

安全取扱Ⅱ

放射線発生装置取扱いの実際

只今から、放射線発生装置取扱いの実際についてお話しします。

Now I would like to talk about the actual handling of radiation generating devices.

話題

- 1 放射線発生装置とは
- 2 放射線発生装置の利用
ビームラインの役割り (1)
- 3 安全対策
ビームラインの役割り (2)
- 4 放射線発生装置利用の手続き

今回は、放射線発生装置とは何か、放射線発生装置の利用のためのビームラインの役割り、安全対策のためのビームラインの役割り、最後に放射線発生装置を利用するための手続きについて説明します。

This time, we will explain what a radiation generator is, the role of beamlines in using radiation generators, the role of beamlines in safety measures, and finally the procedures for using a radiation generator.

1 放射線発生装置とは

- ★放射性同位元素等の規制に関する法律 第2条第5項
- ★放射性同位元素等の規制に関する法律施行令 第2条
- ★放射線を放出する同位元素の数量等を定める件(告示)
- ★荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置として指定する件(告示)

電場や磁場を用いて電子や陽子などの荷電粒子を加速することで電子線又はエックス線(1 MeV 以上のエネルギーを有するものに限る。)並びにその他の放射線を発生させる装置で、装置表面から十センチメートル離れた位置における最大線量当量率が 600 nSv/h を超えるもの。

(種類)

- ①サイクロトロン
- ②シンクロトロン
- ③シンクロサイクロトロン
- ④直線加速装置
- ⑤ペータロン
- ⑥ファン・デ・グラーフ型加速装置
- ⑦コッククロフト・ワルトン型加速装置
- ⑧変圧器型加速装置
- ⑨マイクロトロン
- ⑩プラズマ発生装置(DT核反応における臨界プラズマ条件を達成する能力をもつ装置で、DT核反応専用のものに限る。)

まず、放射線発生装置とは何かについて説明します。放射線発生装置とは一般的には放射線を発生させる装置全般の事で、通常のエックス線装置も含まれると解釈されているようですが、放射性同位元素等の規制に関する法律では次のとおり定義されおり、通常のエックス線装置は含まれていません。

放射線規制法等では、電場や磁場を用いて電子や陽子などの荷電粒子を加速することで電子線又はエックス線(1 MeV 以上のエネルギーを有するものに限る。)並びにその他の放射線を発生させる装置で、装置表面から十センチメートル離れた位置における最大線量当量率が 600 nSv/h を超えるもので、次の種類のもを放射線発生装置と定義されいます。

- ①サイクロトロン
- ②シンクロトロン
- ③シンクロサイクロトロン
- ④直線加速装置
- ⑤ペータロン
- ⑥ファン・デ・グラーフ型加速装置
- ⑦コッククロフト・ワルトン型加速装置
- ⑧変圧器型加速装置
- ⑨マイクロトロン
- ⑩プラズマ発生装置(DT核反応における臨界プラズマ条件を達成する能力をもつ装置で、DT核反応専用のものに限る。)

A radiation generator is generally defined as any device that generates radiation, and is generally interpreted to include ordinary X-ray equipment; however, the Act on the Regulation of Radioactive Isotopes, etc. defines it as follows, and does not include ordinary X-ray equipment.

The following types of devices are defined as radiation generating devices: devices that generate electron beams or X-rays (limited to those with an energy of 1 MeV or more) and other radiation by accelerating charged particles such as electrons and protons using electric or magnetic fields, and with a maximum dose equivalent rate exceeding 600 nSv/h at a position 10 cm away from the surface of the device.

① Cyclotron ② Synchrotron ③ Synchrocyclotron ④ Linear accelerator ⑤ Betatron ⑥ Van de Graaff accelerator ⑦ Cockcroft-Walton accelerator ⑧ Transformer accelerator ⑨ Microtron ⑩ Plasma generator (device capable of achieving the critical plasma conditions in DT nuclear reactions, limited to those dedicated to DT nuclear reactions)

2024年ノーベル化学賞

「コンピューターを用いたタンパク質の設計」
米ワシントン大学・ベイカー(David Baker)教授

「コンピューターを用いたタンパク質の構造予測」
英国Google DeepMind・ハサビス(Demis Hassabis)氏、ジャンパー(John Jumper)氏



生体高分子の立体構造情報(Protein Data Bank)
世界中の放射光施設によるX線結晶構造解析
その他各種解析データを集約したもの

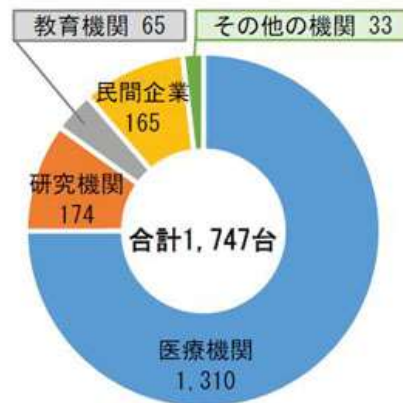
2024年ノーベル賞は、物理学賞に続いて、化学賞でもAI技術関連の業績が受賞しました。

放射線発生装置は、半導体の開発、タンパク質の構造解析又は薬品の開発などに広く利用されており、これまで蓄積された各種解析情報を集約したデータベース等が生かされたものと考えます。

Following the Physics Prize, the 2024 Nobel Prize in Chemistry was also awarded for an achievement related to AI technology.

Radiation generators are widely used in the development of semiconductors, protein structural analysis, and drug development, and we believe that databases that consolidate various analytical information accumulated to date have been utilized.

放射線発生装置の使用許可台数(2019年3月末時点)

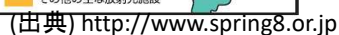


(出典 令和5年度版原子力白書 内閣府)

国内の放射線発生装置の使用許可を得ているものは、令和5年度版原子力白書のデータでは、合計1747台で、機関別では約75%が医療機関のもので、種類は直線加速装置（リニアック）であり、そのほか、理化学研究所等の研究機関や東北大学等の教育機関及び民間企業が設置しています。

According to data from the 2023 edition of the Nuclear White Paper, a total of 1,747 radiation generating devices have been approved for use in Japan, of which approximately 75% are owned by medical institutions and are linear accelerators (linacs). Others are installed by research institutes such as the RIKEN, educational institutions such as Tohoku University, and private companies.

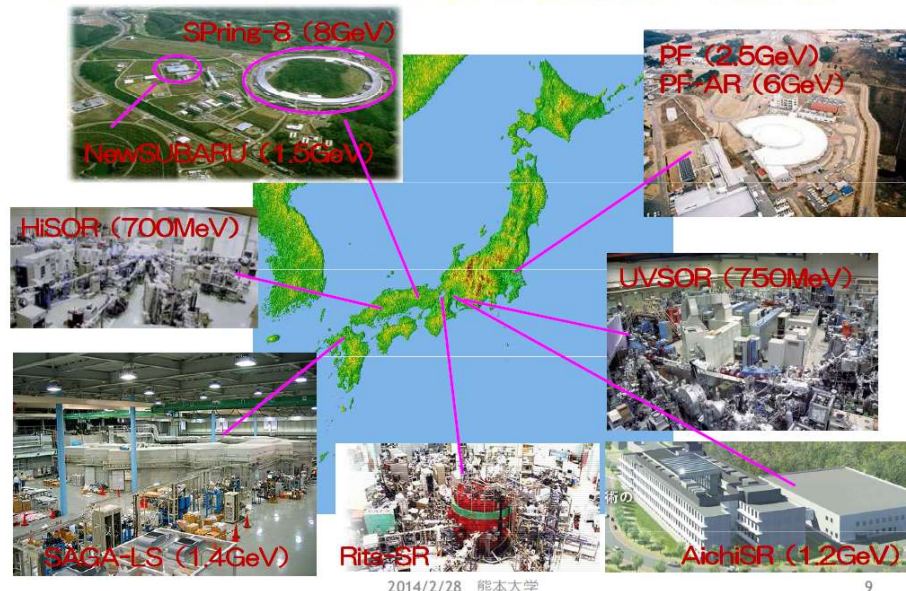
◆ 第3世代の大型放射光施設とその他の主な放射光施設



加速エネルギーは、8GeVとアメリカのAPSや欧州のESRFよりも大きなものとなっています。

The acceleration energy is 8 GeV, which is greater than that of the APS in the US and the ESRF in Europe.

シンクロトロン光利用施設（国内）



(出典) <http://www.spring8.or.jp>

日本には、兵庫県播磨科学公園都市に設置されている理研のSpring-8 8GeV、兵庫県のNewSUBARU 1.5GeV、広島大学放射光科学研究所Hisor 700MeV、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターSAGA-LS 1.4GeV、立命館大学総合科学技術研究機構SR SENTER Rits-SR 575MeV、あいちシンクロトロン光センター1.2GeV、分子科学研究所 極端紫外光研究施設 UVSOR 750MeV、高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設Photon Factory PFリング 2.5GeV、アドバンスドリング PF-AR 6.5GeVのほか、北海道から九州に加速器を用いる研究・教育施設や診療施設等が点在しています。利用目的に応じて利用する施設を選択します。

In Japan, there are RIKEN's Spring-8 8GeV in Harima Science Garden City, Hyogo Prefecture, NewSUBARU 1.5GeV in Hyogo Prefecture, Hiroshima University's Synchrotron Radiation Research Institute Hisor 700MeV, Saga Prefectural Kyushu Synchrotron Light Research Center SAGA-LS 1.4GeV, Ritsumeikan University Research Organization for Science and Technology SR SENTER Rits-SR 575MeV, Aichi Synchrotron Light Center 1.2GeV, Institute for Molecular Science Extreme Ultraviolet Research Facility UVSOR 750MeV, High Energy Accelerator Research Organization Synchrotron Radiation Experimental Facility Photon Factory PF Ring 2.5GeV, Advanced Ring PF-AR 6.5GeV, and other research, educational, and medical facilities that use accelerators scattered from Hokkaido to Kyushu. Select the facility

you want to use depending on your purpose.



