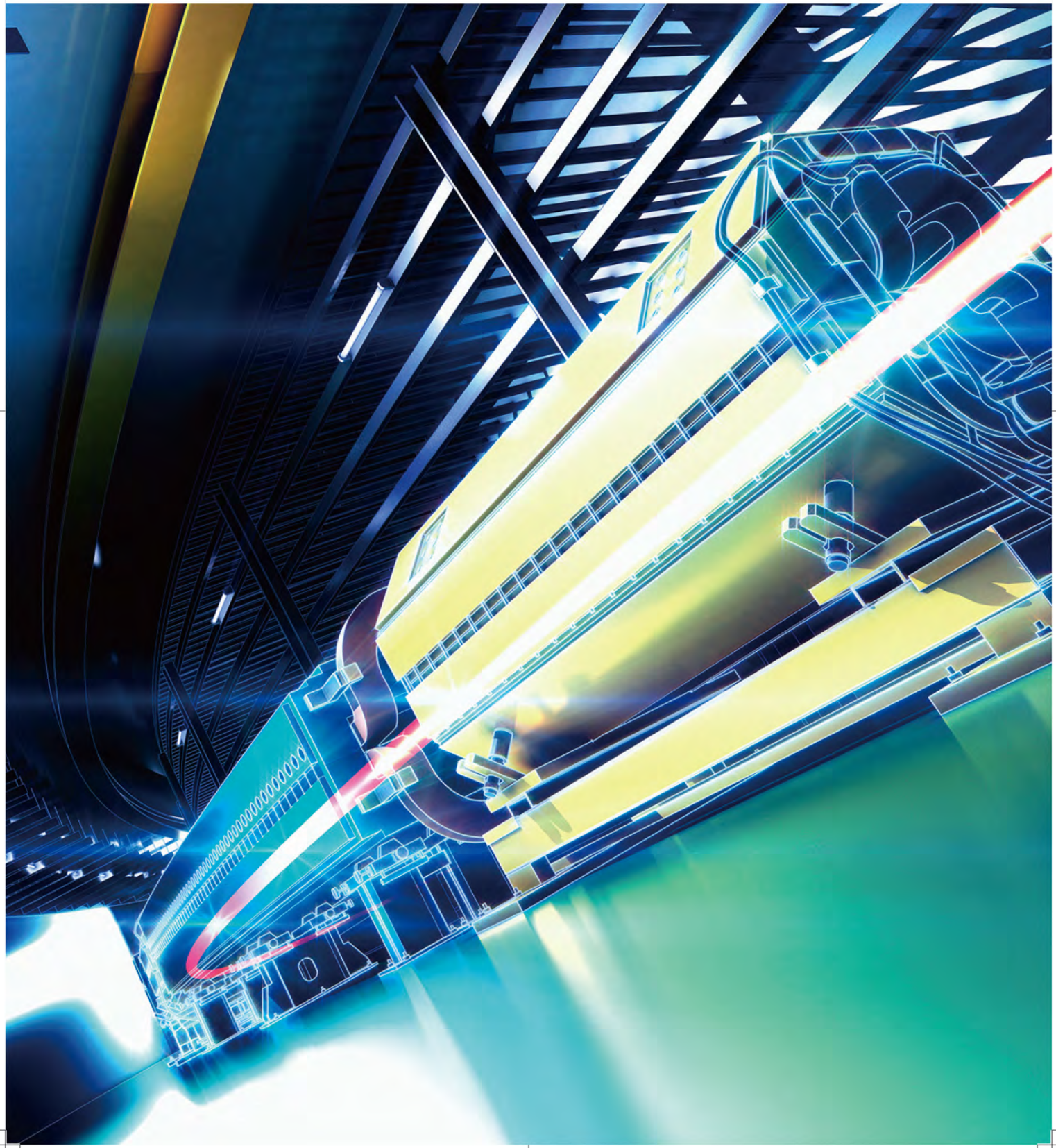
J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complex

