

未知の世界をのぞく最前線レポート

先端科学技術

一般社団法人 日本電機工業会

〒102-0082 東京都千代田区一番町 17-4 TEL. 03-3556-5886 FAX. 03-3556-5890



一般社団法人 日本電機工業会
THE JAPAN ELECTRICAL MANUFACTURERS' ASSOCIATION
<http://www.jema-net.or.jp>

世界をリードする日本の最先端科学技術

日本には世界に誇る最先端技術の研究所が数多くあります。
この冊子でご紹介するのはそのごく一部です。取材記事を読んで興味をもった方は、
インターネットや書籍を使って、自分でも詳しく調べてみてください。
巻末には各施設の見学案内もまとめました。

iPS細胞研究の最先端に世界も注目

京都大学iPS細胞研究所(CiRA)

iPS細胞技術を発展させ、その成果を再生医療や創薬などの分野に応用するための研究所。2010年に開所し、2012年にノーベル生理学・医学賞を受賞した山中伸弥教授が所長を務めている。世界でも最高レベルの研究が行われている。



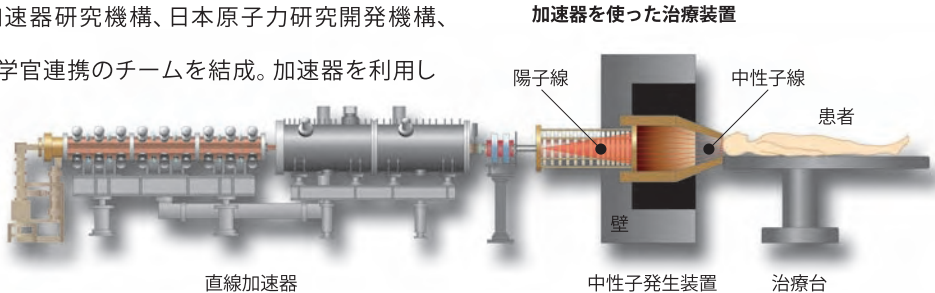
オープンラボ

写真・京都大学iPS細胞研究所

中性子を使ってがんを治療する

いばらき中性子医療研究センター

筑波大学を中心に高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構、北海道大学および茨城県による産学官連携のチームを結成。加速器を利用した次世代がん治療装置や、治療用ソフトウェアの開発を行っている。



直線加速器

加速器を使った治療装置

陽子線

中性子線

患者

壁

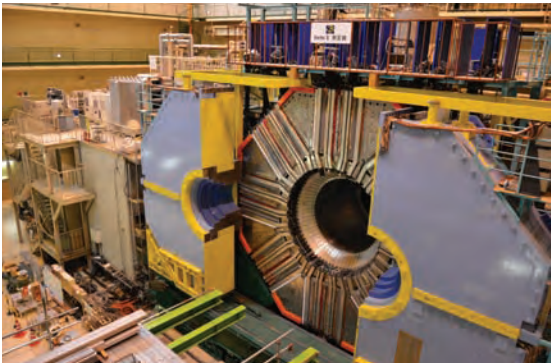
中性子発生装置

治療台

加速器で宇宙創成の謎や物質生命のしくみの解明に挑む

高エネルギー加速器研究機構(KEK)

最先端の大型粒子加速器を使って、電子や陽子などの粒子をほぼ光の速度近くまで加速して高いエネルギーの状態を作り出し、素粒子・原子核に関する研究や、生命体を含む物質の構造・機能に関する研究などを総合的に行っている。



現在アップグレード中のBelle II 測定器

写真・KEK

日本の技術を生かして宇宙に挑む

宇宙航空研究開発機構(JAXA)

日本で宇宙航空分野の基礎研究から開発・利用までを一貫して行う機関。小惑星探査機「はやぶさ」「はやぶさ2」の打ち上げの他、国際宇宙ステーションに有人実験施設「きぼう」を設置するなど国際的なプロジェクトにも参加している。



2003年5月に打ち上げられた「はやぶさ」

© JAXA

無限の燃料から夢のエネルギーをつくる

那珂核融合研究所

核融合エネルギーの早期実現を目指した大型国際プロジェクト「ITER計画」での活動、その計画の支援・補完を目的とした「JT-60SA計画」では「炉心プラズマ研究」、発電実証をする原型炉を目指した「核融合炉工学研究」を行っている。



中央制御室

放射性廃棄物の地層処分を研究する

幌延深地層研究センター

原子力発電の使用済み燃料を再処理した際に発生する高レベル放射性廃棄物を安全に処分するための地層処分技術に関する研究のうち、国の計画に示された深地層の科学的研究や地層処分研究開発などを行っている。



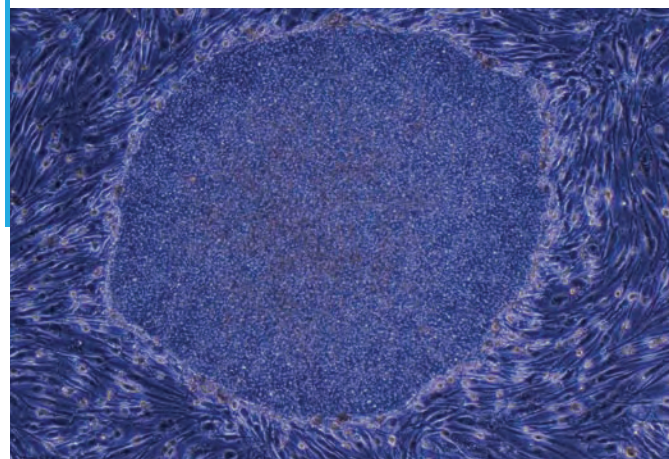
地下250メートルに掘られた調査坑道

日本の最先端科学技術を見に行こう

この冊子で紹介する6か所の研究施設では、世界をリードする研究が行われています。再生医療から、最新のがん治療、素粒子物理学、宇宙工学、核融合エネルギー研究、深地層科学など取り扱うテーマ也多岐にわたっています。興味のある分野から読んでみてください。

REPORT 1

P6



写真・京都大学iPS細胞研究所

iPS細胞を使って難病の治療法を見つける

ノーベル生理学・医学賞を受賞した山中伸弥教授が設立したiPS細胞の研究に特化した世界初の研究機関が京都大学iPS細胞研究所(CiRA:サイラ)です。ここでは、研究者たちがただ一つのゴールを目指して研究を進めています。そのゴールとは「iPS細胞を使って患者さんを治すこと」です。

REPORT 2

P8

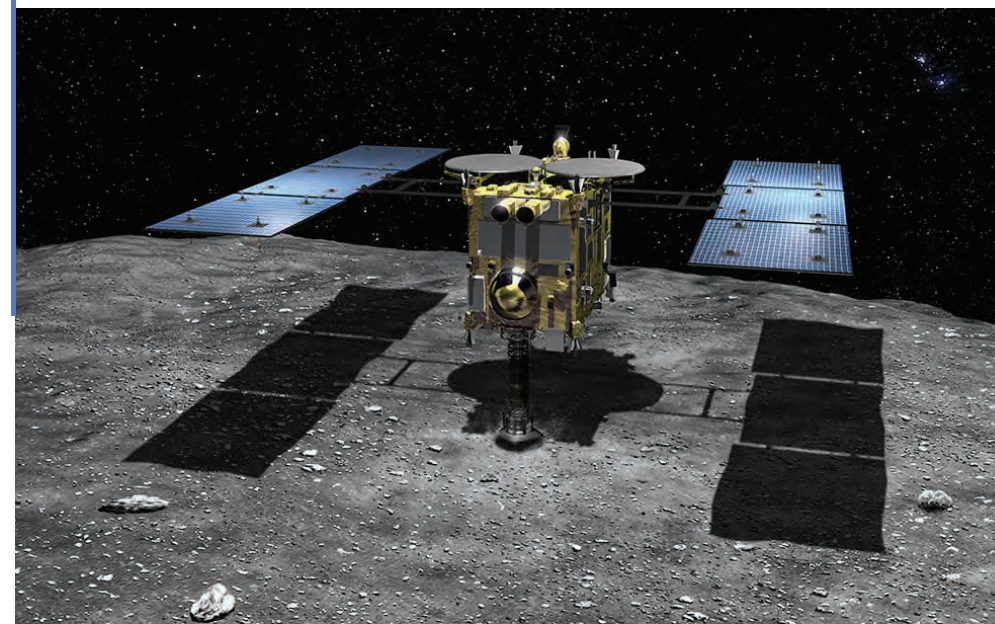


先端技術を集結し目に見えないがんも治療する

がんの治療には放射線も使われますが、放射線と言っても実はいろいろあります。最も一般的なX線から、最近では陽子線や重粒子線なども治療に使用されています。今回取材したのは、次世代のがん治療と言われるBNCT(ホウ素中性子捕捉療法)です。治療装置の開発には、医師だけでなく物理学者も研究に携わっていました。

