

## 関西支部だより

関西支部の2022年度第3回講演会（オンライン併用の対面形式）が2023年2月3日（金）14時30分～17時30分にかけて大阪公立大学文化交流センターホール（大阪駅前第2ビル6階）にて開催された。毎年恒例の新年情報交換の集いとして液体ヘリウムの供給不足を背景とした企業の対応や、大学における新規超伝導物質の探索に関する講演が行われた。今回の講演会では若い世代の支部講演会への参加を促す試みとして学生の参加費を無料とした。結果として従来はほとんどなかった学生の参加者が10名近くとなり、無料化は一定の成果があったといえる。その他の参加者は大学・研究所関係17名、会社関係25名で総数が52名となった。また今回も関西地区以外からの参加も多くあり、オンライン参加者が16名とオンライン併用のメリットを大いに感じる講演会となった。関西支部長の永石竜起氏による開会挨拶に続き、4件の講演が行われた以下に今回のプログラムを示す。

1. 「開会挨拶」 関西支部支部長
2. 「2023年ヘリウム供給の展望」  
坪井真氏/日本エアリキード
3. 「高温超電導線材の開発および市場展開の現状と期待される応用分野」  
永石竜起氏/住友電気工業
4. 「液体ヘリウムを使用しない超電導マグネットの進展」  
齊藤一功氏/ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー
5. 「元素特性を利用した構造制御による遷移金属化合物の超伝導物質開発」  
工藤一貴氏/大阪大学
6. 「閉会挨拶」 関西支部副支部長

坪井氏の講演では、ヘリウムのサプライチェーンの紹介と供給不足となっている背景や今後の見通しについての紹介があった。ヘリウムは石油などと同様の天然資源であり、主に世界の5か所で採掘されている（アメリカ、ロシア、カタール、アルジェリア、ポーランド）以前はオーストラリアでも採掘されていたが最近廃坑となっている。ヘリウムの用途は冷媒だけではなく、半導体、や光ファイバーの製造、さらには様々な密閉容器のリークテストなど多くの産業分野で用いられている。ヘリウムの需要は現在年平均約3%で伸びており、拡大を続ける半導体産業や、近年アジア地域での需要が伸びているMRIなどに牽引されてその成長は加速している。一方、こうした需要増に対し追加供給はなされていない。

2022年には供給に影響を与える重大な事象としてガспロム・アムールの停止（2022年1月に発生した爆発火災による）がある。このプラントは2022年の供給力を増加させるものとして期待されていたが、エアリキード社ではこの事故影響でガспロム・アムールの2023年内の再稼働は困難になったと考えている。また、仮に生産が回復した場合でもウクライナ紛争に伴う制裁も供給再開に対する課題となっており、時期はさらに先になる可能性がある。また、アメリカの供給元であるBMLは2022年1月以降、安全上の懸念から設備の稼働を停止していた。最近になって再開したが米国の需要を優先しており、外販用の出荷は時期未定の状態。さらにTENAWAプラントでも火災事故が起きておりプラントが停止している。これらのことが世界全体で需給が逼迫している理由である。一方、価格についていえば供給不足の他にも輸送コストや人件費の上昇があり、加えて日本の場合には為替の影響も出ている。こうしたことから2023年もヘリウム供給に関しては厳しい状況すなわち、価格上昇や入手困難が続くのではないかとということで講演は締めくくられた。

永石氏の講演では高温超電導線材の開発を振り返った後、市場展開についての説明があった。高温超電導線材とは一般的に超電導臨界温度が液体窒素温度以上の銅系酸化物材料のことであり、現在大きく分けてビスマス系と希土類系の二つの材料を使用した線材が市販されている。超電導製品の応用分野としては医療用MRIに用いられる超電導マグネット、産業機器として単結晶シリコン引き上げ装置用に用いられる超電導マグネット、NMRや粒子加速器などの科学分野で用いられる超電導マグネットなどが良く知られている。また、電力ケーブルに適用した場合のメリットとして送電に必要な導体面積が1/200になることから、冷却構造を考慮しても送電容量は6倍となる。送電需要の増加に対して新たに大規模な敷設をすることなく既存のケーブルから超電導ケーブルへの置き換えを行うことで送電容量を増やすことが期待される。ただし、こうしたケーブルの実証実験は全世界で過去数十のプロジェクトが行われてきたが現在稼働中なのは開発プロジェクトが2件と商用で1件のみである。最近、地球温暖化対策に関連して小型核融合炉の開発がベンチャー企業を中心に進められている。この中の1社であるCommonwealth Fusion Systemsでは希土類系線材（REBCO線材）を用いたトカマクのデモ装置を開発中である。これには7,000kmのREBCO線材が必要とされており、さらに将来的に商用機になれば必要量が20,000km/台になる。これに対し、REBCO線材メーカーは増産体制を検討している。例えばSuper OX社は現

状 3,000km/年の生産量を 2023 年には倍の 6,000km/年とする計画になっている。こうした中で問題となるのはコストであり、例えば Commonwealth Fusion Systems 社では現時点で 1,000~3,000 円/m の REBCO 線材の目標価格を 200 円/m 以下においている。線材メーカーの課題は如何にしてこれを実現するかになる。コスト高の原因は主に超電導層の製造コストである。住友電工では他社が気相合成法を採用しているのに対し、塗布法でコスト低減に取り組んでいる。また、NMR のように永久電流運転の超電導マグネットが必要となる場合には、超電導線同士を超電導状態で接続する技術が必要になる。住友電工ではこれに対する開発も行っており、長年困難であるとされた REBCO 線材同士の超電導接続技術を完成させており、今後、NMR マグネットなどへの適用を図っていくことが示された。

