

# 極低温多価イオン源用小型超伝導コイルの開発

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 基盤理工学専攻  
応用物理工学コース 中村信行研究室 鈴木健人

## 1. 背景・目的

### 1.1 基礎物理定数の時間依存性

基礎物理定数とは一般的に値が変化しないと考えられている物理量を指す。しかしDiracが大数仮説の中で時間変動の可能性を指摘して以降、様々な議論がなされ、中でも微細構造定数 $\alpha$ は無次元の物理量であるため単位の不確かさを排除した評価が可能である点から活発な議論・検証が行われている。近年J. Webbらの研究グループが100億光年のクウェーサーからの光の吸収スペクトルを地球上のスペクトルと詳細に比較したところ、微細構造定数 $\alpha$ に有意な変動が存在しうることが判明している[1][2]。

一方で実験室での高精度周波数標準間の周波数比較を長期間行う検証手法も注目されているが現在観測されている変動の上限値は $\dot{\alpha}/\alpha = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17}/\text{year}$ にとどまっている[3]。この検証を超える精度で $\alpha$ の依存性を評価するには『検証期間の延長』『測定精度の向上』『 $\alpha$ の変動に対して周波数シフトが大きい遷移の選定』のいずれかが必要とされている。

### 1.2 多価イオンによる微細構造定数変動の観測

多価イオンの時計遷移は①電場や黒体輻射に対する遷移周波数のシフトが小さいこと、②微細構造定数 $\alpha$ の変動に対して遷移周波数シフトが大きいことから、新しい周

波数標準の候補として期待されている。理化学研究所のパイオニアリングプロジェクトE3では微細構造定数 $\alpha$ の時間依存性検証に向け、光周波数コムを用いたSr光格子時計と多価イオン原子時計の遷移波長を高精度に比較する実験を計画している。最終実験までの道筋を図1.1に示す。

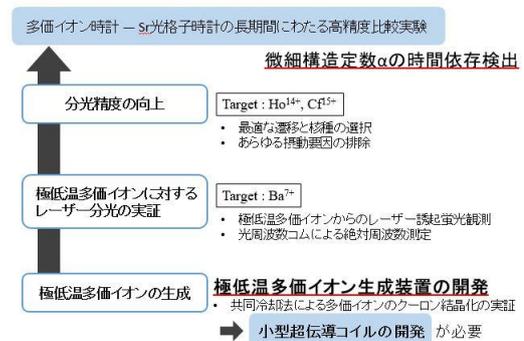


図1.1：最終目標へ向けた道のり

光周波数標準と同様の精度で分光を行うには、多価イオンを極低温に冷やしLamb-Dicke束縛条件を満たす領域にイオンを閉じ込めた上でレーザー分光を行う必要がある。そのため現在、理化学研究所にて極低温多価イオンの生成とレーザー分光の実証を目的とした新装置の開発を進めている。

### 1.3 極低温多価イオン源の構成と特徴

理化学研究所で開発している新装置は、レーザー冷却Be<sup>+</sup>イオンを用いた共同冷却法により多価イオンを極低温とし、レーザー分光を行う装置[4]である。図1.2に装置を横から見た全体図を示す。本装置の最大

の特徴は『多価イオンの生成』『クーロン結晶化』『レーザー分光』の全ての工程を真空装置内で二重封止された小型クライオチャンバー内のイオントラップで完結できる構成である。

