

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54号

高崎研だより

役立つ科学

水素社会を目指した高活性触媒研究

My favorite

目指せ！群馬観光地マスター

日本/世界見聞録

太陽の沈まぬ街に魅せられて

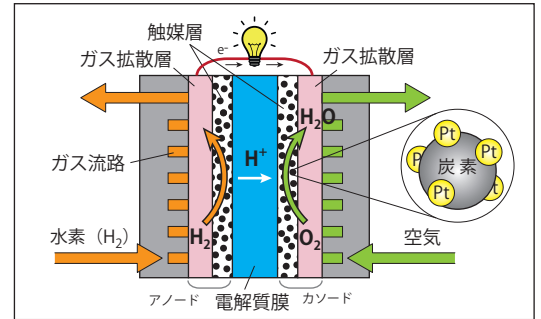
研究装置紹介

透過型電子顕微鏡



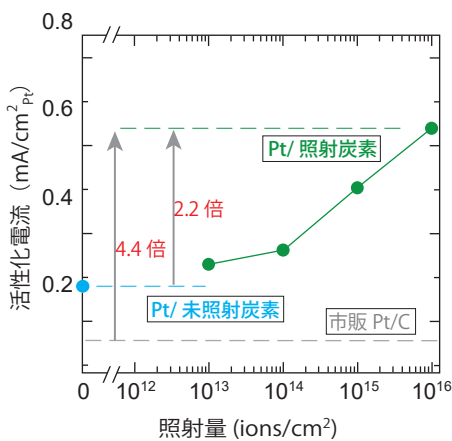
Q1. どのような触媒を開発しているのですか？

水素と酸素を反応させて発電する燃料電池は、反応により水しか生成しないので低炭素化に貢献できるだけでなく、高いエネルギー効率を有するため、次世代自動車の動力源として期待されています。しかし、この反応（酸素還元反応： $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ ）には、触媒として貴重な白金（Pt）が用いられるため、生産コストが高く、普及のおおきな妨げになっています。また、燃料電池車 1 台に使用される Pt 量は車のサイズにより 32 ~ 150 g であり、1 台あたり平均 50 g とすると、世界中の自動車約 9 億台をすべて燃料電池車に置き換えた場合、45,000t もの Pt が必要となります。この量は、Pt の推定埋蔵量 36,000t をはるかに超えています。我々は、使用する Pt の量を削減するため、高活性 Pt 触媒の研究を行っています。



固体高分子形燃料電池

Q2. どのようにして Pt 触媒を高活性化させるのですか？



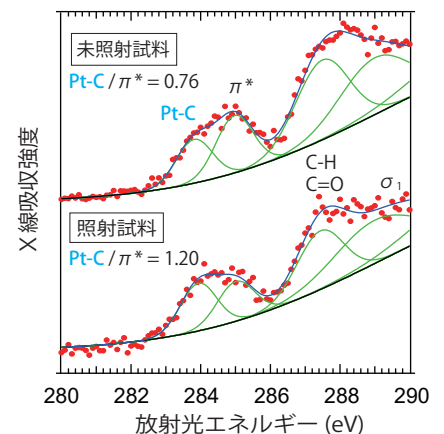
Pt 触媒の活性化電流測定結果

燃料電池では、電極材料である炭素（C）の粉末に Pt 触媒を微粒子にして担持させています。この微粒子を小さくすることで Pt 触媒の活性表面を増やして高活性化する研究などは既にたくさん行われていて大幅な活性向上は難しい状況です。このような状況下、我々は Pt を担持する炭素にイオンビーム照射して欠陥導入すると、Pt 微粒子の触媒性能が向上することを発見しました。

アルゴンイオン（Ar⁺）を照射して欠陥を導入したガラス状炭素（グラッシーカーボン）基板に Pt 微粒子を蒸着した試料の活性化電流を調べたところ、照射していない（欠陥導入していない）試料に比べて 2.2 倍、市販の一般的な Pt 触媒に比べて 4.4 倍の触媒活性があることが分かりました。

Q3. 欠陥を導入したのは炭素 (C) なのに、なぜ白金 (Pt) の活性があがるのですか？

Pt/C 界面の相互作用を通して炭素欠陥が Pt 触媒活性を向上させていると考えられるため、Pt/C 界面の電子状態変化を調べることができる X 線吸収微細構造（XAFS）測定を行いました。詳しい説明は省きますが、この測定で得られたスペクトルを解析した結果、左図のように炭素同士の結合によるピーク（ π^* ）強度に対する Pt-C 結合によるピーク強度比（Pt-C/ π^* ）が増加していることを見出しました。この結果から、炭素に欠陥を導入することにより Pt-C 結合数が増加して Pt 微粒子の担持状態が変化し、Pt の触媒活性能力が向上していることが分かりました。