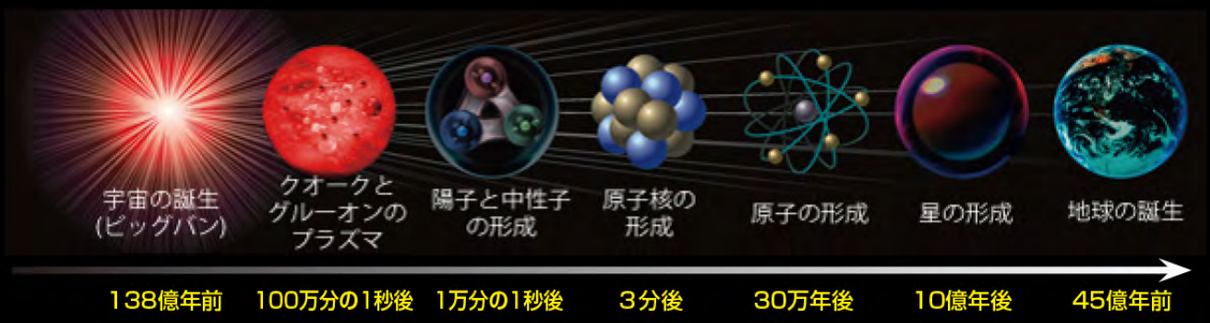
大強度陽子加速器施設



宇宙・物質・生命の起源に迫る
大強度陽子加速器施設 J-PARC

私たちの宇宙はどのようにして誕生し、私たち人類や地球はどうやって生まれてきたのでしょう。

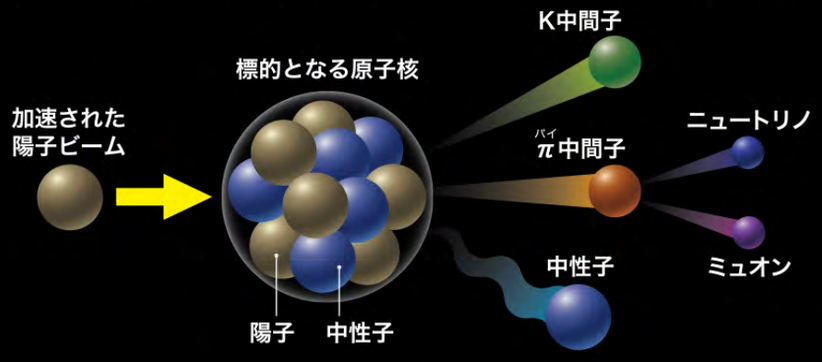
宇宙は、およそ138億年前に誕生したと考えられています。“ビッグバン”と言われる瞬間から爆発的な膨張と共に、超高温だった宇宙はだんだんと温度が下がり、エネルギーの塊から、現在素粒子とされているクォークやレプトンなどのさまざまな粒子が生まれました。これらの粒子はスープのように混沌と混じり合い、空間を自由に飛び回っていましたが、ビッグバンから約1万分の1秒後に、陽子や中性子という粒子の中に閉じ込められました。その後、陽子や中性子が集まって原子核を作り、その周りを電子が取り囲んで原子が形成され、原子が連なって分子ができ、星が、そして地球が作られました。その地球の上で、植物や動物、私たち人類の生命がはぐくまれてきたのです。

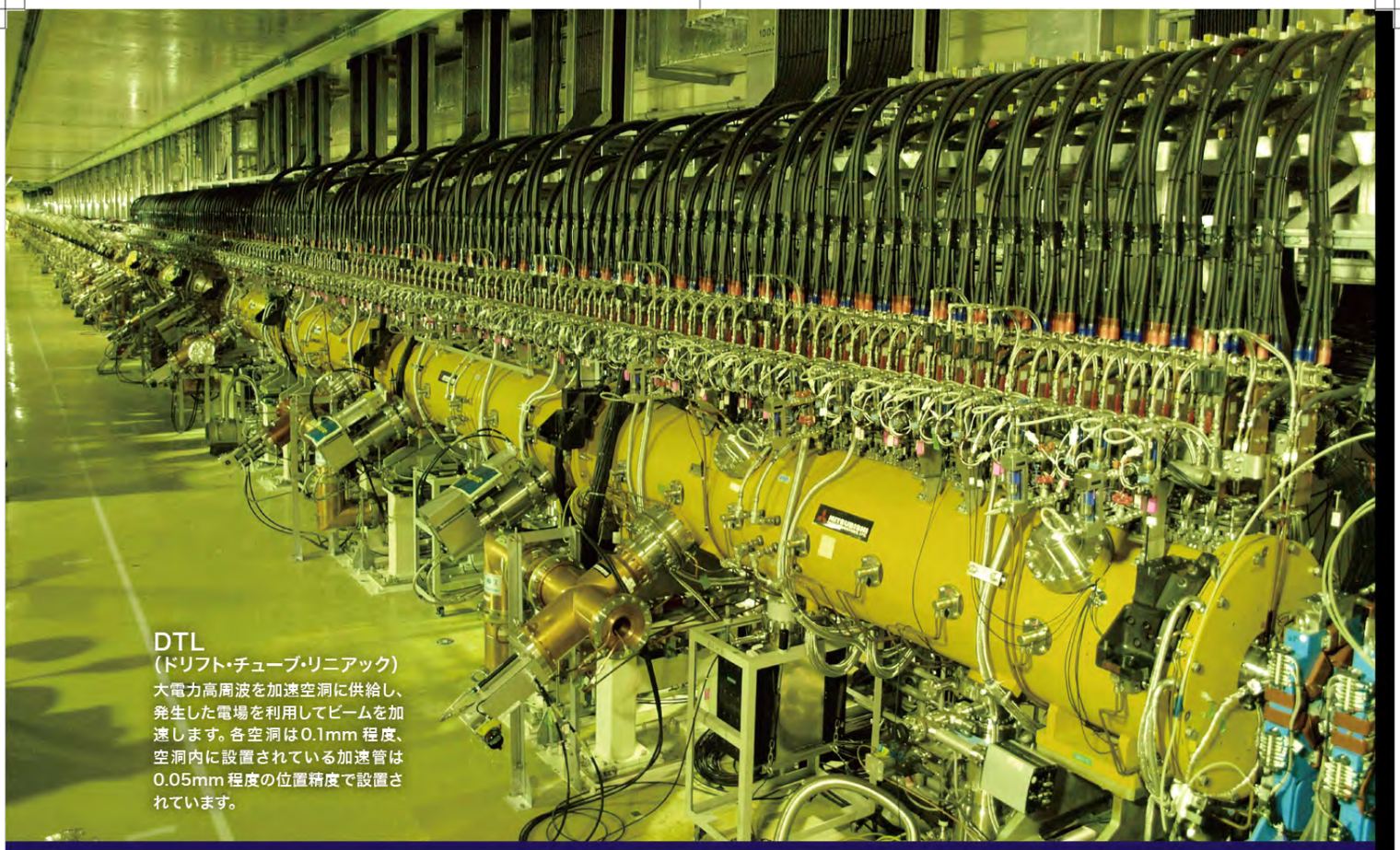


大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)は、原子・分子の構造観察から物質・生命の起源を探る研究や、素粒子や原子核の研究から宇宙の始まりの謎を解く研究を進める、最先端の研究施設です。ほぼ光速まで加速した世界屈指の大強度の陽子ビームから、中性子、ミュオン、ニュートリノ、K中間子などの多彩な二次粒子ビームを作り出し、多種多様な実験を推進しています。

