

# 加速キッチン🌀

～サイクロ流 地球にない原子～

2018年 12月 18-19日

東北大学サイクロترون・ラジオアイソトープセンター

## イベントの流れ



### 1日目

9:00~10:00 ● 受付 **講義室**

10:00~10:45 ● 挨拶、オリエンテーション **講義室**

グループごとに分かれて、自己紹介・チームビルディングを行いました。

10:50~12:30 ● サイクロ見学

今回の実験で用いる放射線管理区域内の加速器等の装置群を見学しました。

12:30~13:30 ● 昼食・休憩 **理薬食堂**

13:30~14:30 ● 実験内容の紹介 **講義室**

今回の実験全体の目的、それぞれのグループごとの役割について紹介しました。

14:30~18:00 ● オフライン実験 **計測室1** **計測室2**

明日からの加速器実験に向けて、テスト用のイオンや同位体を用いて練習しました。

18:00~18:30 ● まとめ・解散 **講義室**

### 2日目

9:00~ 9:30 ● 受付 **講義室**

9:30~12:30 ● オンライン実験 **計測室1** **計測室2**

本番の実験です。加速器を用いてフランシウムをつくり、トラップしました。

12:30~13:30 ● 昼食・休憩 **理薬食堂**

13:30~16:30 ● オンライン実験 **計測室1** **計測室2**

午前の続きです。結果報告に向けて各グループ実験を進めました。

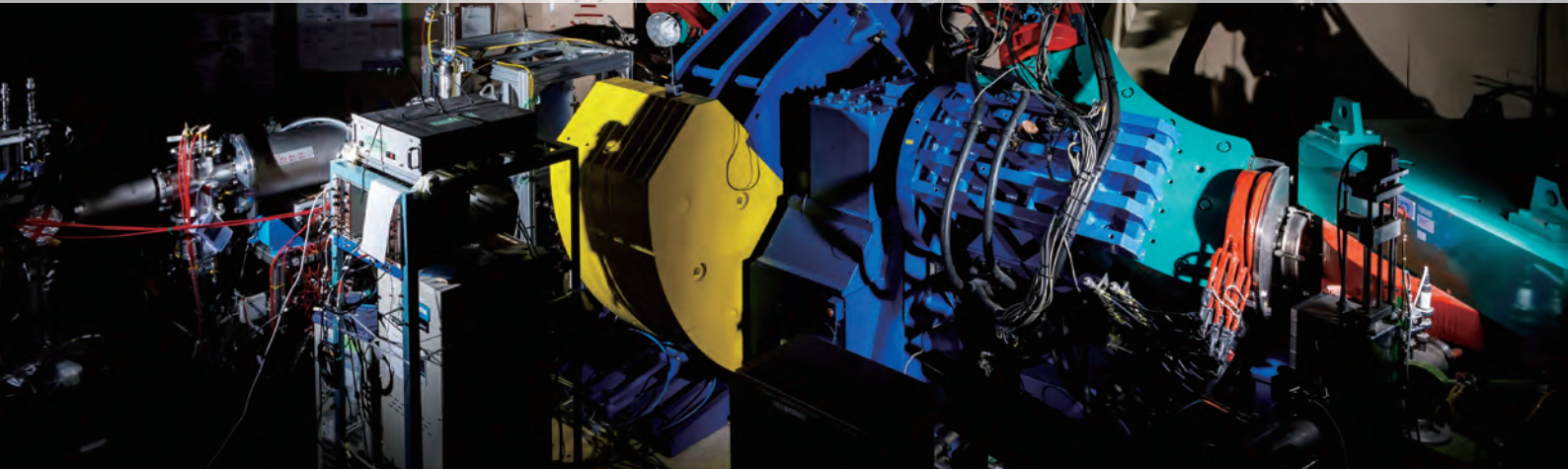
16:30~18:00 ● グループごとに結果報告 **講義室**

それぞれのグループごとにどんな結果が得られたか発表しました。

18:00~18:30 ● 未来博士号の授与、アンケート **講義室**

18:30~ ● 解散 **講義室**





## ■ 実験の目的

今回の実験の目標はフランシウム (Fr) という原子を核融合反応で生成して、それをレーザーで閉じ込める (トラップ) することです。トラップされたフランシウムの性質を調べることで反物質が宇宙から消失した謎という大きなテーマにアプローチできます。このレーザートラップというのがここ数年間東北大で取り組まれている難しい課題で、今回は3グループに分かれてこれに研究者と一緒に挑戦してもらいました。