REPORT 4

P12



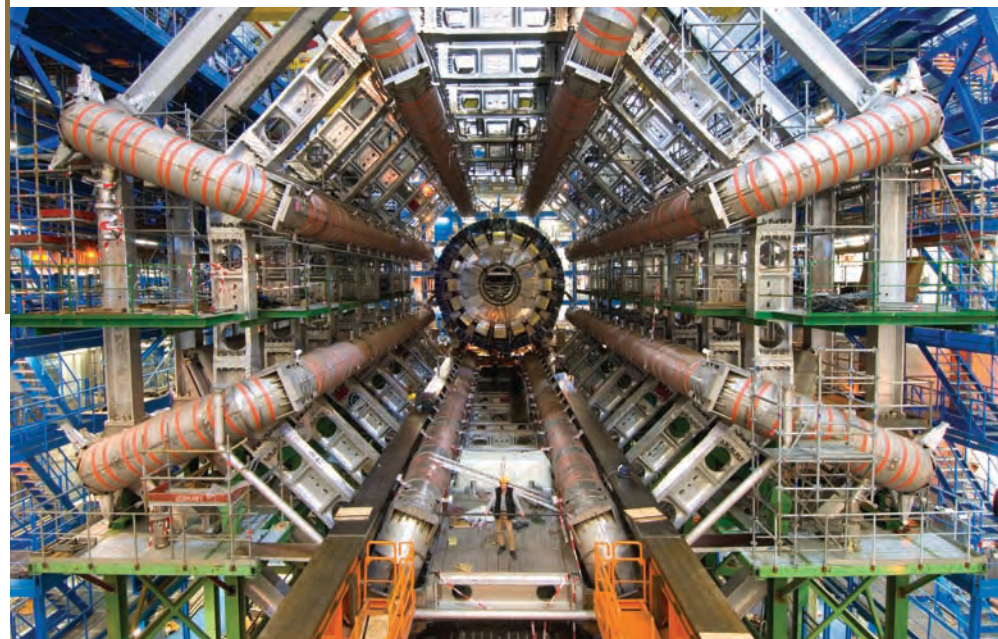
イラスト・池下章裕

「はやぶさ2」で太陽系誕生の謎に迫る

小惑星探査機「はやぶさ」は、2010年に世界で初めて小惑星イトカワの表面からサンプルを持ち帰りました。JAXAでは2014年度に「はやぶさ2」の打ち上げを計画しています。今回探査する小惑星には46億年前に太陽系が生まれたときに存在していた水や有機物が含まれていると期待されています。

REPORT 3

P10



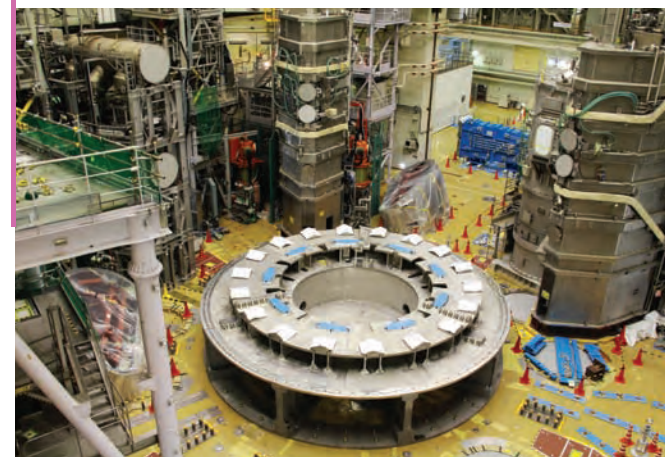
写真提供:CERNアトラス実験グループ

謎だらけのヒッグス粒子に加速器で挑む

これまで多くの物理学者が追い求めてきたヒッグス粒子が発見され、ベルギーのアングレル教授とイギリスのヒッグス教授が2013年ノーベル物理学賞を受賞しました。ノーベル賞受賞を導いたヒッグス粒子大発見の裏には、日本のKEKを始め世界各国の大学・研究機関の協力がありました。

REPORT 5

P14

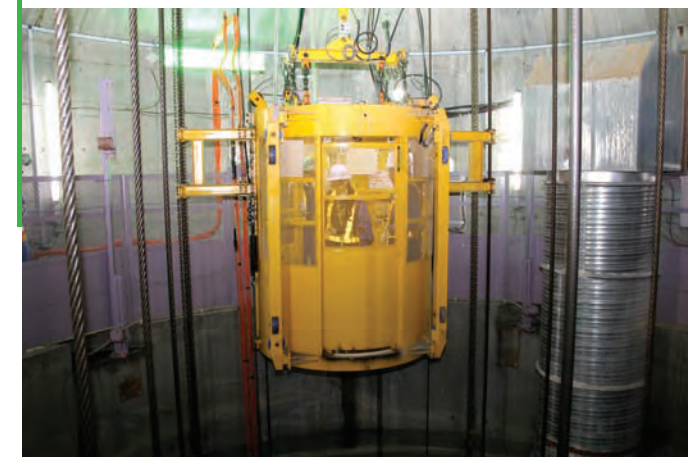


核融合炉で未来のエネルギーをつくる

海水中に豊富に存在する重水素とリチウムをもとにエネルギーをつくる核融合エネルギーは、環境に優しく、安全性も高い、夢のエネルギーと言われ、世界の国々が注目しています。現在、フランスに建設中の核融合実験炉ITERのプロジェクトを日本は早くから積極的に推進しています。

REPORT 6

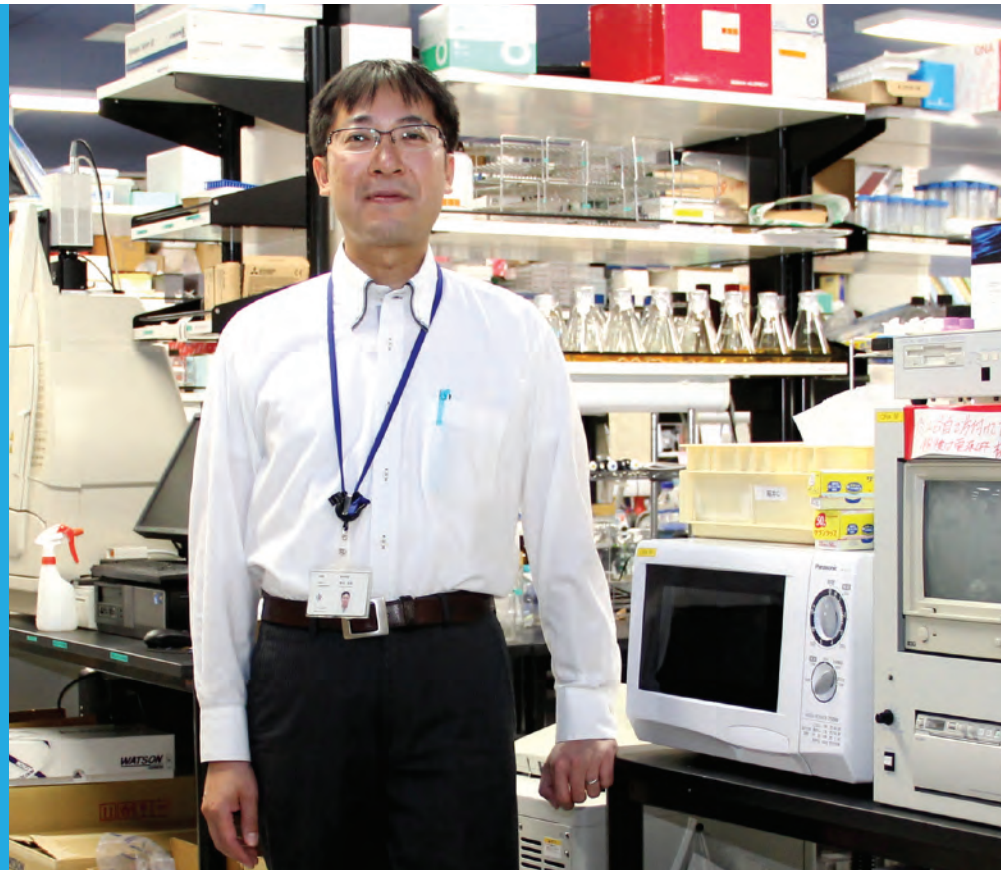
P16



放射性廃棄物の安全な地層処分を研究する

原子力発電所から出る使用済み核燃料を再処理し、再び燃料として利用することを「核燃料サイクル」と呼びますが、再処理の段階で高レベルの放射性廃棄物が出ます。幌延深地層研究センターでは地下深部の地質を調査し、放射性廃棄物を安全に地層処分するための方法を研究しています。

iPS 細胞を使って難病の治療法を見つける



ノーベル生理学・医学賞を受賞した山中伸弥教授が設立したiPS細胞の研究に特化した世界初の研究機関が京都大学iPS細胞研究所(CiRA:サイラ)です。ここでは、研究者たちがただ一つのゴールを目指して研究を進めています。そのゴールとは「iPS細胞を使って患者さんを治すこと」です。

筋ジストロフィーの治療にiPS細胞を

今回取材した櫻井先生は、京都大学 iPS 細胞研究所 (CiRA) の臨床応用研究部門で筋ジストロフィー症治療を研究しています。筋ジストロフィー症とは、筋肉の細胞が壊れて、だんだんと全身の筋力が衰えていく病気です。未だに有効な治療法が確立されていない難病の一つです。

櫻井先生の研究には二本の柱があります。一つは、iPS細胞を移植することで正常な筋肉を再生すること。もう一つは、iPS細胞を使って治療薬を開発することです。iPS細胞とは、皮膚の細胞に4つの遺伝子を入れることでできる「体中のあらゆる臓器や組織の細胞になれる能力を持った幹細胞」のことです。

患者さんの細胞から筋肉を再生すると、病気を持ったままなので、櫻井先生が今考えているのは、健康な人の細胞からつくった iPS

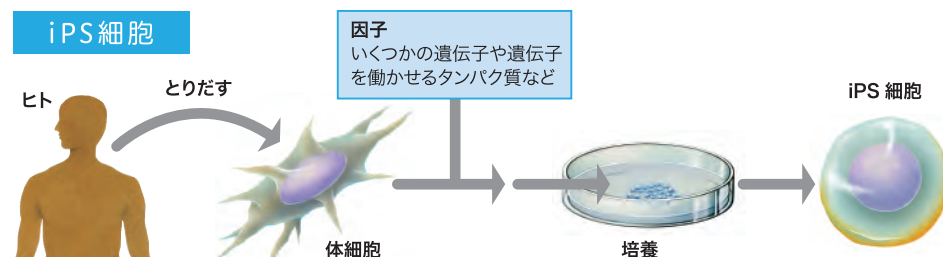
細胞で筋肉をつくり、それを患者さんに移植する治療法です。人間の細胞には血液型と同じように型があり、それをHLA型と言います。HLA型は血液型よりもたくさんの型があるのですが、再生した筋肉を患者さんに移植するためにはこのHLA型を合わせる必要があります。