J-PARC は、最先端技術を有する研究機関や企業が集まる茨城県の北部、東海村に、65 万平方メートルもの広大な敷地を構えています。リニアック・RCS・MR の3つの加速器から成る加速器施設と、物質・生命科学実験施設、ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設の3つの実験施設、及び施設建設を計画中の核変換技術に関する開発研究に、国内だけでなく海外からも多くの研究者を迎えています。J-PARC では、共同研究者とともに、基礎科学から産業応用まで多様な研究・開発を推進しています。

陽子ビームから作り出される多彩な二次粒子ビーム





DTL
（ドリフト・チューブ・リニアック）

大電力高周波を加速空洞に供給し、発生した電場を利用してビームを加速します。各空洞は0.1mm 程度、空洞内に設置されている加速管は0.05mm 程度の位置精度で設置されています。

リニアック
（直線型加速器）
全長約 330m

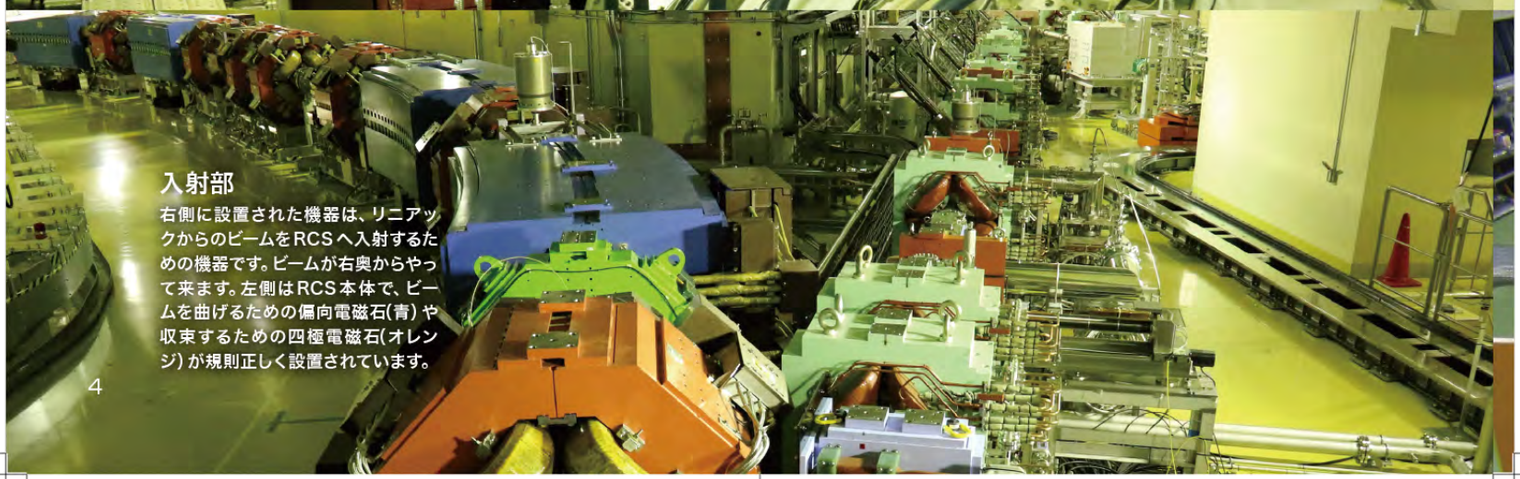
J-PARCのビームは、水素ガスから陽子 1 個と電子 2 個から成る負水素イオンを作り、直線型の加速器「リニアック」で加速するところから始まります。リニアックでは、「クライストロン」という装置を使って電磁波の一種である高周波を発生し、その電力を加速空洞に供給してビームを加速します。41 台の加速空洞でエネルギーを 400MeV まで、速度にして光速の 71%まで加速します。

RCS
（3GeVシンクロトロン、周回型加速器）
周長約 350m

リニアックで加速された負水素イオンは、周回型加速器である 3GeV シンクロトロン(Rapid-Cycling Synchrotron、RCS) に入ったところで、炭素の薄膜をくぐり、2 個の電子がはぎ取られ、陽子になります。陽子ビームは、1 台数トンから数十トンにもなる大きな電磁石約 160 台によって、曲げられたり、収束されたりしながら、加速器の中を 1 万回以上回り、そのエネルギーは最終的に 3GeV（速度にして光速の 97%）にまで達します。RCS の加速空洞は、独自に開発された優れた性能を持ち、J-PARC の世界最高強度の加速性能を支えています。RCS で加速された陽子ビームのほとんどは、物質・生命科学実験施設に送られて実験に利用され、残りは MR（主リング）に送られます。