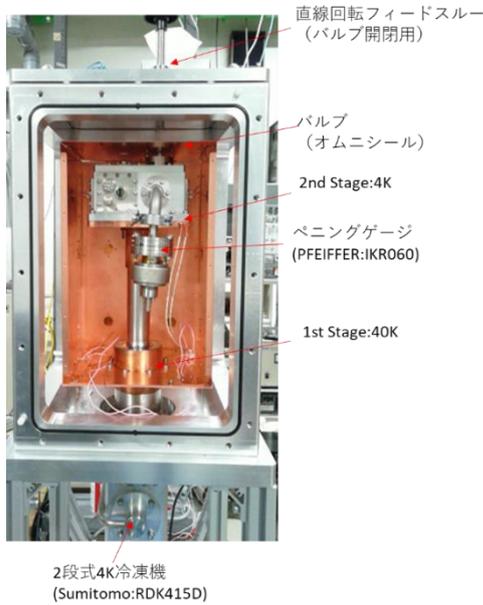


図 1.2 : 極低温多価イオン源の全体図

図1.3はクライオチャンバー内に格納されているイオントラップの概要である。イオントラップは生成・選別・分光の3領域に分割されており、固体ターゲットに照射するパルスレーザーを打ち分けることで任意のイオン生成ができ、生成したイオンは四重極ポールに直巻きしたコイル磁場によって分光領域まで運ぶことが可能である。また、コイルによって発生する磁場は分光領域に影響を与えないようにアンチコイルを巻くことで漏れ磁場を回避させている。

イオントラップを二重封止し極高真空度を達成することで、極低温多価イオンクーロン結晶の長時間保持を実現することを目指している。多価イオン時計の高精度化に向けて、多価イオンクーロン結晶の長時間保持の達成は避けて通れない課題であり、新装置の開発は最終目的の実現のために最

も重要な研究の一つである。

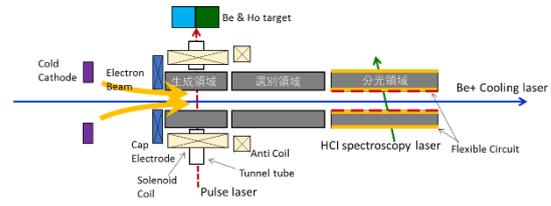


図 1.3 : イオントラップの概要

## 1.4 研究目的

微細構造定数 $\alpha$ の時間依存検出のために理化学研究所で計画されているSr光格子時計と多価イオン原子時計の高精度比較実験には、極低温多価イオンの生成とレーザー分光の実証をするための新装置開発が必要となる。そこで本研究では、新装置の開発に向けて不可欠である小型超伝導コイルおよびそのための電流導入用フィードスルーの開発・製作を目的とする。

## 2. 設計

### 2.1 コイルによる磁場計算

小型超伝導コイルによって形成される磁場の計算をMathematicaにて行った。まずコイルを密に巻いた場合の計算を行ったのち、実際にコイルを巻いて厚みや大きさを測定した。その後実際のコイルの厚みや大きさの値を用いて計算の修正を行った。実測した値を用いた計算結果を図2.1に示す。図中には $\text{Be}^+$ イオンのクーロン結晶を観測するためのカメラ位置と多価イオンを生成する際に $\text{Be}^+$ イオンを避難させるためのStore位置を記載している。この位置で磁場の漏れ出しが大きいと $\text{Be}^+$ イオンのレーザー冷却が難しくなることから、この位置で弱磁場かつ一定となるコイルの仕様を目指している。

またこのコイル冷却試験を試みたところ

10.6Kまで到達したが超伝導駆動ができていなかったため、熱を逃がしやすい新しいフィードスルーの設計が必要となった。

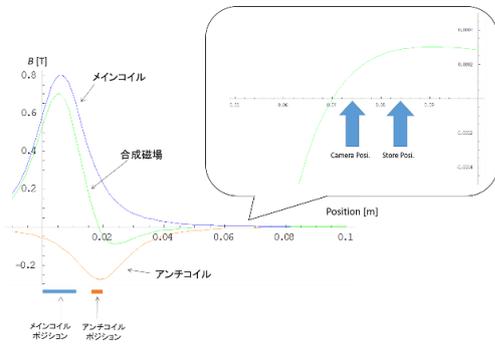


図2.1：実測値を用いた磁場計算結果

## 2.2 フィードスルー用窒化アルミニウムの設計

チャンバー内の熱を逃がすため新しい電流導入用フィードスルー用窒化アルミニウムの設計を行った。元々使用していたものは図2.2に示すように窒化アルミニウムにニオブ線を通す穴が2つある構造で、穴にニオブ線を通し、もう一方から超伝導線を入れ極低温用接着剤を流し込み硬化させる仕組みである。現在はテスト段階のためニオブ線は短絡させているが、本来超伝導線はコイルとして巻かれているニオブ線と接続されるため、ニオブ線がクライオチャンバー内で宙に浮くことから冷え切らない可能性が懸念されている。