おもしろいことに、1,500人から2,000人に1人の割合で、特殊なHLA型を持っている人がいるそうです。他の血液型の人に輸血しても大丈夫というO型の人のように、いくつかのタイプの人に合わせることでできる細胞の型を持った人です。CiRAでは、このような特

殊なHLA型を持った人を50人見つければ、日本人の70%をカバーできると試算していて、今後10年かけてiPS細胞をストックして、さまざまな病気の治療に役立てようという計画があります。

新薬の開発を早められる可能性が見えてきた

一方、治療薬をつくる場合は、患者さんの皮膚や血液からiPS細胞をつくります。iPS細胞はほぼ無限に増やすことができます。治療薬をつくるためには、スクリーニングと言って、



同じ条件でどの化合物に反応するかを調べて治療薬の候補を調べます。iPS細胞を使えば、患者さんの病気を再現した細胞を100個ぐらい並べて、100種類の化合物の反応を調べることもできます。

今までは、まず遺伝子改変マウスをつくらせて人と同じような病気をマウスに発現させます。そして、そのマウスに候補の薬を投与して治るかどうかを調べます。遺伝子改変マウスを開発するのも莫大なコストがかかります。また、こういう病気だったら、たぶんこういう化合物が効くだろうと、候補を絞った上で実験を行うので、新薬となる化合物を見つけるのにも時間がかかります。しかも、最大の問題は、マウスで効く薬が見つかったとしても、人には全く効かないことがよくあることです。

iPS細胞のメリットは実際の患者さんの細胞が使えるという点です。治療薬開発の段階で、実際の患者さんの細胞での効果が分かるので、患者さんの体に薬として入ったときも同じ効果が上がることが期待できるので

す。このようにiPS細胞を使えば、これまで莫大な時間がかかっていた新薬の開発もスピードアップできる可能性があります。

実験の9割は失敗 それでもめげずにやり続ける

世界でも最先端のiPS細胞の研究をしている櫻井先生ですが、仮説を立てていざ実験しても9割以上はうまくいかないのだそうです。「実験がうまくいかないと、さすがに心が折れそうな時もあります。科学は僕らが考えている以上にもっと奥深い。簡単にはうまくいかないことがほとんどです。それでも、きっと答えに近づいていると信じてやり続けることが一番大変ですね」

そんな櫻井先生は、大リーグで活躍するイチロー選手が日米通算4,000本安打を達成したときに、「8,000回以上は失敗しているので、それとどう自分が向き合ってきたかが誇れるところ」と言っていたのを聞いて、「バッティングも圧倒的にうまくいかないものをそれを

どうやったらうまくできるかを考えて、イチロー選手はコツコツやってきた。僕も次の1本を目指してがんばろう!」と勇気づけられたそうです。

櫻井先生は臨床医として患者さんの治療にあたっていた経験があります。めげそうになったときも、この治療方法を待っている患者さんがたくさんいるんだと考えることで、あきらめずに研究を続けられるそうです。筋ジストロフィー症だけでなく多くの難病患者さんたちが、新しい治療法が見つかることを期待して、iPS細胞の研究を見守っているのです。



科学の扉



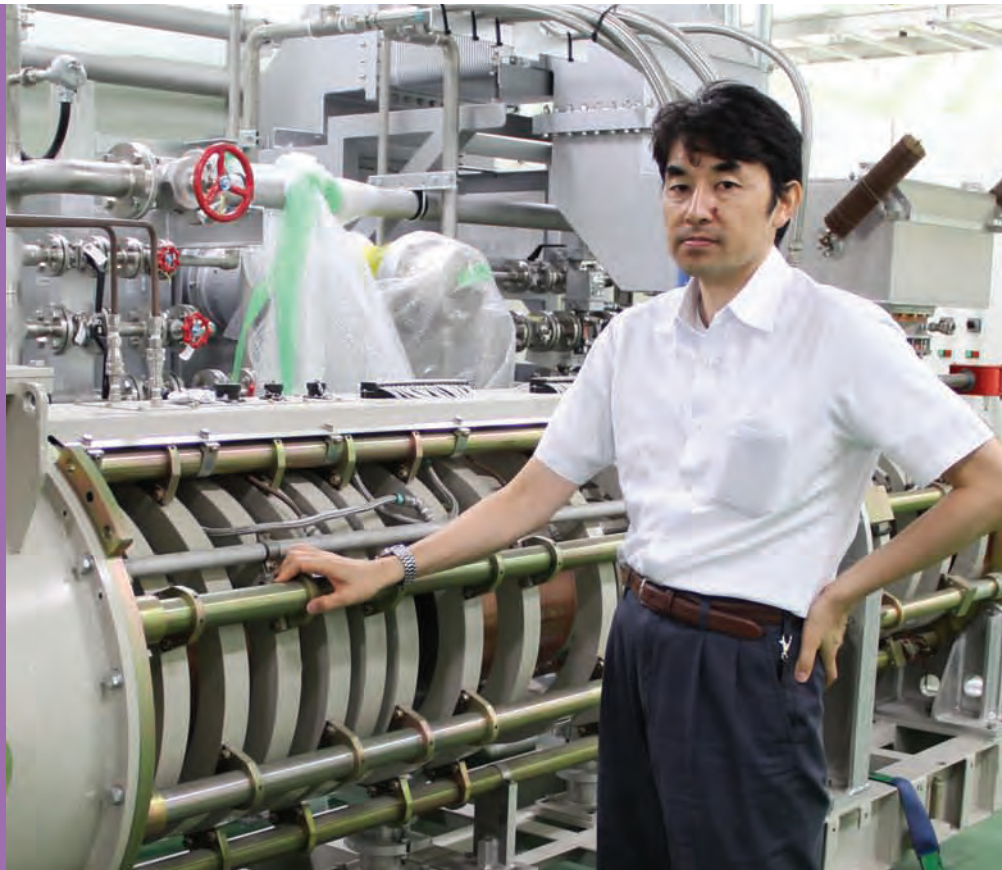
櫻井 英俊
さくらい ひでとし 1973年、岐阜県生まれ。名古屋大学医学部卒業。名古屋掖済会病院で勤務後、名古屋大学大学院で再生医療について学ぶ。2007年に発表された山中伸弥教授の論文がきっかけで、iPS細胞の研究に携わることを決意。2010年からCiRAの臨床応用研究部門に。研究の息抜きはプロ野球観戦。

「科学には必ず真実があります。世界で最初に真実に触れた人間になれる!」

私は小学校低学年ぐらいから医者になりたいと思っていました。医学部を卒業した時点では普通の臨床医になるつもりでした。実際、医者になってみると、教科書的には治ると書いてあるような病気でも、根本的には治らないけれど、命は助かるというような場合が多いんです。患者さんは病気とつきあっているだけ、治っていると言うより苦しんでいる。それで、根本的に病気を治す治療法の開発をあきらめてはいけないなと思い、再生医療の道に進みました。

科学には必ず真実があります。まだ明らかでない真実は山ほどあって、それを明らかにできるのは実験だけです。実験結果が仮説通りになったとき、その真実に世界で最初に触れる、たった一人の人間になることができます。その喜びは非常に大きいです。それに加えて、新しい治療方法などを見つけることができれば、人の役にも立てて、これ以上の喜びはないと思います。

先端技術を集結し目に見えないがんも治療する



がんの治療には放射線も使われますが、放射線と言っても実はいろいろあります。最も一般的なX線から、最近では陽子線や重粒子線なども治療に使用されています。今回取材したのは、次世代のがん治療と言われるBNCT（ホウ素中性子捕捉療法）です。治療装置の開発には、医師だけでなく物理学者も研究に携わっていました。

医学、薬学、物理学 最先端を合わせたがん治療

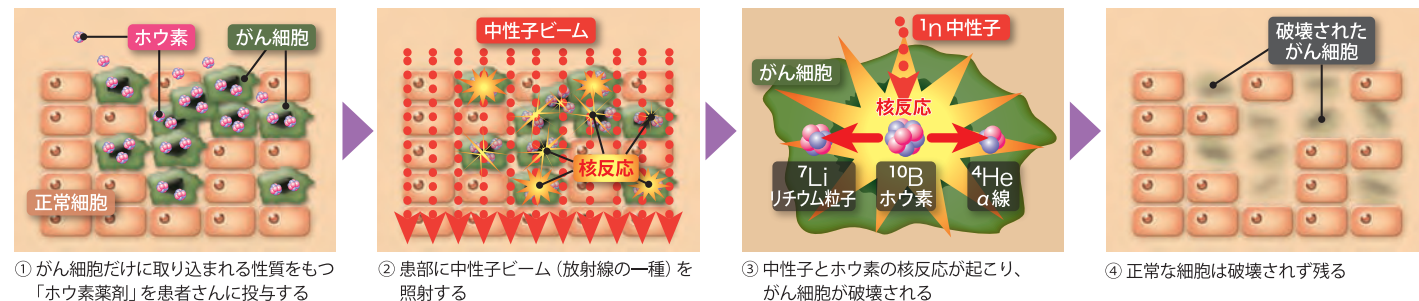
放射線を使ったがん治療と言えば、一般的なものはX線です。最近では、陽子線や重粒子線を使ってがんの病巣にだけ放射線を集中させる治療法もあります。しかし、それでも治療しきれないがんがあります。たとえば、脳腫瘍は正常な脳の細胞の中にがん細胞がしみこんでいます。これを浸潤性のがんと言います。脳の機能が損なわれてしまうので、