加速空洞

「金属磁性体コア」を使用することで高い加速勾配を実現し、短い区間で効率よく高い加速電圧を得ています。この技術もJ-PARCの世界最高強度の加速性能を支えています。



入射部

右側に設置された機器は、リニアックからのビームをRCSへ入射するための機器です。ビームが右奥からやって来ます。左側はRCS本体で、ビームを曲げるための偏向電磁石(青)や収束するための四極電磁石(オレンジ)が規則正しく設置されています。

実験施設を支える J-PARCの加速器群

J-PARC は、陽子を加速する 3 台の大型加速器を持っています。陽子が数兆個から数十兆個もの塊となった陽子ビームは、加速空洞というビームを加速する装置や、何百個もの電磁石に挟まれた細いパイプの中を通過しながら、光速の 99.95%※まで加速されます。陽子ビームが空気中の酸素や窒素分子に邪魔されずに真っ直ぐに進めるように、パイプの中は、宇宙空間と同じくらいの真空状態を実現しています。

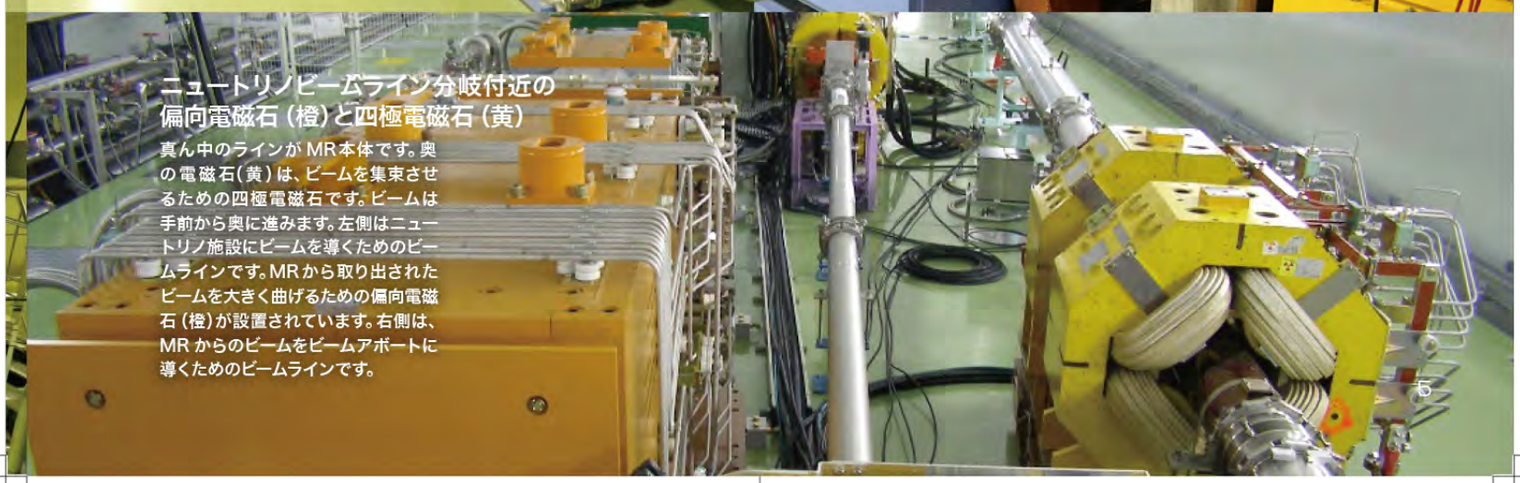
J-PARCの加速器は、日本の高い技術力で作られた超精密な**電気機械**であり、世界最高強度の高エネルギー陽子ビームを作りだすことができます。

※ 30GeV に対応。3GeV では 97.12%。

MR
(30GeV主リング、周回型加速器)
周長約 1600m

たくさんの二次粒子を使うので、数十 GeV のエネルギーの陽子ビームが必要な素粒子・原子核実験のためにビームを加速する周回型加速器で、直径約 500m の我が国最大の陽子加速器です。MR は電磁石の組み合わせを工夫してビームのロスを抑える世界初の設計を採用しています。周回型加速器の中を約 30 万回も回る間に、陽子ビームのエネルギーは 30GeV、速度は光速の 99.95%にまで達し、ハドロン実験施設とニュートリノ実験施設に導かれます。

偏向電磁石(青)と四極電磁石(黄)
陽子の進行方向を曲げる偏向電磁石と、ビームを収束させるための四極電磁石。電磁石の組み合わせを工夫することで、ビームのロスを抑える設計を世界で初めて採用しています。



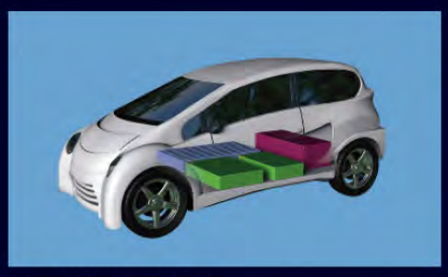
ニュートリノビームライン分岐付近の偏向電磁石 (橙) と四極電磁石 (黄)
真ん中のラインが MR 本体です。奥の電磁石(黄)は、ビームを集束させるための四極電磁石です。ビームは手前から奥に進みます。左側はニュートリノ施設にビームを導くためのビームラインです。MR から取り出されたビームを大きく曲げるための偏向電磁石 (橙) が設置されています。右側は、MR からのビームをビームアボートに導くためのビームラインです。

