遮蔽体で軽減したとしても、

超伝導コイルの機械強度、伝熱性能等の劣化が心配される。そこで放射線耐性を向上させるための様々な工夫を施した。中性子が透過しやすいアルミ安定化超伝導ケーブルを採用し、ケーブル以外のコイル構造もアルミ主体として、発熱を抑えている。さらに、放射線による発熱を素早く取り除くため、コイル内部に純アルミ伝熱板が挿入された特殊なコイル構造とした。また、超伝導コイルを成型する樹脂は、エポキシ樹脂に代えて放射線耐性の高いビスマレイミドトリアジン樹脂を主成分とした。

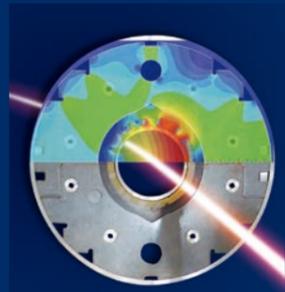
現在輸送ソレノイドと冷凍機は設置済みで、冷媒、励磁電流を導入する装置の製作を進めている。捕獲ソレノイドとなる超伝導コイルはすべて完成しており、今後2年をかけて組立てられる。以上のように、低温セクションでは、世界最大強度の負電荷ミュオンビームを供給することを目指した、超伝導磁石システムの建設を進めている。(吉田 誠)

# ノーベル賞級の研究を支える ニュートリノ超伝導ビームライン の建設と維持

J-PARC 低温セクションの象徴ともいえるニュートリノ超伝導ビームライン—— J-PARC でつくったニュートリノを岐阜県神岡町にある検出器「スーパーカミオカンデ」に向けて飛ばすために、加速した陽子ビームをニュートリノ生成ターゲットに当てる前に神岡の方向に向ける、全長150mに及ぶビームラインだ。ビームを大きく曲げる必要があるため、強い磁場を発生できる超伝導磁石が採用された。超伝導磁石を冷却するシステムの構築から、継続した安定運転によりニュートリノ実験を支える現在までのお話を伺った。(聞き手：J-PARC 広報セクション)

## タイトに決まった予算と スケジュールの条件の中で

建設時の大きな検討要素の1つが、超伝導磁石のコイルの巻き方だった。当時、中心となって検討に当たった荻津氏によると、「ビームを曲げるための2極の磁石と、広がったビームを収束させるための4極の磁石を交互に並べる一般的な設計では、お金と時間の面で成立性が低かったのです。折しも、海外の加速器研究施設との共同研究などから、それを解決する候補となりうる、2極磁石と4極磁石の機能を1つの磁石に組み込んだような機能結合型の磁石のアイデアが舞い込んできました。」この機能結合型磁石の断面写真をご覧くださいと、2個のコイルが左右非対称に置かれている。この磁石で発生する磁場は不均一で、コイルが寄っている側のほうが磁場が大きい。この磁石の中に荷電粒子のビームを通すと、「フレミングの左手の法則」に従いビームは曲がるが、曲がり方は、磁場が強い側のほうが大きくなる。ここで、次にビームが通る磁石を、コイルが寄っている側を逆にして置き、発生させる磁場の向きは同じにすれば、ビームを同じ向きに曲げながら、広がりを抑える



機能結合型磁石の断面写真  
上半分に、磁場の強さの分布を色で示している。緑→黄色→赤の順に磁場が強くなる。

ことができる。一方で、リスクもあったと荻津氏はいう。「ビームを曲げるのと収束するのを別の磁石が担っている場合、設計が多少間違っても運転時に調整できるのですが、機能結合型の磁石を用いるとそうは行かず、設計の要求が厳しくなります。またこのような設計の超伝導磁石は世界初の試みで、当然リスクがあったのでチーム外部の専門家も含めたレビュー委員会で徹底的にリスク分析を行って採用を決断しました。」

