

黄鉄鉱のソーラーカー
'Koenigsegg Quant en el Salón de Ginebra 2009'
by David Villarreal Fernández

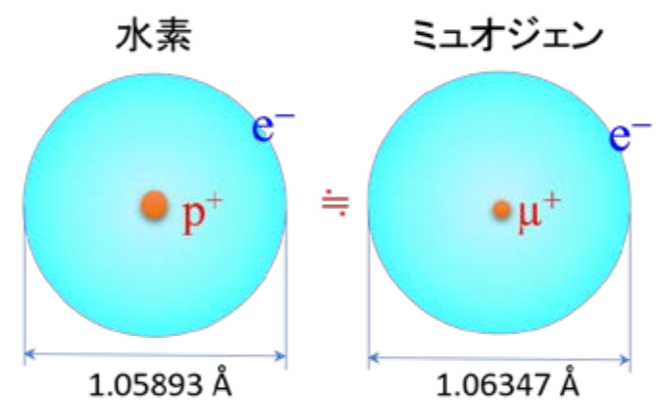
ミュオジェンが明かす 「愚者の金」の真価

ごくありふれた鉱物「黄鉄鉱^{おうてつこう}」が再エネ材料として着目され、2009年の国際モーターショーには全面コーティングされたスーパーカーまで登場した。しかし、実用化は難航している。局面打破に向け、金そっくりの黄鉄鉱を、水素（水素）そっくりのミュオン（ミュオジェン）で探る。… 2 ページ

周期表から考える いまどきの錬金術

KEK 一般公開 2019 の物構研のテーマは周期表でした。物構研 小野 寛太 准教授による周期表にちなんだ講演を誌上で再現しました。意外と身近なレアメタルについて考えてみませんか。 … 4 ページ





真空中の水素とミュオジェンの構造と大きさの比較
物質中の電子を引きつけた正ミュオンは水素にそっくり

ポジティブミュオン → 「ミュオジェン」

ミュオンは素粒子の一つで、電子の仲間だ。電子と同じ大きさの電荷を持つが、質量は電子の200倍もある。ミュオンは宇宙線などによって生成されたときに存在を確認できるが、物質の構成物として観測されることは決してない。たいていの素粒子のように、ミュオンも同じ質量で反対の電荷を持つ反粒子*を持つ。そのため正の電荷をもつミュオンにはポジティブミュオン（正ミュオン）といういい名前が付いている。正ミュオンは比較的重いので陽子と似ていて、うまく水素の原子核になりすますことができる。偽物は、正電荷で電子を引きつけて（水素原子に似た）風変わりな原子になることで、一段と本物らしくなる。門野教授とその仲間はこのような元素としてのミュオンの性質を表すために「ミュオジェン*」という言葉を用いているが、これが彼らの研究の鍵だ。

*ミュオジェン【Muogen】：「原子」は物質の構造を表す言葉であるのに対し、「元素」はその性質を表す言葉である。「ミュオジェン」は、元素としての水素 (Hydrogen) に対応する元素名として提案されている。

基本的な考えはこうだ。ほかの素粒子と同様に、ミュオンもスピンと呼ばれる物理量を持つ。スピンの向きが揃ったミュオンを物質に打ち込んで、ミュオンスピン運動の時間変化を計測すれば、ミュオンの電子状態に関する情報を得ることができる。物質中に打ち込まれ電子を引きつけた正ミュオンすなわち「ミュオジェン」が本物の水素によく似ているので、ミュオジェンを観測することで、調べるのが難しい水素原子の電子状態について推論することができるのだ。

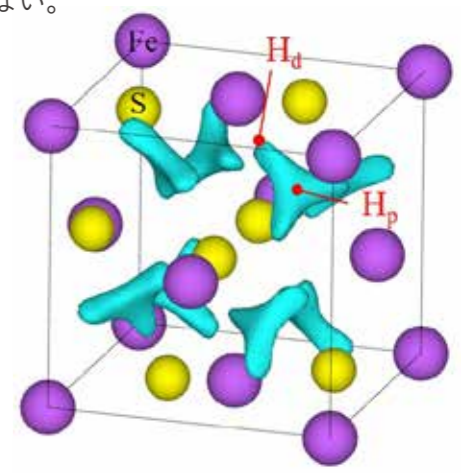
*反粒子…全ての素粒子が、それと同じ質量を持ち、電荷などの符号が正負反対の素粒子を持つと考えられている。