物質科学・生命科学の研究

物質中での原子や分子は、人間社会に例えると個々人やグループにそれぞれ対応し、その振る舞いは物質の性質と密接な関連があります。逆にいうと、原子や分子のふるまいを細かく調べれば、物質の機能を制御するための「仕組み」の深い理解につながり、また想像していなかったような新しい機能を発見することもあります。このような研究により、より高品質な材料の開発や、創薬の効率化が可能になると期待できます。

物質・生命科学実験施設 (MLF)

J-PARC の物質・生命科学実験施設(MLF) では、ほぼ光速(97%) まで加速した陽子を炭素、水銀の標的に衝突させることで、それぞれミュオン、中性子のビームを作り出しています。これらのビームは世界最大級の明るさで試料を照らすことができる「巨大な顕微鏡」として、科学の発展のための基礎研究から材料開発などの応用研究まで、幅広い分野の研究に用いられています。



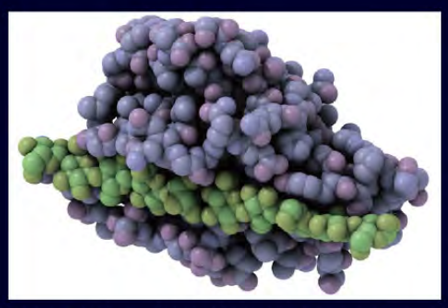
©宮崎 NORI/Newton Press

円筒型リチウムイオン電池

MLF の中性子ビームやミュオンビームは、材料やタンパク質の構造、特に内部に含まれるリチウムや水素の観察に優れた特性を持っています。

リチウムイオン電池は、携帯電話やノートパソコン、大きなものでは電気自動車にも使われ、電化の進む現代社会に不可欠な技術です。性能と安全性のさらなる向上が期待されており、MLF でも中性子やミュオンの特長を生かした研究が行われています。

電池の中で、リチウムはイオンという状態をとり、電解液という液体の中を移動することによって放電や充電が起きる仕組みになっています。しかし、電解液は燃えやすい性質も持っているため、電極が発熱すると電解液が燃えてしまうという事故が起きてしまいます。このようなことを抜本的に解決するために、燃えやすい電解質ではなく、固体を使ったリチウムイオン電池の開発が進められており、MLF でも中性子・ミュオンを使ってイオンの位置や動きを調べ、より高性能な電池材料を開発するための研究が行われています。

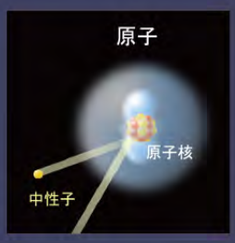


酵素の一種、セルラーゼ *Pc*Cel45A の分子構造 ©東京大学

また、MLF では我々の体を構成しているタンパク質に関する研究も行われています。タンパク質には様々な役割がありますが、たとえば酵素も実はタンパク質でできており、鍵（酵素）と鍵穴（標的）のように結合することで標的を分解・結合させることができます。そのため、酵素が働く仕組みを解明するためには、標的に結合する様子を調べることが重要です。

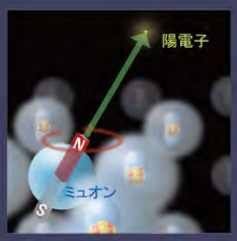
鍵である酵素はゆらゆらと動いて鍵穴に導かれた方がうまく結合するため、その動きを調べて効率的に働く酵素を推測できれば、病気の治療に繋がる薬剤の開発も期待できます。中性子を用いると、酵素と標的を色分けすることができるため、酵素がゆらゆらと動きながら標的に結合する様子をよりはっきりと識別できるというメリットがあります。

２種類のビーム



中性子で見る

中性子は原子核の中に存在する電荷を持たない粒子で、透過力が高いため物質の内部まで到達出来るという特徴があります。中性子を用いると、原子核にあたった際の飛び散り方（散乱）や、散乱した際に速度の変わる様子（分光）から、原子の位置や動きを観察できます。また、中性子が反射する様子から表面・界面の分子構造を調べたり、透過する様子から内部のレントゲン写真を撮影したりすることもできます。特にリチウムや水素などの軽元素や磁石は中性子の得意とする観察対象です。



ミュオンで見る

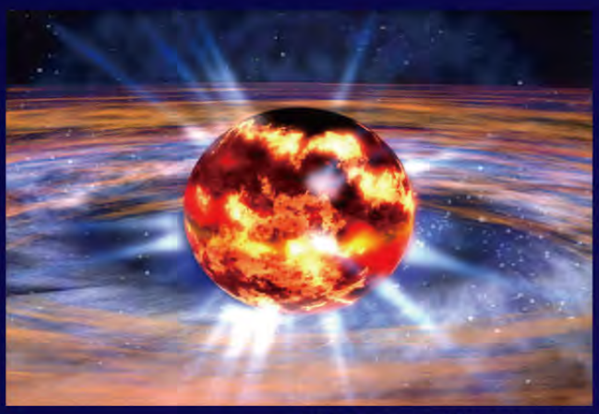
ミュオンはレプトンと呼ばれる素粒子の一種で、プラスの電荷を持つものとマイナスの電荷を持つものがあります。プラスの電荷のミュオンは水素のダミーとして振る舞い、物質中での水素の動きを調べるのに役立ちます。マイナスの電荷のミュオンで試料を照らすと内部に存在する元素の種類に応じた特殊な X 線を発するため、貴重な試料の元素組成を非破壊で分析することができます。ミュオンは磁石としての性質を持っているため、磁石材料中の磁場の強さや向きなどを調べることもできます。

