



国立研究開発法人

量子科学技術研究開発機構

高崎量子応用研究所

第67号

高崎研だより

役立つ科学

イオン注入用レーザーイオン源の開発

My favorite

手作りは楽しい！

日本/世界見聞録

トスカーナ州の小さな街

研究装置紹介

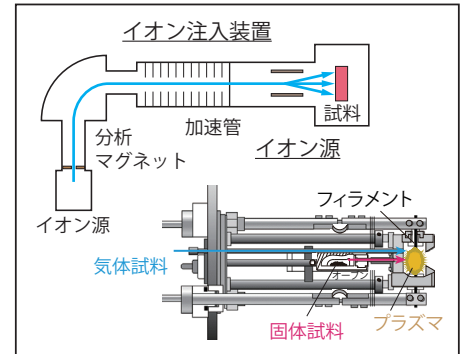
リアルタイム PCR 装置



Q1. イオン源とは、どのようなものですか？

イオンを加速する加速器には様々なものがありますが、その最上流にはビームのもととなるイオンを作り出すイオン源が不可欠です。高崎研のイオン加速器施設 (TIARA) の加速器の1つであるイオン注入装置は主に材料科学の研究開発に用いられ、最大 400 kV の電圧でイオンを加速して材料に注入 (イオン注入) することができます。

右図に、イオン注入装置及びイオン源を示します。鉄イオンのビームを注入する場合は、固体の塩化鉄 FeCl_2 をオープンで加熱気化した後イオン化して、電子と Fe^+ 、 Cl^+ などが混在したプラズマを生成させます。このプラズマからイオンを引き出して、分析マグネットの磁場で必要な Fe^+ のみを選別して下流に通します。そして、加速管で必要な速さ (エネルギー) まで加速し、材料に注入します。

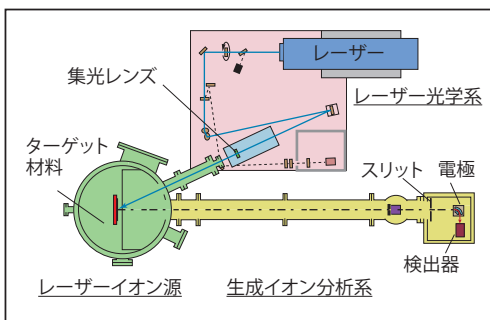


高崎研のイオン注入装置とイオン源

Q2. なぜ、新たにレーザーイオン源の開発が必要なのでしょう？

現在のイオン源は、内部のオープンで固体試料を加熱気化してからイオン化する必要があります。イオンの種類を変えたい場合、オープンの冷却・試料交換・再加熱等に 3 時間ほどの長い時間が掛かってしまいます。また、気化が困難な高融点の金属の中には、十分なビーム電流を安定的に得ることが難しいものがあります。これらの課題を解決するため、レーザーイオン源の開発を進めています。レーザーイオン源はオープン不要で、あらゆる固体からイオンを作ることができます。

Q3. レーザーイオン源開発の進捗状況について教えてください。

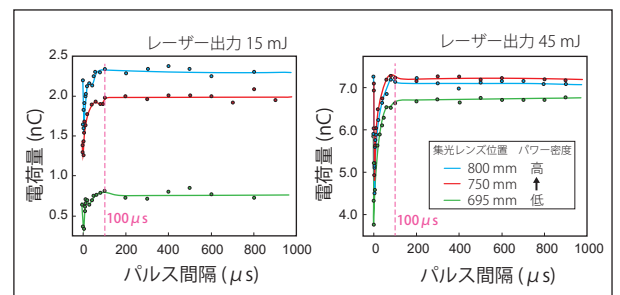


レーザーイオン源のテストベンチ装置

レーザーイオン源は、左図のように真空中で固定ターゲットにパルスレーザーをレンズで集光して照射することで、ターゲット材料のプラズマを生成します。オープンを使わないので、レーザーを当てるターゲットの種類を変えるだけで、迅速にイオン種を変更できます。このレーザーイオン源には、①プラズマの高繰り返し発生、②イオン注入に必要な様々なイオン種の発生、③プラズマからの高効率ビーム発生 の 3 つ開発テーマがあります。