この方法によって試料が水素を含むかどうか分かるわけではないが、そこに水素原子が存在した場合の電気的特性を知ることができる。実験結果と、対象物質中に水素がある場合とない場合の理論的予想とを比べることによって、「忍者」が潜んでいるか判別することができるのだ。

研究者たちは天然の黄鉄鉱の塊から実験を始めた。鉱石を板状に切り、あらかじめその一般的な物性を調べた。そして J-PARC とカナダの粒子加速器研究所 TRIUMF において、異なる実験条件で黄鉄鉱の板にミュオンビームを照射し、注入されたミュオンの挙動を調べた。

実験データによると、ミュオジェンは電気的活性を持つ2つの異なる電子状態にあることが分かった。これは、もし水素原子が潜在していれば、それが黄鉄鉱の電気的特性を変えてしまうことを意味する。水素が複雑に絡み合う効果によって、黄鉄鉱が示す「不可解な電気特性」の一部または全部が説明できる可能性が大いにある。つまり、それこそが黄鉄鉱の半導体としての潜在能力が活かしきれていない理由かもしれないのだ。

この研究の次のステップは、黄鉄鉱の中に隠れた水素が、なぜそのようにふるまうかの徹底的な理論的解析だ。理論からの推測値と実験結果との比較によって「愚者の金」の真の潜在的価値が明らかになるかもしれない。



理論計算で予想される黄鉄鉱中の水素の位置 (水色の領域) 赤点の位置がミュオン実験で分かった2つの状態に対応すると考えられる。H_dのdはdiamagnetic state (反磁性状態)、H_pのpはparamagnetic state (常磁性状態) を表す。H_dは共有結合状態、H_pは孤立している状態と考えられる。

論文情報：“Local electronic structure of interstitial hydrogen in iron disulfide,” H. Okabe, M. Hiraishi, S. Takeshita, A. Koda, K. M. Kojima, and R. Kadono, *Phys. Rev. B* 98, 075210 (2018).

(監修：ミュオン科学研究系 門野良典 教授、邦訳・構成：深堀 協子)

太陽光パネルが金色に？!

想像を絶するような富への夢を駆り立て、そして打ち砕くことで知られるこの鉱物は、本名「黄鉄鉱」よりも「愚者の金」としてよく知られている。その黄色味を帯びた金属光沢は古くから多くの人を騙し、結果として近代アメリカをかたち作るのに役立ったのだが、加えて、個人の幸と不幸をも左右した。例えば、ある愚かな男が「黄金の丘」を持つ女性と結婚したところ、(お察しの通り)黄鉄鉱の丘だった、という自業自得の話もある。

黄鉄鉱には財貨としての価値はないだろうが、黄鉄鉱に全く価値がないということではない。少なくとも、潜在的価値はある。近年、科学者たちは半導体、特に太陽電池や他の再生可能エネルギー関連で黄鉄鉱を活用できないかと考えている。ところが、前途有望であるにも関わらず、そううまくはっていない。理論的な予測に比べて光電変換効率が悪く、しかもその理由は全く分かっていない。

しかし、この謎を解くための突破口が開かれようとしている。KEK と総合研究大学院大学 (総研大) による最新の研究で、材料内部に潜在する水素原子がこの問題に関係していることが分かってきた。

ニュオジェンが明かす「愚者の金」の真価
原作：American Physical Society PHYSICS BUZZ
"Fool's Gold" May Hold Value After All
原著者：Kendra Redmond

黄鉄鉱 (おうてつこう, pyrite FeS₂) : 鉄 Fe と硫黄 S からなる。ごく小さい結晶なら、日本各地の砂粒からも見つけることができるほど身近な鉱物。