素粒子・原子核研究

この宇宙に存在する物質は原子からなり、原子は原子核とその周りを回る電子から、原子核は中性子と陽子から構成されます。そして、中性子と陽子の中を探ると、最も小さな構成要素である素粒子、クォークにたどり着きます。クォークは強い力によって陽子や中性子のなかに閉じ込められていて単独で観測することはできません。一方、電子は強い力を感じない、クォークとは別タイプの素粒子レプトンの仲間で私たちにも身近な素粒子です。ニュートリノもレプトンの仲間になります。レプトンでは、電荷をもつ電子と電荷をもたないニュートリノが対を作っていますが、クォークも電荷の違う２種類が対を作っています。クォークやレプトンには、質量の違う３つの対（世代）があると分かりました。さらにこれらのクォークやレプトンには電荷が正反対の反粒子が存在します。

原子核の構造を探る

原子核を作っている陽子や中性子は、３個のクォークからなる「バリオン（重粒子）」と呼ばれる複合粒子です。一対のクォークと反クォークからなる複合粒子を「メソン（中間子）」といいます。バリオンやメソンのように、複数のクォークが強い力で結合してできた粒子を「ハドロン」といい、現在では、陽子や中性子に限らず、種類の異なるクォークの組み合わせや、クォーク間を結びつけている状態の違いなどから、たくさんのバリオンとメソンがあることが知られています。これらのハドロンを詳しく調べることで、物質の根源が何であるかという謎に迫ります。また、これらのバリオンで、ストレンジ・クォークを含む「ラムダ粒子」や「グザイ粒子」（「ハイペロン」という）は、星の進化の最終段階にあり、太陽の100兆倍以上もの密度を持つ中性子星の中心部に存在するといわれています。陽子や中性子に加え「ハイペロン」を含む「ハイパー原子核」を調べることにより、中性子星の内部の構造やその成り立ちの解明も目指しています。



中性子星のイメージ ©NASA/Dana Berry

ハドロン実験施設

MRで加速された陽子ビームを金の標的にあてることで、多種多様な二次粒子ビームを作り出します。現在は３本のビームラインが設置されており、それぞれの実験の目的にあわせた最先端かつオリジナルな検出器で、物理現象を精密に測定しています。

SKS測定器とHyperball-J

原子核を構成する陽子と中性子は核子と呼ばれ、核力という引力により結び付けられています。しかし核子を近づけていくと、逆に大きな反発力が働くことが知られています。ハドロン実験施設では、陽子から生成したＫ中間子ビームから、通常には存在しないストレンジ・クォークを含む原子核（ハイパー原子核）を人工的に作り出し、この謎に迫る実験をおこなっています。ハイパー原子核の生成は、「ビームスペクトロメータ」と「SKS（Superconducting Kaon Spectrometer）測定器」によって確かめます。

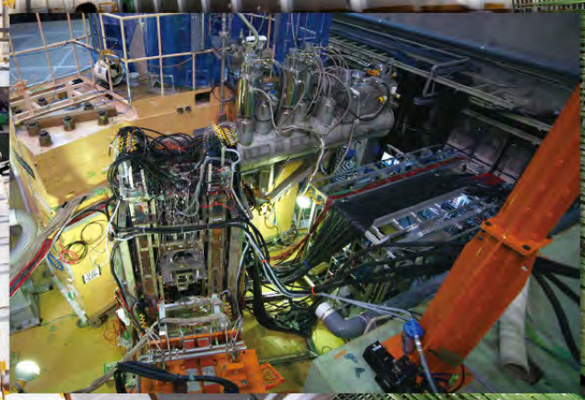
陽子の数と中性子の数が入れ替わった原子核は、鏡像核と呼ばれ、質量や構造がもとの原子核と同じに保たれる「荷電対称性」という性質を持ちます。しかし、それぞれの原子核にストレンジ・クォークを一つ含む粒子（ラムダ粒子）を1個加えると質量が大きく異なってしまう、という不思議な現象が、SKS測定器の中のHyperball-Jという検出器を用いて発見されました。この現象が解明されれば、高密度に圧縮された中性子星内部の物質にラムダ粒子がどのように現れるかがわかり、中性子星の内部の理解が進むと期待されます。

KOTO実験測定器

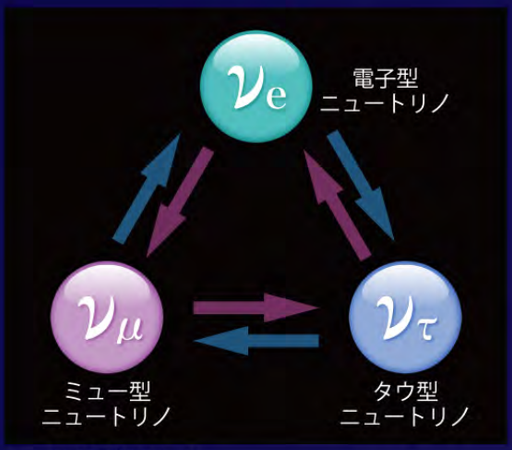
宇宙の始まりでは同じ量だけ存在していたとされる物質と反物質のうち反物質が現在は消えてしまった理由は、まだ完全に解明されていません。ハドロン実験施設では、陽子ビームが作り出す大量の中性Ｋ中間子を用いてその謎に迫る実験（KOTO実験）をおこなっています。

