

SPring-8 NEWS

100
2020.6

研究成果トピックス

SPring-8で解き明かす生物大量絶滅の謎 地層が記憶する6600万年前の環境



SPring-8 NEWS アドレス

<http://www.spring8.or.jp/ja/sp8news>

登録施設利用促進機関

公益財団法人 高輝度光科学研究センター (JASRI)

SPring-8


SPring-8で解き明かす生物大量絶滅の謎 地層が記憶する6600万年前の環境

地球は長い歴史の中で大きな環境変動を幾度も起こしてきました。変動後の環境に適応した生物は繁栄し、できなかった生物は滅びます。同時期に多くの生物種が絶滅することを、生物の大量絶滅といいます。大型生物が登場した約5億4000万年前から現在にかけて、特に大規模な5回の大量絶滅をビッグファイブと呼びます。ビッグファイブの5回目、今から約6600万年前の白亜紀―古第三紀 (K-Pg) 境界では、恐竜やアンモナイトを含む70%程度の生物種が絶滅しました。

筑波大学の丸岡照幸准教授は、地層に含まれる微量な元素を分析することで、過去にどのような環境変動が起こったのかを研究しています。今回、丸岡さんたちの研究グループはSPring-8の放射光を用いてK-Pg境界の地層を分析し、大規模な酸性雨が隕石落下直後に降ったことを示唆する確かな証拠を初めて見つけました。恐竜絶滅の鍵を握るその成果は、2020年2月に学術誌『Geological Society of America Bulletin』のウェブサイトに掲載されました⁽¹⁾。

宇宙から飛来した 隕石の元素が物語ること

デンマークのシェラン島の海岸沿いにStevns Klintという名前の断崖があります。この断崖は6600万年前には海の底にありましたが、隆起などにより陸上に現れ、波に浸食されることで地層が見えるようになりました。特に、K-Pg境界層がよく露出していることで、地質学的に有名な場所です。写真の矢印で示した1~2 cmの粘土の層がK-Pg境界です。丸岡さんたちは、このStevns Klintから採取した試料を用いて研究を行いました。

K-Pg境界における生物大量絶滅の要因は、メキシコのユカタン半島に直径約10 kmの巨大隕石が衝突したこと

です。巨大な隕石衝突による天変地異が生物大量絶滅の引き金となったという仮説は、1970年代から提唱されてきましたが、確かな証拠がなかったため研究者たちの間で本気で議論されていませんでした。ところが、1980年に発表された物理学者のレイ・アルバレツとその息子であり地質学者のウォルター・アルバレツの発見をきっかけに、研究が精力的に進められるようになったのです。

「アルバレツたちはK-Pg境界層のイリジウムという元素の濃度を測定し、ほかの地層に比べて異常に濃縮していることを発見しました。イリジウムは地表にはほとんど存在していない元素ですから、K-Pg境界層のイリジウムは隕石からもたらされたといえます。その後、激しい議論の応酬がありましたが、ほかの証拠や隕石が落下したときに生じたクレーターも見つかり、現在では巨大な隕石が衝突したことは間違いないだろうと考えられています」と、丸岡さんは語ります。



図1 デンマークにあるStevns Klint (高知大学・西尾嘉朗准教授により撮影を改編。矢印の部分がK-Pg境界層)



図4 本研究で明らかになった巨大隕石落下直後の地球の様子

この記事は、筑波大学 生命環境系 丸岡 照幸 准教授にインタビューして構成しました。

巨大隕石落下直後に起きたと考えられている現象には、太陽光遮断、酸性雨、温暖化、紫外線透過といった環境変動があります⁽²⁾。しかし、これらは短時間で起こったため、地層から様子を知ることは難しく、実際にどれが生物絶滅に影響を与えたのかは明らかになっていません。丸岡さんは、大量絶滅の謎を解くために、K-Pg境界層のイリジウムを詳しく調べようと試みました。

「K-Pg境界層にイリジウムが存在していることはわかっていますが、どこにどのような形で存在しているのかは知られていません。粒子として存在しているのか、また、粒子だとしたら偏って存在しているのか全面的に散らばっているのかという情報がわかれば、当時の環境をさらに詳しく知ることができます。もし、イリジウムが別の元素と結合していれば、その組成や同位体比を解析することで隕石衝突直後の環境変動を見出せます」