## ■ 各グループの役割

### グループC

#### フランシウムのトラップ

生成したフランシウムをレーザーと磁場での力で閉じ込めて観測します。

### グループA

#### ビーム輸送

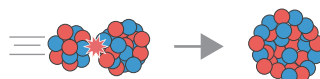
フランシウムのイオンをできるだけ効率よく運びます

### グループB

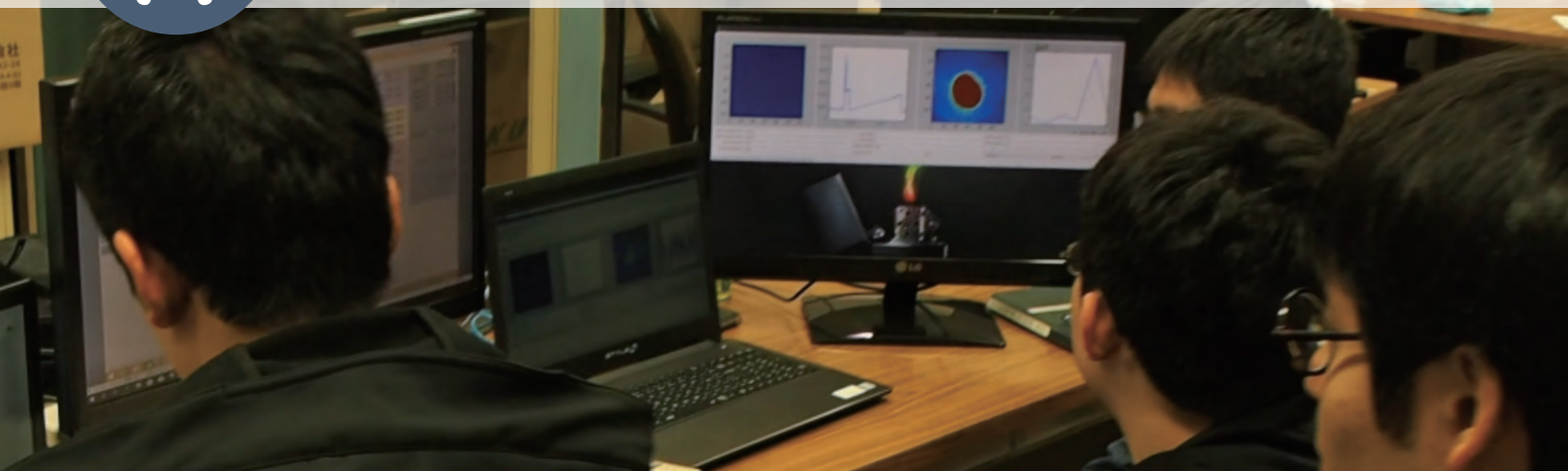
#### ビーム診断

生成したイオンはどのような元素で、こういった元素に崩壊するか調べます。

酸素原子が金イオンと衝突することで核融合反応が起こりより重い原子が生成されます。

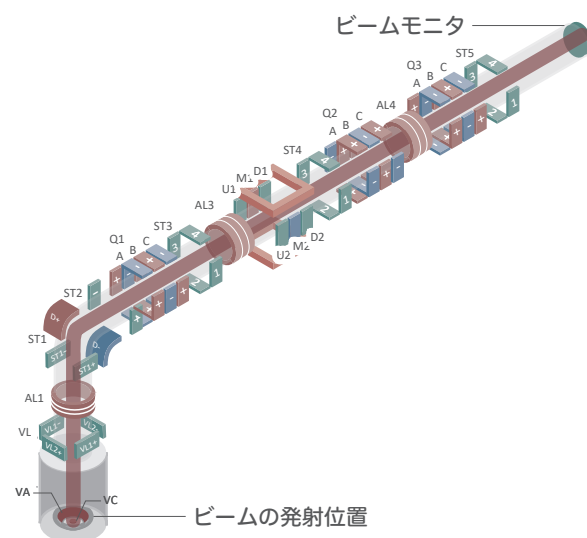


## イオンビームを電気と磁場の力で輸送してみよう

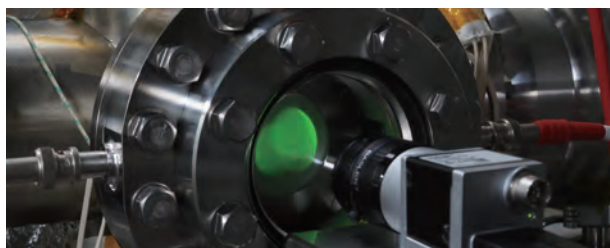


## ■ グループ A の目標

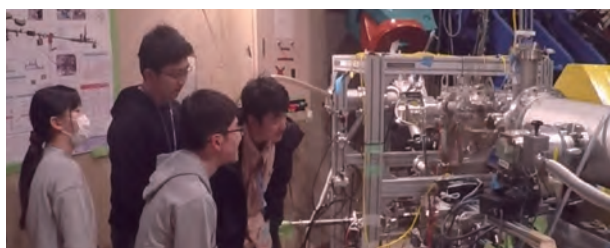
グループ A は核融合によって生成した Fr やその他のイオンを電磁場の力で効率よく輸送することを目指して実験を行いました。右図のようにイオンが生成される領域からビームラインの末端のビームモニタまでおよそ 12 m を数十個の電極、磁石を使って制御する繊細な実験です。さらにウィーンフィルタとよばれる磁場と電場の組み合わせで飛んでくるイオンの質量を分別する装置を使って、どんなイオンが飛んできているかを個別に調べます。



金標的から目標とするビームモニタまでたくさんの電極を活用してビームを輸送します。



イオンビームの像（緑の蛍光像）



ビームを制御しながら像を確認中

## ■ ビームを輸送してみる

イオンビームはビームライン中の 2 台のビームモニタによって像を確認することができます。まずは実際のビーム像を直接目で確認しながらビームを動かしてみました。その後制御室に移り、CCD カメラで撮像したビーム像をもとにリモート制御でそれぞれの電極や磁石を制御しながらビームを奥まで輸送していきます。うまく輸送するためには、収束を目的とした電極や軸調整の電極などの特性を理解しながら制御していく必要があります。初日にはなんとかビームを一番下流のモニタまで輸送することができました。