KOTO実験では、数百億回に一度の割合で、中性のＫ中間子が中性のパイ中間子と二つのニュートリノに移り変わる（崩壊する）現象を世界で初めて測定することを目指します。直径２メートルで長さ３メートルの真空槽を大型のガンマ線検出器で囲み、この崩壊を測定します。

KOTO実験測定器



SKS測定器とHyperball-J



ニュートリノ振動のイメージ

標準理論に登場する 17 種類の素粒子

素粒子の謎を解き明かす

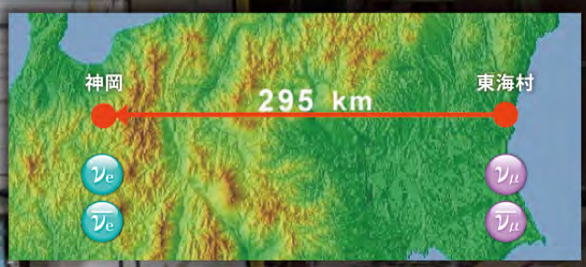
宇宙の物質はバリオン（陽子や中性子）から成り立っていて、反物質（反バリオン）が見当たらないのはなぜなのでしょうか。この謎に深く関わっているのが、ニュートリノという小さな素粒子であると考えられています。J-PARC では 3 世代あるニュートリノが、飛行中に別の世代に変身する「ニュートリノ振動」を調べる「T2K（Tokai to Kamioka）実験」を行っています。T2K 実験では 2013 年、世界に先駆けてミュー型ニュートリノが電子型ニュートリノに変身する現象を発見しました。現在は、宇宙から反物質が消えた謎に迫るため、ニュートリノの反粒子である反ニュートリノを大量に作り出し、その振動現象を調べる実験を行っています。

ニュートリノ前置検出器

ニュートリノ実験施設

T2K 実験では、J-PARC の加速器で生み出した大量の陽子をグラファイトの標的にあてて、ニュートリノを人工的に作り出しています。このニュートリノを「前置検出器」で確認してから、295 km離れた岐阜県飛騨市神岡町にある、東京大学宇宙線研究所の検出器「スーパーカミオカンデ」に飛ばし、その間の変化を観測します。

これまでに T2K 実験は、J-PARC で作り出した第 2 世代のミュー型ニュートリノが、飛行中に第 1 世代の電子型ニュートリノに変身する「電子型ニュートリノ出現現象」を観測することに世界で初めて成功しました。現在は、電磁ホーンに流す電流の向きを逆転させて、ニュートリノの反粒子である反ニュートリノビームを作りだし「反電子型ニュートリノ出現現象」を観測、前者との違いがあるかどうかを検証する実験を進めています。もしニュートリノと反ニュートリノで振動現象に差があれば、それは、ニュートリノでは粒子・反粒子の性質に違いがある（CP 対称性が破れている）ことを意味しており、宇宙の創生時、私たちを作っている物質と同じように存在していたとされる反物質が現在ほとんど存在しない理由を説明する鍵になると考えられています。



T2K 実験のイメージ

核変換の研究

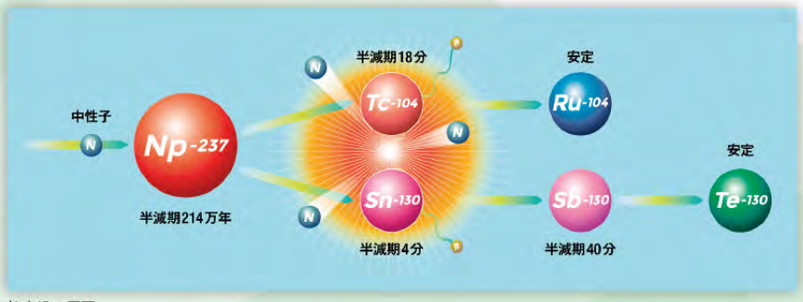
原子力発電で発生した使用済みの核燃料には、人体に有害な影響を与えるさまざまな物質が含まれます。これらの物質を、その特性に応じて適切に処理することで、原子力発電に伴う放射性廃棄物を管理しやすくできます。

特性に応じてグループ分け（分離技術）した物質のうち、特に有害な「マイナーアクチノイド（Minor Actinide、MA）」に中性子を当てると、核分裂反応が起きて、有害度の少ない物質に変換できます（核変換技術）。

分離・核変換の後に残った物質の放射線レベルは、数百年でもとの核燃料と同じ程度にまで下がります。分離・核変換技術は、放射性廃棄物処分の有望な選択肢として、日本をはじめ世界各国で基礎的な研究開発や導入戦略が議論されている最先端の技術です。

J-PARC では、大強度の陽子加速器と MA を燃料とする原子炉を組み合わせて MA を効率的に核変換する「加速器駆動核変換システム (Accelerator-driven System、ADS)」の将来の実用化を目指し、開発研究のための施設建設を予定しています。