しかし、その計画は失敗しました。K-Pg境界層のイリジウムの絶対量が少なく、濃度は測定できてもどの辺りにどのような形で存在しているかという詳しいデータは得られなかったからです。そこで、丸岡さんらはいったんイリジウムから、ほかの元素に測定対象を変更しました。K-Pg境界層にはイリジウムのような隕石由来の元素だけでなく、亜鉛 (Zn)、ヒ素 (As)、ガリウム (Ga)、銅 (Cu)、銀 (Ag)、鉛 (Pb) といった硫化鉱物に取り込まれやすい元素が高濃度に含まれています。丸岡さんたちが調べたところ、試料中のこれらの濃度にはばらつきがありました。このばらつきに意味があると考えた丸岡さんらは、より詳しく分析するために、これらの元素を取り込みやすい硫化鉱物の主要成分である鉄との関係を調べました。

その結果を表しているのが図2 (A) のグラフです。鉄の濃度変化にともなって濃度が増減する (相関が高い) 元素は直線状に点が並び、相関の程度を表す相関係数 r は1に近い値を取ります (銅、銀、鉛の r は大きく外れた値を含めず計算しています)。このグラフから、亜鉛、ヒ素、ガリウムの濃度は鉄の濃度と相関が高く、銅、銀、鉛は相関が高い成分 (図2 (A) の●■▼) と、相関を持たない成分 (図2 (A) の○□▽) があることがわかりました。

さらに、銅や銀について、微量元素マッピング分析を行いました。微量元素マッピング分析は、試料に含まれて

いる元素の種類だけでなく、場所ごとの量を高い空間分解能で測定できる実験手法です。方法としては、まず試料にX線を照射します。X線に当たった元素は一時的にエネルギーの高い状態 (励起状態) になりますが、元の状態に戻るときに、特有の蛍光X線を放出します。この蛍光X線を解析することで、試料の中のどこにどのくらいの量でどのような元素が含まれているかを知ることができます。

丸岡さんらはSPring-8のビームラインBL37XUを使用して微量元素マッピング分析を行いました。SPring-8なら、より強いX線を照射できるため、通常のX線では解析できない厚みの試料を分析することができます。試料が厚いほど、元素が多く含まれている可能性が高く、研究に有利なのです。

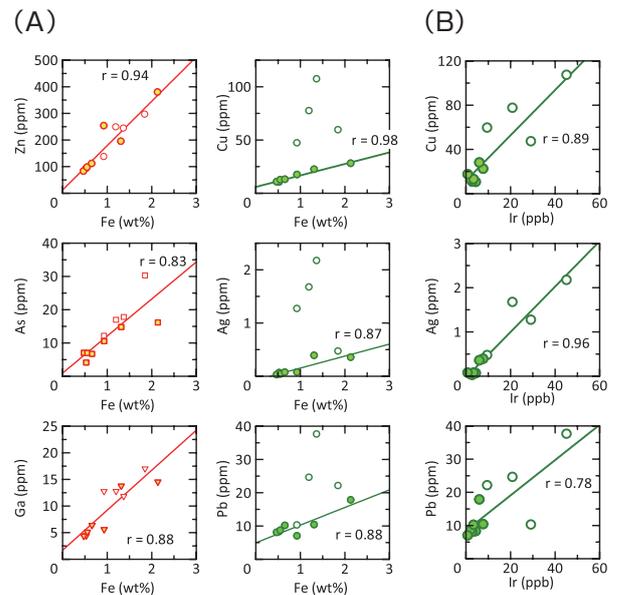


図2 試料中の元素と鉄の濃度の相関 (A) とイリジウムの濃度の相関 (B)