また、新たに、宮城県仙台市において3GeV高輝度放射光施設ナノテラスの運用が始まりました。

In addition, the NanoTerrace, a new 3 GeV high-brilliance synchrotron radiation facility, has begun operation in Sendai, Miyagi Prefecture.



文部科学省HPに、放射線発生装置施設の紹介用ビデオが掲載されています。時間の関係上、KEKのものを一つだけ紹介します。興味がある方は、後でご覧ください。

The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology website has videos introducing radiation generating equipment facilities. Due to time constraints, I will only introduce one from KEK. If you are interested, please watch it later.



ここで、放射光施設の中身を理解するために、理研のX線自由レーザーに関するビデオをご覧ください。

To get an idea of what goes on inside a synchrotron radiation facility, check out this video about RIKEN's X-ray Free Laser.

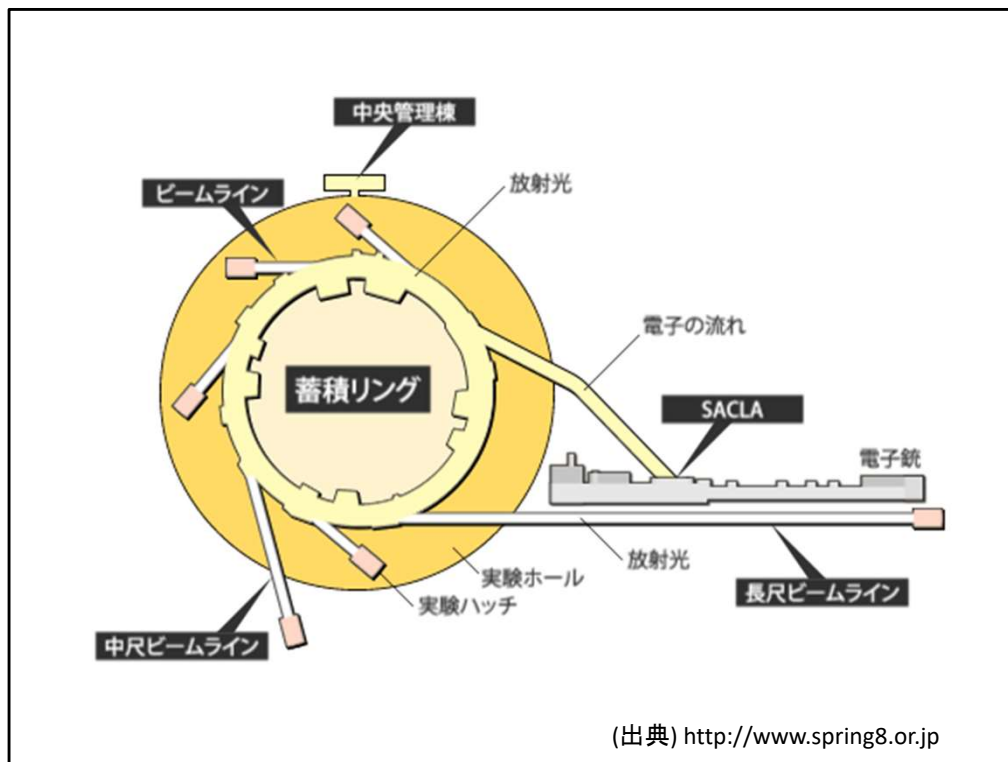
SPring-8 (最大エネルギー8GeV)



(出典) <http://www.spring8.or.jp>

これは、Spring-8を上空から撮影したものです。次の図と比べてみると建物内の設備と機能が理解できると思います。

This is an aerial photograph of Spring-8. Comparing it with the following image will give you an idea of the facilities and functions inside the building.



(出典) <http://www.spring8.or.jp>

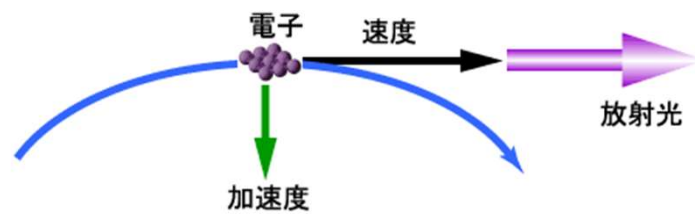
右下のSAKURAに設置されている電子銃から発射された電子は、SACLA内の直線加速装置で8Gevまで加速されて、周長約1,500mの蓄積リングに投入し、エネルギーを維持しながら周回させて、偏向電磁石や挿入光源により放射光を発生させます。

発生した放射光は、ビームラインを通して、蓄積リング内外に設けられた実験ハッチに導かれ、さまざまな実験に利用されています。

Electrons fired from the electron gun installed at SAKURA in the lower right are accelerated to 8 GeV by SACLA's linear accelerator and injected into a storage ring with a circumference of approximately 1,500 m, where they are rotated while maintaining their energy, generating synchrotron radiation using bending magnets and an insertion light source. The generated synchrotron radiation is guided through beamlines to experimental hatches installed inside and outside the storage ring, and is used for a variety of experiments.

放射光とは

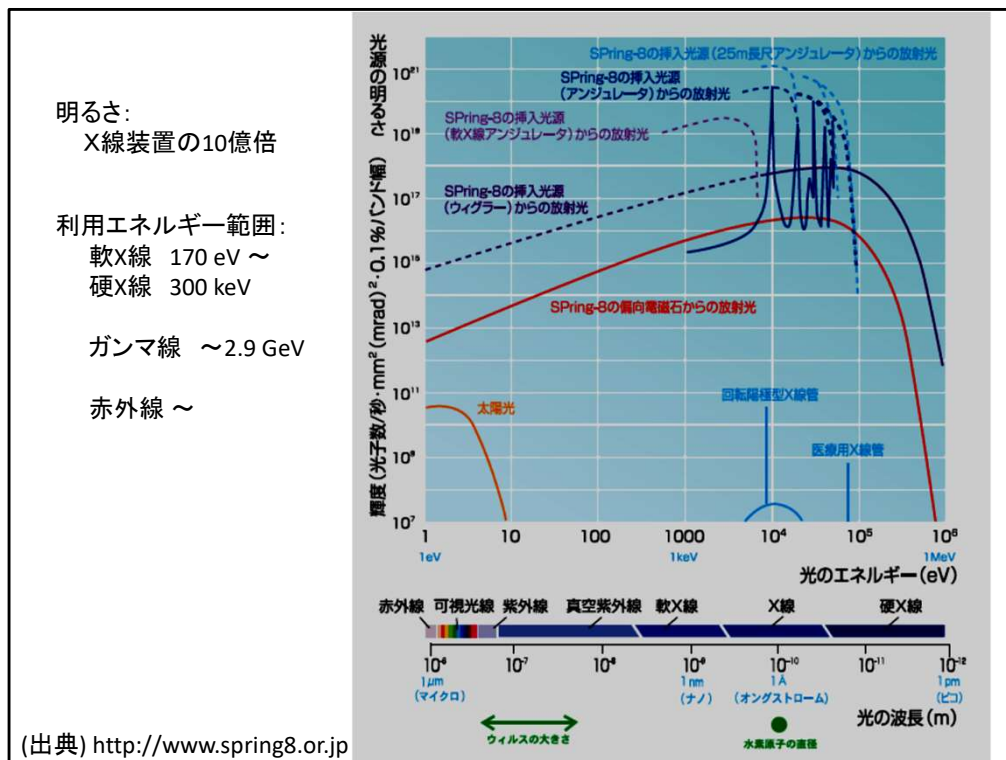
ほぼ光速まで加速された電子の軌道を電磁石等で曲げることで接線方向に発生する高輝度の白色電磁波のこと。



(出典) <http://www.spring8.or.jp>

放射光とは、ほぼ光速まで加速された電子の軌道を電磁石で曲げることで接線方向に発生する高輝度の白色電磁波のことです。

Synchrotron radiation is a high-intensity white electromagnetic wave that is generated in the tangential direction by bending the orbit of electrons accelerated to nearly the speed of light using an electromagnet.



放射光は、その明るさ、エネルギー、指向性に特徴があります。これは、Spring-8のもので、明るさは通常のエックス線装置の10億倍で、エネルギーは赤外線以上、軟エックス線の170eV～硬エックス線の300keVのほか、2.9GeVまでのガンマ線を利用することができます。

Synchrotron radiation is characterized by its brightness, energy, and directionality. This is from Spring-8, which is 1 billion times brighter than regular X-ray equipment, and has energies greater than infrared, ranging from soft X-rays of 170 eV to hard X-rays of 300 keV, as well as gamma rays up to 2.9 GeV.