## 国内有数規模のビームラインを どうやって冷やすか？

150mにわたって並ぶ28台の超伝導磁石に冷え残りがあってはならない。どのような方法で冷やせばよいのか？ ブクブクと沸騰している状態で、液体ヘリウムは沸点の-269℃に保たれている。これを配管の中に流して超伝導磁石を冷却すると、どんどんヘリウムガスに変わっていくので、ガスだまりができて電気絶縁の低下や冷え残りが起きる。そこで考えられるのが、圧力を上げることで液体と気体の境目のない超臨界状態になったヘリウムの使用である。液体ヘリウム貯槽内の熱交換器で冷やされた超臨界ヘリウムは、ポンプを使って超伝導磁石に送られる。沸騰状態の液体ヘリウムと異なり、超伝導磁石を冷やすうちに超臨界ヘリウムの温度は上がっていくが、必要な流量を確保して-268℃以下に冷却している。超伝導磁石の冷却への超臨界ヘリウムポンプの本格的な採用はKEKでは初めてで、使いこなせるのか不安もあった。しかし、大島氏は「それまでやってきたことの集大成だ」と思ったという。移動式ヘリウム液化機の整備やヘリウム液化機を超伝導電磁石性能試験装置に改造した経験から、初めての機器でも試行の中で特性を理解し、その性能を引き出せるようになると前向きに考えた。

## 継続した安定運転で ニュートリノ実験を支える

2009年に超伝導ビームラインは完成し、運転を開始した。初期にはインターロックの誤動作が発生したが、その解決以降安定してニュートリノビーム運転に貢献している。徹底した安定運転の継続を可能にするカギは、大きく3つあるという。1つ目は不純物管理。「ヘリウムガスを油と混ぜて圧縮し、油を分離してから熱交換器に送るのですが、油が混ざっていると、低温下で凍り付き、液体ヘリウムがうまく流れなくなってしまいます。KEKで蓄積されてきた超伝導システムの長期連続運転、特に不純物の除去および監視のノウハウが生かされています。」と、槇田氏が説明してくれた。2つ目は制御。冷凍機の制御プログラムをメーカー任せではなく、大島氏は独学で学び常に改善している。制御プログラムの信頼性は増し、オペレーターの誤操作を防いでいる。3つ目は、予防保全。トラブルを予測してメンテナンスを入れたり、必要になりそうな交換部品等をあらかじめ購入しておいたり、常に先手を打っている。また、経験値に基づく勘所により、故障の兆候をとらえて未然に防いできた大島氏を、荻津氏、佐々木氏、槇田氏は、口をそろえて称賛した。大島氏は、超伝導ビームラインの継続し

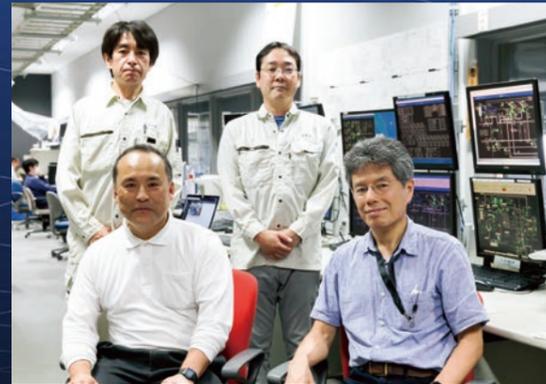
た安定運転への貢献が評価され、2020年に文部科学大臣表彰「研究支援賞」を受賞した。