①については、生成したパルス状のプラズマを用いて連続的にイオンを材料に注入するには、プラズマを高繰り返しで生成させる必要があります。基本的には、レーザーの照射の頻度を高めればよいのですが、高くしすぎると前のレーザーが生成したプラズマやガスが残っている状態で次のレーザーを照射することになるため、安定したプラズマを得られません。そこで、2 つのレーザーの照射時間間隔を徐々に短くして、2 つのプラズマのイオンの総電荷量を測定しました。その結果、炭素イオンの生成について、パルス間隔がおよそ $100 \mu\text{s}$ までは安定で、それ以下では電荷量が急激に減少することが分かりました。

②の様々なイオン種の発生では、炭素、チタン、銅、タンタルのイオンの割合を最大化するレーザーのパワー密度を明らかにしました。③高効率のビーム発生では、レーザーイオン源下流の直後にソレノイド電磁石を設置し、拡散しているプラズマを収束してビームとして使用されるプラズマの量を増やす研究を行っています。



レーザーパルス間隔による炭素イオン発生量

私がパン作りをはじめたのは、今から 20 数年ほど前のこと。家で焼き立てのパンが食べられたら最高だなと思い一念発起！ レシピ本を見ながらのパン作りから始め、その数か月後には月に 1、2 回パン教室へ通うことになりました。

当時はまだ子供たちも小さく、家族に協力してもらいながら、趣味の世界に足を踏み入れていったのです。習ったパンを家でおさらいしたり、パン作りのサイトを読み漁ったりして、作り方だけではなく使う材料についても深く知りうと、当時は暇さえあればパンに時間を費やしていたと記憶しています。

そんな日常が今も続いていて、真夏以外はほぼ毎日パンを焼いています。手の込んだパンなど作った時期もありましたが、結局のところ、日々食べるものは食パンやベーグルなどの食事系のパンばかり。焼き立てを家族に振る舞えて、おいしそうに食べてくれることが生きがいとなっています。



自家製セサミブレッド

そして、もう一つ。ここ数年で始めたことがケーキ作り。家族の誕生日や記念日など自己流でつく



楽しさの源泉 ケーキ作り

ることはありましたが、コロナ禍で時間を持て余していたこともあり、ちゃんと習ってみようと教室へ通い始めました。習ってみるとこれまた奥が深く、繊細で一筋縄ではいかないところが「沼」となり、どんどん深みにハマっています。多いときで月 3 回ほど、2 か所の教室に通うこともあり、味見をする夫が最近太り始めました (笑)。

パンもケーキもその日の天気、気温などで出来が左右され、同じ様に出来ないことが逆にやる気に繋がっています。食べる楽しさから作る楽しさへ、ここからまだまだ楽しさを追及していきたいと思います。

へとへとかあさん (ペンネーム)

日本/世界見聞録

トスカーナ州の小さな街

2023 年 6 月、イタリアはルッカで行われた原子力技術とその応用に関する国際会議に参加しました。主に欧州から総勢 400 名の参加者がおり、私はその中で「結晶材料を用いた新たな放射線検出器開発に関するワークショップ」を企画し、6 件の発表を無事まとめることができました。

ルッカは、斜塔で有名なピサから電車で 30 分のガイドブックにも載っていない小さな街ですが、観光客もちらほらと見かけます。中心街は大きな城壁で囲まれ、中心には円形劇場と呼ばれる楕円形の広場があるイメージ通りのイタリアの街です。広場はオープンカフェやレストラン、ジェラートショップなど、夜遅くまで賑わっています。カフェでとなりになった老夫婦も旅行で訪れていたようで、「ここは、何も無いのがいいんだ。何も予定を立てずに何もしないをしに来た。」この話を聞いて、何も無い街が少し楽しくなった気がしました。



ワークショップの様子



会議会場となった古代修道院 Real Collegio

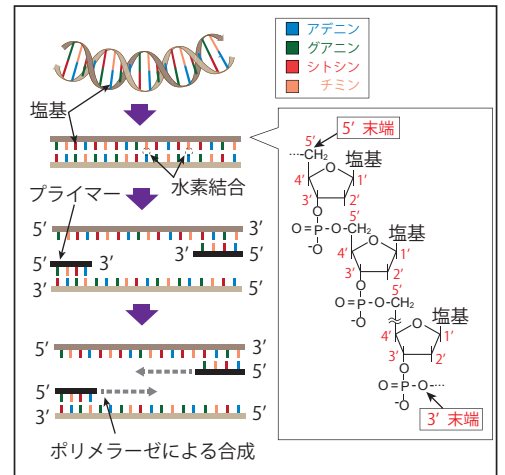
全てが順調に進んでいましたが、帰国日にトラブルに遭いました。帰国便は早朝のフライトのため遅延の心配のある電車を避けて、配車サービスを使ってタクシーを予約しましたが、約束の時間になっても現れません。海外で繋がる電話を持たない我々は、近所のコンビニの店員さんに事情を伝え、別のタクシーを探してもらいました。たまたま、1 台つかまったので助かりましたが、このような経験は 2 度目で、今後はなるべく昼の便で帰るか、帰国前日には都市部に移動するようにしようと思いました。