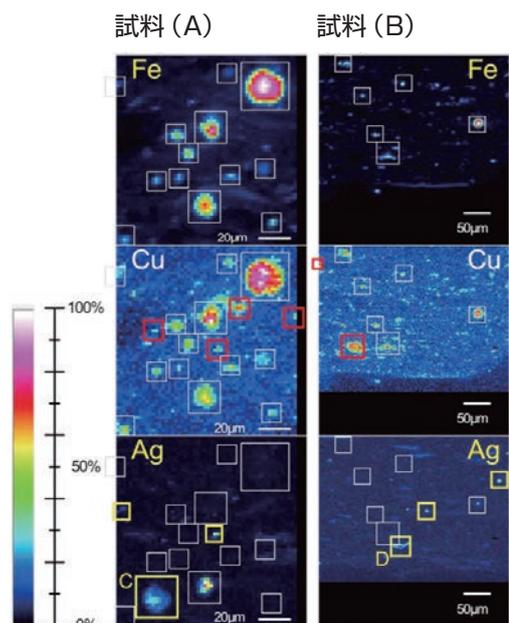
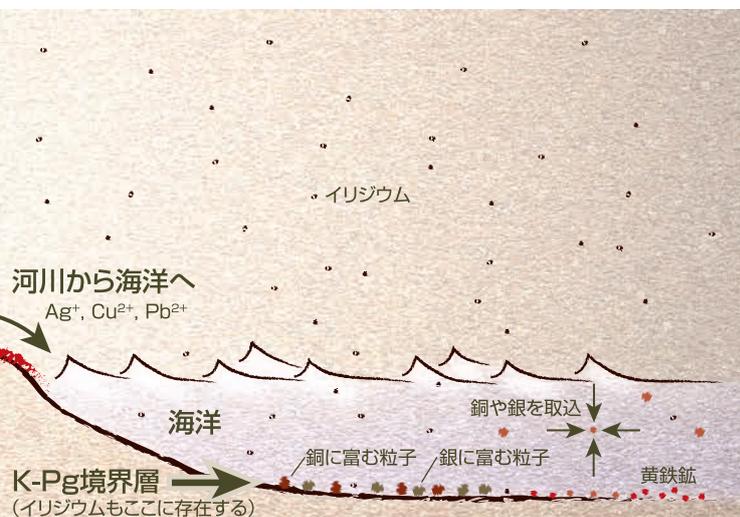


図3 微量元素マッピング分析

分析の結果、図3のようなマッピングを得ることができました。この実験からも、銅や銀はやはり、鉄と同じ位置に存在している成分（白い四角）と、鉄とは独立して存在する成分（銅粒子：赤い四角、銀粒子：黄色の四角）があることがわかります。

このような傾向の違う2つの成分を、丸岡さんは次のように解釈しました。

「鉄と同じ位置にある成分は海洋の堆積物としてもともと存在していた黄鉄鉱に由来していると考えられます。銅や銀は黄鉄鉱のような硫化鉱物に取り込まれやすいため、黄鉄鉱粒子に鉄と一緒に含まれているのです。一方、鉄と別個に粒子を形成している銅や銀は、ヒ素、ガリウムなどより酸に溶けやすい元素です。銀・銅のうちの鉄と独立した成分は、大規模酸性雨によって大陸から溶け出して海洋に流れこんだ可能性が高いと考えられます」

大規模な酸性雨はいつ降ったのか

では、そのような大規模な酸性雨はいつ降ったのでしょうか。巨大隕石衝突によって酸性雨が降るメカニズムについては、隕石衝突によって地層に堆積していた硫黄が二酸化硫黄（亜硫酸ガス： SO_2 ）または三酸化硫黄（無水硫酸： SO_3 ）として空気中に放出され、硫酸となると考えられています。しかし、大規模な火山活動によっても硫酸酸性雨は生じますので、酸性雨の存在を示しただけでは隕石衝突との直接の関係はわかりません。

丸岡さんたちは、イリジウムの濃度について詳しく調べ、銅や銀の濃度と相関が高いことを発見しました（図2(B)）。イリジウムは隕石からもたらされる元素です。しかし、時間が経つと海底に沈んで海水中からはなくなります。イリジウムと銅や銀が同じK-Pg境界層に含まれているということは、これらの元素が同時期に海水中に存在したという

ことで、隕石衝突直後に酸性雨が降って銅や銀が海に流れ込んだことを意味します。

このような酸性雨は、生物活動にどれほどの被害を与えたのでしょうか。酸性雨の被害を見積もるときには「クリティカルロード（臨界負荷量）」という値を用います。池や湖などにクリティカルロードを越える硫酸酸性雨が降り注いだ場合、水の化学組成が戻ったあとも、そこに住んでいた様々な生物たちは元の状態には戻りません。K-Pg境界層が示す期間に降った硫酸酸性雨量は、このクリティカルロードよりも2桁高い数値だと見積もられています。どれだけ有害な雨だったかが容易に想像できます。

「酸性雨によって大量絶滅が起こったことを否定する研究者もいます。なぜなら、魚類や両生類のような、酸性雨によって最も影響を受けそうな淡水の生物が絶滅していないからです。しかし、隕石衝突によって形成されたカルシウムに富む微粒子が淡水中に豊富に存在していれば酸を中和します。これについて、酸性雨が降っても淡水生物の生存が可能であることを定量的に評価し、2003年に論文で発表しました」