照射有無試料の XAFS スペクトル

Q4. 今後の研究について教えてください。

今後は、開発中の Pt 触媒を搭載した燃料電池システムで、 $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ に進む過程を直接観測することで、Pt 触媒における「炭素欠陥の役割」を解明し、Pt 触媒のさらなる高活性化への指針を示していきたいと考えています。

この春から高崎で暮らし始めましたが、それまでは友達に誘われて伊香保温泉に行ったことがあるくらいで、群馬に何があるかよく分かっていませんでした。なので、最近の休日は観光ガイド片手に車で群馬や近隣の観光地巡りをしています。

免許は持っていたものの取得後に運転したのは両手で数えられるくらいしかない、いわゆるペーパードライバーでしたが、ほんの数日の運転で山路運転にも慣れ、遠い距離でも出かけられるようになりました。少林山達磨寺、富岡製糸場、榛名神社、たんばらラベンダーパーク、軽井沢…有名な観光地にいくつも行くことができました。9月上旬の土日には、高崎まつりに行きました。実家の近くでは、道路の交通規制をして神輿や山車、出店がたくさん出るような大きなお祭りがなかったので、新鮮で楽しむことができました。



高崎まつりのだるま

ライトアップされた
軽井沢高原教会

ペーパードライバーからは脱却しましたが、高速道路を運転したことが未だに一度もありません。教習所では高速シミュレーター教習のみでした。群馬は温泉地がたくさんあることで有名ですが、夏は35℃を超えるような暑さのなかで温泉に行く気が起きませんでした。これからの時期は温泉巡りを楽しめる気温になってくるので、有名な紅葉スポットを探しつつ、高速道路の運転練習を兼ねて今までよりも少し足を延ばしてお出かけしようと思います。

家族や友達が来てくれた時にガイドできるくらいには詳しくなりたいので、穴場でおすすめのスポットがあればぜひ教えてもらえると嬉しいです。

のんびり安全運転（ペンネーム）

日本/世界見聞録

太陽の沈まぬ街に魅せられて

2022年6月、ストックホルムで開催された Defect in Solids for Quantum Technologies という国際会議に参加しました。本会議は、個体（特に半導体）の点欠陥を利用した量子技術に関する研究を進める研究者らが一堂に会するもので、コロナ禍を理由に2回の延期を経て、今回ようやく現地開催に至りました。そうした背景もあったせい、多岐にわたるテーマを早朝から日没まで活発に議論する大変濃密な6日間となりました。

「日没まで」と書きましたが、ちょうどこの時期は夏至祭が行われる直前で、23時でもまだ明るく、一年で最も長い夜の時間を楽しむ人々で街は賑わっていました。ここではマスクをしている人はほぼ



23時半頃のストックホルム

メーラン湖に面するストックホルム
市庁舎とガラムスタン（旧市街地）

おらず、観光客もかなり多く見かけたので、コロナ禍はもう終わってしまったかの錯覚してしまいましたが、帰国するためにはPCR検査の陰性証明書を提出する必要があったため、感染対策を怠らず、羽を伸ばしすぎないようにしないといけなかったことは、今回の出張で最も厄介な問題でした。「おとなしく」していた甲斐あって、幸い問題なく帰国することができました。

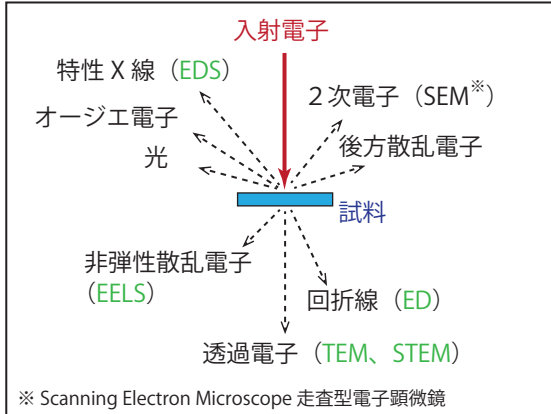
ストックホルムは北欧の統一感のある街並みが極めて美しく、ただ付近を散策して、Fika（フィーカ＝コーヒーを飲むこと）するだけでも楽しい都市です。町の人々はみな優しく朗らかで、スーパーで買い物をしていると、「お土産か？ だったら絶対これがいいぞ！」とリコリスのグミを勧めてくれました。どんな味がするお菓子なのか、一度ストックホルムを訪れて試してみたいはいかがでしょうか？