忍者の隠れ家

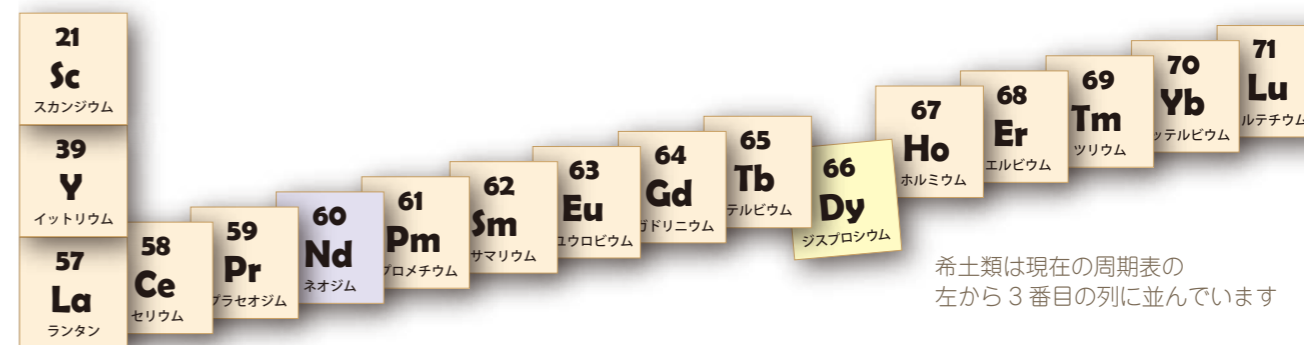
多くの人が、周期表の一番初めにあって最も単純な元素である水素のことを、単なる気体だとか、あるいは可燃性のこととか、燃料電池に使われるものなど考えるのではないだろうか。しかし、この新しい研究を主導している門野良典教授は、それで話は終わらないという。水素はこっそりと物質中に忍び込むことができ、隠れたままいろいろな問題を引き起こす。「水素は物質にとってまるで忍者のような不純物で、至るところにいてとても活発であるにもかかわらず、見つけることが難しい」と門野教授は言う。

半導体中に水素を埋め込むことは、ときには有用で、むしろ好都合でさえある。適量の水素が適正な位置にあれば、水素によって構造上の欠陥による影響を減らすことができる。しかし、特に予想外あるいは未確認の場所に水素が過剰にあると、材料の電子特性を望ましくない方向に変えることがある。

黄鉄鉱が謎の電気活性を示すことが分かってから、門野教授は、黄鉄鉱は忍者 (つまり水素) の隠れ家なのではないかと考え始めた。もしそうなら、水素を制御することで、最終的に黄鉄鉱の半導体としての潜在能力を引き出すことができるかもしれない。物質中の水素を観測することは難しいことで知られている。特に低濃度ではなおさらだ。そこで研究グループは独自のアプローチを始めた。それが、ミュオンの注入だ。

周期表から考える いまどきの錬金術

KEK 一般公開 2019 講演 「周期表 150 周年 ～レアメタルってココがすごい!～」より
 講演者：物構研 放射光科学研究系 准教授 小野 寛太
 (レアメタル代替材料・ハイスルーポット計測が専門)



希土類は現在の周期表の
左から 3 番目の列に並んでいます

メンデレーエフの「？」

今年メンデレーエフ(ロシア、1834～1907)が周期律を発見してから150年にあたります。それ以前にも元素の表を考えた人はいましたが、メンデレーエフの周期表が普及したのはなぜでしょう？

多くの科学者は当時見つけていた63の元素だけでルールを見つけようとしていました。しかし、メンデレーエフはまだ見つけていないものがあると考え、空欄「？」を残したのです。周期表の発表時、アルミニウム Al = 27 の隣に原子量 68 の元素が存在すると述べ、その密度や融点をも予言しました。1875年に ? = 68 に相当するガリウム Ga が発見されて、メンデレーエフの読みは当たりました。周期

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Ti=50	Zr=90	?=180.
		V=51	Nb=94	Ta=182.
		Cr=52	Mo=96	W=186.
		Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1
		Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.
		Ni=Co=59	Pd=106,5	O=199.
H=1		Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112
	B=11	Al=27,1	?=68	U=116
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118
	N=14	P=31	As=75	Sb=122
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137
		?=45	Ce=92	Pb=207.
		?Er=56	La=94	
		?Yt=60	Di=95	
		?In=75,5	Th=118?	