隕石衝突後は複数の現象が起こり、どれが決定的だったかはまだわかりませんが、少なくともこれだけの濃度の酸性雨が大量に降れば、陸上の生物や食性に致命的な影響を与えたことは確かです。丸岡さんたちの研究が、隕石衝突直後に大規模な酸性雨が降った証拠を示したことで、約6600万年前の地球の本当の姿に大きく一歩迫ることができました。

「さらに研究を進めていけば、酸性雨の規模や継続時間も定量的に明らかにすることができる」と、丸岡さんは語ります。ほかの時代についても同様の分析を行えば、生物大量絶滅と酸性雨の関係がさらに明らかになるはずですよ。太古の地球の姿の全容が見えるのはいつでしょうか。今後の研究の成果が楽しみです。

- 参考文献 (1)Maruoka T., Nishio Y., Kogiso T., Suzuki K., Osawa T., Hatsukawa Y., Terada Y., 2020, Enrichment of chalcophile elements in seawater accompanying the end-Cretaceous impact event: Geological Society of America (GSA) Bulletin (DOI: 10.1130/B35403.1)
(2)Maruoka T., 2019, Mass extinction at the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) boundary, in Yamagishi A., Kakegawa T., Usui T., eds., Astrobiology: From the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence: Springer, p. 303-320.

Column コラム

丸岡さんが「地球化学」という研究分野に出会ったのは、大学の学部学生時代の「結晶物理学」の講義で、一本の学術論文を日本語に全訳する宿題が出たときです。それこそが、1980年にノーベル物理学者のアルバレット親子が隕石衝突仮説を提唱した『Science』掲載の論文でした。

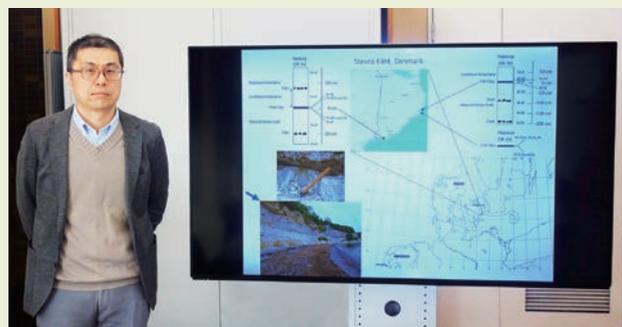
「学術論文をじっくり読んだのはそのときが初めてでした。微量な元素や同位体比といった指標から遠い昔に地球で起こったことを読み解けるということも初めて知りました。宿題として訳していた当時は、深く内容を理解できていなかったと思いますが、地層の元素を測ることでパラダイムシフトが起こるなんて、面白いことがあるなと強く印象に残りました」

もともと地震や気象などを扱う地球物理学を学びたいと思い、大阪大学理学部物理学科に入学した丸岡さんですが、授業の宿題がその後の人生を決めてしまったのです。

現在は地球化学の世界にどっぷりはまっている丸岡さん。休日にはどんなふうにご過ごしているのでしょうか。

「海外ドラマをわりとよく見ます。FBIやCIAが出てくるサスペンスものとか好きですね。鑑識の人たちが出てくると、思わず作中で描かれている分析手法に注目してしまいます」

次は何を解き明かしてくれるのか、丸岡さんの今後の活躍が楽しみです。



Stevens Klintのデータと共に、丸岡さん。

SPring-8を用いた蛍光X線分析

この世の全ての物質は元素の組み合わせで構成されています。物質にX線を照射すると構成元素に由来するX線（蛍光X線）が発生します。本号で紹介している蛍光X線分析（XRF）は、物質から発生する蛍光X線のエネルギーと強度を計測することにより、物質中に含まれる元素の種類や構成割合を知ることができる手法です。

SPring-8では実験室系に比べて高強度、高輝度なX線を試料に照射することができ、より高エネルギーのX線の使用も可能であるため、高感度な蛍光X線分析の光源として適しています。