量子機能創製研究センター 佐藤 真一郎



【原理と特徴】

透過型電子顕微鏡（TEM：Transmission Electron Microscope）は、一般的に最大数 100 万倍の倍率で物質の分子・原子レベルの微細構造を観察できる装置です。高真空中に保たれた鏡筒内で電子銃により電子を発生させ、これを高電圧で加速して試料に照射すると、電子は試料を透過あるいは散乱します。



※ Scanning Electron Microscope 走査型電子顕微鏡

電子と物質の相互作用

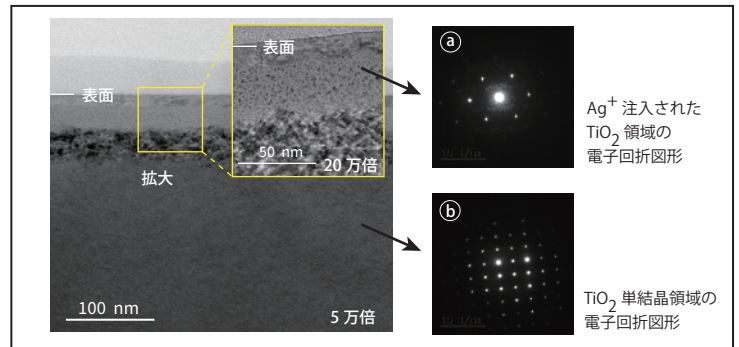
この電子を電子レンズで集束あるいは発散させて、試料の下方にある蛍光板に拡大した像を結ばせて観察します。TEM は試料を透過した電子を検出するため、試料を 100 nm 以下まで薄片化する必要があり、得られる画像は試料の加工の良し悪しに大きく影響されます。

高崎研の TEM は数 nm～数 100 nm くらいの微細構造を観察することができます。また、オプションとして以下の機能を有しています。

- ①ED（Electron Diffraction 電子回折法）：試料に電子を照射して得られる回折パターンから試料の結晶構造を調べる、
- ②STEM（Scanning Transmission Electron Microscope 走査透過型電子顕微鏡）：加速した電子を細く絞って試料に走査しながら照射し、透過した電子を検出して観察する、
- ③EDS（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy エネルギー分散型 X 線分析法）：試料に電子を照射して得られる特性 X 線のエネルギーから元素と濃度を分析する（重元素向き）、
- ④EELS（Electron Energy Loss Spectroscopy 電子エネルギー損失分光法）試料に電子を照射し、非弾性散乱によるエネルギー損失から元素と濃度を分析する（軽元素向き）。

【使用例】

右下の写真は、100 keV Ag^+ をイオン注入した二酸化チタン (TiO_2) 単結晶基板をイオンスライサーで厚さ 100 nm 以下まで削り込んだ試料断面の TEM 写真 (5 万倍及び 20 万倍) 及び電子回折図形です。表面から深さ方向 50 nm 付近まで 2、3 nm の黒い粒子を観察することができます。EDS による元素マッピングにより、これが Ag 粒子であり、イオン注入により Ag^+ が表面から 50 nm 付近まで到達していることが分かります。①は TiO_2 単結晶に Ag^+ が注入された領域の電子回折図形で、②は TiO_2 単結晶のみの電子回折図形です。①の回折図形から Ag^+ が注入された領域では TiO_2 は非結晶化し、 Ag が結晶で微粒子の状態で存在していることが確認できます。



Ag^+ 注入された TiO_2 の TEM 写真及びその電子回折図形

Qメッセージ

この夏は、6 月に連日 40℃近くまで気温が上がる猛暑に見舞われました。その後戻り梅雨が長く続き、9 月になるとかつて経験のない大型台風が連続して日本に接近・上陸しています。今や異常気象が常態化しており、国連の定めた SDG's（持続可能な開発目標）を実現するための研究開発が世界的に最優先課題となっています。高崎研でも、エネルギー・環境に関連した材料研究をはじめ、量子機能創製研究や RI 医療・農業応用研究において SDG's への貢献を強く意識した研究開発を推進しています。（高崎量子応用研究所長 前川康成）



延期になっておりました令和 4 年度の高崎研施設公開ですが、10 月 30 日（日）に開催予定です。詳細は、後日高崎量子応用研究所 HP の新着情報にてご案内いたします。よろしくお願いたします。