## 省エネにもチャレンジ！

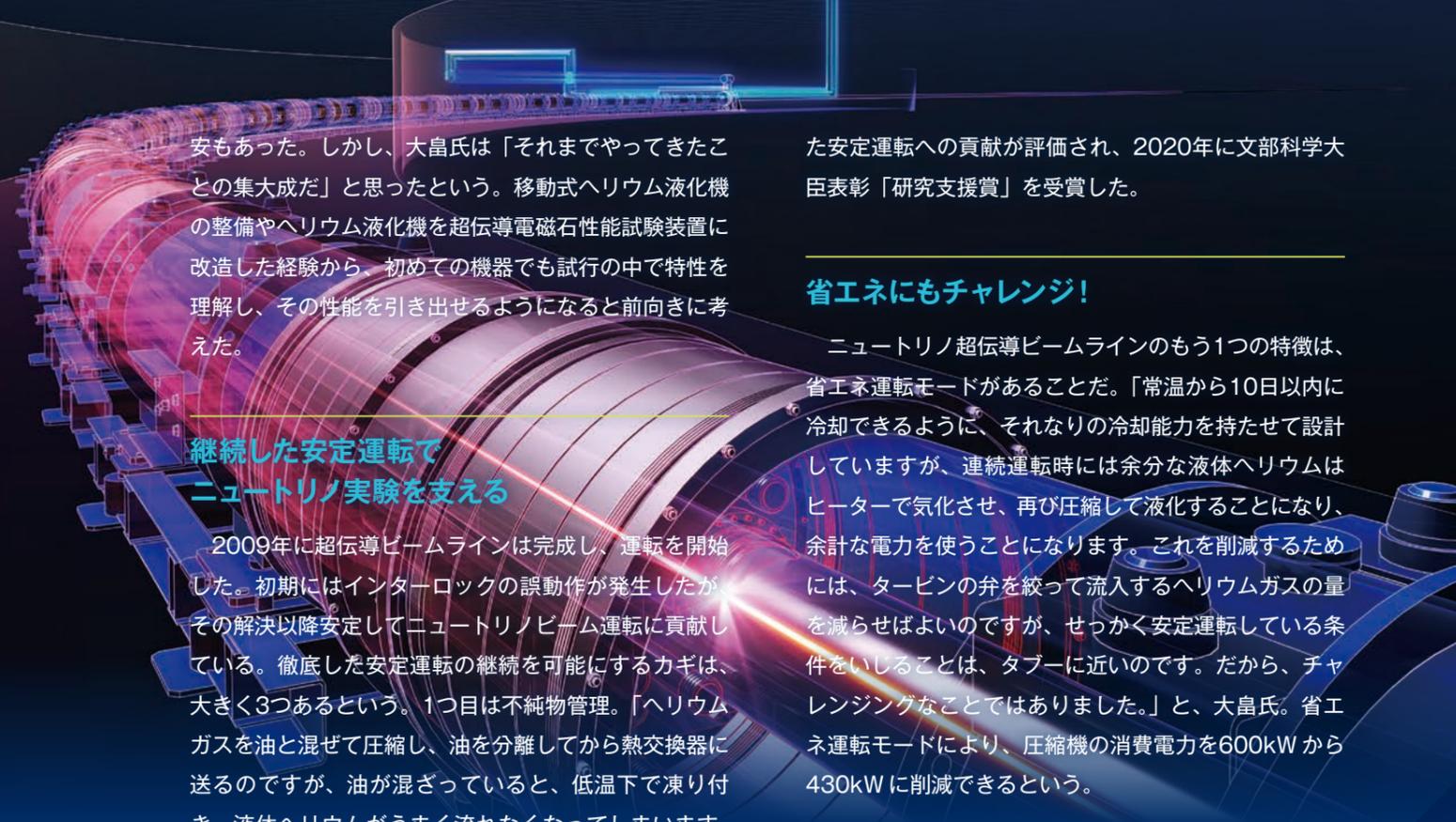
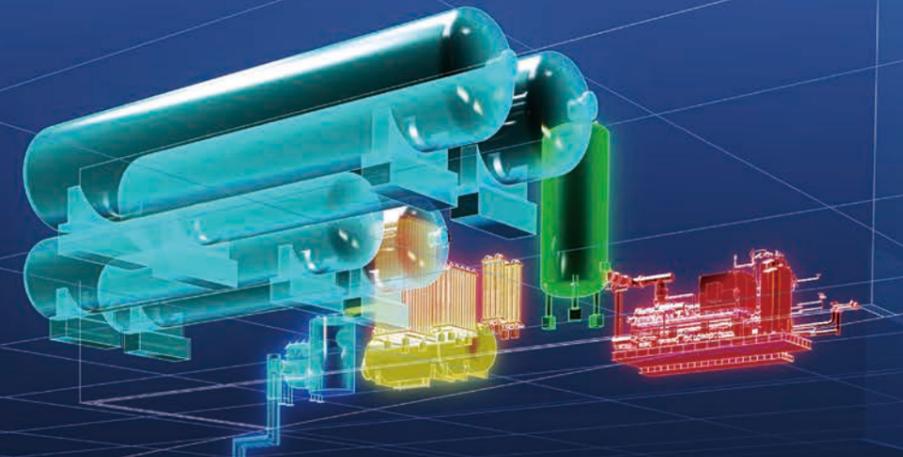
ニュートリノ超伝導ビームラインのもう1つの特徴は、省エネ運転モードがあることだ。「常温から10日以内に冷却できるように、それなりの冷却能力を持たせて設計していますが、連続運転時には余剰な液体ヘリウムはヒーターで気化させ、再び圧縮して液化することになり、余剰な電力を使うこととなります。これを削減するためには、タービンの弁を絞って流入するヘリウムガスの量を減らせばよいのですが、せっかく安定運転している条件をいじることは、タブーに近いのです。だから、チャレンジングなことではありました。」と、大島氏。省エネ運転モードにより、圧縮機の消費電力を600kWから430kWに削減できるという。