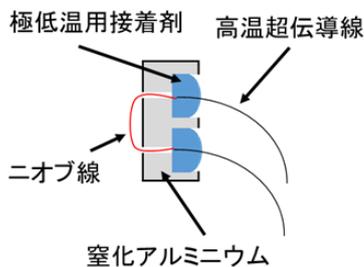


図2.2：従来のフィードスルー構造

この欠点を改善するために今回新しく設計を行ったフィードスルー用窒化アルミニウムを図2.3に示す。超伝導線を通せる格子

状の穴を窒化アルミニウムに2つ開け、超伝導線を差し込んだのち、線の一端同士をニオブ線ではんだ付けする構造になっている。この構造であれば超伝導線を伸ばすことでクライオチャンバー内のコイル上で接続が可能となり、極低温までの冷却を期待できる。

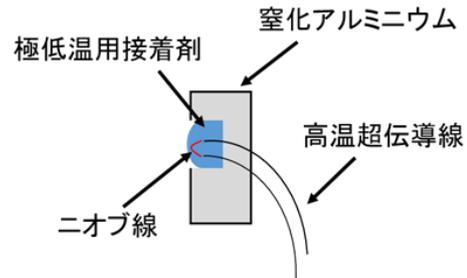


図2.3：設計したフィードスルー構造

## 2.3 クライオチャンバー内への熱流入量計算

本装置の多価イオン源は装置全体を極低温に保つ必要があることから、外部からの熱流入量が冷凍機で冷却できる熱量よりも小さい必要がある。熱流入経路を図2.4のように考え、 $P_1$ は冷凍機で冷却する熱量、 $P_2$ は超伝導線を通してクライオチャンバーへ流入する熱量、 $P_3$ は輻射によって銅シールドからクライオチャンバーへ流入する熱量として計算を行った。

また、今回の計算においてフィードスルーの超伝導線の長さを装置運用の際に用いる予定の15cmとしている。それぞれの熱量について計算を行った結果を表1に示す。この結果から外部からの熱流入量 $P_2 + P_3$ が冷凍機で冷却できる熱量 $P_1$ より小さいことがわかるため外部からの熱流入は問題ないと判断した。

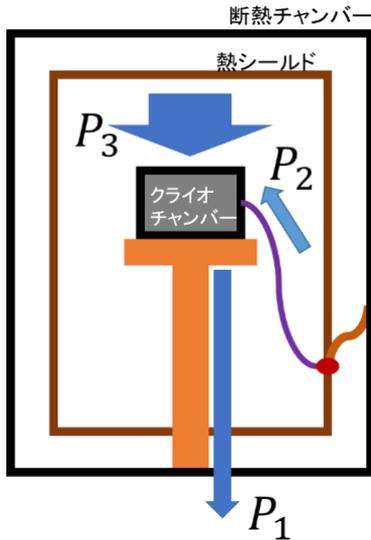


図2.4：熱流入経路の概略図

表1：熱流入量の計算結果

| 熱の種類          | 熱量[W]                  |
|---------------|------------------------|
| 冷凍機P1         | 1.5                    |
| 高温超伝導線を伝う熱P2  | $3.56 \times 10^{-3}$  |
| 熱輻射P3(アルミニウム) | $3.314 \times 10^{-4}$ |
| 熱輻射P3(SUS)    | $7.66 \times 10^{-4}$  |