牧野 高紘 (量子機能創製研究センター)

【原理と特徴】

PCR（ポリメラーゼ連鎖反応：Polymerase Chain Reaction）は、微量しかいない DNA サンプル中からターゲットとなる塩基配列を試験管内で増幅させる技術です。

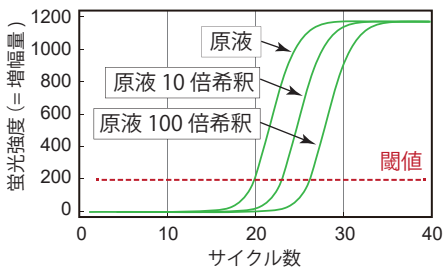
DNA は、アデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、チミン（T）の4種の塩基で構成され、AとT、GとCが相補的に結合した二本鎖の状態にあります。DNAには5'あるいは3'末端という方向があり、5'→3'方向にDNA合成が進みます。二本鎖DNAは熱によって一本鎖になりますので、増幅したい塩基配列を挟むような一組の短い配列（プライマー）や、DNAを合成するDNAポリメラーゼ等と一緒に、温度制御しながら反応させます。すると、一本鎖となったターゲット領域にプライマーが優先的に結合し、DNAポリメラーゼによって新たなDNAが合成されます。



このような一連の反応（サイクル）を繰り返すことで、ターゲット

とする塩基配列の量を指数関数的に増やすことができます。

リアルタイムPCR装置は、増幅されたDNA量をリアルタイム（サイクル毎）に検出するための分析機器です。この装置を用いると、左図のように、ターゲット塩基配列を持つDNAの量が多いサンプルほど、検出可能な増幅量に達するのが早いことがわかります。このことを利用して、閾値として設定した増幅量に達するサイクル数から、サンプル中のターゲット塩基配列の量を知ることができます。

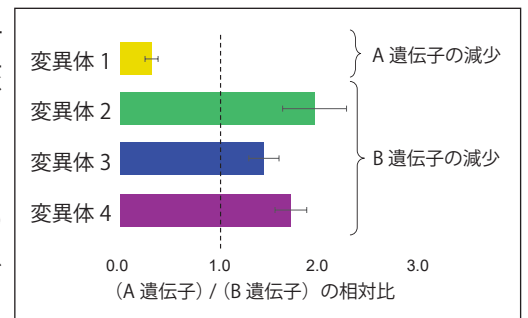


ターゲット塩基配列の量に応じた増幅曲線

【実際の分析例】

イオンビーム照射によって、赤いアントシアニン色素を合成できなくなった植物（変異体1～4）を4つ取得しましたが、その原因は不明でした。そこで、リアルタイムPCR解析を行ったところ、右図のように、変異体1ではA遺伝子が、変異体2、3及び4ではB遺伝子がそれぞれ減少していることがわかりました。該当する遺伝子が照射によって欠失したため、アントシアニンを合成できなくなったことが判明しました。

本装置は、例えば、遺伝子の発現解析（各遺伝子の発現量の定量的評価）や食品サンプル中の異物混入検査、また、近年では新型コロナウイルス感染に関するPCR検査などにも利用されています。



各変異体におけるターゲット塩基配列の存在比

Q メッセージ

あれほど長く厳しかった暑さが去り、あっという間に風の冷たく感じる日々となっています。気のせいなのか秋や春のような「ちょうどよい季節」が昔より短くなったように感じられます。自然現象だからやむを得ないと思う反面、カーボンニュートラルに関わる技術などを通じて暮らしよい気候の維持につながるのであれば、多くの方に喜んでいただけることでしょう。量子技術の持つ可能性が日常生活の向上にも貢献できれば、と念じる日々です。

（高崎量子応用研究所副所長 山本 博之）