外科的にがんの病巣のすべてを取り除くのには限界があります。また、しみこんだ部分のがんは目でも見えないので、普通の放射線では狙い撃ちができません。そのため、悪性の脳腫瘍だと1年以内に90%の人が亡くなってしまいます。

脳腫瘍のように普通の放射線治療では治せないがんに対して、熊田先生はBNCTという中性子を使った新しい治療法を研究しています。「私は医者ではありません。もともと、原子力工学の仕事をしていました。BNCTには中

性子（放射線の一種）を発生させるための技術装置の開発が不可欠です。そのためには中性子工学の専門家が必要です。さらに、治療効果を発揮させるための薬の専門家も必要です」と言う熊田先生。BNCTはそれぞれの異なる分野の最先端技術を合わせて、実現できる次世代のがん治療です。BNCTの研究開発では、様々な分野のスペシャリストが、それぞれの得意分野を医療に役立てています。熊田先生のように、医師でなくても、がん治療に貢献することができるのです。

BNCTによるがん治療のメカニズム



たった一度の治療で 患者さんの負担を減らす

それでは、次世代がん治療と言われるBNCTはどこが画期的なのでしょう。一般的なX線治療の場合、体の外側からX線を照射してがん細胞をやっつけます。しかし、X線の通り道にある正常な臓器も傷つけしまうので、患者さんの体に負担をあたえてしまいます。そのため、X線を当てる量を30回に分け、毎日少しずつ照射して治療を行います。一方、BNCTの場合は一度に30分の中性子照射を行うだけで治療が終了します。

BNCTでは中性子の照射の前に、患者さんに薬を投与します。その薬に入っているのが、がん細胞にだけ選択的に集まるホウ素薬剤です。がん細胞はアミノ酸の代謝が非常に早いという性質を持っていて、正常の細胞に比べて3倍も5倍もアミノ酸を取り込みます。そこで、アミノ酸にホウ素を加えた薬を患者さんに投与すると、がん細胞により多くのホウ素が集まることになります。そのホウ素を含

んだがんにめがけて体の外から中性子を照射します。そうすると、ホウ素と中性子が核分裂反応を起こして、がん細胞だけをやっつけることができるのです。正常な組織とがん細胞が混じり合っている浸潤性のがんの場合でも、正常組織はほとんどダメージをうけません。

治療シミュレーションの ソフト開発で貢献したい

BNCTは中性子を使う治療法ですが、今まで中性子を発生させるには原子炉しかありませんでした。臨床研究でBNCTに治療効果があることは実証されていましたが、原子炉を使わなくてはいけないという点で、実用には向きませんでした。もちろん、病院に原子炉をつくるわけにはいけませんし、安全管理が難しいという問題もありました。

ところが、最近になって、加速器によって中性子を発生させる技術が確立されました。BNCTの治療には大量の中性子が必要です。

現在、熊田先生たちが開発している治療装置は、長さ7メートル程度の加速器で陽子を光の速さの約10%まで加速して、ベリリウムに当てて中性子を発生させます。この規模であれば治療装置を病院に併設することも可能です。2015年度には臨床研究を始める予定ですが、BNCTの治療に加速器を使っているのは世界でも日本だけです。加速器の技術は日本が最も先行しているので、世界中の研究者が注目しています。

熊田先生の専門分野はシミュレーションソフトの開発です。実際に治療を行うことが決まると、治療の前に患者さん一人一人のがんに対して、どの方向から何分ぐらい中性子を照射すれば良いかをシミュレーションして、最適な治療条件を導き出す必要があります。実際の治療に使うシミュレーションには、高い精度が必要です。「将来、私のつくったソフトウェアが世界のスタンダードになって、みんなが使ってくれるのが私の夢です」と熊田先生は話してくれました。

科学の扉



熊田 博明

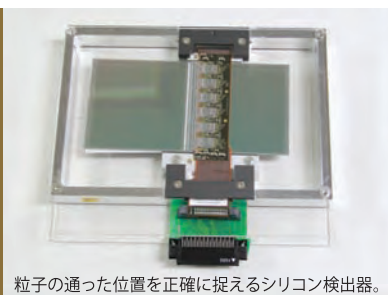
くまだ・ひろあき 1992年、茨城大学工学部機械工学科。1994年、茨城大学大学院工学研究科修士課程修了。1994年、日本原子力研究開発機構に就職。2005年、筑波大学大学院人間総合科学研究科博士課程修了。2009年、筑波大学大学院人間総合科学研究科基礎医学系で陽子線治療およびBNCTの医学物理分野に関する研究開発に従事。

「夢を持ち続けて努力すれば いつか必ず夢に近づくことができる」

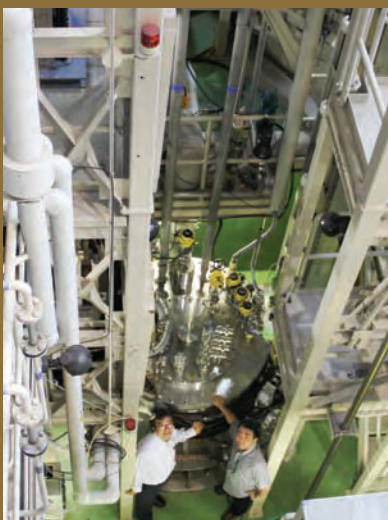
子どもの頃から機械やプログラムに興味がありましたね。大学では機械工学を学び、日本原子力機構に就職しました。そこで、たまたまBNCTの研究にたずさわることになりました。最初は医療について全く分からなくて。でも、だんだん興味がわいてきて、筑波大学の医学部大学院へ行きました。私の専門は医学物理分野です。加速器をつくるスペシャリストたちは理系の最先端の人たち、一方お医者さんは物理や工学のことが分からない。私はその両方の橋渡しをしています。実際に患者さんに接することはない裏方ですが、患者さんが治ったことを知るとやりがいを感じます。医師じゃなくても、いろいろな関わり方で医療に携わることができます。

夢を持ち続け、自分がやれることを継続していれば、夢に近づくことはできる。たとえ最終目標に達成できなくても、その過程で必ず喜びや達成感があると思います。

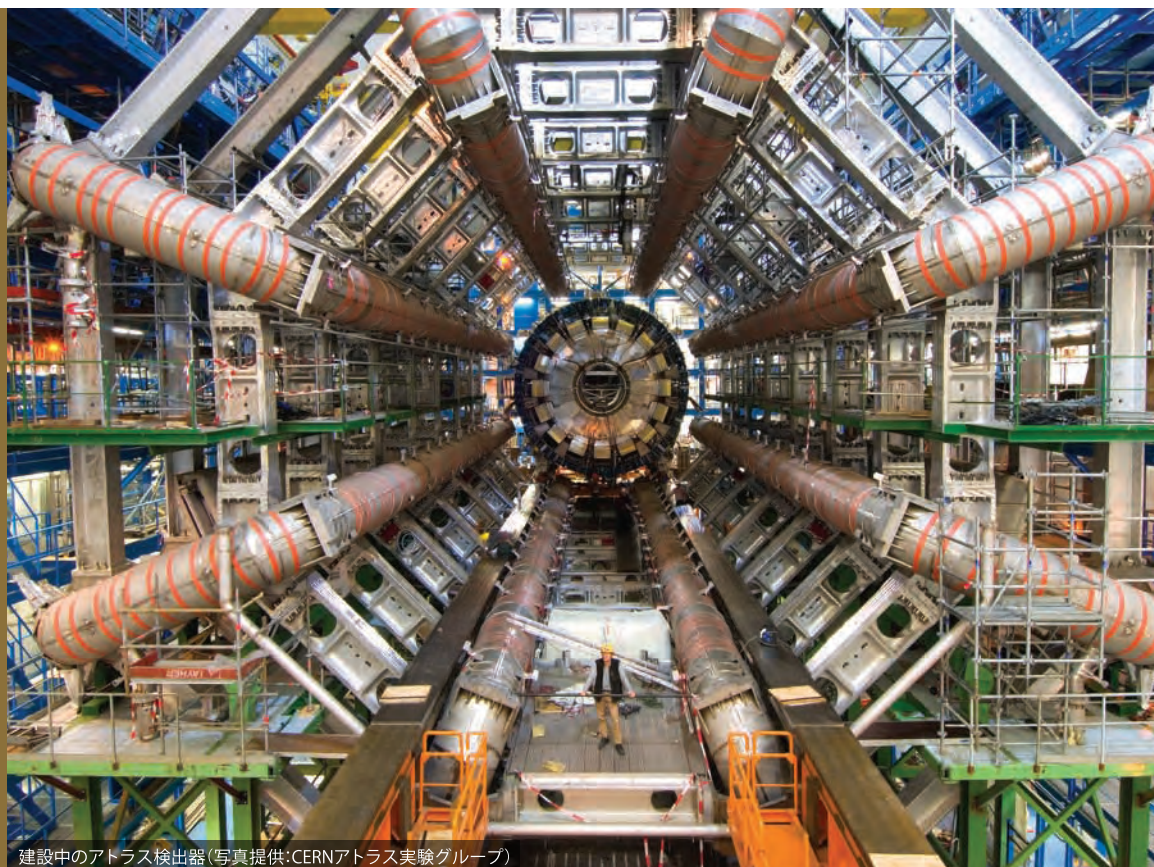
謎だらけのヒッグス粒子に加速器で挑む



粒子の通った位置を正確に捉えるシリコン検出器。



LHC加速器のために開発した超伝導束束磁石の試験装置



建設中のアトラス検出器(写真提供:CERNアトラス実験グループ)