## ■ 特定のイオンのみを取り出す条件を計算

イオンビームは磁場によってローレンツ力を受け、電場によってクーロン力を受けます。この二つを同時に反並行に与える状態にすると、二つの力が等しい条件のイオンのみを取り出すことができます。この実験ではカリウムやカルシウム等の様々なイオンも同時に生成されるため、これらの力を計算することで、どのような制御を行うとどんなイオンを取り出すことができるか、中高の物理の知識を総動員して計算をしました。

$$E=45 \text{ の時} \quad 45 = \frac{\sqrt{2qvB^2}}{m} \quad 45^2 = \frac{2qvB^2}{m}$$

$$45^2 \times m = 2qvB^2 = 900 \times 197$$

よってストロンチウム

$$E=70 \text{ の時} \quad 70 = \frac{\sqrt{2qvB^2}}{m} \quad 70^2 = \frac{2qvB^2}{m}$$

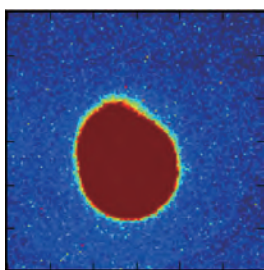
$$70^2 \times m = 2qvB^2 = 900 \times 197$$

よってカリウム

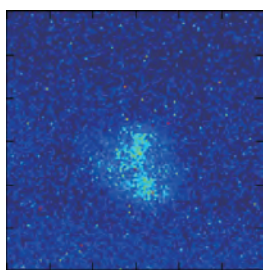
$$E=85 \text{ の時} \quad 85 = \frac{\sqrt{2qvB^2}}{m} \quad 85^2 = \frac{2qvB^2}{m}$$

$$85^2 \times m = 2qvB^2 = 900 \times 197$$

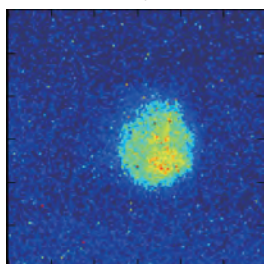
イオン取り出し条件の計算の様子



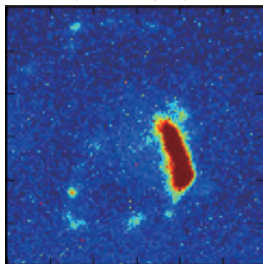
カリウム



ストロンチウム



カルシウム



金

## ■ 特定のイオンの取り出し実験

先述の計算を元に実際にイオンビームの制御を行ったところ、左図のように様々なイオンの取り出しに成功しました。特に金イオンは大変量が少ないので、観測が難しいのですが、制御に工夫を凝らして終了目前でなんとか像を確認することができました。今回は加速器のトラブルで十分なフランシウムを生成できず、像の確認をできませんでしたが、これらのイオンの輸送の想定からフランシウムの取り出しに必要な条件の予測も行うことが可能になります。

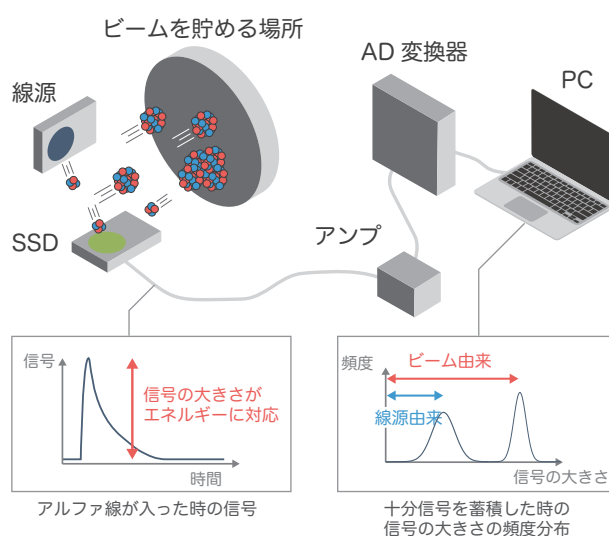
加速器実験において効率的なビーム輸送は欠かせない要素です。学校で学ぶ電磁気の知識を総動員して挑みました。



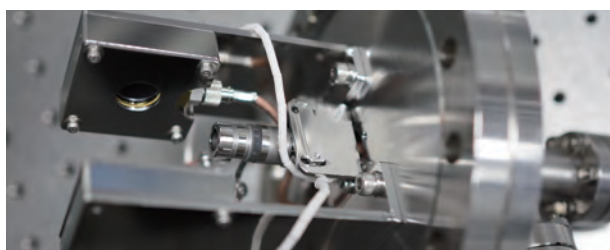


## ■ グループ B の目標

グループ B はイオンビームのより詳細な分析を行います。本実験がターゲットにしている Fr は寿命があり、数分後に $\alpha$ 粒子を出して崩壊します。その他にも様々な $\alpha$ 粒子を出して崩壊する同位体がありますが、この時の $\alpha$ 粒子のエネルギーを調べることで、それぞれの種類や生成量を分析することができます。まずは答えが分かる線源で事前にテストを行った上で、実際に測定したエネルギーの頻度分布と同位体のデータベースから、どんな同位体ができただか調べることが目的です。



SSD 検出器の信号の大きさからアルファ粒子のエネルギーを求め、そこから崩壊を分析します



チャンバー内部の SSD 検出器や線源の様子の一例



SSD 検出器からの生信号を確認中

## ■ SSD 検出器の準備

$\alpha$ 粒子のエネルギーを調べるために SSD 検出器を用います。まずはこの検出器から出ている信号をオシロスコープで調べることで、 $\alpha$ 粒子由来の信号がどのように電気信号に変換されてデータ処理されているのかを確認しました。目にみえない粒子のエネルギーを測るという複雑な計測系を 1 つ 1 つ確認しながらどういう仕組みで測定ができるかを頑張って理解していきました。



