



国立研究開発法人

量子科学技術研究開発機構（量研）

高崎量子応用研究所

第55号



高崎研だより

役立つ科学 🍁

レアアースの効率的リサイクル研究

My favorite 🍃

長期縦走登山の思い出

日本/世界見聞録 🍁

絵画のような風景 ガルダ湖畔

研究装置紹介 🍁

電子スピン共鳴装置



Q1. どのようなレアアースをリサイクルするのですか？

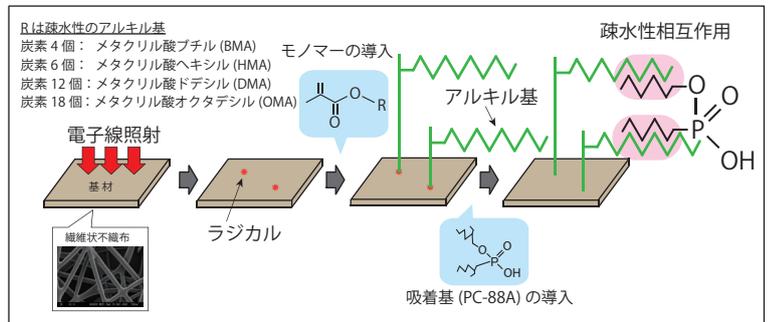
HV 車や EV 車、エアコン、ハードディスク等に永久磁石として利用されているネオジウム (Nd) とジスプロシウム (Dy) をリサイクルする研究を行っています。現在、Nd と Dy はほぼ 100% 中国から輸入していますが、近年地政学的にも有用な資源の確保がますます重要になってきています。耐熱性を向上させるためにジスプロシウムを含有するネオジウム磁石は、製品を分解して磁石を取り出せば再利用が可能です。リサイクルは、主に磁石を製造する際に発生する研削粉末や固形くずで、原料の 20 ~ 30% 程度発生します。

Q2. どのようにして Nd や Dy をリサイクルするのですか？

現在 Nd と Dy のリサイクルは、経済性の問題から溶媒抽出法により中国で行われています。溶媒抽出法は金属選択性に優れ、目的とするレアアースを高濃度で濃縮することが可能ですが、濃縮工程は多段階で長時間を要し、大規模な設備が必要となります。そこで、Nd や Dy と結合しやすい抽出剤を不織布に導入した吸着材の開発に着手しました。

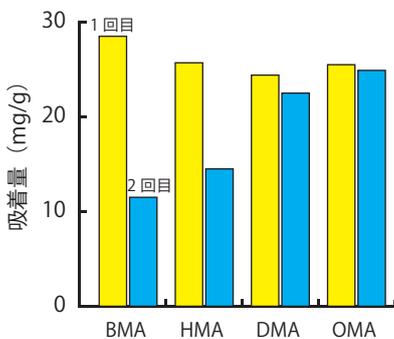
Nd や Dy 等の希土類の吸着にはリン酸基が有効ですが、シンプルな構造のリン酸基は選択性が低いため狙った金属を効率的に捕まえることは困難でした。そこで、希土類の分離性能が高いリン酸基にアルキル基を結合させた PC-88A を吸着基として導入することを検討しました。PC-88A は構造内の OH 基の反応で高分子基材に導入するのですが、その OH 基で希土類を捕まえるため、導入に OH 基を使ってしまうと吸着性能を失ってしまいます。そこで、OH 基を活かした状態で PC-88A を基材に導入する方法として、疎水性相互作用を利用しました。疎水性相互作用は、油等の疎水性化合物同士が水中に存在する場合、自らはじかれる形で油同士が集合体を形成する現象です。

まず、放射線グラフト重合を利用して繊維基材に疎水性の性質を持つアルキル基(モノマー)を導入します。ここに PC-88A を添加すると、抽出剤が持つアルキル基とグラフト重合で導入したアルキル基が疎水性相互作用によって結合し、吸着材を作製することができます。



Dy 吸着材の作製プロセス

Q3. 放射線グラフト重合した吸着材の性能について教えてください



作製した吸着材の Dy 吸着能

疎水性相互作用は共有結合と比べて弱い結合なので、作製した吸着材について吸着性能に加え、耐久性も調べました。その結果、1 回目の吸着試験ではすべての吸着材が Dy に対して吸着材 1g 当たり 25 mg の高い吸着量を示しましたが、Nd の吸着量はすべて 1 mg/g 以下であり、Dy を選択的に吸着することができました。しかし、吸着材を何度も使用すると、左図のように BMA、HMA、DMA を導入した吸着材の吸着性能は低下しましたが、最も長いアルキル基を持つ OMA は吸着量に変化がなく、耐久性が優れていることが分かりました。