話題

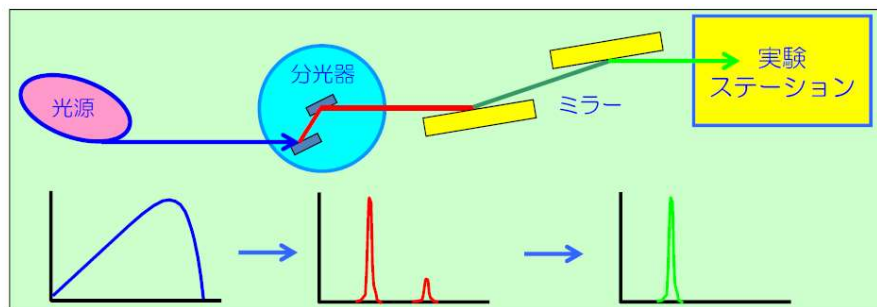
- 1 放射線発生装置とは
- 2 放射線発生装置の利用
ビームラインの役割り (1)
- 3 安全対策
ビームラインの役割り (2)
- 4 放射線発生装置利用の手続き

次に放射線発生装置の利用のためのビームラインの役割りについて話を進めます。

Next, I would like to discuss the role of beamlines in utilizing radiation generators.

ビームラインの役割 (1)

- シンクロトロン光ビームの集光・整形や単色化などの光学系を構成し、利用者の実験目的に応じたシンクロトロン光を供給する。



2014/2/28 熊本大学

25

(出典)平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料
岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)

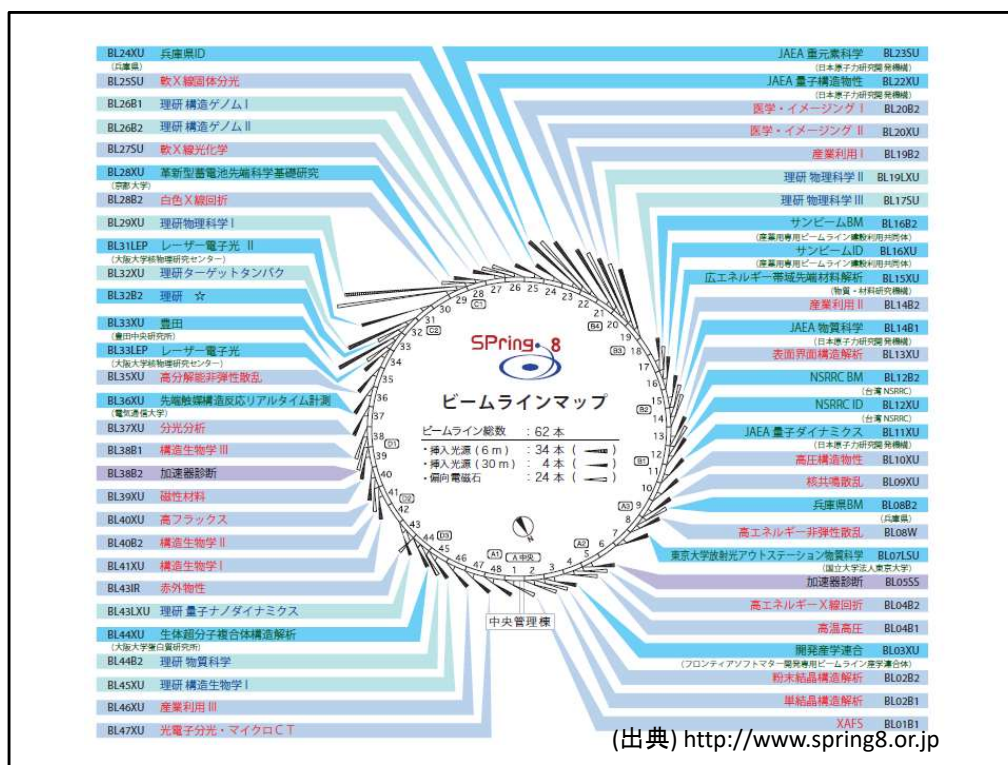
利用者の実験目的に応じた放射線の種類やエネルギーを取り出すために、ビームラインに設けられた分光器やミラーを介して、集光、整形や単色化させています。

利用者が直接に取り扱う放射線は、主に軟エックス線や硬エックス線であると思われます。そこで、エックス線を取り扱うのに何故放射線規制法に基づくこの教育訓練を受講しなければならないのか疑問に思われる方も少なくはないと思います。

みなさんが取り扱うエックス線は、直線加速器やシンクロトロン等の放射線発生装置から作られています。したがって、元をたどると放射線発生装置を利用することになるため、この教育訓練の受講対象になります。

In order to extract the type and energy of radiation appropriate for the user's experimental purpose, the light is focused, shaped, and monochromatized using spectrometers and mirrors installed in the beamline.

The X-rays that you will be handling are produced by radiation generating devices such as linear accelerators and synchrotrons. Therefore, since you will be using radiation generating devices, you are eligible to take this education and training.



ここで、Spring-8のビームラインについて紹介します。
 ビームラインは、ご覧のとおり、62本用意されており、軟エックス線個体分光、軟X線光化学、白色X線回折、光電子分光・マイクロCT、医学・イメージング、結晶構造解析など様々な分野の実験に利用されています。

Here, we will introduce the beamlines at Spring-8. As you can see, there are 62 beamlines available, and they are used for experiments in a wide range of fields, including soft X-ray solid spectroscopy, soft X-ray photochemistry, white X-ray diffraction, photoelectron spectroscopy/microCT, medicine/imaging, and crystal structure analysis.

■ 実験ステーション



実験ホール内の実験ハッチ

偏向電磁石あるいは挿入光源で発生した放射光を光学系で整形して実験ハッチまで導き、試料に照射し、散乱・回折X線、透過X線、蛍光X線、2次電子やイオン等を計測する様々な実験が行われています。

(出典) <http://www.spring8.or.jp>

これが、実験ステーションです。実験ホール内の実験ハッチ内に利用する放射線を導き、試料に照射して計測を行う場所です。

この写真は、試料や計測用機器のセッティングを行っている場面です。セッティングが終わったら、実験ハッチ内に人がいない事を確認して、入口扉を閉めてインターロックのONに、照射及び計測を開始します。

実験ハッチの入口付近には、緊急停止ボタンがあります。緊急停止ボタンを押した場合には、全てのビームラインが緊急停止に陥る場合があります。試料や計測器等のセッティング及び人が実験ハッチ内に居ないことを確実に確認することが重要です。

This is the experiment station. The radiation is introduced into the experiment hatch in the experiment hall, where it is irradiated onto samples and measurements are taken.

This photo shows the scene where the samples and measurement equipment are being set up. After setting up is complete, we make sure that no one is in the experimental hatch, close the entrance door, turn on the interlock, and start irradiation and measurement.

If the emergency stop button is pressed, all beamlines may enter an emergency shutdown. It is important to make sure that no samples or instruments are set up and no people are present in the experiment hatch.

There is an emergency stop button near the entrance to the experimental hatch.

UVSOR (最大エネルギー750 MeV)

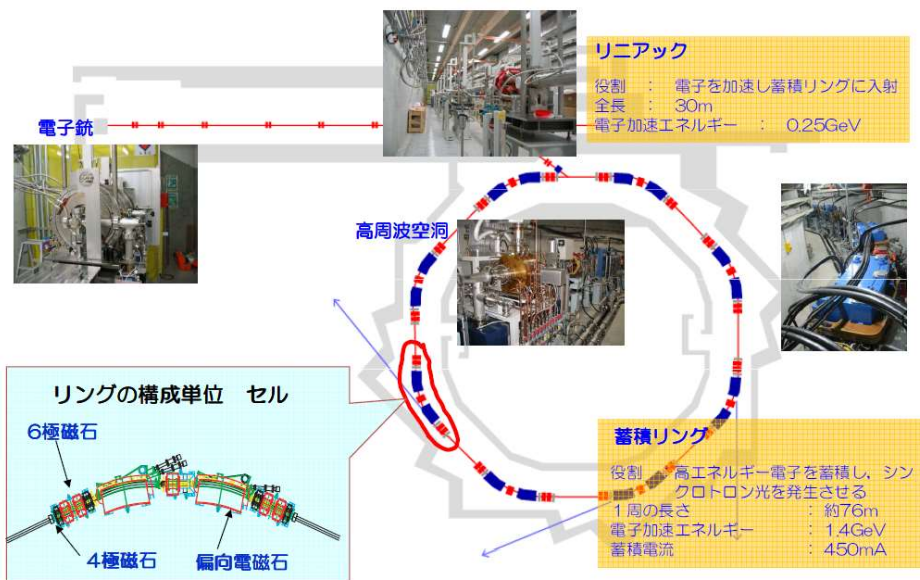


(出典)自然科学研究機構 分子科学研究所 極紫外光研究施設 UVSOR パンフレット(2012)

人体への影響が少ない紫外光や放射線等を利用する場合には、実験ハッチは設けられていません。例えば、分子科学研究所の放射光施設（UVSOR）があります。

In cases where ultraviolet light or radiation, which have little effect on the human body, is used, no experimental hutch is provided. For example, there is the Synchrotron Radiation Facility (UVSOR) at the Institute for Molecular Science.