これまで多くの物理学者が追い求めてきたヒッグス粒子が発見され、ベルギーのアングレール教授とイギリスのヒッグス教授が2013年ノーベル物理学賞を受賞しました。ノーベル賞受賞を導いたヒッグス粒子大発見の裏には、日本のKEKを始め世界各国の大学・研究機関の協力がありました。

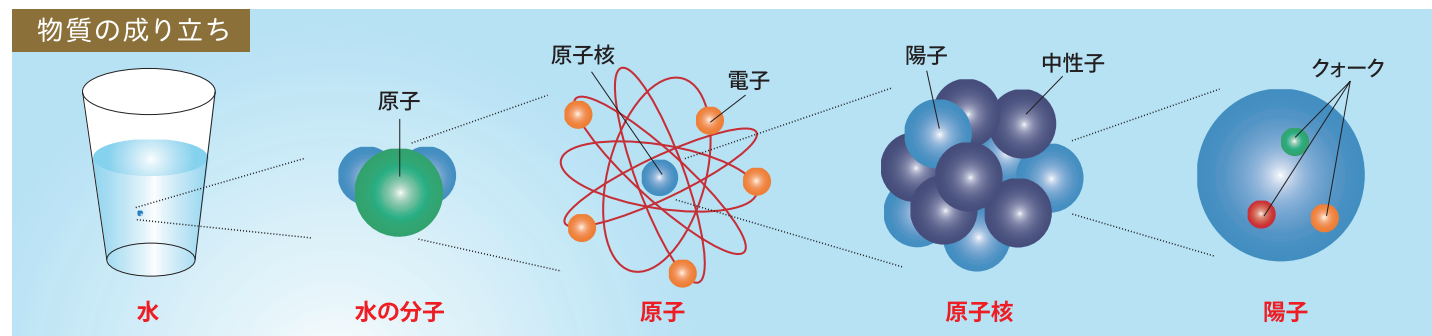
なぜ重さが生まれたのか その謎はヒッグス粒子にある

私たちの世界は何からできているのか考えたことがありますか？ 19世紀まで、これ以上分割できない一番小さな単位は「原子」だと考えられてきました。20世紀後半、原子の中には原子核と電子があり、原子核の中にはさらに陽子と中性子があることがわかりました。そこで、この電子・陽子・中性子をこれ以上細かくできない粒子＝「素粒子」と名づけ

たのです。ところが、陽子や中性子はさらに細かいクォークというものからできていることも今では分かっています。現在、最も基本的な素粒子は17個あると言われていて、その中で最後まで見つかっていなかったのがヒッグス粒子です。しかも、ものに重さを与えるという、他の素粒子とは異なる性質を持っています。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の徳宿先生は、「宇宙が最初に生まれたとき、粒子は重さがなく高速で飛び回っていました。

ところが、ヒッグスの海が空間のいたるところを埋め尽くしたため、粒子たちは速く走れなくなってしまいました。遅くなったということは、重さが生まれたと言い換えることができます。ヒッグス粒子のおかげで、素粒子同士が結びつき、物質が生まれ、星や人間が生まれたと言われています。これまで物理学者たちはいろいろな実験でヒッグス粒子の存在を証明しようとしてきました」と、研究の流れについて説明してくれました。



日本の技術力が ノーベル賞受賞を後押し

ヒッグス粒子が見つかりにくかった理由は、ヒッグス粒子自体が非常に重いことと関係がありました。重い粒子を発見するためには、強力なエネルギーが必要なのです。ヒッグス粒子の発見には、スイスのセルン研究所に建設された円周27キロメートルの強力な加速器が使われました。光の速さとほぼ同じ速度まで陽子を加速し、反対方向に回した陽子と衝突させることで人工的にさまざまな素粒子をつくりだし、ついにその中からヒッグス粒子を探し当てました。

セルン研究所はヨーロッパ20か国が協力してつくった施設ですが、加速器建設にも世界中の国が手を貸しています。中でも最初に協力を申し出たのが日本でした。KEKを含め16の大学や研究機関から約110名の日本人がATLASと呼ばれる高さ25メートル、幅44メートルの巨大測定器の開発に参加しており、徳宿先生はその全体をまとめる責任者です。

「1秒間に数億回起こる衝突の中からヒッグス粒子を見つけるのは、100億人の写真の中から自分の恋人の写真を見つけるようなもの」と徳宿先生は説明します。さらに膨大な衝突の中から良いデータを選ぶためには高精度の測定器をつくらなくてはなりません。世界38か国約3千人が共同で開発にあたり、日本はヒッグス粒子を見つける手がかりとなったミュオン粒子の検出器と、さまざまな粒子が通る場所を精密に測定するシリコン検出器を開発しました。検出器をつくるのにも、研究者と一緒に企業がーから開発していく必要があります。今回のヒッグス粒子発見には日本の最先端技術が貢献しています」と話してくれました。

宇宙の95%は未だ謎 次は暗黒物質を解明したい

さて、ヒッグス粒子が今回発見されたことで、宇宙の謎が明らかになるのかというと、残念ながらそうではありません。17個ある素

粒子でこの世界を説明する理論を「標準模型」と言いますが、現代の物理学者たちは、これで全部のはずがないと考えています。実は、宇宙を構成する要素のうち、今分かっているのはわずか5%で、後の95%は分かっていないそうです。そこには、「標準模型」にはない未知の粒子、いわゆる暗黒物質があると考えられています。

徳宿先生たちATLASチームは、暗黒物質の発見にも挑戦します。現在有力なのは「超対称性モデル」という理論です。今見つかった粒子のペアとなる粒子が存在するはずという説です。今回見つけたヒッグス粒子にも、ペアとなる粒子が存在するかもしれません。今後も、未だ解明されていない95%の謎に迫るべく、加速器や測定器をアップグレードしながら研究が続けられます。今回のヒッグス粒子の発見は、宇宙の謎を解き明かすための新たな第一歩と言う徳宿先生は「若い人たちにも、これからどんどん研究に参加してほしい」と最後に話してくれました。

科学の扉



徳宿 克夫

とくしゅく・かつお 1982年、東京大学理学部物理学卒業。1987年、東京大学大学院理学系研究科物理学卒業。1987年、東京大学原子核研究所研究員に。1988年、東京大学原子核研究所助手。1996年、東京大学原子核研究所助教授。1997年、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所助教授。2005年、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授。現在はATLAS日本チームの共同代表の一人として活躍している。

「いつかはヒッグス粒子も役に立つかも 基礎科学を社会に置き換えるとおもしろい」

僕らの生活にヒッグス粒子の発見が、どう役立つかと言われたら、何の役にも立たないかもしれない。でも、100年前に電子が発見されたおかげで、今のようなエレクトロニクス社会が生まれるなんて、誰も考えもしなかった。同じように、100年前アインシュタインが考えた一般相対性理論も、当時は何の役に立つのかと言われました。でも、一般相対性理論がなければカーナビのGPSも存在しません。ヒッグス粒子も、将来何か役に立つ可能性はあります。

僕たちのやっている基礎科学は、この世の中がどうなっているかを理解することです。相対性理論と呼ぶように、物理を勉強していると、物事は相対的だということが分かります。それを社会に反映すると、人間は皆同じで平等だと考えられます。基礎科学で、僕たちが何からできているのかを考えているうちに、人間社会のつながりにも新しい考え方をもたらすのではないかと想像するとおもしろいですよ。

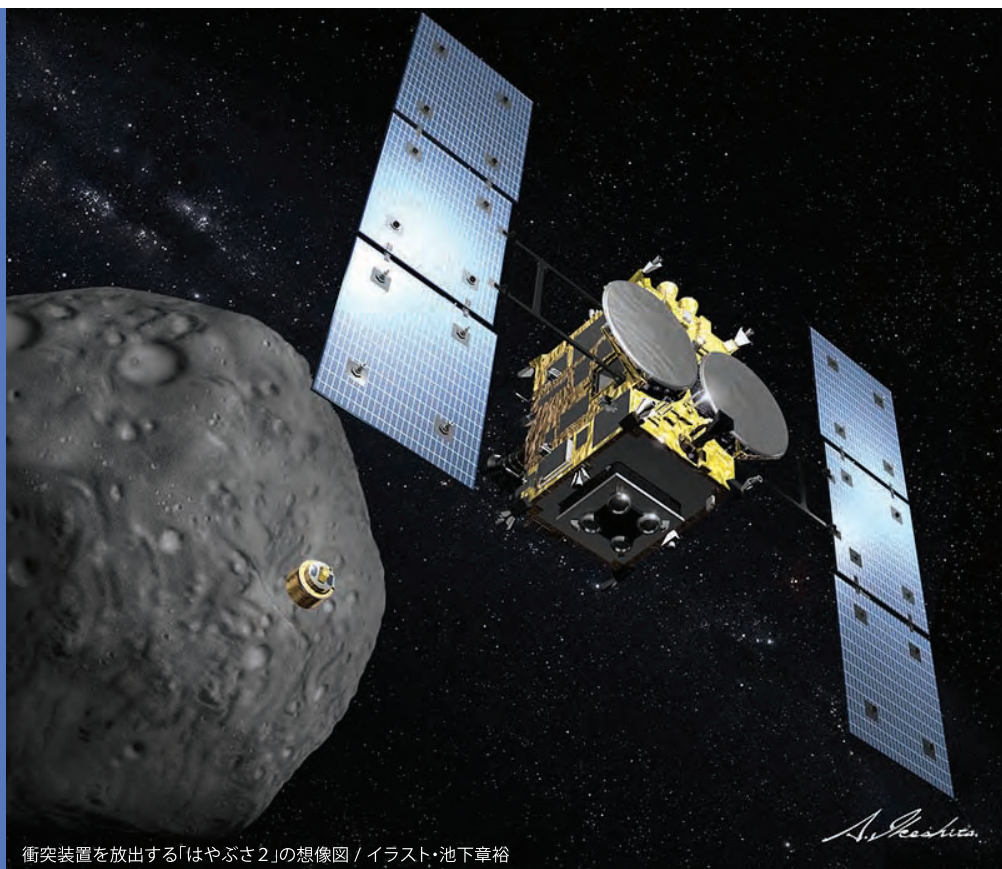
「はやぶさ2」で太陽系誕生の謎に迫る



かつて活躍したロケットの原寸模型も



宇宙科学の拠点となる相模原キャンパス



衝突装置を放出する「はやぶさ2」の想像図 / イラスト・池下章裕

小惑星探査機「はやぶさ」は、2010年に世界で初めて小惑星イトカワの表面からサンプルを持ち帰りました。JAXAでは2014年度に「はやぶさ2」の打ち上げを計画しています。今回探査する小惑星には46億年前に太陽系が生まれたときに存在していた水や有機物が含まれていると期待されています。