制御室に移動後は線源由来の同位体の分析を行いました。実際に測定したエネルギースペクトルから NuDat[1] というオンラインの同位体データベースを用いて、それぞれのピークがどの崩壊に対応していくか調べていきます。アルファ線を出す同位体はたくさんあります。その中から崩壊の順序やエネルギーを元に確からしい同位体を頑張って探して行きました。また、この結果を元にフランチウムがどのようなエネルギースペクトルになるか外挿して予測を行いました。

[illegible]

## ■ 本実験での分析

線源テストを参考にいいよ本実験データの分析です。線源由来のピークの右側にたくさんのピークが確認することができました。線源テストから校正したエネルギーからどんな崩壊が起こったか分析していきます。 $^{239}\text{Pu}$  崩壊系列上は存在しないのではと考えていましたが、 $^{241}\text{Am}$  線源の製造過程で  $^{239}\text{Pu}$  が用いられることを文献から発見して予測を立てるなど、独創的なアイディアも飛び出しました。同時に検出したフランシウム由来と思われるアルファ線の頻度から実際に飛来したフランシウムの量を計算しました。

中学・高校で原子について学習しますが、実際に調べてみると同じ元素記号でも多彩な同位体が存在していることが分かります。なじみのない重元素をたくさん同定できました。

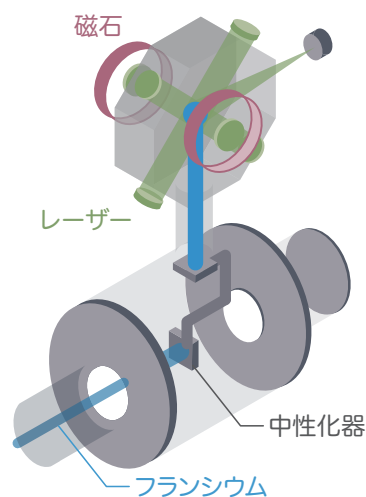


## レーザーでフランシウムをトラップしよう

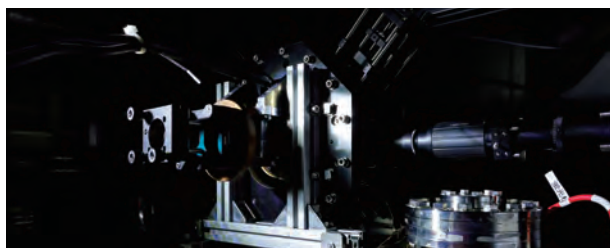


### ■ グループ C の目標

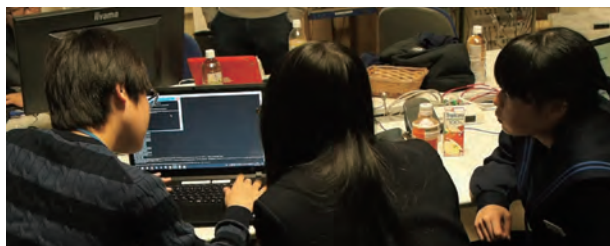
グループ C はグループ A ～ B によって輸送されたフランシウムをレーザーでガラスのセル内に閉じ込める（トラップ）ことが目標です。セルの中心に勾配磁場が印加されている状態で、フランシウムの共鳴周波数に対応したレーザーを6方向から照射することで、その中心にフランシウムはトラップされます。輸送されてくるフランシウムはとて少ないので、磁場や周波数の条件を最適化できるかがカギです。



フランシウムは購買磁場中にレーザーを6方向から照射することでトラップすることができます



フランシウムのトラップ装置



トラップ原子の解析中の様子

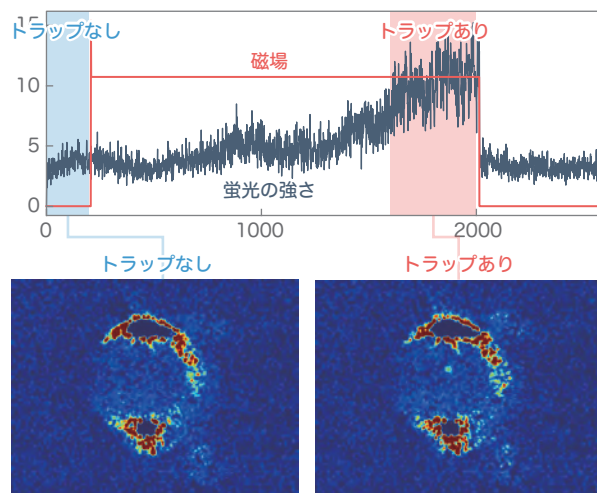
### ■ トラップ装置の見学

トラップを行うためには、必要な周波数のレーザーを供給するためのレーザー系、その他様々な複雑な装置群が必要になり、遠隔で操作しながら複数人で協力して行います。それぞれの部屋にどんな役割があり、どういう仕組みでトラップを行うのか見学しながら確認しました。