SAGA-LS (最大エネルギー1.4 GeV)



2014/2/28 熊本大学
 (出典)平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料
 岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)

18

これは、九州シンクロトロン光研究センターの概要です。最大エネルギーは1.4GeVであり、Spring-8の8GeVと比べると小さいのですが、特徴のある様々な分野の実験に利用されています。

This is an overview of the Kyushu Synchrotron Light Research Center. The maximum energy is 1.4 GeV, which is smaller than the 8 GeV of Spring-8, but it is used for experiments in a variety of unique fields.

実験ホールに設置されたビームライン



- ・実験ハッチがあるビームライン
BL06, BL07, BL09A, BL11, BL15 ⇒ 硬X線を利用するビームライン
主に大気中での実験
- ・実験ハッチの無いビームライン
BL10, BL12, BL13 ⇒ 軟X線を利用するビームライン
主に真空中での実験

2014/2/28 熊本大学

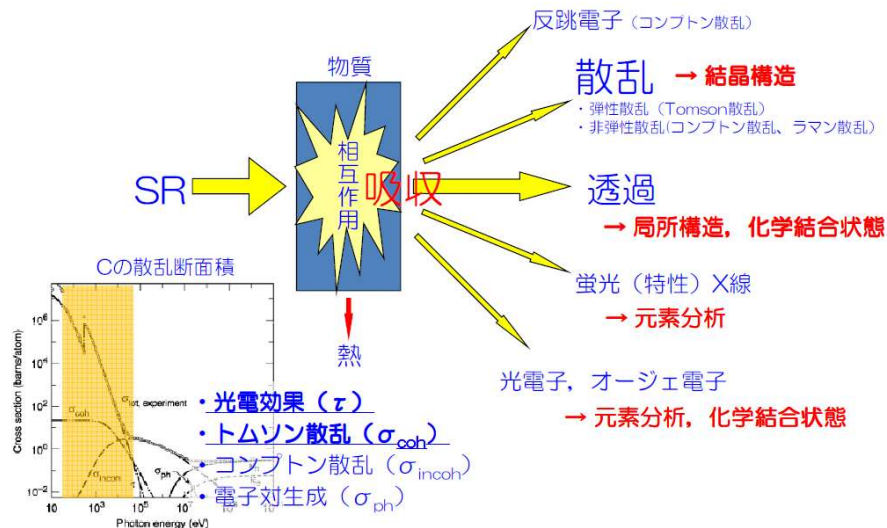
24

(出典)平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料
岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)

これは、九州シンクロトロンの実験ホールです。利用する放射線の種類やエネルギーによって実験ハッチが設けられています。

This is the experimental hall of the Kyushu Synchrotron. Experimental hutches are set up according to the type and energy of radiation used.

シンクロトロン光（X線）と物質の相互作用



2014/2/28 熊本大学

27

(出典) 平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料
岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)

シンクロトロン光から発生するX線と物質との相互作用を利用して、様々な実験に利用されています。

散乱線を計測することで、結晶構造が解析でき、透過の状況からイメージング等によって局所構造や科学的結合状態を、蛍光エックス線の計測から元素分析が行われています。

X-rays generated from synchrotron light are used in a variety of experiments, taking advantage of the interaction between the X-rays and materials. By measuring the scattered rays, crystal structures can be analyzed, and local structures and chemical bonding states can be determined by imaging based on the penetration conditions, while elemental analysis can be performed by measuring fluorescent X-rays.

材料科学におけるシンクロトロン光の利用

特徴

- 高輝度
- 高指向性
- エネルギー可変
- . . .

利点

- ▶ 微量元素測定
- ▶ 迅速測定
- ▶ 微小ビーム形成
- ▶ 高分解能測定
- ▶ 元素選択
- ▶ . . .

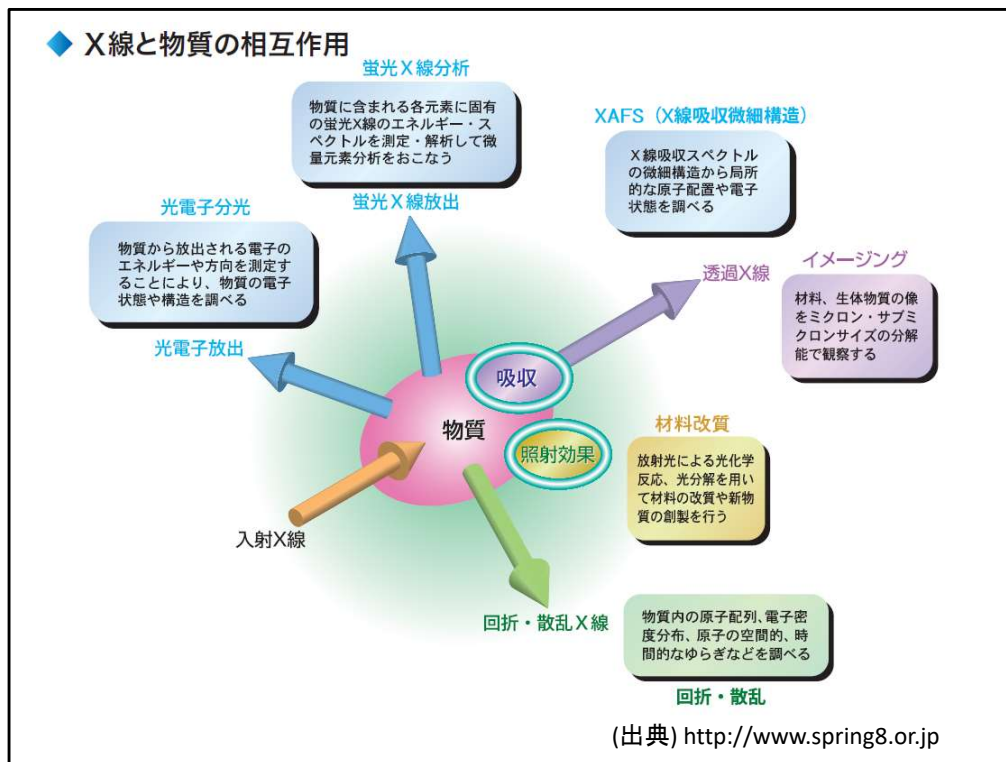
2014/2/28 熊本大学

31

(出典)平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料
岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)

放射光から得られる放射線の特徴として、高輝度、高指向性、エネルギー可変が上げられます。通常のエックス線装置では計測ができなかった微量元素測定や計測時間の短縮、高分解能測定が可能になりました。

The characteristics of radiation obtained from synchrotron radiation include high brightness, high directionality, and variable energy. It enables trace element measurement that could not be performed with normal X-ray devices, shortens measurement time, and enables high-resolution measurement.



放射光は、X線と物質との相互作用を利用した各種分析の高度化に貢献しています。

Synchrotron radiation contributes to the advancement of various analyses that utilize the interaction between X-rays and materials.

光合成水分解反応の機構

光合成における水分解・酸素発生反応は、光のエネルギーを生物が利用可能な化学エネルギーに変換し、大気中に酸素を供給し、それによって地球上酸素呼吸生物の生存を可能にする意味で極めて重要なものです。この反応は、光化学系IIという膜タンパク質複合体によって行われています。シアノバクテリア由来光化学系IIは17個の膜貫通タンパク質と3つの膜表面性タンパク質により構成され、分子量350 kDaの単量体が二量体を形成して機能しています。この二量体の結晶構造をSPRING-8の放射光を利用して1.9 Å分解能で解析した結果（図1左）、各サブユニットの構造や電子伝達に関わる成分の配置・構造が明らかになっただけでなく、そこに含まれる水分解・酸素発生反応触媒の構造が明らかになりました。この触媒は、 Mn_4CaO_5 の組成を持ち、「歪んだ椅子」の形をしており、 Mn_4CaO_5 がキュバン型の座部を形成し、4つ目のMnイオンがオキソ酸素を通してキュバンの外に繋がっていました（図1右）。キュバンの歪みを作り出している原因の一つは、5つの酸素原子のうち、O5と呼ばれる酸素原子とその周りのMnイオンとの結合距離が長いからです。このことは、O5が特殊な位置にあり、反応の過程で切り出され、酸素分子を形成するための基質酸素の一つを提供している可能性を示唆しています。実際に、閃光照射により水分解反応の中間状態（ S_2 、 S_3 状態）を作り、X線自由電子レーザー-SACLAを用いてポンプ-プローブ実験を行った結果、 S_2 状態では新たな水分子の挿入は見られなかったが、 S_3 状態では新たな水分子（O6）がO5の近傍に挿入され、O5とO6の間で酸素-酸素結合が形成され、分子状酸素を放出することが示されました（図2）。

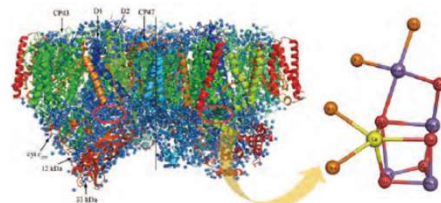


図1. 光化学系II二量体の全体構造（左）と Mn_4CaO_5 クラスターの構造（右）

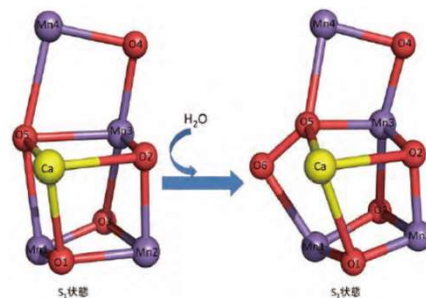


図2. 光化学系IIの水分解反応における Mn_4CaO_5 クラスターの構造変化。暗黒で安定な S_2 状態と2閃光照射により形成された S_3 状態の構造を示した。

（出典）<http://www.spring8.or.jp>

BL41XU, BL45XU, SACLA

岡山大学 沈 建仁

最近の放射光を利用して得られた成果の一部を4つ紹介します。
これは、タンパク質結晶構造解析法を開発したものです。

Here are four of the recent results obtained using synchrotron radiation. This is the development of a protein crystal structure analysis method.