### 3. 装置製作と機能試験

#### 3.1 フィードスルーの製作

実際にフィードスルーを製作する際には図3.1に示す流れで行った。

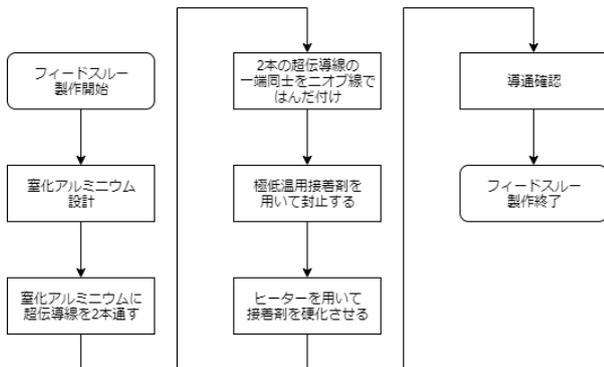


図3.1：フィードスルー製作の流れ

製作したフィードスルーはクライオチャンバーの側面にはめ込む形で取り付けた。その後図3.2のようにクライオチャンバーを熱シールド内へと設置させると同時に、フ

ィードスルーの超伝導線と断熱チャンバーから伸びている銅線を熱アンカー部分ではんだ付けした。しかし装置を冷却させる際にアンカー部分で発生する熱が原因で極低温にならない可能性があるため、アンカー部分での接続についていくつかの方法を試験した。それぞれの接続に関して機能試験として冷却試験および電流試験を実施した。冷却試験では装置運用を想定している4Kまでの冷却を目標に冷凍機で冷却を行った。一方電流試験では10K程度まで冷却されている場合に冷却したまま電流を流し、超伝導状態で20A程度の電流を流すことを目標として行った。



図3.2：クライオチャンバーを熱シールド内に設置した様子

#### 3.2 極低温用接着剤を用いた接続

アンカー部分に発生する熱を逃がすため窒化アルミニウム板をネジ止めし、図3.3のように板の上から極低温用接着剤ニトフィックスを直接付着させて熱を逃がす方法を試みた。この接続方法で冷却試験を試みたところ図3.4のような結果となり、21.4Kまでしか冷えなかった。更に真空時の装置の振動によってアンカー部分が外れてしまい、

より強固な接続方法を模索する必要があることが判明した。



図3.3：窒化アルミニウム板の上から接着剤を付着させた様子

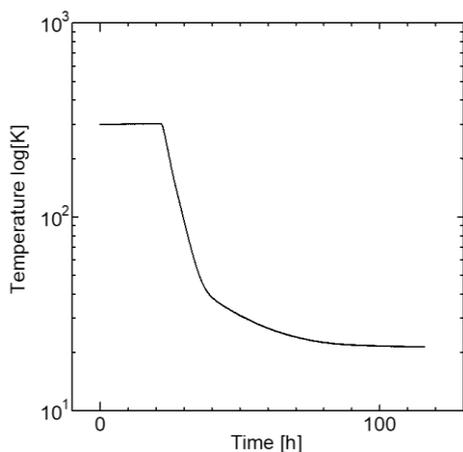


図3.4：極低温用接着剤を用いた接続での冷却試験結果

### 3.3 銅板を介した接続

より低温への冷却およびアンカー部分が外れないようにするため、図 3.5に示すように窒化アルミニウム板の上に貼った銅板を介して接続を試みた。この接続方法での冷却試験は図3.6のような結果となり、12.9Kまでしか冷えていないものの以前より冷却性能を改善することができた。電流試験も行ったところ図3.7のような結果が得られたが、目標の20Aまで流すことは出来なかった。装