建設計画中の核変換実験施設



核変換の原理

核変換実験施設用核破砕ターゲット模擬試験装置

共同利用実験施設としてのJ-PARC

J-PARC は、大学だけでなく企業も含む、国内外の多様な分野の研究者に使ってもらうための大型実験施設です。のべ21万人日のユーザーに利用されており、その約半数が海外からのユーザーです。また、企業による利用も多く、ここ数年は年間平均70件近くの研究課題が採択されています。新専攻や分室の設置など、国内大学との連携も進めています。

国内大学との連携

先端施設を用いた大学院教育は、将来の施設創りができる人材育成に大きく貢献します。2015 年に分室を設置した大阪大学（写真左）に続き、多くの大学が設置を検討中です。また、茨城大学は2016年に量子線科学専攻を新設しました。J-PARCの講義と演習で、先端科学とその施設運営にダイレクトに触れる機会を次世代を担う若者に提供します。

海外研究機関との連携

諸外国の研究機関と連携協力関係を結び、人材交流や研究交流、技術交流を進めています（写真右）。
最近では、豪州 ANSTO、カナダ TRIUMF、スウェーデン ESS などと、覚書を締結／更新し、協力を深めています。

産業界との連携

先端施設のフロンティアを熟知する企業人の人材を育成する制度の整備も進めています。2016 年には、住友ゴム工業株式会社と、企業に属しつつ、J-PARC の MLF において新しい研究方法の開発や先導的研究を推進するフェローシップ制度を始めました。

国際センターとしてのJ-PARC

- 物質・生命科学　：世界三大実験施設の一つ アジア・オセアニアの中核
- 原子核素粒子物理：K中間子実験で世界の中心
- ニュートリノ物理：世界をリード 三大施設の一つ

ニュートリノのセンター　ハドロン（K中間子）実験施設
中性子のセンター

CERN：欧州合同原子核研究機構　ISIS：英国ラザフォード・アップルトン研究所の中性子源
FNAL：米国フェルミ国立加速器研究所　SNS：米国オークリッジ国立研究所の中性子源

J-PARC は国際的な研究拠点として、各分野での研究をリードしています。
物質・生命科学実験施設は、加速器で生成した中性子を用いて実験を行う実験施設として、イギリスのラザフォード・アップルトン研究所が持つ ISIS、アメリカのオークリッジ国立研究所が持つ SNSと並ぶ世界三大施設のひとつであり、アジア・オセアニアの中核的な研究拠点です。ハドロン実験施設で行われている原子核素粒子物理の研究も世界的レベルにあり、中でもＫ中間子の研究が世界をけん引しています。また、ニュートリノ実験施設は、ヨーロッパのCERN、アメリカのFNALと並び、加速器を使ったニュートリノ研究の世界三大研究施設のひとつです。

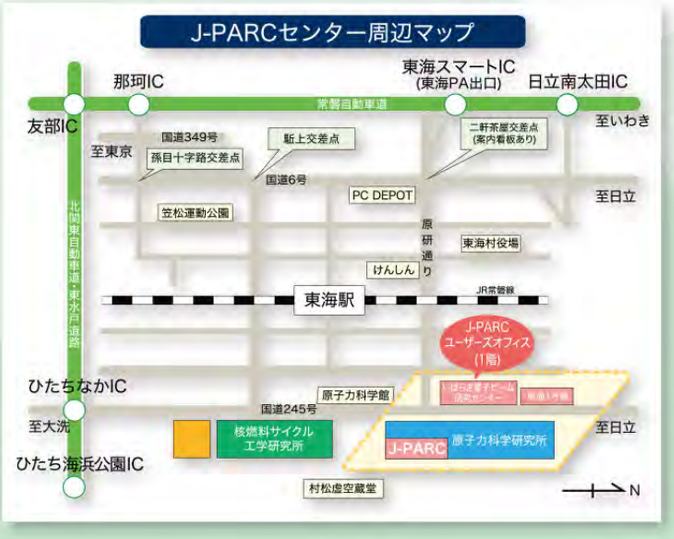
沿革

J-PARCは、日本原子力研究開発機構（JAEA）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）との共同プロジェクトです。平成 13 年に両機関はJ-PARCの建設及び研究開発に関する協力協定を締結し、平成 20 年度には物質・生命科学実験施設で、平成 21 年度にはハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設で利用運転を開始しました。現在、核変換実験施設の建設に向けた検討と技術開発を進めています。

平成13年	日本原子力研究所（原研：現 JAEA）とKEK間で、J-PARCの建設と研究開発に関する協力協定を締結 J-PARC施設 建設開始
平成17年	原研とKEK間で、J-PARCの運営に関する協力協定を締結
平成18年	J-PARC センター設置
平成19年	リニアック、RCSで所期エネルギー達成
平成20年	MRで当初目標のエネルギー（30GeV）達成 物質・生命科学実験施設の利用開始
平成21年	ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設の利用開始

交通アクセス

常磐線「東海駅」よりタクシーで約10分
常磐自動車道「東海スマートIC」より約15分、「那珂 IC」「日立南太田 IC」より約20分
東水戸道路「ひたちなか IC」より約25分



J-PARC センター

〒319-1195
茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4
TEL：029-284-4578
FAX：029-284-4571
http://j-parc.jp/

J-PARC 施設を利用される方

J-PARC センターユーザーズオフィス

〒319-1106
茨城県那珂郡東海村白方162-1 いばらき量子ビーム研究センター1F
TEL：029-284-3398
FAX：029-284-3286
http://is.j-parc.jp/uo/

2017年3月発行