## 大島氏のさらなる挑戦

「これから設備の老朽化が始まる中で、超伝導磁石システムの不具合によるトラブルを未然に対処し、ニュートリノの実験が終わるまでのビーム運転稼働率99.9%以上を維持したい。」と大島氏は意欲を燃やす。ニュートリノ実験のデータの蓄積に世間の期待が高まる中、設備が古くなっていくことは免れない事実だが、「中古のものを扱うことをたくさん行ってきた大島氏の経験が、まさに生きてくるときだ」との佐々木氏の言葉に、J-PARCの最先端の科学成果を支える低温セクションの底力が感じられた。



(後列左から) 大島 洋克 氏、佐々木 恵一 氏  
(前列左から) 槇田 康博 氏、荻津 透 氏



# J-PARC での低温実験を可能にする 液体ヘリウム回収・供給設備の建設と維持

J-PARCにおける低温セクションのもう1つの重要な貢献が、J-PARCで低温環境下での実験を行いたいJ-PARCユーザーに液体ヘリウムを供給する設備の建設と運用だ。ユーザーが液体ヘリウムを実験に使用後、ガスとして回収するためのラインが、J-PARCの諸施設に張り巡らされており、戻ってきたガスを液化して再び供給する。この設備があるおかげで、昨今の世界的なヘリウム入手難の状況にあっても、J-PARCでは液体ヘリウムを用いた実験が継続できている。それを支えるスタッフに、お話を伺った。（聞き手：J-PARC広報セクション）

