

# 量子コンピュータ向け大型希釈冷凍機の開発

アルバック・クライオ株式会社

斎藤 政通

## 1. はじめに

量子コンピュータは素因数分解や量子化学計算など特定の用途では従来のスーパーコンピュータを遥かに凌ぐ速度での計算が可能であり、ここ数年大きな注目を集めている。2019年のGoogleによる量子優位性<sup>1)</sup>や、2022年IBMの433量子ビット<sup>2)</sup>、2023年の理研ら国内グループによる国産量子コンピュータ<sup>3)</sup>などの報告がある。さらにIBMは2033年に10万量子ビットの計画を発表するなど<sup>4)</sup>、超伝導量子コンピュータの研究が急速に進んでいる。量子コンピュータには超伝導方式以外にイオントラップ、ダイヤモンド、冷却原子、シリコンなど様々な方式が研究されているが、現在最も研究が進んでいるのがこの超伝導量子コンピュータであり、希釈冷凍機による冷却が必須なことから、低温技術の進展とも密接な関りがある。本稿ではまず低温技術の進歩の量子コンピュータ研究への関りを概観し、量子コンピュータと希釈冷凍機の関係を中心に説明し、最後に弊社アルバック・クライオ株式会社での活動を簡単に紹介する。

## 2. 低温技術の発展

希釈冷凍機は1960年代にOxford Instrumentsより市販された<sup>5)</sup>。当初からしばらくは液体ヘリウム寒剤が不可欠であった(ウェット型)が、1990年代に開発された磁性蓄冷材により、4K-GM冷凍機や4Kパルス管冷凍機などの機械式冷凍機での4K以下への冷却が可能となった<sup>6)</sup>。これにより液体ヘリウム寒剤の代わりに機械式冷凍機を利用した希釈冷凍機が可能となり、2000年代には4Kパルス管冷凍機を搭載した希釈冷凍機(ドライ型)が市販されるようになった<sup>7)</sup>。

液体ヘリウム寒剤の取り扱いが不要となったことにより、定期的な液体ヘリウムの注ぎ足しの手間だけで無く、液体ヘリウム供給に必要な設備の導入と維持コストが解消され、室温から最低温度までの自動化も容易なことから、低温技術や低温物理を専門としない研究者に対しても、希釈冷凍機の利用が可能となった。

また、ウェット型では室温~4Kを隔てる真空断熱槽と、その内側で4K以下の希釈冷凍機本体を

囲む真空断熱槽で、合計2重の真空断熱槽が必要であった。一方、ドライ型では単一の真空槽のみとなるため、被冷却物を設置する低温部の空間を拡大することが容易となった。このため、より大きな低温空間を必要とする超伝導量子コンピュータの発展へドライ型希釈冷凍機の登場が大きく貢献したと考えられる。

## 3. 量子コンピュータと希釈冷凍機

超伝導量子コンピュータの量子ビットは、ジョセフソン接合を含む共振回路内に発現する超伝導量子状態の2つのエネルギー準位を利用している<sup>8)</sup>。この準位間のエネルギーは数GHzのマイクロ波に相当し、温度換算すると数100mKとなる。マイクロ波照射による意図した量子ビット操作を実現するためには、外部環境からの熱的攪乱の影響を十分小さくする必要があり、このマイクロ波のエネルギースケールより十分低い数10mK以下の環境下に置くことが要求される。そのため、超伝導量子コンピュータには希釈冷凍機での冷却が必須となる。

量子コンピュータの動作時の希釈冷凍機への熱負荷は、室温から低温部へと接続されるマイクロ波用同軸ケーブルなどの配線を伝わり高温側から低温側へ流入する受動熱負荷と、信号の減衰や増幅器などの動作に必要な能動熱負荷、2つが支配的となる<sup>9)</sup>。Krinerらは各温度ステージへの熱負荷と冷凍能力を考慮した結果、20mKで19μWの冷凍能力を持つ希釈冷凍機において、150量子ビットの動作が可能との見積を示し、さらに改良を加えることで1000量子ビットを提案している<sup>10)</sup>。また、冷凍能力以外にも、マイクロ波部品や増幅器が占める体積も量子ビット数に比例し増加するため、これらの構成部品を収容可能なサイズの低温空間を有した希釈冷凍機が必要となり、実際に巨大な希釈冷凍機の開発が、IBM<sup>11)</sup>、BLUEFORS<sup>12)</sup>、Fermilab<sup>13)</sup>で進められている。