Q4. 今後の研究について教えてください。

様々な金属が溶存する中から、狙ったレアアースだけを捕まえることができる究極の吸着材の開発を目指し、研究を進めています。

私は学生時代ワンダーフォーゲル部という登山をするサークルに所属していました。沢登りや岩登りなどもしましたが、一番記憶に残っているのが毎年夏恒例の長期縦走登山です。

私の行った長期縦走登山はサークル発足史上最長の 15 日間の山行で、長野県上高地から新潟県日本海親不知の 100 km のルートを補給無しで踏破する行程でした。基本はテント泊をするので 15 日間の食料とテントなど装備は 40 kg 以上になります。出発地の上高地では「荷物大きいね、穂高まで行くのかね」と聞かれて「いいえ、日本海までです」とドヤ顔で答えていましたが、初日のテント場から見える下界の灯りを見た瞬間に心が折れそうになりました。

しかし、行程を進めるにつれて食料が消費されて荷物が軽くなるので、美しい北アルプスの絶景を楽しむくらいの余裕は出てくるものです。10 日目あたりで白馬岳に着くと、4 年生の OB が待ち受けており、下界から運んできてくれたビールや新鮮なごちそうをたらふく堪能するサプライズはとても嬉しかった記憶があります。当時は何でこんな辛い山行をしているのだろうと思いましたが、今となってはすべてが贅沢な経験であったと懐かしささえ覚えます。



北アルプスの雲海



長期縦走ルート

細谷 青児 (放射線高度利用施設部)

日本/世界見聞録

絵画のような風景 ガルダ湖畔

2022 年 6 月下旬に放射線画像検出器に関する国際会議に参加しました。本国際会議は、画像検出の基礎研究や応用研究について議論するもので、例年湖畔で開催されることがお約束になっており、今回はイタリア最大の湖であるガルダ湖北端の保養地リーヴァ・デル・ガルダにて開催されました。イタリア南部はかなりの暑さでしたが開催地は過ごしやすく、湖畔を周回する遊歩道を通って朝晩ホテルと会場を行き来しました。イタリアの山間にあるため交通アクセスは悪かったのですが、湖に切り立つ初夏の山々は絶景で、絵画を見ているようでした。

会議では、粒子線イメージングの応用研究に関する私たちの発表について多くの質問をいただき、貴重な情報交換ができました。コロナ対策状況は日本とかなり異なり、会議会場入場時の消毒は準備されていますが、マスクをしている参加者は少数派でした。



花々に囲まれたガルダ湖遊歩道



水の都ヴェネチア

帰国時は、日本の入国審査のためヴェネチア国際空港近くの病院で PCR 検査を受けました。検査結果が出るまでの空き時間を利用してヴェネチアの市街を散策しましたが、陽性の場合は飛行機に搭乗できずイタリアに足止めとなるため、かなりドキドキでした。検査結果は同行者も含め全員陰性となり、無事帰国が叶いました。コロナ禍の影響がもう少し続きそうです。ワクチン接種でコロナ禍が落ち着き、現地開催の会議に滞りなく参加できるようになることを願っております。

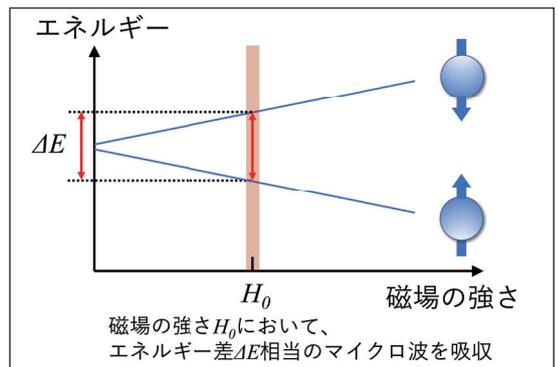
放射線生物応用研究部 山口 充孝

【原理と特徴】

電子スピン共鳴 (ESR: Electron Spin Resonance) 装置は、文字通り「電子スピン」のマイクロ波との「共鳴現象」を利用して、物質中に存在する「不対電子」を検出する装置です。