ミッションは46億年前の有機物を持ち帰ること

「はやぶさ2」はイトカワとは別の種類と考えられている小惑星へ行き、そこからサンプルををとって戻ってきます。今回のミッションの大きなテーマは二つ。一つ目は太陽系空間を行ったり来たりする技術を確立することです。現在私たちが飛行機で地球上のどこへでも旅行ができるように、太陽系空間を自由自在に往復する技術が確立されれば、宇宙旅行も可能になります。「はやぶさ2」で開発さ

「はやぶさ2」スケジュール(予定)	
2014年度	打ち上げ
2018年	小惑星 (1999 JU3) 到着
2020年	地球に帰還
2021年～	サンプル分析

れる技術はその最初のステップと言えるそうです。

二つ目は、持ち帰ったサンプルから太陽系の誕生について調べることです。今から46億年前に宇宙空間のガスがぎゅっと縮んで、真ん中に太陽が生まれ、その周りに回転する円盤ができました。その円盤の中から惑星ができたということが分かっています。そのころ、地球のような惑星は物質が集まった後、いったんドロドロに溶けてしまってから、今の惑星ができました。そのため、46億年前当時に太陽系をつくった物質は、現在の地球上には残っていません。そこで、イトカワのように溶けなかった小惑星の表面を調べれば、46億年前の物質が当時かなり近い状態で残っているだろうと考えたのが「はやぶさ」計画の発端です。

「『はやぶさ』が行った小惑星イトカワは岩石で、惑星が誕生したところの化石のような天体です」と吉川先生は説明します。「今度、『は

やぶさ2』が行く小惑星も、やはり岩石なのですが、岩石の中に水や有機物が含まれていると考えています。46億年前の宇宙空間にあった水や有機物を調べることができれば、生命のはじまりとなった起源が解明できるのではないかと考えられています」

地球から遠く離れた探査機の軌道を正確に計算する

「はやぶさ」も「はやぶさ2」もイオンエンジンを搭載しています。イオンエンジンは新しい技術で、キセノンという物質をイオン化し、電氣的に加速して噴射するものです。効率が非常によいことから、将来の月・惑星探査でも重要な技術として期待されています。また、遠く離れた小惑星に探査機が自ら判断して近づく「自律航法」を実証しました。カメラやレーザ高度計のデータをもとに、小惑星との距離を測りながら、近づいていきます。

吉川先生は「はやぶさ」に続けて「はやぶさ2」でも探査機の軌道決定を担当しています。「軌道決定というのは、探査機を打ち上げた後どこを飛行しているかという、要するにナビゲーションのことです」と吉川先生。小惑星イトカワは、地球から最も遠ざかると3億キロ以上離れます。地球から遠く離れた小惑星へ向かう探査機の位置を正確に決めるのは大変難しいことです。

また、イオンエンジンは微小な推力をずっと出し続けるので、探査機の軌道にかなり影響するのだそうです。「探査機の軌道は打ち上げた後、太陽の引力と惑星の引力を受けます。太陽や惑星の引力については非常によく分かっているので、探査機にどのような力がかかるのかは正確に計算できます。ところが、イオンエンジは地上からの命令でエンジンを操作するので、微妙に推力がずれます。そのずれが実は軌道に大きく影響してくるので。そのため、いかに正確に軌道を出すかというのは難しかったです」。

天体の衝突を回避するスペースガード

「はやぶさ」や「はやぶさ2」のミッションは太陽系誕生の謎を解くことと説明しましたが、もう一つ、私たちの生活に関わる重要な貢献があります。みなさんは、2013年2月にロシアにNASAの推定で直径17メートルの隕石が落ちてきた事件を覚えていますか。隕石落下の瞬間をとらえた動画が世界中でニュースになりました。吉川先生によると、小惑星イトカワも地球に衝突する可能性の

ある天体なのだそうです。

「たった17メートルでもあのような被害が生じるのですから、もっと大きな天体がぶつかったら、大変なことになります。世界的にも天体の地球衝突問題(スペースガード)は研究されていて、最近国連でも議論されました」と吉川先生。地球の周りには、イトカワ以外にも衝突の可能性のある小さな天体がたくさん飛んでいるそうです。あらかじめ、そういった天体を発見することも大切です。衝突を回避するためにも相手の天体をよく知ることが重要なのだそうです。



「はやぶさ」や実物大ロケットの模型などの展示が充実

科学の扉

「ネットで調べるだけじゃなく手を動かして実際に触れてみてほしい」



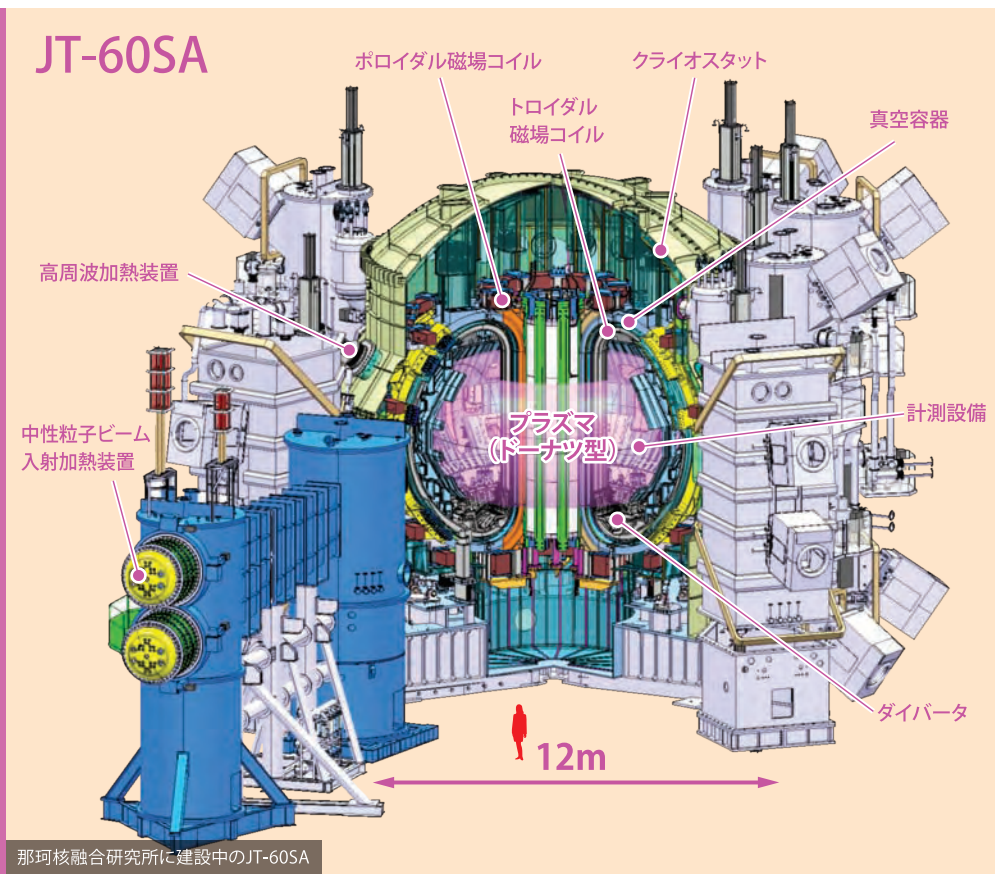
吉川 真

よしかわ・まこと 東京大学理学部天文学科、同大学院卒業。日本学術振興会の特別研究員を経て、1991年から旧郵政省通信総合研究所に勤務。1998年に旧文部省宇宙科学研究所に着任し、現在に至る。専門は天体力学。小惑星や彗星といった太陽系小天体の軌道解析が専門。現在は、人工衛星や惑星探査機などの軌道決定について研究を進めている。また、天体の地球衝突問題(スペースガード)にも関心が高い。

小学生のころから星を見るのが好きで、天体望遠鏡を買ってもらって星を見ていました。中学、高校時代は運動をやっていましたが、星が好きだったので天体の本を読んだりしていました。大学に入って自分の専門を決める時に、やっぱり宇宙を勉強したいなと思って、天文学科に進んでから本格的に学び始めました。

今、インターネットで検索するといろいろと情報が出てきますが、検索しても答えが出てこないような問題はまだまだたくさんあります。宇宙が特にそうなのですが、われわれの知らないことがいっぱいあります。若い人には、ぜひそういう未知のことに挑戦してほしいと思います。何でも良いので、まずは興味を持って、ネット上だけで調べるのではなくて、自分の手で実験をするなり、観測をするなり、自分の手を動かして実際に触れてみてほしいと思います。