置運用を目指すにあたり、より低い温度まで冷却することが必要となる。

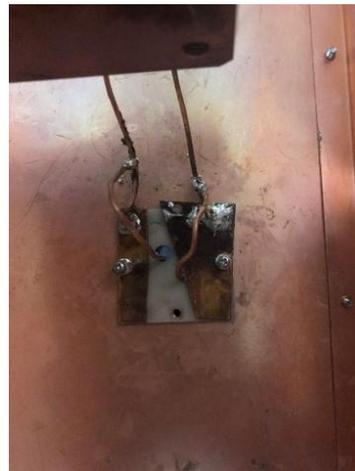


図 3.5：アンカー部分に銅板を用いた接続

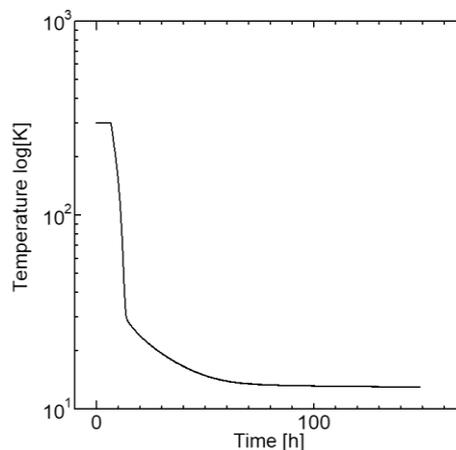


図3.5：銅板を介した接続での冷却試験結果

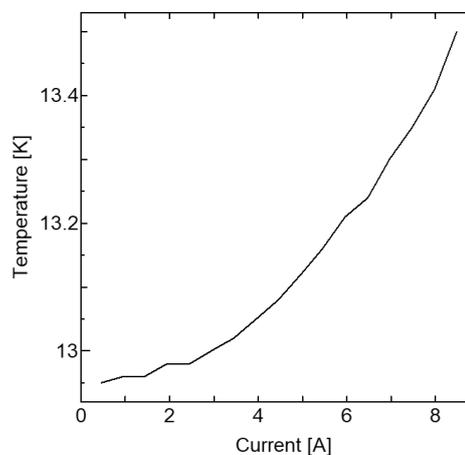


図3.6：銅板を介した接続での電流試験結果

### 3.4 超伝導線の長さ変更による接続

より低温へ冷やすためにフィードスルーの超伝導線の長さを変更する方法を試みた。熱流入量計算では超伝導線の長さの問題はなかったが、超伝導線の長さが熱流入量と関係があると考え、超伝導線の長さを15cm → 30cmと変更し試験を行った。図3.7は冷却試験の結果である。この方法で10.3Kまで到達し、以前のフィードスルーを用いた試験と同程度の温度まで冷やすことに成功した。

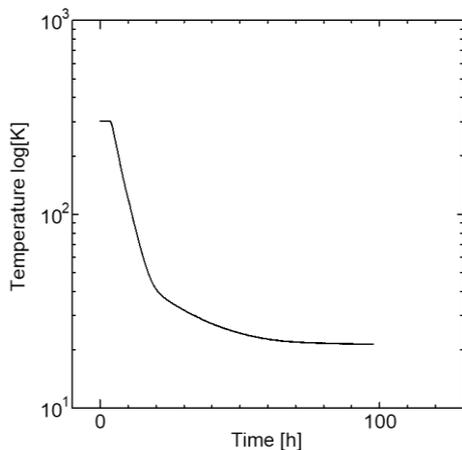


図3.7：超伝導線の長さを変更による接続での冷却試験

## 4. 結論

微細構造定数  $\alpha$  の時間依存検出のため理化学研究所にてSr光格子時計と多価イオン原子時計の長期間にわたる高精度比較実験が計画されている。本研究では、極低温多価イオンの生成とレーザー分光の実証をするための新装置の開発において不可欠な超伝導コイルおよびそのための電流導入用フィードスルーの設計・製作を行った。

今後は更なるコイル開発や装置改善に努めていき、冷却試験で10K以下まで冷やした上で超伝導駆動できる構成を模索していく予定である。

### 参考文献：

- [1] J.K.Webb, Victor V.Flambaum, Christopher W.Churchill, Michael J.Drinkwater, John D. Barrow, Phys. Rev. Lett. 82, 884 (1998).
- [2] J. K. Webb, M. T. Murphy, V. V. Flambaum, V. A. Dzuba, J. D. Barrow, C. W.Churchill, J. X. Prochaska, and A. M. Wolfe, Phys. Rev. Lett. 87, 091301 (2001).
- [3] T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt, C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, J. C. Bergquist, Science 319, 5871, 1808 (2008).
- [4] N. Kimura, K. Okada, N. Nakamura, N. Ohmae, H. Katori, and M. Wada, RIKEN Accel. Prog. Rep. 50, 202 (2017)