ダイヤモンド中のドーパント原子立体配列の解明

ダイヤモンドは宝石に使われるほどの美しさだけでなく、高強度、耐熱性、絶縁性能などの優れた特性により応用上にも重要な物質です。炭素というありふれた元素の結晶であるため、資源のない我が国にとって、元素戦略的な観点からも注目されています。優れた絶縁性は、微量元素のドーピングにより高性能な半導体として機能することにつながるため、次世代パワーデバイスや量子センサーなどへの応用が期待されています。デバイス応用のためには、微量元素ドーピングによりダイヤモンド中に電子またはホール（電子の抜け殻）を導入し導電性を付与する必要があります。p型半導体はホウ素ドーピングにより、n型半導体はリンドーピングにより制御可能であり、これら的高品質化がデバイス性能に関わる重要な因子となります。

本研究では、化学気相成長法により作製したリンドープn型ダイヤモンド薄膜(リン濃度: $0.06 \text{ atom\%}$ 、産総研 加藤由氏により提供)に対して、超高精度水素中 α ラザワース実験(図1)を行うことにより、従来技術、電子顕微鏡やX線結晶構造解析では不可能だった、ダイヤモンド中のリン元素の3次元的な原子配列構造を世界で初めて明らかにしました。結果は、ドーパードリン原子が、(a)リン原子がダイヤモンドを構成する炭素原子と置き換わった構造(格子置換構造)と、(b)隣り合う炭素原子が2つ外れて、その中間位置にリン原子が存在する構造として導入されることを見出しました。電気活性性とリン原子の構造はダイヤモンド結晶中に電子を放出する、電気的に活性化構造であるのに対し、(b)は逆に電子を捕獲してしまう不活性化構造です。さらに、構造(b)はダイヤモンド成長方向に配向していることが観測されました。ダイヤモンド中のリン原子配列構造と電気的活性化状態が「見える」ようになったことから、ダイヤモンドの結晶成長条件を変えながら、この測定による構造の変化を観測すること、不活性化構造を抑制して活性化構造の濃度を上げること、より高度な試料合成の戦略を立てることができるようになります。

BL25SU 岡山大学 横谷 尚睦、奈良先端大 松下 智裕
論文: T. Yokoya *et al.*, *Nano Letters* 19, 5915 (2019)

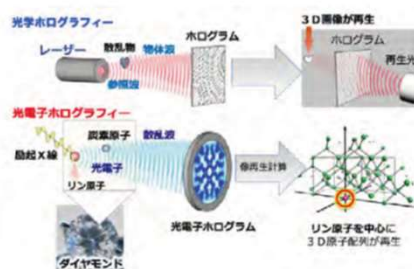


図1. 光電子ホログラフィーの原理図

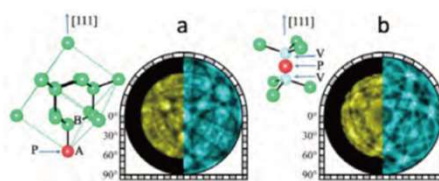


図2. 光電子ホログラムと再生されたダイヤモンド中のリンの原子配列

(出典) <http://www.spring8.or.jp>

これは、光電子ホログラフィーによってダイヤモンド中のドーパミン原子立体配列を解明したものです。

This is the discovery of the three-dimensional arrangement of dopamine atoms in diamond by photoelectron holography.

ナノ複合結晶薄膜の規則成長とその構造決定に成功

高いガス吸着特性と高い規則性（結晶性）を有する多孔性配位高分子（PCP）は、ガス分子の高効率分離・濃縮機能や空孔内部での特異な反応など様々な機能の利用が可能な物質群です。このため、異なる機能を持ったPCPを集積化することで、高効率な燃料電池など、様々なエネルギー関連素子を作製することが可能となります。このような素子構築には、異種PCPを密着して集積するために、複数のPCP膜の結晶の向きをそろえて作製（配向成長）することが必要不可欠です。しかし、これまでは平面的に剛直なPCP以外での配向成長には成功していませんでした。今後、機能の多様性と作製した素子の耐久性、集積時の異種PCP間の密着性を高めるためには、3次元方向に剛直なPCPの結晶を配向成長させる技術の実現が切望されていました。

本研究では、配向成長に適切な基板とその表面加工、3次元方向に剛直性を示しながらも成長方向を制御できる骨格形成材料を選ぶことで、配向成長した3次元的なPCPのナノ薄膜作製に成功しました（図1）。また、このナノ薄膜において、可逆的なガスの吸脱着反応が起こることに加え、骨格構造の変化を伴わずに吸脱着反応がおこなわれるといった剛直性も確認しました。これらナノ薄膜の配向成長や吸脱着時の構造変化は、SPRING-8の高輝度なX線と表面・界面の精密な回折実験が可能でBL13XUの計測基盤を用いることで初めて確認できたものです（図2）。

この研究成果は、異なる機能を持ったPCPを集積した新たな機能素子を作製する基盤技術となるため、ナノ薄膜での機能素子の研究開発が大きく加速され、燃料電池の高性能化などへの応用が期待されます。

BL13XU

京都大学 大坪 主弥、北川 宏

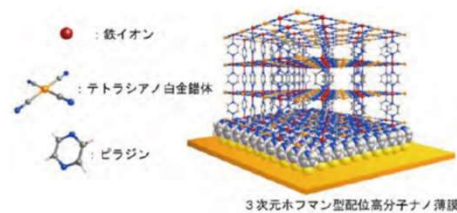
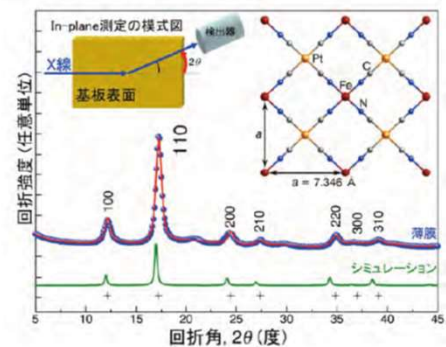


図1. 結晶配向性3次元多孔性配位高分子ナノ薄膜

図2. 結晶配向性3次元多孔性配位高分子ナノ薄膜の放射光X線回折プロファイル (出典) <http://www.spring8.or.jp>

これは、超薄膜構造X線回折によって、ナノ複合結晶薄膜の規則成長とその構造決定に成功したものです。この技術によって、将来、液化ガスの保管や輸送の方法が従来の重たいボンベから、取扱いが用意な軽い箱になることが期待されています。

This is the successful determination of the ordered growth and structure of nano-composite crystalline thin films by ultra-thin film structure X-ray diffraction. It is expected that in the future, this technology will enable the storage and transportation of liquefied gas to be changed from the conventional heavy cylinders to lighter, easier-to-handle boxes.

惑星科学

マイクロCT (Micro-CT)

**炭素質小惑星リュウグウの形成と進化：
リターンサンプルのCT撮影から得た証拠**

小惑星探査機はやぶさ2は、2020年12月に炭素質小惑星リュウグウのサンプルを地球に持ち帰りました。本研究では、このリターンサンプル初期分析の一環として、SPRING-8の種々のX線CT手法を組み合わせたマルチスケール非破壊3次元分析を行い、小惑星リュウグウの形成進化過程を調べました。リターンサンプルは10 μm ~8 mmの黒色粒子であり(図1)、粒子径100 μm 以上の大きい粒子はBL20XU、それより小さい粒子はBL47XUのX線CTシステムを用いて撮影を行いました。

BL20XUでは、サンプルの体積を空間解像度1 μm 以下のCT撮影によって精密に求め、電子天秤で測定した質量からサンプルの密度を求めました(図1)。これらの分析は、サンプルの汚染を避けるため大気遮断環境で行いました。その結果、サンプルの平均密度は $1.79 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ であり、小惑星リュウグウ全体の密度(1.19 g/cm^3)より非常に大きいことが分かりました。このことは、リュウグウの内部に30%以上の隙間があることを示しており、リュウグウがラプトルパイル構造をもつ小惑星(母天体の衝突破壊によって生じた岩塊が集積してできた小惑星)であることと整合的です。