これまでに実証されている量子コンピュータの量子優位性は、いわば量子コンピュータが得意とする特殊な計算について示されたものである。実用的な計算を実行させるには、量子コンピュータ

で発生するエラーを検出し訂正する技術が必要とされている。この誤り耐性汎用量子コンピュータで実用的な計算をするには100万量子ビットが必要とされており、現行の量子コンピュータの単なる拡張では困難である。そのため、冷凍機だけでは無く、システム全体の基本設計の模索がされており<sup>14)</sup>、希釈冷凍機の最終的な姿についても今後の重要な検討課題とみられる。

#### 4. アルバックグループでの取り組み

弊社アルバック・クライオ株式会社では、クライオポンプの製造・販売で培った極低温技術と、株式会社アルバックの真空技術と材料技術を技術的バックグラウンドに、量子コンピュータ向け希釈冷凍機の開発を行っている。2014年から大阪市立大学（現大阪公立大学）との間で、無冷媒希釈冷凍機の技術開発の共同研究プロジェクトを推し進め、小型であるが無冷媒の希釈冷凍機技術の蓄積を行ってきた。2021年からJST(科学技術振興機構)のムーンショット型研究開発事業に参加し<sup>15)</sup>、国内の量子コンピュータ研究者との連携を深め、研究開発を加速させている。これまでに、図1の希釈冷凍機試作機を製作し、希釈冷凍機も含めた純国産の量子コンピュータ実現に向け取り組んでいる。

#### 参考文献

- 1) F. Arute et al., Nature **574** (2019) 505
- 2)<https://newsroom.ibm.com/2022-11-09-IBM-Unveils-400-Qubit-Plus-Quantum-Processor-and-Next-Generation-IBM-Quantum-System-Two> (Accessed: 2023/6/17)
- 3)[https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324\\_1/index.html](https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324_1/index.html) (Accessed: 2023/6/17)
- 4)<https://research.ibm.com/blog/100k-qubit-supercomputer> (Accessed: 2023/6/17)
- 5)<https://nanoscience.oxinst.com/resources/template/celebrating-50-years-of-dilution-refrigeration> (Accessed: 2023/6/17)

- 6) 中込秀樹:低温工学概論, 東京電機大学出版局, (1999) 第6章
- 7) Z. Zaho : Cryogenic Engineering and Technologies, CRC Press, (2019), Chap.11
- 8) 山本剛 : 日本物理学会誌 **75** (2020) 610
- 9) 猪股邦宏ら : IEEJ Transaction on Fundamentals and Materials **142** (2020) 190
- 10) S Krinner et al. : EPJ Quantum Technology **6** (2019) 2
- 11)<https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap> (Accessed: 2023/6/17)
- 12)<https://bluefors.com/blog/introducing-kide-large-scale-cryogenic-platform/> (Accessed: 2023/6/17)
- 13)M. Hollister et al. : arXiv:2108.10816 (2021)
- 14) W Munro ら : NTT 技術ジャーナル, **3** (2021) 30
- 15) <https://ms-iscqc.jp/> (Accessed: 2023/6/17)

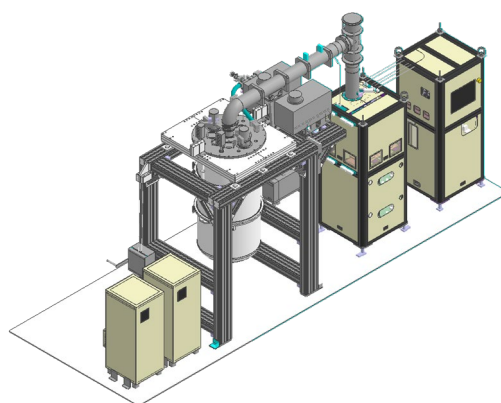


図1 希釈冷凍機試作機の外観