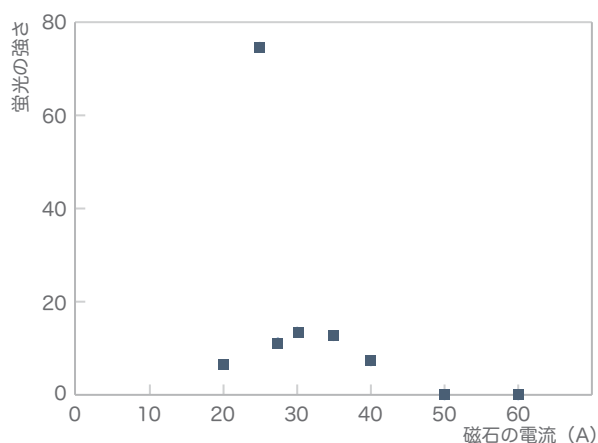


## ■ Rb を用いたトラップテスト

加速器を運転する前に、まずはガラスセル中に充満している Rb 原子を用いたテストを行いました。右図のように磁場を印加することでトラップされた Rb 原子の画像を確認することができました。レーザーのパワーや露光時間といった観察条件等を調整しながら 1 日目になんとか観測した結果です。実験を進めながら、そもそもなぜ原子はレーザーでトラップされるのかについて研究者とのディスカッションも盛んにおこなわれていました。



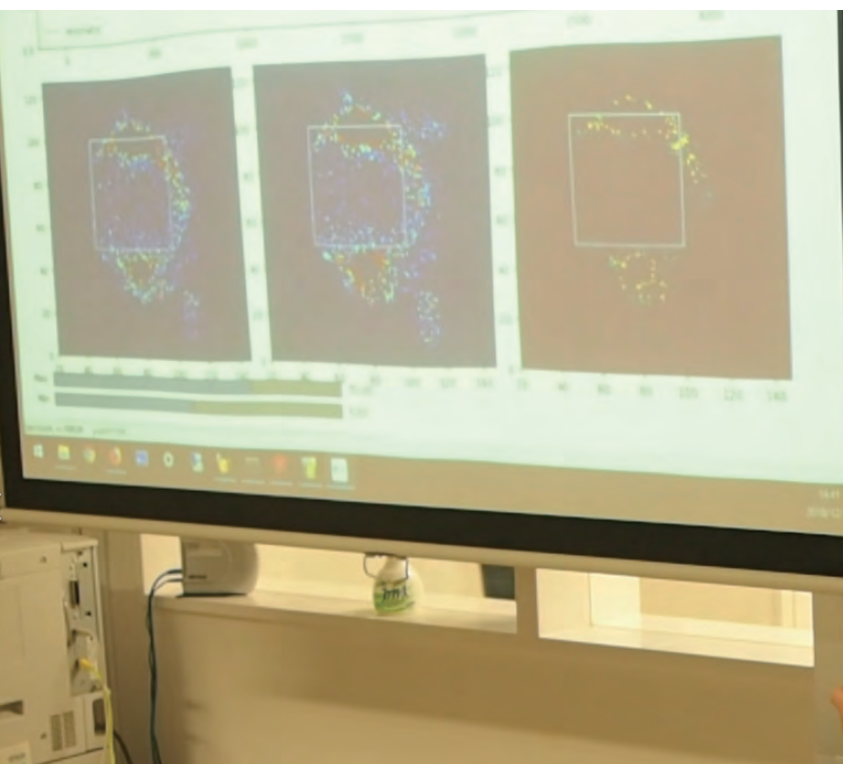
典型的なトラップされた原子の画像です。条件を最適化することで、明瞭な像の観測に成功しました。



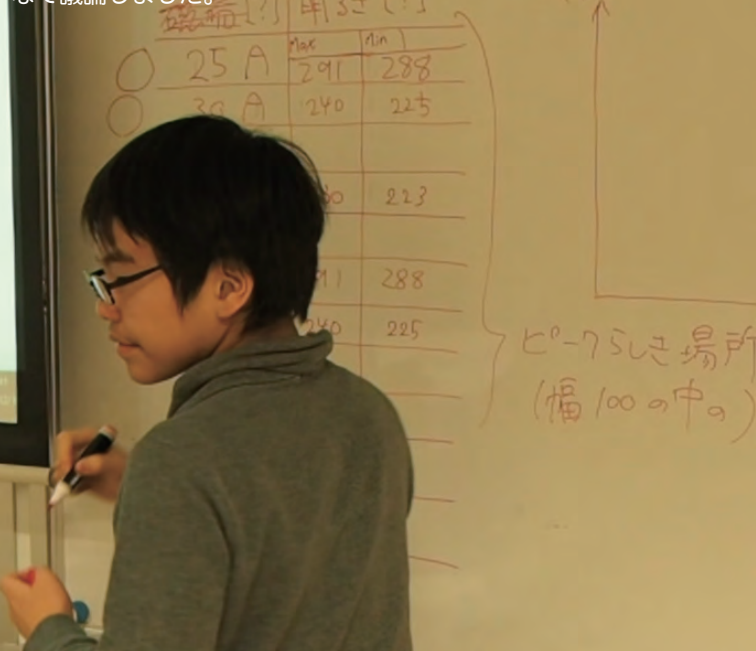
磁場によってトラップされた原子の蛍光の強さを比較しました。25 A で強い傾向がみえたものの、30 A 程度が最適な磁場のようです。