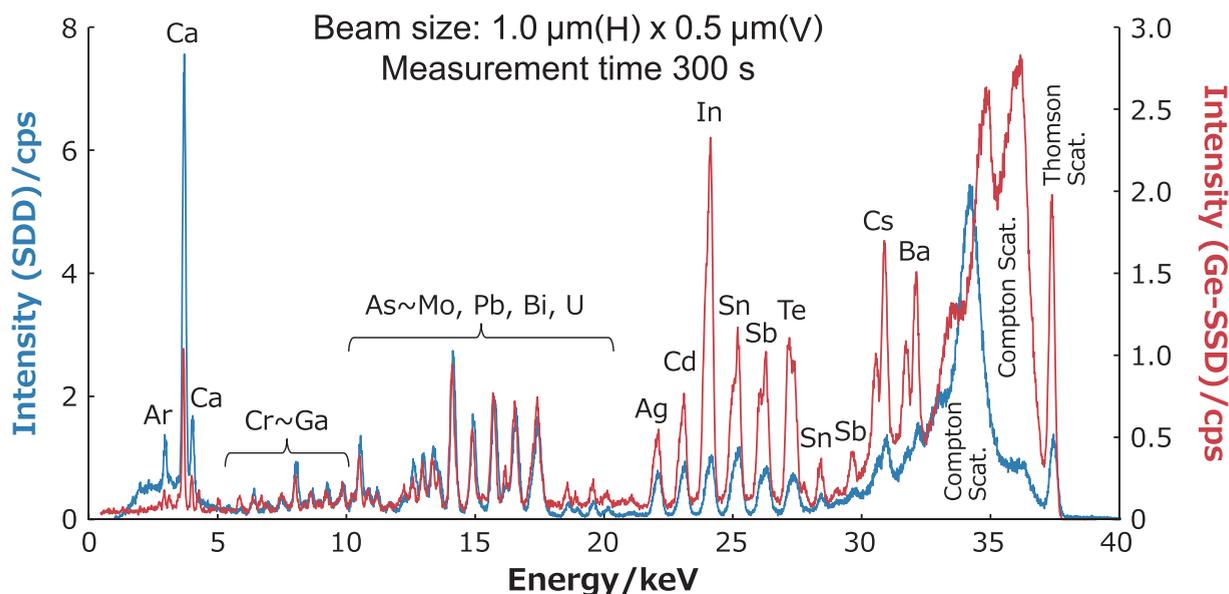


図1 認証標準物質SRM612のXRFスペクトル比較

図1はBL37XUで計測された認証標準物質であるSRM612のXRFスペクトルの例です。赤線と青線は使用した検出器の違いです。この物質には図中に記載している元素が定められた量含まれており、分析した試料に対する標準物質としてよく用いられています。含まれている元素は非常に低濃度（100 ppm以下）ですが、SPring-8の高エネルギーで高強度なX線を利用することにより、高感度な計測が実現されました。特にアンジュレータビームラインであるBL37XUでは、高輝度な光源特性を生かしてX線を1 μm以下の大きさに絞って試料に当てることによって物質中の微小領域の分析が可能です。

図2は東日本大震災時に原子力発電所のメルトダウンによって近県に飛散したセシウムボールを分析した例です。飛散した粒子は非常に小さい（数μm）のですが、SPring-8の高輝度なX線を集光することにより、粒子内部に含まれている元素を検出し、含まれる元素の組み合わせから確かに原子力発電所由来の物質であることをつきとめました。

SPring-8における蛍光X線分析はこれまで述べたように未知の物質中に含まれる元素を高感度に検出することにより、物質の由来を明らかにする強力な技術です。また微小領域の分析が可能なことから細胞内の元素分布の分析や電池などの機能性材料の内部の分析など幅広い応用分野に適用されています。

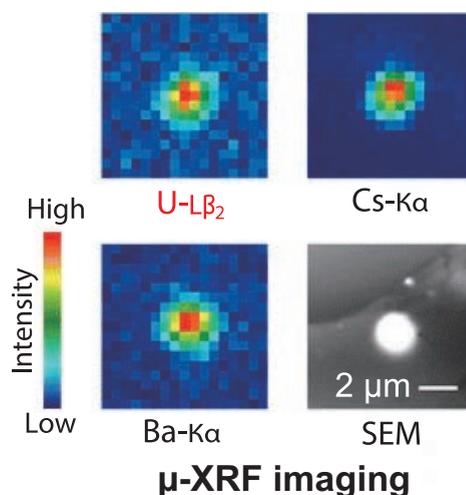


図2 蛍光X線分析によるセシウムボールの分析例 (Y. Abe *et al.*, Anal. Chem., 86, 8521(2014))

第15回：岡山大学大学院 自然科学研究科
阪上 拓巳さん

今回は岡山大学大学院 自然科学研究科 応用化学専攻 無機材料学研究室 修士課程2年生の阪上さんです。阪上さんは昨年度の“第19回SPring-8夏の学校”の参加者でした。夏の学校の感想を中心にお話をお伺いし、最後に今後の参加者に向けて“ひとこと”頂きました。