Д. Менделѣевъ

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mendeleev%27s_1869_periodic_table.png

メンデレーエフが1869年に発表した周期表
現在普及している周期表とは並ぶ向きが異なる
(?=68は中央付近にあります)

表は元素を分類するだけでなく元素の位置によってその性質を予測できるものだということが示されたのです。

メンデレーエフの周期表は現代の物質科学にも受け継がれています。研究者たちは新しい機能を発現したいというときに「ここにある物質はこういう性質だから」と日々周期表を見て考えているのです。

普段目にしない元素はどこにある？

地球上に最も多く存在する元素は鉄 Fe と言われていますが、そのほとんどは地球の深部にあります。人の手が届く地殻にある元素は、重量の多い順に酸素O、ケイ素Si、アルミニウムAl、鉄Fe、カルシウムCa、ナトリウムNa、カリウムK、マグネシウムMg、…で上位10元素だけで全体の99%を占めます。つまりそれ以外の元素は地上に多くは存在しないのです。

スマートフォンを細かくすり潰して構成元素を調べたという論文があります。結果は70元素だったそうです。現在の周期表には118の元素があり、そのうち安定に存在する元素は約80種ありますが、そのほとんどが使われているということ。スマホは元素の宝庫と言えます。とはいっても、電話はもともと小さいので材料の量としては大したことがないと思われるかもしれませんが、では自動車はどうかというと、例えばハイブリッド車でもおよそ70種の元素が使われています。

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	↓	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	↓	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

スマートフォンに使われている元素の
毒性があるため問題視される鉛Pbは
使われていないのが分かる

レアメタルってココがすごい！

携帯電話に欠かせないスピーカーの構成元素を見ると、多い順に鉄 Fe, ニッケル Ni, ホウ素 B, **ネオジウム Nd**, **プラセオジウム Pr**, **ジスプロシウム Dy**, …と続きます。太字で書かれた元素は**レア**(希少な)**メタル**(金属)と呼ばれる元素です。

スピーカーには磁石が使われています。レアメタルのうち、希土類と呼ばれる元素を使った磁石は普通の黒い磁石(フェライト磁石)に比べて強力です。例えば小さくて強いネオジウム磁石も、希土類磁石のひとつです。スマホは本体をなるべく小さく薄くしたいので、同じ出力を得られてより小さいレアメタル磁石が使われているようです。スマホの場合、バッテリー・基板・スピーカー・スクリーンのあらゆる部分でレアメタルが使われていることが分かりました。

電気自動車でも磁力が強い方がパワーが出せるので、やはりレアメタルの磁石が使われます。その他、レアメタルが使われる場面はバッテリー・LED・発電機・モーター・太陽光発電などたくさんあり、製品の省エネ化や環境保全に貢献しています。どのくらいすごいかと言えば、ネオジウム磁石を使ったエアコンは従来品に比べ30%も効率がアップしていて、家電屋さんの言う「エアコンの電気代を考えると、買い替えた方がお得ですよ。」というセリフは正しいことになります。エネルギー消費量は削減され、CO₂排出量削減にも効果があって、レアメタルは地球温暖化を避けるためにちょっと使う、スパイスのようなものと言えるでしょう。希土類磁石に替えると省エネ化が図られる、LEDは消費電力が少なく長持ちするなど、特に東日本大震災以降は、レアメタル製品が欠かせないアイテムとなっています。一度レアメタルを使ってしまうと後戻りはなかなかできません。

ところが、ハッピーなだけではないんです！

レアメタルには厳密な定義があるわけではなく、一般に入手が難しい金属を指します。埋蔵量は多くても採取が難しいものや、採取できても(例えば鉄 Fe とチタン Ti の合金のように)金属原子レベルで分離するのが難しいものなども含まれます。

日本には金属資源はほとんどありません。レアメタルだけでなくすべての金属を輸入に頼っています。しかし日本のレアメタル消費量は世界でもトップクラス。今の計画通り電気自動車化を続けると、2050年にはなんと世界の埋蔵量を超えてしまう、との予測もあります。