核融合炉で未来のエネルギーをつくる



海水中に豊富に存在する重水素とリチウムをもとにエネルギーをつくる核融合エネルギーは、環境に優しく、安全性も高い、夢のエネルギーと言われ、世界の国々が注目しています。現在、フランスに建設中の核融合実験炉ITERのプロジェクトを日本は早くから積極的に推進しています。

燃料が無尽蔵にある夢のエネルギー

みなさんは星や太陽がなぜ輝き続けているのかを考えたことはありますか。これこそが、核融合反応なのです。軽い原子核どうしが衝突して重い原子核へ融合することを核融合と言います。では、太陽で起こっていることをどうやって地球上で発生させることができるのでしょうか。重水素と三重水素という水素の仲間同士を高温で融合させることで、核融合を起こすことができるのです。

核融合で残る燃えかすはヘリウムで、地球温暖化の原因となる二酸化炭素や窒素酸化物などは発生しません。また、燃料がなくなると核融合反応も止まるので、ガスの元栓を閉めるように直ちに反応を止めることができ、安全です。燃料となる重水素と三重水素が1グラムで石油8トンに相当するエネルギーを発生することができます。この三重水素は核

融合炉の中でリチウムからつくります。それらの燃料は海水の中から無尽蔵に取り出すことができるため、核融合エネルギーは「夢のエネルギー」と言われているのです。

「現在、いろいろな発電方法がある中で、核融合発電が良い点は、わずかな燃料で大きなエネルギーが得られることです」と話すのは那珂研究所の吉田さんです。「日本は資源が少なく土地も狭い。でも、日本の最大の強みは、物づくりが得意なこと」また、安全性に関しても日本は総合力が高いので、核融合は日本にとっても合った発電方法ではないかと吉田さんは考えているそうです。

プラズマ研究で日本が世界に大きく貢献

核融合によってエネルギーを取り出すためには燃料を1億度以上に熱して、「プラズマ」という状態で核融合反応を持続させる必要

があります。このプラズマの研究を行っているのが吉田さんです。プラズマとは、太陽はもちろん、オーロラや、雷のような放電現象で現れます。もっと身近なところでは、蛍光灯やプラズマテレビのディスプレイなどにも使われています。「プラズマは流体だと考えるとわかりやすいと思います」と吉田さんは説明します。「流れるプールを想像してみてください。プールに浮かんでいる人間が粒子です。粒子は一つ一つ動いているけれど、全体としてはプールの周りをぐるぐる回って流れていますよね。それがプラズマの流れです」

吉田さんはどうすればプラズマを高温に保持しながら閉じ込められるかを研究しています。核融合炉ではプラズマをドーナツ型の真空容器に閉じ込めて、高温状態を保ちます。真空容器の断面を円形ではなく、D字のようにしたり、プラズマの流れを変化させたりすることで、核融合反応の効率を高めることができるのだそうです。

那珂研究所では、フランスに建設中の核融合実験炉 ITER に先だって、核融合プラズマの研究を行ってきました。臨界プラズマ試験装置 JT-60 は 1985 年に運転を開始し、1996 年にはプラズマを 5.2 億度にすることに成功しました。人類が地球上でつくった世界最高温度としてギネスブックに登録されました。現在は、後継試験装置の JT-60SA を建設中で、日本の得意とする超伝導装置で ITER プロジェクトの研究を補いながら支援していく予定です。



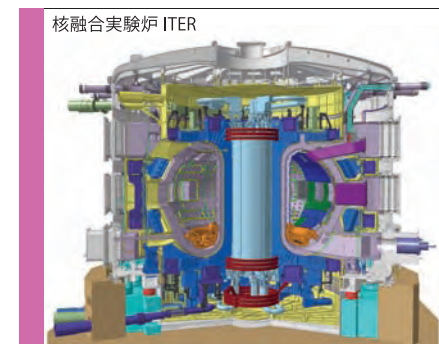
JT-60SA プロジェクトには日欧 11 か国約



300 人の研究者が参加していて、吉田さんはその取りまとめをしています。「私は英語が下手なんですけど、なるべくたくさんの人と話すようにしています。大勢の人がいるので考え方も違ふし、苦勞もありますが、良いものをつくりたいという思いはみんな一緒。普段からコミュニケーションをしていれば、みんな協力してくれます。昔は、研究者になると自分の専門のことばかりで、視野が狭くなるんじゃないかと思っていました。でも、こうやって様々な国の人と話していると、『視野を広く持たないと』と常に刺激を受けますね」

世界各国の研究者が集まる ITER プロジェクト

ITER は 35 年という長期にわたる国際的研究開発プロジェクトです。核融合炉は超伝導技術をはじめとする最先端技術の結晶です。日本は ITER に参加している国々と協力しながらすべてのハイテク機器を調達します。那珂研究所ではプラズマの閉じ込めに欠かせない、



超伝導マグネットの開発を行っています。マグネット開発を担当している井口さんは「超伝導コイルには強い電磁力がかかるので、ステンレス製のコイル容器の材料開発もしています。D 型で高さは 16 メートルありますから、溶接して一からつくります。研究者というよりは技術屋っぽいですね。核融合開発は今世紀半ばの実用化を目指しています。高校生の皆さんにも、ぜひ注目してほしいです」と話してくれました。



超伝導マグネット開発を担当する井口将秀さん

科学の扉

「目標は自分でがんばってつくるもの 目標があれば失敗も糧になる」



吉田 麻衣子

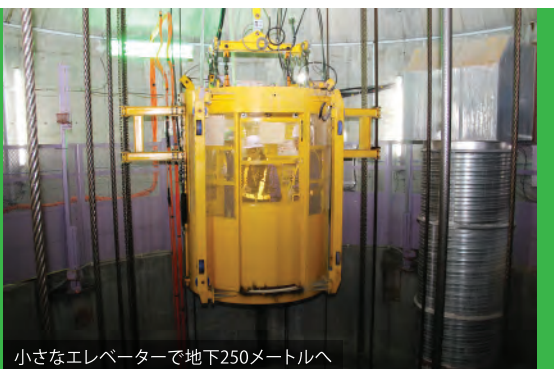
よしだ・まいこ 研究副主幹。1999 年 3 月、筑波大学第一学群自然科学類卒業。2004 年 3 月理学博士取得(筑波大学)。2004 年 4 月、原研入所。2010 年 6 月、第 15 回日本女性科学者の会奨励賞を受賞。幼いころは恐竜博士になりたかった。趣味はテニス。核融合プラズマの開発で、エネルギー供給に役立てたいと思い研究している。

思い返してみると、理科好きになったのは小学校の理科の先生の影響だと思います。とても面白い先生で、授業はほとんどせずに、野外観察ばかりしていました。夏休みの宿題の追加実験をしたり。そのころから実験って面白いと思うようになりました。

実は、私は高校生のころから核融合に興味を持っていました。当時、私が日本で怖いと思っていたのが、資源がないことと地震があることでした。そんな自分の心配事がきっかけで、エネルギーと地震に興味を持ち、将来自分なりに理解したいと思っていました。当時の高校生用の参考書に「核融合は夢のエネルギー」と紹介されていたのを読んで、それでひかれたんでしょうね。

これまでの研究の中では、いろいろな苦勞がありました。へこたれなかったのは、目標があったからです。目標は自分でがんばってつくるものだと思います。目標があれば失敗も糧となりますよ。

放射性廃棄物の安全な地層処分を研究する



小さなエレベーターで地下250メートルへ



地下施設を案内してくれた棚井憲治さん



「ゆめ地創館」展望階から地下施設が眺められる。遠くには利尻富士も

原子力発電所から出る使用済み核燃料を再処理し、再び燃料として利用することを「核燃料サイクル」と呼びますが、再処理の段階で高レベルの放射性廃棄物が出ます。幌延深地層研究センターでは地下深部の地質を調査し、放射性廃棄物を安全に地層処分するための方法を研究しています。

どうすれば安全に放射性廃棄物を処分できるか

原子力発電の燃料はウランです。発電で出る使用済みの核燃料を加工して、もう一度発電に使えるように再処理することを「核燃料サイクル」と呼びます。日本では青森県六ヶ所村に処理工場を建設していますが、再処理の過程で高レベルの放射性廃棄物が残ります。全体の燃料の3〜5%程度ですが、これを廃液と言います。

再処理直後の高レベル放射性廃棄物の放射線量は、ウラン鉱石を1とすると約2万倍です。それが1千年たつと放射線量は約3千分の1に減ります。数万年たつとほぼ天然のウラン鉱石と同じになります。放射性廃棄物の処理方法についてはこれまで、いろいろな方法が議論されてきました。海底や南極などの氷床深くに処分することは国際条約により不可能です。また、ロケットなどで地球外に処分

することも、コストの問題や打ち上げが失敗することも考えると現実的ではありません。世界の国々が今研究を進めているのは、数万年以上にわたって人間の生活環境から遠ざけることのできる地層処分という手段です。

天然バリアと人工バリアを組み合わせる

天然バリアというのは天然の岩盤のことです。法律上、地下300メートルより深いところに処分場をつくることが決まっています。当然ですが、火山活動や、地殻変動などの影響が少ない安定した地質環境が必要です。

人工バリアの一番内側にあるのが「ガラス固化体」です。ホウケイ酸ガラスに廃液を混ぜて、約1200度で溶融したものをステンレス製のキャニスターに流し込んで固めます。キャニスターの大きさは高さ134センチ、直径43センチ、重さ500キロです。ガラスと廃液の

割合は約7：3です。廃液をガラスの中に混ぜて固めているので、例外外側のキャニスターが割れてもガラスと一緒に廃液も固まっているため、地層に放射性物質が流れ出るのを防ぐことができます。