## ■ Rb 原子を用いた磁場の最適化

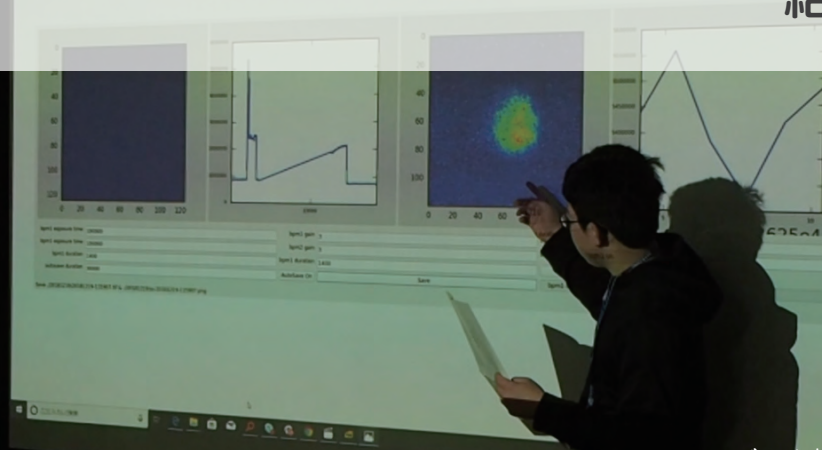
さあ、いよいよフランシウム（Francium）のトラップといきたいところでしたが、加速器のトラブルでほとんどフランシウムをトラップ装置まで運べなくなっていました。こういう時にどういう意味のある実験を行うかが、この手の加速器実験で重要なポイントです。みんなで頭をひねって、そもそも最適な磁場の値はいくつなのかを、調べることにしました。左図のように 30 A あたりだと上手くトラップできるというとても貴重なデータを得ることができました。25 A でも強い傾向がみえましたが、再現性はどうかについても議論が沸きました。