## 予算難の中での建設

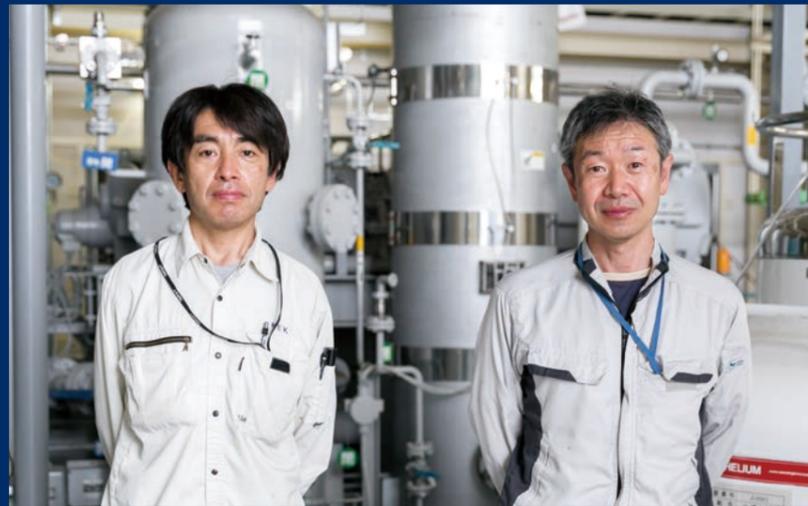
2000年初頭のJ-PARC建設当初、ヘリウム回収・供給設備を構築する必要があるか否かの議論があった。当時、世の中では、液体ヘリウムの需要が多く、主要な保有国であるアメリカは広く備蓄を放出しており、価格は安かったので、買って捨てればよいという向きがあった。一方で、荻津氏は、ひとたび保有国が放出を締めれば入手難の状況が訪れることを、ある程度は見越していた。また、ヘリウムが枯渇する資源であるという観点から、再利用すべきとの見方もあった。そんな中、物質・生命科学実験施設のユーザーにアンケート調査を行ったところ、設備の使用を希望する声が多く、液体ヘリウムの希望使用量は年間1万リットル以上であることが分かり、設備を建設する構想となった。

しかし、J-PARCの建設初期には加速器設備が優先で、予算がつかなかった。そこでまず、回収設備だけを設置し、回収したヘリウムガスは高圧ポンペに詰めて原子力科学研究所が保有する液化機へ運び、液化することで運用が始まった。そこに、筑波大学の液化機設備更新に伴い、中古の液化機を譲り受けることとなり、ようやく自

前で液化し、再供給ができるようになった。

予算不足の中で、段階的に設備を増やしてきた飯田氏と大島氏に、「最初に一括で建設するのと比べ、大変だったか？」と尋ねると、「全然大変です」と、間髪入れず返ってきた。「最初に一括で建設すれば、我々は構想を示すだけで、業者が責任を持ってやって

くれます。中古をもらってきて段階的に増やしていく場合は、トラブルがあったときの責任は、我々が持つことが前提になります。また、増設設備の設置場所も最初から計画されていないので、設置可能な場所を探し出して、当該施設の担当者と相談しなければなりません。」加えて、J-PARC建設時に削った森林を元に戻す措置により、設備を入れるために小さな建屋しかつけれない制約もあっ



（左から）大島 洋克 氏、飯田 真久 氏

たそうだ。飯田氏は立体化することで、その中に設備を押し込んだ（写真）。

こうして回収設備と液化設備は設置されたが、まだ“システム”として完成はしていないという。ユーザーから回収したガスをためておくカードルの数が足りないというのだ。しばらく液体ヘリウムを用いた実験が行われない場合には、ガスとしてためておくべき量が多くなる。カードルの容量を超えてしまうと、実験に使用するわけではないのに、液化機を運転して、液化しなければならなくなる。また、運転する側の都合で運転してためておくことに限界があるので、実験に使用するタイミングに合わせて運転せざるを得ない大変さもある。今年度の予算で、ようやくカードルを買い足す予定であるという。

## 安定した運転を可能にする 技術力とマネジメント力

設備をつくった先の運用においては、「技術力」に加えて「マネジメント力」がカギを握る、と大島氏は言う。「限られた予算をどこにどう割り当て、より安定してシステムを維持するか、常に考えることで、高い稼働率を維持できています。」との大島氏の発言に、横田氏が「一方で、設備が止まる前に兆候に気づいて対処するところが、技術者としての大島氏と飯田氏のすごいところ。老朽化が進む今後、中古品を多く使っている我々の設備にとって、そうした技術力もますます重要になってくる。」と、すかさず付け加えた。

## ユーザーの協力があってこそ

この設備が、前の見開きで紹介したニュートリノ超伝導ビームラインと大きく違うところは、途中にユーザー

が入っていることだ。J-PARCのユーザーは、回収に非常に協力的であるという。一般に回収率が下がりがちな小口ユーザーが多い使用状況であるにもかかわらず、回収率は95%程度と非常に高い。これは、例えば、一旦液体ヘリウムを回収しきってから次の試料に交換するなど、ロスを防ぐポイントをユーザーが押さえていないと、達成できない数字であるそうだ。