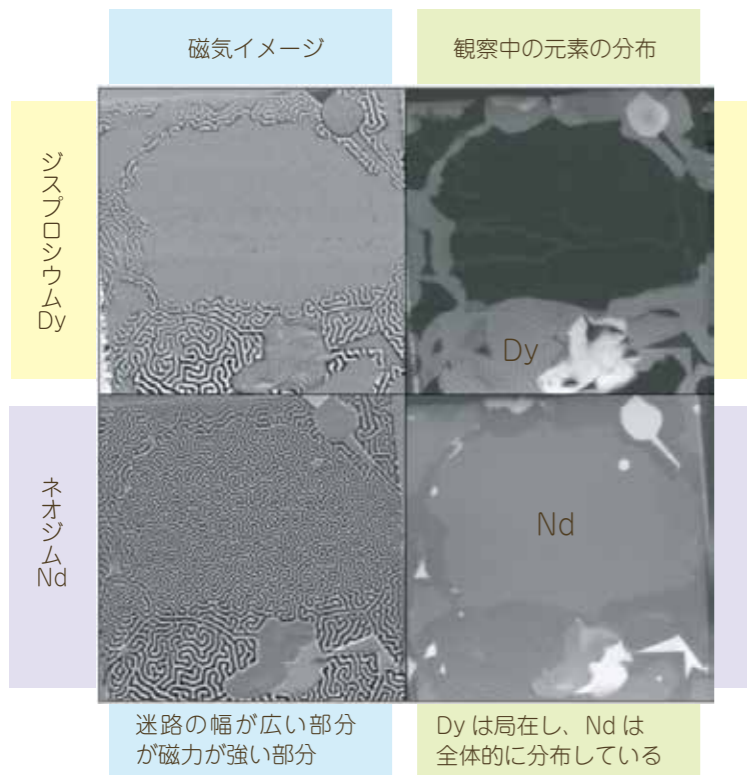
それだけではありません。希土類鉱山では安く作るために山全体に硫酸をかけ溶け出してくる元素を抽出するなどの環境破壊が行われた例もあります。またレアメタルが特定の国や地域に偏在するために武装資金源となり、人権侵害や暴力行為によって得られた金属が世界中に出回っていると言われていいます。そのため、紛争に関連する鉱物は使わないようにしようという動き*も広がっています。

* アフリカ諸国などの紛争地域で採掘された鉱物資源のことを紛争鉱物(conflict minerals)という。米国では使用を禁じる法規制が行われ、対象の鉱物資源はスズ Sn, タンタル Ta, タングステン W, 金 Au の4物質(3TG)となっている。

日本の都市は「都市鉱山」と言われます。上手にリサイクルすれば日本は世界有数のレアメタル産出国になるのです。すでに携帯電話等をリサイクルしてオリンピックのメダルにするなどの取り組みが行われています。

リサイクルを進める一方で、レアメタルを使わずに今の便利さを保つにはどうしたらいいのでしょうか。錬金術でしょうか? 賢者の石*を探すのでしょうか?

* 賢者の石:「錬金術」で至高の物質とされる。鉛 Pb やスズ Sn を金に変えたり、不老不死の薬になるとも。ファンタジーやゲームなどでもおなじみですね。



ジスプロシウム拡散磁石の元素ごとの観察

レアメタルをありふれた元素で置き換えよう

ここ 10 年日本では、希土類ジスプロシウム Dy の代替金属の探求が盛んにおこなわれています。このレアメタルは、クリーンエネルギー推進のために最も重要かつ希少で、なおかつ置き換えが最も難しいとされているからです。

ネオジム磁石の唯一の欠点は、温度が上がると磁力を失うことでした。本当はジスプロシウムそのものは磁石としては有用ではないのですが、熱に強く、高温になる場所で使うネオジム磁石に添加すると有効なことが知られていました。それで電気自動車や電車などのモーターによく使われています。電気自動車用のモーター 1 個当たりには、従来は、ネオジム Nd 200 g、ジスプロシウム Dy 30 g が使われていました。いま日本ではモーターで動く自動車の在庫台数は年間百万台を超えています。ジスプロシウムをできるだけ使わない磁石の開発が求められました*。KEK では元素の果たす役割を理解するためフォトンファクトリー (PF) や J-PARC MLF の加速器を使って物質の機能を詳しく調べています。この新しい磁石の開発にも KEK の加速器が役立ちました。

レアメタルの使用量を減らす

磁石の中の元素それぞれの役割を調べるには、元素ごとに分けて見ることができると顕微鏡が必要になります。PF の放射光を光源とするコンパクトな X

線顕微鏡を作り、自動車会社などと協力して新開発の磁石を詳しく観察しました。左の 4 枚の図はすべて磁石の同じ部分を写しています。図の左側では迷路のような模様が見えますが、迷路の幅が比較的広い部分が高性能な強い磁石であることが分かっています。その部分のイメージを見比べると、ジスプロシウムは部分的に存在し、迷路の幅が広い部分に対応していること、ネオジムは全体的に存在することが分かりました。それまでネオジムの 30% の量を全体に均一に入れていたところを、3% に減らし局在させた「ジスプロシウム拡散磁石」の高性能化のメカニズムがこの観察によって明らかになりました (論文 1)。ジスプロシウム拡散磁石はハイブリッド自動車や電気自動車のモーターに使われています。