夏の学校の実習にて、右から今回インタビューに答えてくれた阪上さんと同じ実習を行った堀さん、吉田さん、渡辺先生、瀧川さん。

Q. 現在の研究と理系に進んだ経緯を教えてください。

A. 修士論文のテーマは、「スパッタ法による $\text{YbFe}_2\text{O}_4 / \text{Fe}_3\text{O}_4$ 積層膜の作製と評価」です。次世代電子デバイスの新規材料として注目されている、複電荷鉄酸化物 YbFe_2O_4 の積層膜において、産業化されているスパッタリング法を用いての実用化に向けた製作を行っています。大学へは元々化学が好きで「知識を生かした職業に携わりたい」と考えていて、実際勉強する中でも材料開発に対して強い興味を持ち、現在の修士課程のテーマになっています。

Q. どうして“SPring-8夏の学校”に参加しようと思ったのですか？

A. 私の地元が兵庫で、SPring-8の名前は知っていましたが、「すごい測定ができる」位のイメージしかありませんでした。修士まで研究し、実際夏の学校に参加できるようになり、「世界トップレベルの施設を肌で体感し、自分の中のイメージを形あるものにしたい」と参加を決めました。

Q. SPring-8夏の学校に参加して“どのようなこと”を感じましたか？

A. 様々な大学の様々な分野の学生と交流できたので、普段の学生生活では体験できない刺激を受けることが出来ました。また、参加していた学生さんは優秀な方ばかりで、特に印象に残っているのが、自身の研究を全く違う分野の私に、分かり易くかつ理解できるように説明されている方がいました。このような自身の研究を幅広く伝えられる技術は、私も見習いたいと思いました。

Q. 最後に今後のSPring-8夏の学校に参加する学生たちに“ひとこと”お願いします。

A. 夏の学校では普段の学生生活では味わえない体験を沢山することが出来ます。特に、学生同士の交流は貴重な体験だと思うので、勇気を出して積極的に交流して良い思い出を作ってください。

「夏の学校には一人で参加した」とのことですが、会期中色々な講師や生徒とたくさんの意見交換を行い、「とても活発で向上心のある生徒であった」と事務局が覚えていた阪上さんでした。夏の学校の講師には、以前の夏の学校の参加者だった方もおられます。阪上さんも今後研究や自身の特性を生かし、“SPring-8夏の学校”の魂を継いで、講師として立たれているかもしれませんね。

行事 予告

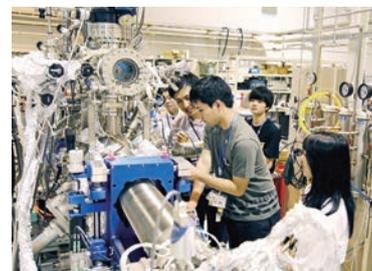
第4回 SPring-8 秋の学校 今年もSPring-8秋の学校の開催を予定しています。

SPring-8 秋の学校は、次世代の放射光科学に貢献する人材の育成を目的として、SPring-8 ユーザー協団体 (SPRUC) と高輝度光科学研究センター (JASRI) が中心となり、大学や関係諸機関と協力して開催するものです。昨年度の第3回は学生53名、社会人9名の合計62名の参加でした。

大学院修士を中心としたSPring-8夏の学校とは異なり、講義とグループ講習は、理系大学3年生が十分に理解できる水準に設定されており、施設停止期間中で放射線従事者登録も不要のため、卒業研究や大学院進学を控えた方々が進路を考える最適な機会になります。また、放射光に興味があり、これから利用を考えている大学院生や企業研究者の方々にも適しています。もちろん、すでに利用経験がある大学院生の参加も歓迎します。

申込等の詳細は、決まり次第HPで公開いたします。

※新型コロナウイルス感染症の拡大状況などにより、開催を延期・中止する可能性があります。あらかじめご了承ください。



グループ講習の風景

詳細については、SPring-8 ホームページ (<http://www.spring8.or.jp/ja>) にてご確認ください。



SPring-8 NEWS

No.100 June 2020
SPring-8 Document D 2020-006

編集 SPring-8 NEWS 編集委員会

発行 公益財団法人 高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1丁目1番1号

TEL (0791)58-2785 FAX (0791)58-2786

E-mail: jasri-event@spring8.or.jp <http://www.spring8.or.jp/>