磁気光学トラップの最適な磁場条件を見つけるために、ホワイトボードにこれまでの結果を整理しながらグループのみんなで議論しました。



## 結果報告

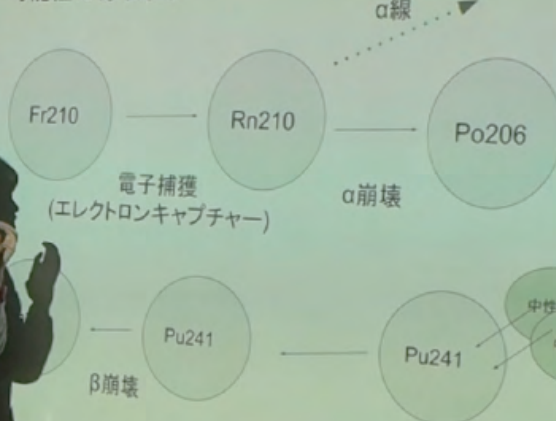


グループ

**A**

ビーム輸送を行い、それぞれどんなイオンの分別ができたかをビーム像をみせながら紹介しました。

可能性のある原子



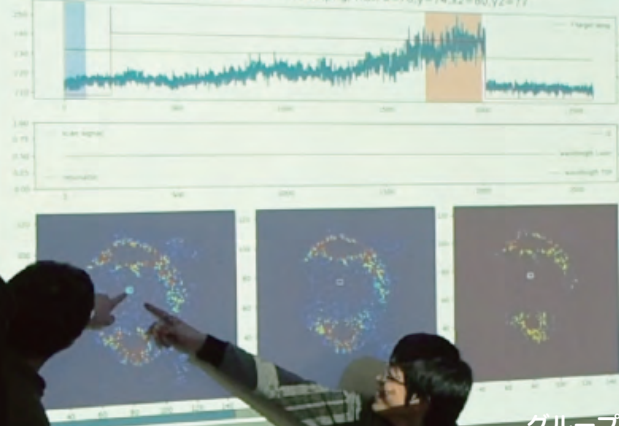
グループ

**B**

崩壊由来の $\alpha$ 線のエネルギーから同定した同位体について、崩壊系列を示しながら提案しました。

25A

Summary 20181219-120512.png, ROI: x=76,y=74,x2=80,y2=77



グループ

**C**

トラップした原子の画像を紹介して、どこにトラップした原子があるかを説明しました。

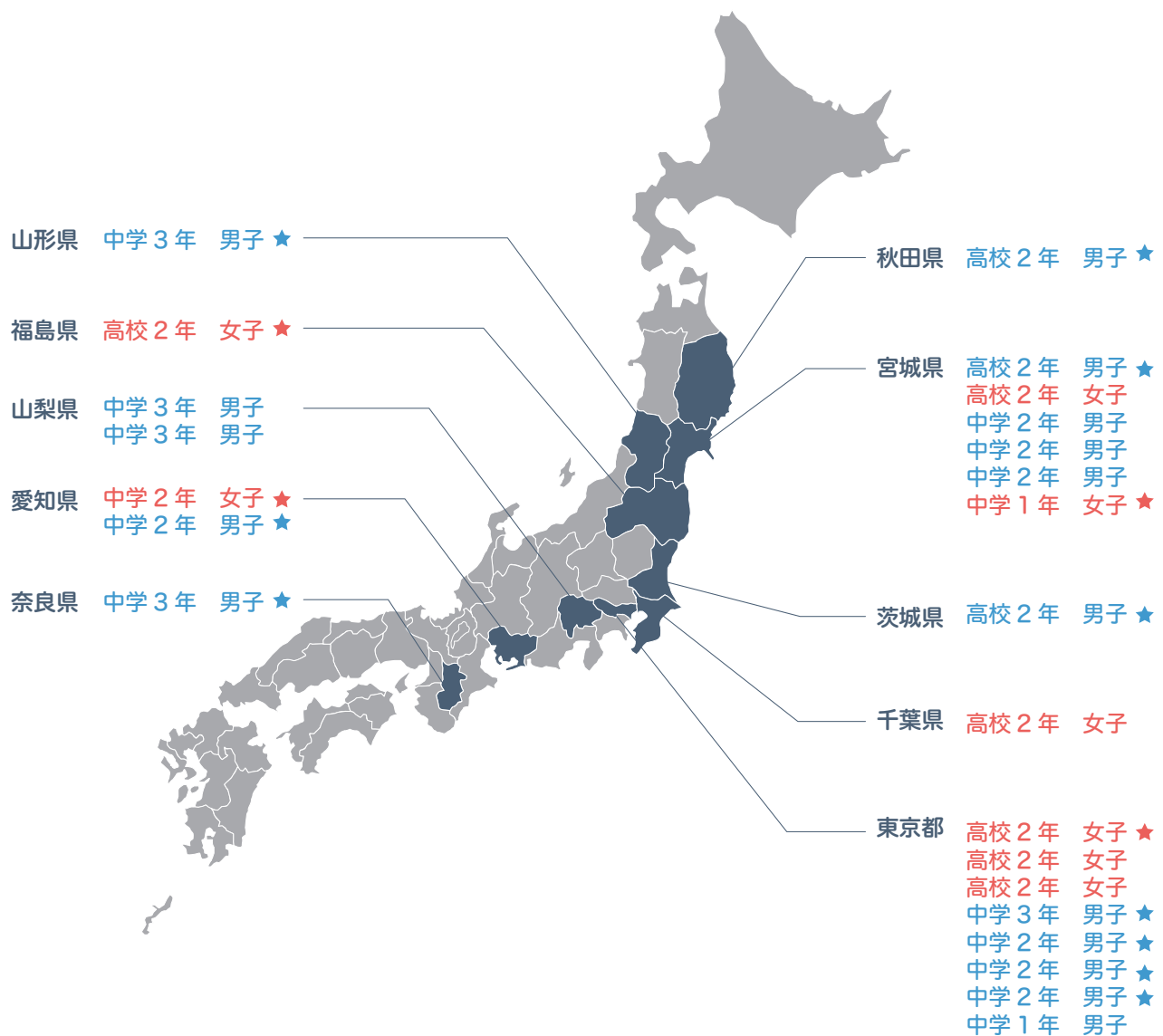


## 応募者・参加者情報

### Q1 どこからきましたか？

A1

東日本を中心として10の都道府県の中学校・高校から申込がありました。なお、参加者は★印です。24名の応募者のうち13名が選考を経て参加しました。



## Q1 将来の夢は？

A1

研究関連から、医者やシステムエンジニア等幅広い回答がありました。また、学年によってどのぐらい絞り込まれているかも違うようです。

物理学者

理科関係

SE

研究者

学者

医者

研究者  
or  
学芸員

科学者

ロボット  
クリエイター

医者

## Q2 加速キッチンを知りましたか？

A2

主にウェブサイト（ひらめき☆ときめき、東北大）をネットサーフィン中に見つけるケースが多いようでした。

ウェブサイト

ひらめき☆ときめきのウェブサイト

×3

東北大のウェブサイト

×1

誰から？

両親からの紹介

×7

学校の先生の紹介

×1

## Q3 過去に参加して面白かったイベントを教えてください。

A3

他のひらめき☆ときめきのイベント参加者が多いようです。その他 KEK の様々なイベントの参加も多いようで、どれも面白かったようです。

KEK のイベント

KEK の見学

Belle plus

東北大学

片平まつり

11月30日の東北大の講座

ひらめき☆ときめき

有機 EL のイベント

蝙蝠の超音波についてのイベント

カミオカンデ見学



## Q4 難しかったですか？よくわからなかったところは？

A4

特に中学生には難しいところもあったようですが、そこから楽しさへと後半に変わっていった参加者も多いようです。

### 難易度

難しかったが後半には大体理解できた

調整してビームを作る部分が難しく、また楽しかった

ちょうどよかった。正直、中1～高2で年齢幅が広くて簡単すぎないか不安だったんですけど、そんなことなかったです

ちょうどよく楽しめるものだった。また、説明もたおても分かりやすく、理解しやすかった

調整してビームを作る部分が難しく、また楽しかった

様々なことを教えてもらったので理解できました

分からない部分も多かったが、自分で結果を求めてみて試行錯誤する楽しみもあった。まさかプログラムの中身を見て推測するとは思わなかった。

少し難しかった

### わからなかったこと

スピン、共鳴、チャンネルなど

フランシウムと反物質の関係について

トラップの仕組み

## Q5 印象に残ったことや感想があれば教えてください

A5

難しさを感じつつも、最終的には思ったより自分たちにも加速器施設での研究や実験を理解して考え、議論できると感じてもらえたケースもあったようです。

加速キッチンの機械室以外は意外とラフ。今回の参加メンバーの頭の良さ、興味深々さ！！物理系の実験の楽しさ、化学系（私化学好きなので）との違い。元素の楽しさ！面白さ！！ホントにリアルな実験テーマでできた喜びと楽しさを感じました。興味関心の維持力の大切さ。

思ったよりラフなふんいきだったので、分からないことを理研の方々などに聞けて良かったです。特にお菓子と飲み物のおかわりが自由だということに驚きました

普段絶対に使えないような機械を使ってさまざまなことに取り組めてとても楽しかったし、貴重な経験ができたので良かったです

本当の実験の空気を味わえてよかった。加速器を近くで見れてすごいと思った

意外に、フランシウムは外のもっと重い原子とは違いすぐに（他と比べると）作れるということが印象に残った

データを調べるときにプログラムを直して使っていた部分が印象に残った

感めいをうけました。仕組みを理解しより興味がわきました

本物の物理学者の方と一緒に2日間本物の加速器を使えて感動した。

ないないと騒いでいた金イオンが見つかった時の感動

難しかったが後半には大体理解できた

時間が足りなかった



## Q6 加速器実験についてイメージが変わりましたか。

A6

チームで研究する雰囲気が普段の学校での実験と違いを感じる参加者が多い印象でした。また、研究はしばしば上手くいかないことが多く、その中でどういう姿勢で取り組むかということを生で体験した様子が分かります。