キャニスターはさらに、オーバーバックと呼ばれる鉄製の容器に入れます。地下深くに埋めるので、岩盤からの圧力に対して守る役割と、地下水との接触を防ぐ役割があります。地中に1千年間埋めた場合の腐食を想定して、オーバーバックの鉄の厚みは19センチありま



人工バリア(オーバーバックと緩衝材)の実物。

す。さらに、その周りを緩衝材で囲みます。緩衝材には、ベントナイトという粘土を使います。

ベントナイトは猫のトイレの砂として家庭でも使われているものです。ベントナイトには三つの特徴があります。一つ目は、水を吸収すると膨らんですき間を埋める性質があること。膨らむので、岩の亀裂を流れてくる地下水を防ぐことができます。二つ目は、容易に水を通さないこと。もしも、地下水にさらされても、オーバーバックへ水が接触するまでかなりの時間をかせいでくれると予想されています。三つ目は、水に溶けたものを吸着する性質があることです。地下水を通じて放射性物質が岩盤に漏れ出るのを防ぐと考えられています。

日本の地層で研究する意義がある

世界でも地層処分については研究されています。現在、スウェーデン、フィンランドなどでは安全審査まで計画が進んでいます。

幌延深地層研究センターは調査研究を行うための施設であり、日本の地層処分場の場所はまだ決まっていません。日本国内には深地層研究を行っている施設が幌延を含めて2か所あります。幌延は堆積岩の地質ですが、もう一方の施設では結晶質岩の地質について研究しています。

日本で地層処分の研究をすることの意義について、棚井さんは「日本の地質で研究してみることが一番重要です。来年から試験が本格化します。専門家がいくら説明しても理解してもらえないこともありますから、こうして実規模の施設を是非見ていただきたい。海外の施設の映像をいくら流しても、日本の地質とは違うからと説得力がない。私たちは、穴を掘る機械も一から製造して掘っています。その時の映像も見てもらうことができます」と説明します。

平成26年から幌延深地層研究センターでは、地下350メートルの坑道で実規模の緩衝材とオーバーバックに入れたヒーターを放射性廃棄物に見立て、熱が地下水などへ与え

る影響や地中からの圧力が緩衝材やオーバーバックに与える影響などを長期にわたって調べることになります。



緩衝材を穴に正しく配置するための試験装置



地下施設ではさまざまなデータが収集されている

科学の扉

「いろいろと試行錯誤して何かを見つけ出すのは楽しい」

高校は工業系の学校に通っていました。将来は土木工事で橋やトンネルをつくりたいと考えていました。建設業界に就職しようと思ったのですが、色々とあって当時の動力炉・核燃料開発事業団（現、日本原子力研究開発機構）に入社しました。入社後は、ウラン探鉱に従事していましたが、1986年、地層処分を研究する部署に異動となってから、ずっと地層処分の研究をしてきました。地下深い場所で、ものをつくるということは、これまであまり前例のないことですから興味を持ちました。

地下を相手にするということは、決まったことだけやってもだめなんです。地層が相手だと分からないことがいっぱいあります。何でこんな結果が出るのかと、びっくりするようなこともある。でも、失敗したりしながら、結果を出すのは面白いですね。皆さんも、自分の興味のある分野で、いろいろと試行錯誤して何かを見つけ出してほしいと思います。



棚井 憲治

たない・けんじ 1981年、動力炉・核燃料開発事業団(現・日本原子力研究開発機構)入社。1986年、環境資源部地層処分対策室。1992年、東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室。2010年からは地層処分研究開発部門 堆積岩処分技術開発グループでサブリーダーを務める。



この冊子で紹介した研究所を訪問してみませんか。ほとんどの研究所で常設展示 や施設の見学が可能です。



1

京都大学iPS細胞研究所(CiRA)



〒606-8507 京都市左京区聖護院川原町 53

【問い合わせ】

Tel. 075-366-7000

<http://www.cira.kyoto-u.ac.jp/>

■ ギャラリー

研究棟 1 階のギャラリーが公開されています。iPS 細胞の基本を学べる展示パネルをはじめ、CiRA の研究や研究棟内の様子を伝える情報端末などを見ることができます。iPS 細胞研究に関連する書籍も自由に閲覧できます。予約不要。

【公開時間】

平日／8:30～17:15、土曜／9:00～17:00

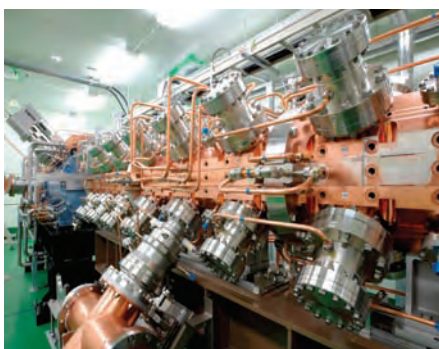
■ 研究棟見学会

月に1回、研究エリアの見学ができます。定員は毎回 30 人。応募者多数の場合は抽選となります。1 か月前までにホームページからの申し込みが必要です。開催日や申し込み方法などはホームページをご覧ください。

<http://www.cira.kyoto-u.ac.jp/>

2

いばらき中性子医療研究センター



〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方 162-1

現在、BNCT（ホウ素中性子捕捉療法）に関する展示や見学は実施されていません。

BNCT の内容はこちらのホームページをご覧ください。

<http://www.tsukuba-sogotokku.jp/project/project1/>

【問い合わせ】

筑波大学陽子線医学利用研究センター

Tel. 029-853-7100

3

高エネルギー加速器研究機構(KEK) つくばキャンパス



写真・KEK

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

【問い合わせ】

広報室 Tel. 029-879-6048（平日の 9:30～12:00、13:00～17:00）

<http://www.kek.jp/ja/PublicRelations/Visit/How-to/>

■ KEK コミュニケーションプラザ

加速器が動く仕組みや素粒子について学んだり、宇宙から降り注いでいる宇宙線を観察したり、タンパク質の立体構造を目で見たり、身近なものに含まれている放射線を自分で測ってみたり、さまざまな体験ができます。予約不要。

【公開時間】

年中無休／9:30～16:30

（年末年始・夏期休業期間を除く）

■ 研究施設見学ツアー

平日にコミュニケーションプラザ以外の研究施設の見学ができます。10 名以上の団体で、2週間前までの申し込みが必要です。まずは電話で空き状況をご確認ください。

■ イベントなど

年に1度の一般公開（例年9月上旬ごろの休日）のほか、サイエンスキャンプ、中学・高校生向けの実習や講義なども実施されています。詳細はホームページをご覧ください。

4

宇宙航空研究開発機構(JAXA) 相模原キャンパス



〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

【問い合わせ】

広報・普及係 Tel. 042-759-8008

<http://fanfun.jaxa.jp/visit/>

■ 展示見学

展示室にはロケットや人工衛星の模型があります。「JAXA さがみはら文庫」の本を読んだり、大型スクリーンに映し出される映像をみたり、様々な体験ができます。「はやぶさ」の模型や「はやぶさ2」展示コーナーもあります。屋外にはロケットの実物大模型が展示されています。予約は不要です。

なお 10 名以上の団体の場合、説明員による見学ツアーを申し込むことができます。まずは電話でお問い合わせください。

【公開時間】

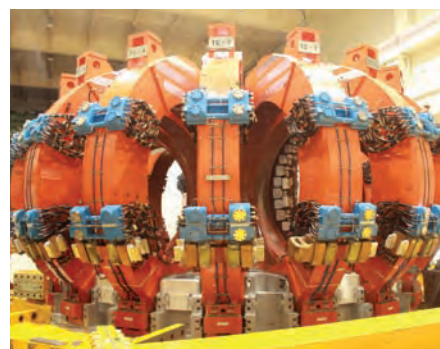
年中無休／9:45～17:30（臨時休館日がありますので、事前にご確認ください）

■ イベントなど

イベントや特別公開が開かれることがあります。詳細はホームページをご覧ください。

5

那珂核融合研究所



〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

【問い合わせ】

総務課 Tel. 029-270-7213

<http://www.naka.jaea.go.jp/infomation/welcome/welcome.html>

■ 施設見学

展示館や中央制御室など、世界最先端の研究開発の現場を見学できます。「超電導の世界」や「ロボットの操作」の体験もできます。専門スタッフによる案内で、所要時間は1～2時間。希望に合わせたアレンジも可能。見学には予約が必要です。また、上の写真のような巨大なコイルを間近で見することもできます。

【公開時間】

平日／9:30～17:00

【見学できる人数】

1回あたり1～40人

■ イベントなど

年に一度、施設公開も行われています。詳細はホームページをご覧ください。

6

幌延深地層研究センター



〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

<http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/kengaku.html>

■ 施設見学

深さ 140m および 250m の調査坑道など、地下研究施設を見学できます。2 週間前までに「見学申込書」の提出が必要です。まずは電話で空き状況の確認をしてください。

【問い合わせ】

総務課 Tel. 01632-5-2022

【公開時間】

4～10月＝火・木曜／11:30～15:00、

11～3月＝木曜／11:30～15:00

【見学できる人数】

4～10月＝1日あたり最大 16名、

11～3月＝1日あたり最大 8名

■ ゆめ地創館

地下深部の研究内容の展示や、モニターで現在の地下施設の工事状況などがご覧いただけます。

団体での見学で係員による案内が必要な場合は、事前に「団体見学申込書」の提出が必要です。詳しくは電話でお問い合わせください。

【問い合わせ】

ゆめ地創館 Tel. 01632-5-2772

【公開時間】

9:00～16:00、休館日＝毎週月曜と年末年始（12/29～1/3）