物質中の原子は、主に原子核と電子によって構成され、そのうち電子はその磁氣的性質に由来して「電子スピン」とも称します。原子内における電子は、基本的に 2 個の電子で 1 つの安定な軌道を形成しますが、放射線のような外部からの衝撃により、1 つの軌道に 1 つの電子がある状態を形成することがあり、これを「不対電子」と称します。

この不対電子に外部から磁場を印加すると、不対電子は磁場に平行および反平行な 2 つの状態を取ることができます。これらの状態間のエネルギー差にピッタリ相当するマイクロ波を照射すると、不対電子はマイクロ波を吸収します。これを「磁気共鳴現象」と称します。よって、不対電子を含む物質にマイクロ波を照射しながら、磁場を変化させていくことで、磁場に対するマイクロ波の吸収スペクトルが観測され、物質中にある不対電子に関する情報を得ることができます。

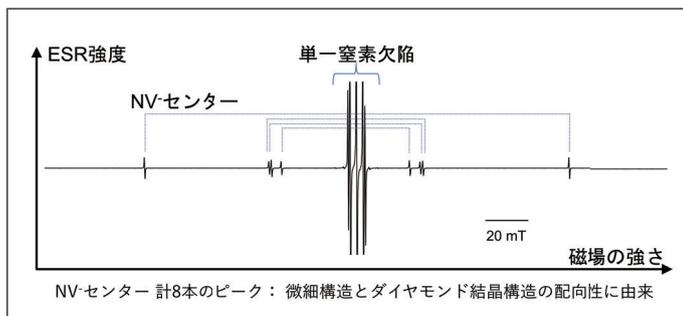


磁場による不対電子のエネルギー準位の分裂

ESR 法の測定対象は不対電子を有した物質に限定されるため、かなりマニアックな印象ですが、高崎量子応用研究所では、不対電子を生じる“放射線と物質の相互作用”を活かした研究が長らく行われており、不対電子に関する基礎的な知見が得られる ESR 法は有用な測定手段となっています。

【実際の分析例】

ESR 法は秩序構造を有する物質、特に結晶において分解能の良いスペクトルを得られることが古くから知られています。放射線照射および熱処理を施した人工ダイヤモンド（炭素の結晶）の ESR スペクトルを示します。



放射線照射 / 熱処理したダイヤモンドの ESR スペクトル

ダイヤモンド中の NV⁻ センターは、量子暗号や量子センサーなどの量子科学技術の基盤要素として期待されており、ESR 法はその構造解析や特性評価に役立てられています。

不対電子を有する照射欠陥は ESR スペクトル上にピークとして検出され、人工ダイヤモンド中に自然に含まれる単一窒素欠陥の存在や NV⁻ センター（窒素と空孔が結合した複合欠陥）の生成が確認できます。NV⁻ センターの示す計 8 本のピークはスペクトル解析することにより、NV⁻ センターの持つスピン状態の特徴を理解することができます。また、ダイヤモンド中の NV⁻ センターは、量子暗号や量子センサーなどの量子科学技術の基盤要素として期待されており、ESR 法はその構造解析や特性評価に役立てられています。

不対電子を有する照射欠陥は ESR スペクトル上にピークとして検出され、人工ダイヤモンド中に自然に含まれる単一窒素欠陥の存在や NV⁻ センター（窒素と空孔が結合した複合欠陥）の生成が確認できます。NV⁻ センターの示す計 8 本のピークはスペクトル解析することにより、NV⁻ センターの持つスピン状態の特徴を理解することができます。また、ダイヤモンド中の NV⁻ センターは、量子暗号や量子センサーなどの量子科学技術の基盤要素として期待されており、ESR 法はその構造解析や特性評価に役立てられています。

Qメッセージ

10月30日（日）、コロナ禍により2年続けて現地開催を見送っていた高崎量子応用研究所の施設公開を3年ぶりに開催することができました。地域のみなさまを始め、多くの方々にご来場いただきありがとうございました。研究施設の見学、工作教室、実験体験などを通じて、活動内容を知っていただく機会となりましたら幸いです。これからも様々な機会を通じて、高崎研の研究活動の積極的な情報公開に努めてまいります。（管理部長 小柳大作）