

■ 関西支部だより

関西支部は2024年度第3回講演会（オンライン併用）を2025年2月5日（水）14時00分～17時05分に大阪公立大学文化交流センターにて開催した。参加者は総数28名（講演者4名、会員23名、非会員1名うち現地参加20名、オンライン参加4名）であり、関西支部長の掛谷一弘による開会挨拶に続き、下記4件の講演が行われた。

1. 「開会挨拶」 関西支部支部長
2. 「誤り耐性量子コンピュータに向けたスケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発」
小林 和淑氏／京都工芸繊維大学
3. 「カーボンニュートラル社会実現に向けた加地テック水素圧縮機関連の取り組みについて」
橋本 政典 氏／株式会社加地テック
4. 「超伝導光子検出技術の開発と応用」
三木 茂人 氏／情報通信研究機構
5. 「極低温デジタル信号処理を用いた超伝導光子検出システムの高度化」
宮嶋 茂之 氏／情報通信研究機構
6. 「閉会挨拶」 関西支部副支部長

小林氏の講演では、はじめに量子コンピュータの概要と現状について報告された。ジョセフソン接合を利用した量子ビットは状態を表すのに波動関数の重ね合わせを利用するため、古典ビットと比べて同じ情報を少ないビット数で表すことができる。しかしながら誤りの発生が1%程度あることが実用性のある10万量子ビットを超える量子コンピュータの開発を阻んでいる。そのため誤り耐性量子コンピュータ（FTQC）の開発が指向されている。FTQCでは誤りの発生率を 10^{-5} のオーダーに抑えることが目指されているが、現在の技術では難しいため、誤り発生率の目標値を 10^{-4} 程度に緩和した早期誤り耐性量子計算（Early- FTQC）の開発が進められていることが紹介された。

将来的には10万量子ビット程度の集積回路を希釈冷凍機で極低温まで冷却し、これを複数台クラスター化することで実用量子コンピュータが実現するだろうという予測が紹介された。

またムーンショット目標6「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」について報告された。

超伝導量子ビットの動作には極低温が必要となるため、希釈冷凍機による冷却が用いられている。現行機では制御のためのエレクトロニクスが室温に置かれているため、量子ビットの動作には多数の同軸ケーブルを室温から極低温までおろす必要があり、熱流入が問題となる。この問題を解決するために低温で動作する半導体集積回路の開発を行っ

ていることが紹介された。半導体集積回路は量子ビットの制御と読み出しを担う。これにより希釈冷凍機の極低温部への熱流入を劇的に減らすことが期待される。低温動作の集積回路のみならず、室温部分の古典集積回路も含めて量子ビットのコントロールと誤り訂正を行うシステムの開発を行っていることが紹介された。

開発は2025年までに100量子ビット程度のFTQCのプロトタイプを完成させること、2030年までに100万量子ビットのFTQCまで対応でき、ネットワークを介し他のFTQCとクラスターを組めるスケーラブルなシステムを開発することを目標とすることが述べられた。最後に最終的な目標はいかなる量子ビットにも対応できる汎用的な量子ビット制御システムを開発すること、リアルタイムエラー訂正を実現すること、世界でトップの量子ビットコントローラー企業を立ち上げること、20年後に“Project Q”としてテレビ番組で紹介されること、であることが紹介された。



小林和淑氏ご講演の様子

橋本氏の講演では、圧縮機の特徴と開発の歴史、カーボンニュートラル社会へ向けた水素圧縮機関連の取り組みについて報告があった。加地テックは1905年（明治38年）創業、1934年（昭和9年）から空気コンプレッサーの研究に着手するなど圧縮機に関する深い知見と高い技術力を有し、水素ステーション用圧縮機では国内トップのシェアを持つ、主に中小型のガス圧縮を得意とする老舗企業である。圧縮機には様々な型式があるが、水素ステーション用としてはレシプロコンプレッサーとも呼ばれる容積形の往復式が最も一般的である。レシプロコンプレッサーは所謂レシプロエンジンと逆のコンセプトで、エンジンはガスを膨張させることで動力を得るのに対し、圧縮機は逆に動力を加えることでガスを圧縮する機構であることが構造図を用いて示された。また圧縮機自体は既に成熟された技術であるが、水素ステーション向けやPETボトル成形用のコンプレッサーなどにはオイルフリー化が必須であり、加地テックが

これまでに培ってきた技術を生かせる分野でもあるとのことであった。

カーボンニュートラル社会へ向けた水素圧縮機関連の取組みについては、グリーンイノベーション基金事業に参画するなど特に水素ステーション分野に力を入れているとのことであった。水素ステーション用圧縮機は重力の影響を受け難い縦型で4段もしくは5段圧縮、吐出量は340 Nm³/hが主であるが、近年では、バスやトラック用のステーションが伸びてきている印象であり、大型・商用モビリティ(HDV)向けに、吐出量が従来約2倍に当たる600 Nm³/hの新型水素圧縮機を三井E&Sと共同で開発しているとのこと。現在、水素脆化や機械的性質の変化、摺動部品の長寿命化の課題解決に取り組んでいると報告された。