BL47XUでは、2つのモード(結像型吸収CTと走査結像型位相CT)で空間解像度~100 nmのCT撮影を行い、サンプルを構成する物質の3次元空間分布を調べました。その結果、結晶の内部に閉じ込められた液体の水を発見しました(図2)。この水は、かつてリュウグウ母天体にあった水であり、cryoTOF-SIMS分析を行った結果、塩や有機物を含む炭酸水でした。このことは、リュウグウの母天体が太陽系の木星軌道より外側の低温領域で形成したことを示唆します。本研究の成果は、炭素質小惑星が、太陽系のどこで、どのように形成され、進化し、破壊され、現在の姿になったのか、その謎を解く重要な手掛かりとなりました。

BL20XU, BL47XU
東北大学 松本 恵、立命館大学 土山 明、JASRI 上橋 真之
論文: T. Nakamura *et al.*, *Science* 379, eabn8671 (2023). DOI: 10.1126/science.abn8671

C0002粒子の光学顕微鏡写真

1mm

C0002粒子内部のCT像

1mm

図1. C0002粒子(探査機が採取した3番目に大きい粒子)の光学顕微鏡写真と内部のCT像

液体の水

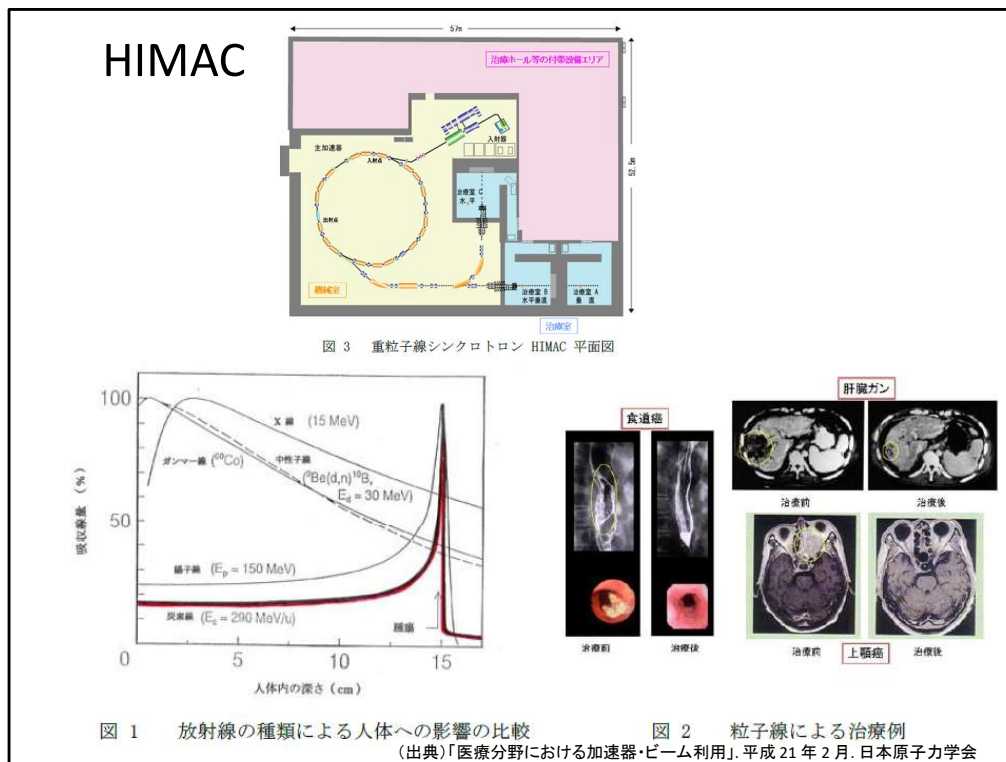
10 μm

図2. 六角板状結晶(硫化鉄)内部に発見された空孔を満たす CO_2 を含む液体の水のCT像

(出典) <http://www.spring8.or.jp>

これは、マイクロCTを利用して、小惑星リュウグウの形成と進化を解明したものです。
 これらのように、様々な分野に利用されていることが理解できたものと思います。

This project used micro-CT to elucidate the formation and evolution of the asteroid Ryugu.



これは、医療における利用の一例で、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構にある重粒子線がん治療装置です。放射光から得られる重炭素線を利用することで、目的組織の治療効果を極大化させるとともに、従来のX線やガンマ線は、患部以外の組織に放射線が吸収されることで起きる副作用を軽減できるようになりました。

This is a heavy ion cancer treatment device at the National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology. By using heavy carbon beams obtained from synchrotron radiation, it is possible to maximize the therapeutic effect on the target tissue while reducing the side effects that occur when radiation is absorbed by tissues other than the affected area, as occurs with conventional X-rays and gamma rays.

話題

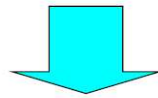
- 1 放射線発生装置とは
- 2 放射線発生装置の利用
ビームラインの役割り (1)
- 3 安全対策
ビームラインの役割り (2)**
- 4 放射線発生装置利用の手続き

次に、安全対策のためのビームラインの役割りについてお話しします。

Next, I would like to talk about the role of beamlines in safety measures.

ビームラインの役割 (2)

- 利用者の放射線被ばくやビームライン機器破損の防止、光源リングの真空度維持を図って実験を安全に行えるようにする



- 放射線遮へい
- ビームラインインターロックシステム

2014/2/28 熊本大学
(出典)平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料
岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)

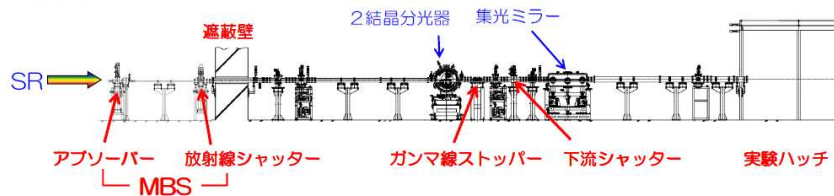
39

利用者の放射線被ばくや機器破損を防止するとともに、蓄積（光源）リングの真空維持を図って安全を維持するために、ビームラインには、放射線遮蔽対策とインターロックシステムが設置されています。

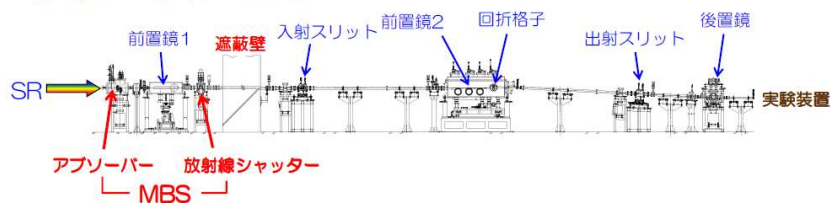
To prevent users from being exposed to radiation and equipment damage, and to maintain safety by maintaining a vacuum in the storage (light source) ring, beamlines are equipped with radiation shielding measures and interlock systems.

ビームラインに設置された 放射線遮へいおよびインターロック

硬X線ビームライン：BL15



軟X線ビームライン：BL12



2014/2/28 熊本大学

40

(出典)平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料
岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)

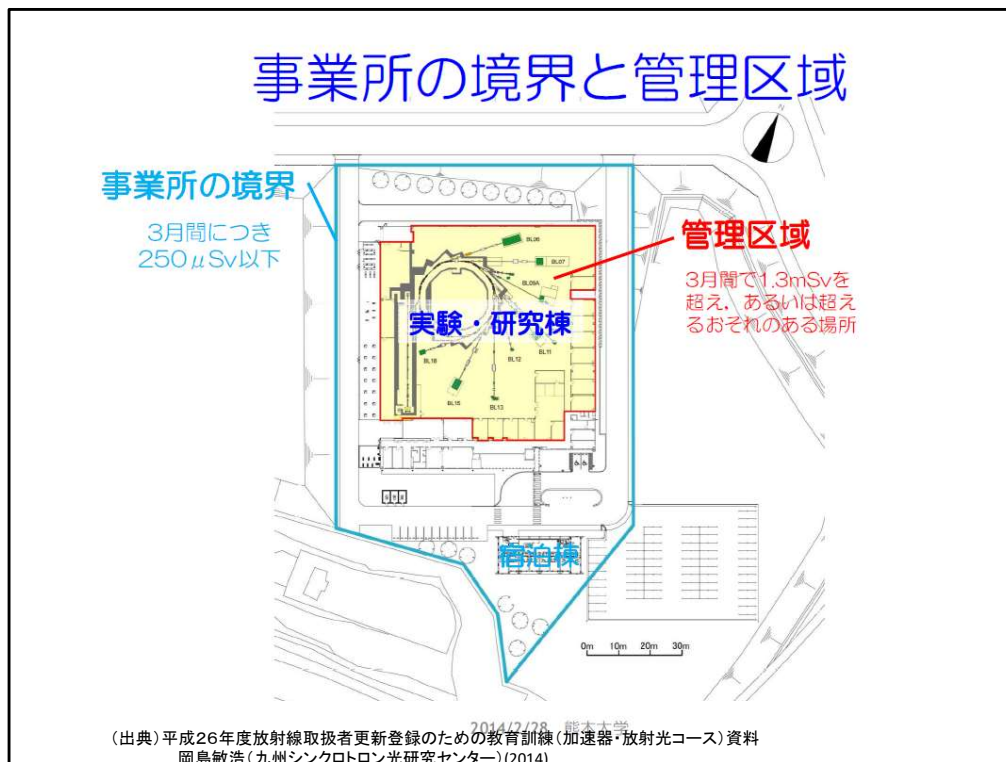
これは、九州シンクロトロン光研究センターのものです。蓄積リングが取り出された放射光には、高エネルギーのガンマ線や中性子線が含まれています。これを、アブソーバー、と遮蔽壁で遮蔽しています。

また、実験ハッチに導入する放射線のエネルギーを調整するために、分光器の後段にガンマ線ストッパーが配置されています。さらに、実験ハッチ内での緊急事態に備えて、放射線シャッターや下流シャッターによるインターロックシステムが設けられています。

The synchrotron radiation extracted from the storage ring contains high-energy gamma rays and neutrons, which are blocked by absorbers and shielding walls.