齊藤氏は「液体ヘリウムを使用しない超電導マグネットの進展」と題し、主として製品面、生産面における技術開発の内容について紹介された。最初に、ヘリウムの状況について情報提供があった。ここ 20 年間で輸入量は減り続け、価格は上昇傾向が続いている。また、半導体素子や光ファイバー製造、リークテストなどの産業用途としてヘリウムガスが多く使用されている。70%がガス、30%が気体として販売されており、液体ヘリウムは MRI が需要の中心となっている。超電導マグネットメーカーにおいては、ヘリウムは製品検査では超電導マグネットの冷却や超電導線材の評価、生産工程ではクライオスタットのリークテスト、部材の 4 K による評価など要素試験に利用される。製品面での対応については、まず、超電導マグネットの構造の説明があり、それを踏まえて、超電導マグネットにおける代表的な冷却方式として、冷媒型、再凝縮型、無冷媒型の詳細が話された。「全てをヘリウム使用量ゼロの冷凍機冷却方式にできるか？」との問題提起があり、それが困難であることを冷却方式による特徴の違いから説明が行われた。使用する冷媒、初期立ち上げ時間、運転温度、停電/冷凍機の故障、クエンチ時、クエンチリカバリ、メンテナンスなどの特徴の冷却方式による比較がなされ、実例として、NMR は信号強度が小さく感度が弱い測定方法のため冷凍機の機械ノイズ、磁気ノイズが問題となるため、冷凍機が使えないこと、MRI などは落雷、地震などによる予期せぬ停電時には冷凍機が停止し、温度が上昇してマグネットがクエンチすることなどが挙げられた。一方で、これらの解決に対する試み、NMR における技術開発として、振動の少ないパルスチューブ冷凍機を使用する方式、冷媒蒸発抑制装置、ヘリウム圧縮機の利用、また、MRI における技術開発として、ヘリウム密閉型マグネットがあ

る。最後に、生産面での技術開発として、ヘリウム液化装置や再凝縮装置などの利用により使用量の低減が図られていることの紹介があった。

工藤氏からこれまでご自身が進められてきた配位化学、化学結合の形成と切断、多形を利用した超伝導物質開発の内容の話題提供があった。最初に超伝導の魅力が語られた。際立つ超伝導状態を示す物質は結晶構造、磁気構造、バンド構造などに特徴を有しているため、新超伝導体の発見が、物性物理学の新たなトレンドの端緒になり得る。物性物理学の新しい分野を切り開くことを目標として、元素特性を有効に利用して結晶構造を制御し、新しい超伝導物質の開発を進めている。次に配位化学を利用した超伝導体開発について紹介があった。鉄系超伝導体は、常圧下において、銅酸化物系超伝導体に次いで高い超伝導転移温度  $T_c$  を示す系であるため、新物質の発見には大きな意義がある。鉄系超伝導体は、FeAs 層とスペーサー層が交互に積層した層状構造をとる。FeAs 層が超伝導の舞台であり、それを隔てるスペーサー層の違いにより  $T_c$  が高くなったり低くなったりする。遷移金属の配位化学を利用して共有結合性のスペーサー層を持つ鉄系超伝導体 10-4-8 型  $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  を発見している。鉄系超伝導体の物質開発の幅を広げる契機となり、共有結合性のスペーサー層をもつ様々な鉄系超伝導体が発見されている。さらに、化学結合の形成と切断を利用した超伝導体開発について説明があった。As は組み合わせる元素に依存して様々な価数をとる。10-4-8 型鉄系超伝導体の  $\text{Pt}_4\text{As}_8$  層には、As が 2 つ結合した  $(\text{As}_2)^+$  ダイマーがあり、この層において電子数を減らし As のダイマー同士をつないだら、As のジグザク鎖が導かれる。例えば、112 型鉄系超伝導体  $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$  は実際にそのような結晶構造を持ち、 $T_c = 35 \text{ K}$  の超伝導を示す。この系の  $T_c$  は、As サイトへの化学置換により 47 K まで上昇する。As 以外でも可能で、例えば、 $\text{AuTe}_2$  の  $\text{Te}_2$  ダイマーを切断することにより超伝導が発現する。最後に多形を利用した超伝導体開発に触れられた。多形とは化学組成が同じであるにも関わらず結晶構造が異なる現象であり、多形の制御は超伝導体の開発に有効である。立方晶の化合物  $[\text{LaIrSi} \text{ 型}(P2_13, T^4, \text{No. 198})]$  として知られていた  $\text{BaPtAs}$  に対して、六方晶構造の超伝導体  $\text{BaPtAs}$  を見出した。六方晶の  $\text{BaPtAs}$  は、 $\text{SrPtSb}$  型  $(P\bar{6}m2, D_{3h}^1, \text{No. 187})$  と  $\text{YPtAs}$  型  $(P6_3/mmc, D_{6h}^4, \text{No. 194})$  の結晶構造をとり、Pt と As からなるハニカムネットワークを持つ。それぞれ、 $T_c = 2.8 \text{ K}$ 、 $T_c = 2.1\text{-}3.0 \text{ K}$  で超伝導を示す。

最後に、今回の講演会にあたり、会場を提供いただいた大阪公立大学と興味深い話題のご提供を頂きまし

た講師の先生方にこの場をお借りして厚くお礼を申し上げます。

(大阪大学 中本将嗣、JASTEC 齊藤一功)