レアメタルの使用をなくす

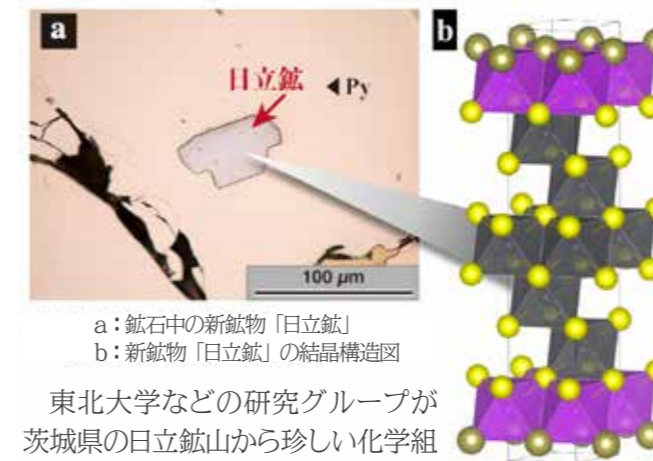
次に研究者が目指していたのはジスプロシウムを全く使わない磁石です。それまでは数 μm だったネオジムの結晶サイズを数 100 nm 台まで小さくすることで、ジスプロシウムを使用せずに実用に耐える磁石が開発され、2018 年から自動車用モーターの材料として使われています。中性子を用いた観察によりこの磁石の高性能化の要因を明らかにしました (論文 2)。

このような研究では物質の状態を調べるために強力な X 線 (放射光) や中性子線などを照射し元素ごとの吸収量や磁気イメージなどを調べていますが、実験データの解析には知見の積み重ねと解析者の熟練が必要でした。近年では機械学習を取り入れ、材料開発の自動化・高速化を図っています (論文 3)。

材料を取り巻く情勢は刻々と変化しています。レアメタルを極力使わない電池の開発など、社会に必要とされる材料を効率的に開発するための方法論も含め、研究を進めていきます。

論文情報: 1 "Element-Specific Magnetic Domain Imaging of (Nd, Dy)-Fe-B Sintered Magnets Using Scanning Transmission X-Ray Microscopy" K. Ono, T. Araki, M. Yano, N. Miyamoto, T. Shoji, A. Kato, A. Manabe, H. Nozaki, Y. Kaneko, J. Raabe, *IEEE Transactions on Magnetics* 47, 2672 (2011).
 2 "Magnetic Reversal Observation in Nano-Crystalline Nd-Fe-B Magnet by SANS" M. Yano, K. Ono, A. Manabe, N. Miyamoto, T. Shoji, A. Kato, Y. Kaneko, M. Harada, H. Nozaki, J. Kohlbrecher, *IEEE Transactions on Magnetics* 48, 2804 (2012).
 3 "Automated estimation of materials parameter from X-ray absorption and electron energy-loss spectra with similarity measures" Y. Suzuki, H. Hino, M. Kotsugi, K. Ono, *npj Computational Materials* Vol.5 No.39 (2019).

茨城県内の日本最古の鉱床で発見された鉱物が、フォトンファクトリーにて新鉱物と判明



a: 鉱石中の新鉱物「日立鉱」
b: 新鉱物「日立鉱」の結晶構造図

東北大学などの研究グループが茨城県の日立鉱山から珍しい化学組成を持つ鉱物を発見、フォトンファクトリー BL-10A での単結晶 X 線回折実験によって、新しいタイプの結晶構造をもつ新鉱物であることが分かりました。新鉱物は「日立鉱」と命名されました。

この発見は、地球科学的見地から鉱床の生成当時の環境の推定に役立ち、さらに新規材料物質開発への寄与が期待されます。(物構研トピックス 2019/8/9)

第 2 回 文理融合シンポジウム
量子ビームで歴史を探る
 —加速器が紡ぐ文理融合の地平—

とき: 2019 年 12 月 25 日 (水) ~ 26 日 (木)
 ところ: 大阪大学 中之島センター (大阪市)
 詳細は <https://www2.kek.jp/imss/event/2019/12/2526sympo.html>