In addition, a gamma ray stopper is installed after the spectrometer to adjust the energy of the radiation introduced into the experimental hut.

Furthermore, an interlock system consisting of a radiation shutter and a downstream shutter is installed in case of an emergency inside the experimental hut.



放射光施設においても、放射線規制法によって利用者及び公衆の安全を確保するために、事業所境界の線量を3カ月間につき $250\ \mu\text{Sv}$ 以下及び線量が3カ月間で 1.3mSv を越える場所を管理区域として設定し管理するように義務付けられています。

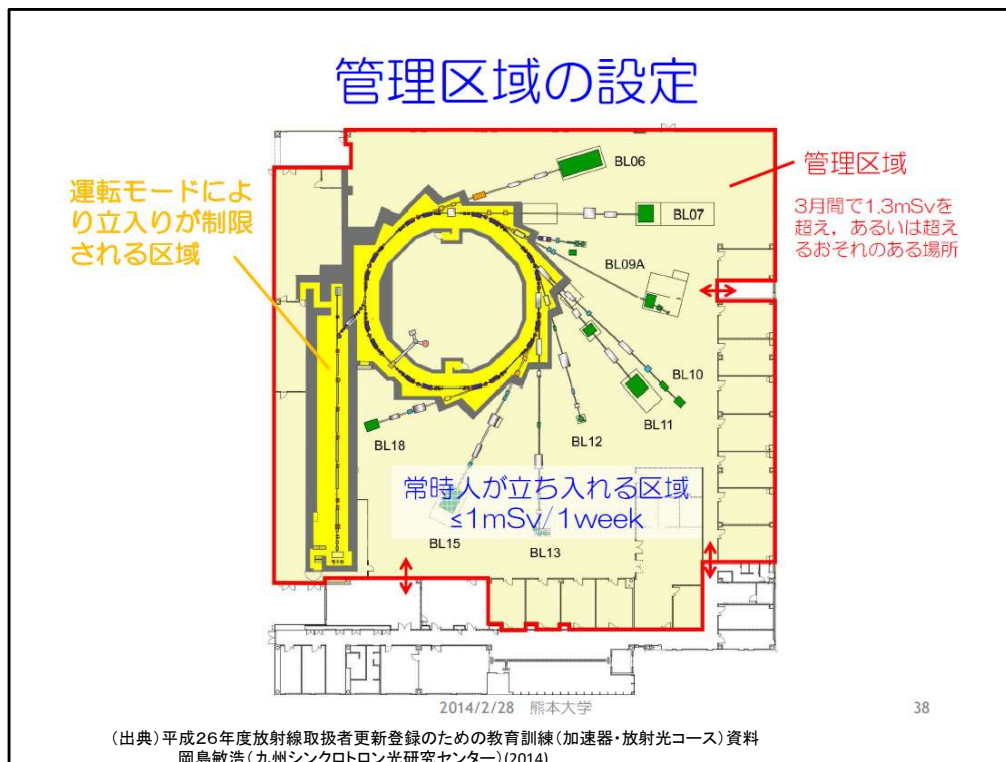
図に示すとおり、実験場所は、管理区域に設定されているため、利用する場合は、本学において放射線業務従事者として登録されており、教育訓練と健康診断を確実に受けていなければなりません。

また、利用者個人の被ばく管理を確実にを行うために、放射光施設を利用する際には、本学が発行するガラスバッジを持参してください。管理区域に入っている間は装着・計測するようお願いします。

Synchrotron radiation facilities are required to designate and manage as controlled areas the radiation dose at the boundary of their workplaces where it is kept below $250\ \mu\text{Sv}$ per three month period, and any area where the radiation dose exceeds 1.3mSv per three month period.

Those who wish to use the facility must be registered as radiation workers at Kumamoto university and must have undergone education and training and a health check.

When using the synchrotron radiation facility, please bring your glass badge issued by Kumamoto University.



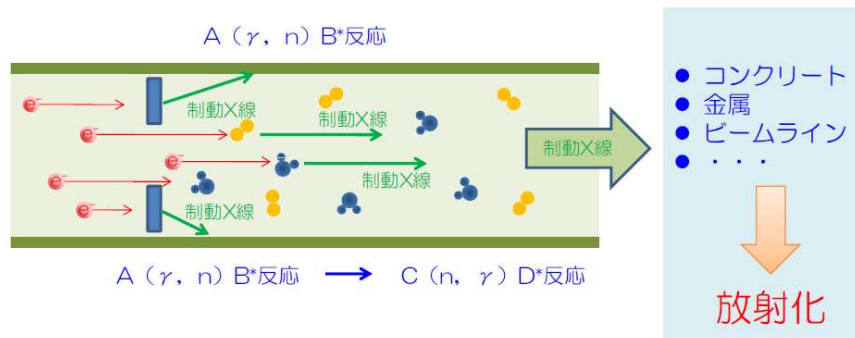
利用者は、各放射光施設の放射線取扱主任者及び安全管理担当者の指示に従って行動し、立入制限エリアや実験場所での立入時間制限等の指示に従ってください。利用場所の線量は、1週間につき1mSvと定められています。

Users must follow the instructions of the radiation protection supervisor and safety manager at each synchrotron radiation facility, including time restrictions on access to restricted areas and experimental locations. The radiation dose limit at the usage location is set at 1 mSv per week.

電子線加速器で注意を要する放射線 制動放射線（X線）と放射化

- ～10MeV以上の電子線加速器における（ γ ，n）反応による放射化

- A（安定核）+ $h\nu$ （光子） → B*（放射性核）+ n（中性子）
- C（安定核）+ n（中性子） → D*（放射性核）+ $h\nu$ （光子）



2014/2/28 熊本大学

44

（出典）平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練（加速器・放射光コース）資料
岡島敏浩（九州シンクロtron光研究センター）(2014)

さきほど、蓄積リングから中性子線も放射されると言いました。中性子は、6MeV以上の電磁波と物質との核反応（ $\gamma \cdot n$ ）によって発生します。この中性子が、物質の原子核に取り込まれると取り込まれた元素が放射性元素になります。これを放射化といいます。この中性子によって、遮蔽壁のコンクリートや金属またはビームラインの材料が放射化されています。このような現象があることを理解した上で、放射光をご利用いただければと思います。

Neutrons are produced by nuclear reactions (γ -n) between electromagnetic waves of 6 MeV or higher and matter.

These neutrons activate the concrete and metal of the shielding walls and the materials of the beamline.

話題

- 1 放射線発生装置とは
- 2 放射線発生装置の利用
ビームラインの役割 (1)
- 3 安全対策
ビームラインの役割 (2)
- 4 放射線発生装置利用の手続き

最後に、放射光利用の手続きについて説明します。

Finally, we will explain the procedures for using synchrotron radiation.

放射線作業登録申請書(2022年度)
Radiation Worker Application Form
(For External User / Supplier)

新規

国立研究開発法人理化学研究所 播磨事業所 安全管理室長 殿
To RIKEN the Harima Safety Center Director

受付番号
Receipt No B202209290026

2022 年Y 09 月M 30 日D

所属機関名称
Name of affiliation 熊本大学

所属長職・氏名
Name and title of the supervisor ○○○○長

e-mail ○○○○ @jimu.kumamoto-u.ac.jp

下記の者の外来放射線作業登録の申請をいたします。
The person below hereby applies to be registered as a radiation worker.

登録区分 Type of applicant	☒ 理研他地区職員、理研客員研究員、研修生 RIKEN Employee (non-Harima), RIKEN Visiting Scientist, RIKEN Student Trainee ☐ 専用BL設置者 Contract Beamline ☐ 放射光利用ユーザー SPring-8/SACLA User ☐ 理研外部利用者 External User ☐ 常駐・外来業者 Other external company			登録機関 (JASRI) JASRI
フリガナ Furigana	○○○○	生年月日 Date of birth	2000 年Y 05 月M 17 日D	
氏名 Name	○○○○	性別 Sex	男	
E-mail	○○○@kumamoto-u.ac.jp	ユーザーカード No. User Card No.	0057660	
		SPring-8 ID No.		
		理研 ID No. RIKEN ID No.	220988	
所属機関 部署名 Name of affiliation division	○○○○	身分 Position	○○○○	
住所 Affiliation address	〒zip code (postal code) 860-8555 ○○○○	Phone	○○○○	
実験課題番号(放射光利用ユーザーのみ記入) Experimental proposal number (Fill in ONLY by SPring-8/SACLA User)			SACLA確認印 Confirmation seal	
受入担当者所属・氏名(放射光利用ユーザー以外は記入) Accepting affiliation and its person in charge (Note: Fill in except SPring-8/SACLA User)	物質ダイナミクス研究グループ Baron Alfred		印 Signature	

これは、Spring-8の申請書です。最近、webで申請するようになりました。Web申請だからと言っても、勝手に申請することはできません。赤丸の箇所については、Web登録する前に、所属部局等の担当事務課に記入内容を確認してください。間違っていた場合は、本学関係者及び先方に多大な負担がかかるとともに、申請内容の承諾までに時間がかかります。最近、留学生の手続きにおいて、氏名のフリガナが、本学での登録申請内容と異なる事例がありました。誤りがあった場合は、申請を取り下げて、内容を訂正の上、再度申請する必要があります。

This is the application form for Spring-8. Recently, applications have been accepted online. Even though it is an online application, you cannot apply on your own.