不具合や故障などがあっても臨機応変に対応していくことが実験や研究において大切だということがわかりました。こういった研究はたまにしか行うことができないということも初めて知ったので驚きました

もともと大変だと知っていましたが、ビームを運搬するためにいちいち数値をかえないといけなかったのも思ったより大変でした

もちろん実験自体も大変だけど、分析もなかなか大変だということ。実感一回一回の価値がでかい。もっと日々粒子加速して、原子作ってると思っていました。

だいぶゆるく行っているのだなと感じた。あと、全く見つからなかったところ。もっと見つかるものと思っていた。

みんなで同じことをするのではなく、いくつかのチームに分けて実験しているんだと知った

サイクロトロンという加速器とは別のタイプのものもあるということを知った

マシントラブルが多い、プログラムのソース解読

奥が深く難しかったです。理解できるとおもしろかったです

意外と自由に楽しそうにやっているんだなと思った

## Q4 来年度に期待することや開催してほしいイベント

A4

今回はマシントラブルでフランシウムのトラップまで達成できなかったので、次は目標を達成したいという内容が多かったです。

### 加速キッチンについて

こういった企画を来年以降も続けて欲しいです。素粒子関連の企画に参加してみたいです

中学生のイベントも高校生のイベントと同じような内容のものをもっと増やしてほしいです

来年はやはり、今年できなかったことや発展形もやってみたいと思う

これからもこのようなイベントをずっと続けてください。応援しています！！

加速キッチンと同じような内容のもの

### フランシウムを捕まえたい

実験がうまく行くこと

Frがあまりでなかったのでまたやりたい

ぜひフランシウムが観測される現場に立ち会いたいと思った

是非ともフランシウムを捕獲したい！！

成功すること！！（成功というか、最後までたどり着くこと）。今回フランシウムは見られなかったけど、それ以上のものを得られました。



## Q5 その他のコメント

### 保護者からのコメント1

改めまして、先日の【加速キッチン】では大変お世話になり、本当に有難う御座いました。ご担当の早水先生を初め、諸先生方やBグループのお兄さん、お姉さんに良くしていただいて感謝しかありません。

初日から、こんなに無知な親子で大丈夫なのか？と悶々としておりましたが、最終日の帰りの仙台駅での待ち合わせで、ひと目で成長したことがわかりました。

満面の笑みで駅の最後の牛タンを頬張りながら、「この二日間で宝物の時間になった！！本物の理科に出会った！！夢のような貴重な体験だった！！」と。機関銃のように話す息子を久しぶりに見ました。

興奮冷めず、自宅に戻ってからは早速アマゾンで「元素手帳」や「元素」の本を購入したり、いただいた「学位記」は額に入れて自室の良く見えるところに。もしかしたら「真夏の夜の夢」の中かも知れませんが、小さな「出来た」を成長の糧になったらな、と思っております。

早水先生の的確なフォローや説明、山本先生の知的好奇心を埋めてくださる助言など、日常生活や学校では体験できない

「リアル」を経験されている研究者の皆様と一緒に過ごせたことが「刺激のシャワーを全身に浴びてきた。」と話してくれました。

田中先生をはじめ初日に皆さまと貴重な時間を過ごさせていただく中、普段お聞きすることのないお話も伺うことができ、

母としても大変勉強になりました。有難う御座いました。

「また、先生に会いたい。。。」 呟く息子がいます。

機会がありましたら、必ず応募します！学園祭も気になっているようです。

### 保護者からのコメント2

本日まで加速キッチンにてお世話になりました中村です。

さきほど、無事、帰宅しました。

息子は、かなりのめり込んでできたようで、帰路でも色々解説していました。本当に貴重な時間をこのイベントに割いていただきありがとうございます。先生が取り組まれている「教育から科学、社会」というお話も感銘を受けました。

息子から直接、e-mailで質問が行くかもしれませんが、お時間あるときにご対応いただけると幸いです。

## 参加者からのコメント 1

先日は、お忙しい中、加速キッチンの資料を送っていただき、ありがとうございました。私たちが実験したことが、詳しくまとめられていて、とても分かりやすかったです。送っていただいた資料をもとに、自分なりに振り返り、学校の先生や両親にどう報告するか考えます。また、他のグループが行っていた実験の内容を、より詳しく知ることができ、実験全容をより理解できました。参加者の将来の夢や、参加したイベントなども載っていたので、同年代の考えを知り大変参考になりました。

加速キッチンに参加したことで、私が思っていた実験に対するイメージが大きく変わりました。世の中まだまだ知らない事だらけです。今年も「ひらめき☆ときめきサイエンス」に応募して、いろいろな実験に参加してみたいです。また、もし可能なら、もう一度加速器の実験に参加し、フランシウムのトラップを成功させたいと思います。

そして、もっと勉強に励み本気で東北大学を目指します！  
本当にありがとうございました。

## 参加者からのコメント 2

理系は個性的な人が多いので田中先生みたいに社交的で人当たりがよくて人望があり笑顔がよく似合う人はものすごく少ないと思いました。天然記念物というか国宝だと思います。先生の講演会やイベントや企画や先生主催の何かがあったら是非教えて下さい！