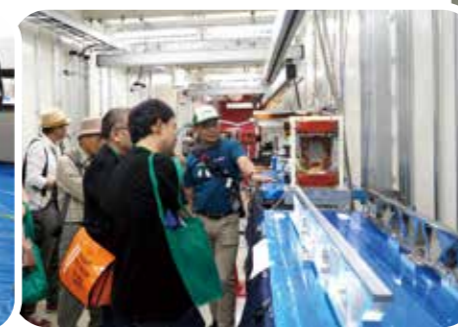
2019 年度
量子ビームサイエンスフェスタ
第 37 回 PF シンポジウム
第 11 回 MLF シンポジウム

とき: 2020 年 3 月 12 日 (木) ~ 14 日 (土)
 ところ: ザ・ヒロサワ・シティ会館 (茨城県水戸市)
 (茨城県立県民文化センター)

J-PARC 施設公開を開催 2019/8/25



MLF サイエンスラボでスライムを測っているようす



BL06 VIN ROSE で装置の解説

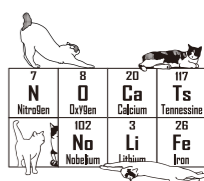


MLF 第 1 実験ホール

KEK 一般公開を開催 2019/9/1



フォトンファクトリー 実験ホール



今年も物構研
 ネコTシャツが大人気!
 10月、KEK 売店などで
 改めて販売を始めました。

大島寛子さんデザインのネコネコときどきイヌ周期表 (元素名入り) ダウンロードはこちらから。
https://www2.kek.jp/imss/news/assets/2019/09/06/neko_periodictable.pdf



*この研究が始まったころ、ジスプロシウムの価格は高騰していました。希少資源が使われるだけで車の値段が上がることが想像できますね。



チョコレート・サイエンス 5周年記念

チョコレート学入門



チョコレートがもっとおいしくなる講演会と
選べるワークショップを開催します



とき：2019年12月14日（土）10:00～15:30
ところ：広島大学 学士会館 レセプションホール（広島県東広島市）
講演：株式会社明治 大阪工場長 古谷野 哲夫 氏
「Farm to Bar ～カカオ生産現場からチョコレートを知る～」
広島大学 生物生産学部 上野 聡 教授
「チョコレートの分子構造がおいしさを決める」

実習：チョコレート・サイエンス or ショコラミル
主催：KEK 物質構造科学研究所・東京大学 物性研究所
お申込み・詳細は、物構研チョコレート・サイエンス特設サイトへ
<https://www2.kek.jp/imss/education/chocosci/>



申込受付開始は
2019年11月20日
正午です

チーム チョコレイト・サイエンスが
日産財団のリカジョ賞 第2回 準グランプリを受賞!

物構研では 広島大学 うえの さとる 教授のフotonファクトリーを用いた研究成果に基づき、科学的に考えながら美味しいチョコレート作りを体験するプログラム「チョコレート・サイエンス」を実施しています。5年に亘る活動が女子小中学生の理系への関心を高める取り組みとして高く評価されました。



今年度の
チョコレート・サイエンス開催情報

物理で美味しく チョコレイト・サイエンス
とき：2020年2月2日（日）13:30～16:00
ところ：つくばエキスポセンター（茨城県つくば市）
対象：小学4年生以上・予約制
<http://www.expocenter.or.jp/>

大人のためのサイエンス
物理で美味しく チョコレイト・サイエンス
とき：2020年2月11日（火・祝）13:30～15:30
ところ：日立シビックセンター（茨城県日立市）
対象：中学生以上・予約制
2020年1月7日より受付 Tel.0794-24-7731



編集：物構研 広報室（瀬戸 秀紀、足立 伸一、安達 成彦、阿部 仁、市村 規子、岩野 薫、宇佐美 徳子、大島 寛子、瀬谷 智洋、中村 惇平、深堀 協子、山田 悟史）

発行：高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1 TEL: 029-864-5602
<https://www2.kek.jp/imss/> e-mail: imss-pr@ml.post.kek.jp（物構研 広報室）
禁無断転載 ©All rights reserved by High Energy Accelerator Research Organization (KEK)



IMSS Facebook
モバイルサイト



2021年、KEKは創立50周年を迎えます



物構研の「チョコレート・サイエンス」は今年で5周年です