「昨今の世界的なヘリウム入手難の状況にあっても、J-PARCでは液体ヘリウムを用いた実験が継続できているのは、建設時、およびその後の長年にわたる設備維持におけるスタッフの努力と、回収に協力してくれるユーザーのおかげにほかならない。」と、横田氏が強調した。

## ユーザーの研究を全力で支えたい

「設備を止めずに安定に運用して、研究者に良い論文を書いてもらうバックアップをするのが、我々の仕事です。」と、飯田氏と大島氏は口をそろえて語る。「我々は、ガソリンスタンドの店員だと思っています。無かったら困る。一方で、お客さんには、他店に行くという選択肢もある。液体ヘリウムは買って捨てればよい、と思うかもしれない。そういうことのないように、与えられた環境の中で、与えられた物を使って、ユーザーの要望に応えることに力を尽くしています。」と飯田氏。大島氏も、「緊急の使用希望にも、どうしても物理的に不可能な場合を除き、柔軟に対応し、液体ヘリウムを供給します。」と付け加えた。

そして、2人は口々に、せっかくなるこの設備をぜひ活用してほしいと強く訴えた。J-PARCでは、回収さえきちんとしてもらえれば、液体ヘリウムを無償で供給している。そのことが、まだまだ知られていないのかもしれない。現J-PARCユーザー、およびこれからJ-PARCユーザーになりうる研究者に、この季刊誌を通して知ってもらい、ぜひ活用してほしい。

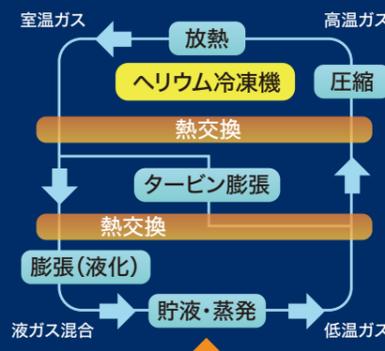


### 冷蔵庫や空調用の冷凍機



身近にあるエアコンや冷蔵庫に組み込まれている冷凍機と同様にヘリウム冷凍機も冷媒の圧縮・膨張で低温を発生する。一般の冷凍機は1つのサイクルで構成されているが、ヘリウム冷凍機はタービン膨張サイクルが加わり2つのサイクルで構成されている。また蒸発した低温ヘリウムガスと熱交換も必要になる。

### ヘリウム冷凍機

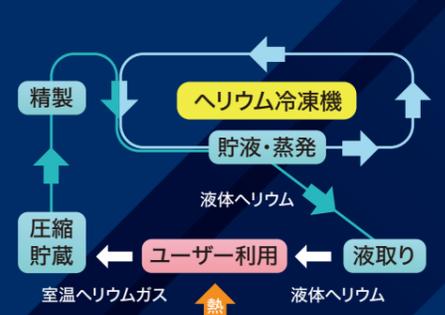


### ニュートリノ超伝導磁石の冷却システム (前の見開き参照)



ヘリウム冷凍機で発生する寒冷によって、ニュートリノ超伝導磁石を超臨界ヘリウム経路で冷却し、供給用ヘリウムを液化している。

### 液体ヘリウムのユーザー供給システム





低温セクションのスタッフ

ご意見、ご感想をお待ちしております。 ✉ [web-staff@j-parc.jp](mailto:web-staff@j-parc.jp)

< 編集後記 >

J-PARCの最先端の科学成果を支える極低温技術、そして設備の安定運転、さらには省エネ運転を可能にする低温セクションの技術スタッフの熱い思いに、感動しました。J-PARCには、まだまだ知られていない魅力が、たくさんあります。これからも、この季刊誌でお伝えしていきます。