最後に、電気化学式水素ポンプの開発についての紹介があった。電気化学式水素ポンプは水素の酸化還元反応により水素を圧縮するPEM形水素圧縮装置であり、運転時に動作音がほとんどしない利点があるが、現状では高額であることと、吐出量も約4 Nm³/hと水素ステーション用圧縮機の約1/100程度であることが課題との認識が示された。



橋本政典氏ご講演の様子

三木氏の講演では、はじめに単一光子検出器には、高い検出効率、低い暗計数、速い応答速度、小さいタイミングジッタが要求されること、超伝導ナノストリップ単一光子検出器(SNSPD もしくは SSPD)は、これまで用いられてきた光子検出器に置き換わる物として期待されていることが紹介された。SNSPD が優れている一例として、2007年に発表された当時の世界最長記録となる200 km間の量子暗号鍵生成の成功や、低い暗計数率10 Hz(R. H. Hadfield, Nat. Photo., 2009)が示された。特に暗計数率は当時主流であったInGaAsでの値16 kHzに対し3桁も低い値であり衝撃的であったとのこと。

次に高性能SNSPDシステムの開発について報告された。システムを高性能化するためには、主に冷却技術、パッケ

ージング技術、ナノストリップ技術、の3つの技術開発が必要となる。今回の発表では開発の一例として、電子線描画装置や反応性イオンエッチング技術により形成された幅100 nmの超伝導NbNナノストリップ素子や、超伝導ナノワイヤ層への光吸収率を増強する光キャビティー構造についての紹介がなされた。SNSPDの検出効率は超伝導ナノワイヤ層への光子吸収率に大きく依存することが分かっており、ダブルキャビティー構造を採用することにより光吸収率をほぼ100%にすることが出来たこと、2017年時点で検出効率81%、暗計数率7 c/sに達したこと、などが紹介された。また更なる性能改善に向けた取り組みとして、ウェハ裏面への多層膜の具備と入射光導入光ファイバ端面への多層膜フィルタの具備により、システム検出効率は91.8%に、暗計数率は1.136 c/sを達成したというデータが示された。

最後にSNSPDシステムの応用と社会還元に向けた取り組みとして、量子暗号通信ネットワークの試験運用や量子技術への適用などの事例が紹介された。またストリップ幅が光スポット径よりも大きい超伝導ワイドストリップ光子検出器(SWSPD)の研究開発について報告された。ストリップ幅が格段に太いにもかかわらずSWSPDの動作はSNSPDと同等もしくは一部それ以上となるとのことであり、今後の発展が期待される。



三木茂人氏ご講演の様子

宮嶋氏の講演では、SNSPDを用いた光子検出システムの応用において、低温信号処理技術によるシステムの高度化は重要な要素の一つであることが示され、中でもジョセフソン接合のスイッチングジッタが0.1 ps以下、かつ直流電流駆動可能でSNSPDの出力信号でイベント駆動できる単一磁束量子(SFQ)回路に基づく低温信号処理が有望であるとの報告がなされた。64ピクセルのSNSPDアレイとSFQエンコーダを冷凍機へ実装し、SFQエンコーダによる信号読み出し、タイミングジッタの計測、64ピクセルSNSPD

の同時動作実証の結果などが示された。SNSPDのタイミングジッタを劣化させることなく、時空間情報を生成できること、レーザーのON/OFFだけではあるが64ピクセルの同時動作が可能であることが示された。

また32×32ピクセルのSNSPDアレイに向けた行列読出し方式に基づくSFQ信号処理回路についても位置情報を生成できたことが報告された。これにより読取りチャンネル数を抑制しつつSNSPDアレイの大幅な大規模化を達成する道筋が示された。更に大規模SNSPDアレイシステムの構築を目指すため、SFQ信号処理回路とSNSPDアレイの二つのデバイスを一体化したモノリシック集積化デバイスの概要と光子照射実験の結果が示された。モノリシック集積化のプロセスを確立し、タイミングジッタの劣化無しで単一光子応答が確認できたと報告された。

大規模SFQ回路を駆動するには回路全体では大電流が必要となり、そのジュール熱が大きな問題となってきた。この発熱はSFQ回路よりむしろ同軸コネクタの接続で起きていると指摘された。発熱を抑制する実装として、非磁性のマイクロDsub端子の使用とツイストペア線を使用する試みが最後に紹介された。この組み合わせでは従来の同軸ワイヤと比較して大幅な発熱量の低減に成功し、結果、SFQ回路駆動による0.1W GM冷凍機のステージ温度上昇も2.2Kから2.3Kへの上昇程度に押さえることができたとの報告がなされた。これにより0.1W GM冷凍機でも更なる大規模SFQ回路を動作させられる可能性が示された。



宮嶋茂之氏ご講演の様子

講演会終了後には、JR大阪駅近辺で有志による懇親会が開催され、活発な議論と交流が行われた。

最後に、今回の講演会の開催にあたり、場所のご提供、オンライン環境のご提供および講演の企画にご協力いただきました皆様、ご講演いただ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。

(上野栄作、宍戸寛明)