Before registering online, please confirm the details you have entered with the relevant administrative department of your department or department.

諸規定を遵守し、放射線作業に従事することを誓います。
I will take the classes at the request of the laws and the RIKEN rules, and understand the contents of them. I hereby agree to do the radiation work under the condition provided by them, and promise to keep them.

日付 Date 2022 年 Y 09 月 M 29 日 HD (署名 Signature) ○○○○

所属機関承諾・証明欄 Approved and authorized by affiliated organization as below:

上記の者が、現在、当機関において放射線業務従事者として登録され、法令に基づいて放射線管理を受けていることを証明します。また、自2022 年 10 月 13 日至2023 年 03 月 31 日の期間(年度を超えないこと)、国立研究開発法人理化学研究所播磨地区において放射線作業に従事することを承諾します。
I authorize the applicant named above to engage in radiation work, certifying that our institute has conducted radiation management for the applicant. Also, I authorize the applicant to engage in radiation work on the RIKEN Harima Campus from Y/M/D to Y/M/D (within a fiscal year.)

健康診断について(直近の結果を記入) Health check (the result of the latest)	☒ 異常なし Normal ☐ 異常あり(健康診断の写しを添付して下さい) (Attach the copy of health check results)	Not normal
被ばく線量について(前年度の結果を記入) Dose amount of radiation exposure (the result of the last fiscal year)	☒ 1mSv 未満 Less than 1mSv ☐ 1mSv 以上(mSv)です。(健康診断の写しを添付して下さい) More than or equal to 1mSv (Attach the copy of health check results)	

所属機関名称
Name of affiliated organization/company

住所
Address

代表者職・氏名
Name and title of the representative for the organization above

放射線取扱主任者機関名
Name of organization/company of the radiation protection supervisor

住所
Address

放射線取扱主任者職・氏名
Name and title of radiation protection supervisor

連絡先:Phone

web申請システムに入力する前に、
所属する部局等の担当事務に確認する。
間違いがあれば再申請となり手続きに時間を要します。

章印
Authenticated

証明
Certified

この欄の内容について、所属部局等の長（所属部局等の担当事務課）及び放射線取扱主任者が確認します。事実と相違がなかった場合にwebシステムにて承諾処理します。

さきほど同様に、赤丸の箇所の記入内容については、本学所属部局等の事務課に聞いてから、webシステムに申請してください。

The details will be checked by the head of the department in charge and the radiation protection officer. If there are no discrepancies with the facts, approval will be processed via the web system.

外来放射線作業者の登録について
Registration for External Users of radiation work and Suppliers

国立研究開発法人理化学研究所播磨事業所
RIKEN Harima Branch

本研究所において放射線作業を行うには以下の事項を十分理解し、所定の手続きを行って下さい。
Please understand to observe following items and go through the routine procedure in order to engage with the works of radiation

1. 本研究所で放射線作業に従事するためには、所属機関において放射線業務従事者に登録されている必要があります。
You must be registered as a radiation worker permitted by your affiliation in order to engage with radiation work at this campus.
2. 本研究所の放射線取扱主任者が、被ばく線量・健康診断・教育訓練等の証明書類の提出を求めた場合は速やかに提出して下さい。
If a radiation protection supervisor of this campus requested to submit your records of exposure dose, medical examinations, and radiation training, please submit these promptly.
3. 本研究所で放射線作業を行う時は、所属機関の個人被ばく線量計を持参して下さい。（海外機関所属者は対象外です）
When you engage with radiation work at this campus, please bring a dosimeter belonging to your affiliation. (You affiliated with overseas institution are exempted from this rule.)
4. 放射線作業を行う前に、安全講習（e-ラーニング又はDVD講習）を受講し、本研究所の放射線障害予防規程を理解して下さい。
Before you start radiation work, please take safety trainings (e-learning or DVD training) and understand radiation hazard control regulations of this campus.
5. SACLA加速器棟・光源棟・XSBTにチェックを入れた場合は、あらかじめハイスルーブット棟2F事務セクションでSACLAの確認を受けて下さい。
If you place a check mark in the box for "SACLA (Accelerator/Undulator Bld., XSBT)", please receive a confirmation from SACLA on this application at the administrative section on the 2nd FL in Highthroughput Factory before you submit this to the front desk of radiation control at RIKEN Harima Safety Center.
6. 作業にあたっては、安全確保に努めて下さい。
Please make efforts for security for radiation related works.

申請書の裏面の注意事項は、良く読んで、理解した上で、厳守して利用してください。

一つ目は、本学において放射線業務従事者に登録されており、教育訓練と健康診断を確実に受けていること。3番目には、本学が配付する個人被ばく線量計を持参すること。4番目には、放射光施設を利用する場合は、あらかじめ利用する放射光施設の予防規程を受講すること。6番目には、作業の際は安全確保に努めるように記載されています。

Please strictly observe these precautions.

- 1 You must be registered as a radiation worker permitted by your affiliation in order to engage with radiation work at this campus.
- 2 If a radiation protection supervisor of this campus requested to submit your records of exposure dose, medical examinations, and radiation training, please submit these promptly.
- 3 When you engage with radiation work at this campus, please bring a dosimeter belonging to your affiliation.
- 4 Before you start radiation work, please take safety trainings (e-learning or DVD training) and understand radiation hazard control regulations of this campus.
- 5 Please make efforts for security for radiation related works.

放射光利用の条件

- 1 本学の「放射線業務従事者」であること。
- 2 所属部局等の長及び放射線取扱主任者の了承を得ること。

(要件)

- 1 本学の放射線取扱者個人管理システムに登録されていること。
- 2 健康診断を受診していること。
「管理区域立入前」および「定期(1月期、7月期)」
- 3 教育訓練を受講していること。
「講習A」および「講習B(更新登録用講習RI利用者用)」

個人被ばく線量測定器

学内施設のみ利用者には「X線用(FX)」又は「広範囲用(FS)」を配付している。

放射光を利用する場合には、「中性子広範囲用(NS)」を持参する必要がある。

このため、放射光利用を計画した時には直ちに、測定器を交付する部署に連絡すること。

ここで、利用の条件を整理したいと思います。

1つ目 本学の放射線業務従事者であること。

2つ目 2 所属部局等の長及び放射線取扱主任者の承認を得ること。

具体的な要件は、本学の放射線取扱者個人管理システムに登録されていること。

2 健康診断を受診していること。 「管理区域立入前」および「定期(1月期、7月期)」 3 教育訓練を受講していること。 「講習A」 および「講習B(更新登録用講習RI利用者用)」を受講していることです。

また、個人被ばく線量測定器を持参しなければなりません。その場合、学内施設のみ利用者には「X線用(FX)」又は「広範囲用(FS)」を配付しています。放射光を利用する場合には、「中性子広範囲用(NS)」を持参する必要がありますので、放射光利用を計画した時には直ちに、測定器を交付する部署に連絡してください。

個人被ばく線量は、管理区域に立ち入っている間、継続して、測定することになっています。このため、学外における被ばく線量も測定・管理する必要があります。そのため、本学が発行するガラスバッジを持参して適切に着用・測定してください。万一、持参しなかった際は、学外での被ばく線量測定値を合算するため、その結果を、本学のガラスバッジを交付する部署に連絡してください。

Conditions for using synchrotron radiation.

1. The individual must be a "radiation worker" employed by Kumamoto university.

2. 2. Obtain approval from the head of the department or division to which you belong and the radiation protection officer.
3. Have undergone a health check before entering the controlled area and regularly (January and July).
4. Have taken the required education and training.
5. If you plan to use synchrotron radiation, you will need to bring along a "Neutron Wide Range (NS)" instrument. Therefore, if you plan to use synchrotron radiation, contact the department that will issue the measuring device immediately.

参考資料

- 1 公益財団法人 高輝度光科学研究センター Spring-8 パンフレット(2023)
- 2 自然科学研究機構 分子科学研究所 極紫外光研究施設 UVSOR パンフレット(2012)
- 3 医療分野における加速器・ビーム利用 日本原子力学会 加速器・ビーム科学部会解説(2011)
- 4 平成26年度放射線取扱者更新登録のための教育訓練(加速器・放射光コース)資料 岡島敏浩(九州シンクロトロン光研究センター)(2014)
- 5 改訂版・放射光ビームライン光学技術入門
～はじめて放射光を使う利用者のために 日本放射光学会 (2019)

この資料を作成する上で参考にしたものを掲げています。
放射光をはじめて利用する方は、5番目の「改訂版・放射光ビームライン光学技術入門」を是非、ご覧ください。
以上で、説明を終わります。お疲れ様でした。

I used these documents as reference.
Thank you for taking this course.