

大強度陽子加速器施設

**J-PARC**

Japan Proton Accelerator Research Complex

**最大にして最強。**

**MIR**

**Main Ring**

**大強度ビームの最前線!!**

# J-PARC

とは

## J-PARCは加速器を用いた 最先端の研究施設

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力など幅広い分野の最先端研究を行うための陽子加速器群と実験施設群の呼称です。J-PARCの最大の特徴は、世界最高クラスの強度をもつ陽子ビームで生成する中性子、ミュオン、K中間子、ニュートリノなどの多彩な二次粒子ビーム利用にあります。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所【現 日本原子力研究開発機構 (JAEA)】が共同で提案し、8年の歳月と総工費1524億円をかけ、2008年にJAEA東海の原子力科学研究所内に第一期施設が完成しました。

J-PARCの加速器は、線形加速器 (リニアック) と円形加速器 (シンクロトロン) 2台の計3台で構成されています。

## 3つの加速器群



1

### 加速器1 : LINAC (Linear Accelerator)

水素ガスから水素化物イオン (陽子1個と電子2個からなる陰イオンで、負水素イオン、 $\text{H}^-$  (エイチマイナス) と呼ばれます) を発生させ、全長約330mの線形加速器リニアックで400MeV(2013年5月までは181MeV)まで加速し、次の加速器RCSへ送ります。粒子の速度は光速の71%になります。左の写真はビームエネルギーを設計値の400MeVに上げるため、新たに設置したACS型加速空洞です。

LINAC

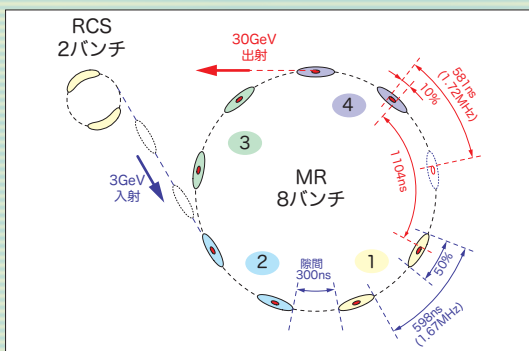


2

### 加速器2 : RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)

RCSは一周約350mの円形の加速器で、加速器の種類としてはシンクロトロンと呼ばれます。リニアックから来た $\text{H}^-$ は炭素の薄膜をくぐる時に2個の電子が剥ぎ取られ陽子となります。陽子ビームは1万回以上回る間に3GeVまで加速され、光速の97.1%に達し出射されます。陽子ビームの大部分は物質・生命科学実験施設へ送られ実験に利用されます。一部は次の加速器MRへ送られます。

RAPID-CYCLING SYNCHROTRON



3

### 加速器3 : MR (Main Ring)

MRは一周約1570mのシンクロトロンで、約1~4秒ごとにRCSから2個ずつ4回に分けて8個の陽子ビームバンチ(約 $3 \times 10^{13}$ 個の陽子の塊)を受け取ります。MRではそのビームバンチを約12万周させ30 GeVまで加速し、二つの実験施設へ出射します。この時陽子の速度は光速の99.95%となります。

MAIN RING

光速 : 光が真空中を進む速度は秒速約30万kmです。

MeV、GeVとは : eV(電子ボルト)はエネルギーの単位の一つで、電子または陽子1個などの素電荷をもつ粒子を1ボルトの電位差で加速した時に得られる運動エネルギーが1eVです。M(メガ)は百万、G(ギガ)は十億を表します。

# J-PARC MRを構成するもの

## 高周波加速システム

9

高周波電圧を用いて荷電粒子を加速する装置で、加速器の心臓とも呼ばれます。空洞と高周波増幅器などから構成されます。

## 電磁石システム

2 6 7 10 11

陽子ビームの周回軌道を決める磁場をつくる各種の電磁石やそれらの電源などです。

## 真空システム

全周

ビームの通り道を真空に保つためのパイプや真空ポンプなどです。

## ビーム診断システム

全周

加速器の目とも呼ばれ、ビームの強度、軌道や振動などの様子を調べ、最適な運転が行われているか診断します。

## ビーム輸送システム

3 11 12

RCS から MR へ、また MR からニュートリノ実験施設やハドロン実験ホールへビームを輸送します。

## ビーム入出射システム

6 7 10

MRへビームを入射し、実験施設へビームを取り出します。

## 加速器制御システム

1

加速器の頭脳とも呼ばれ、加速器全てのコンポーネントをコントロールします。

## 冷却水システム

8

電磁石、電源、高周波加速装置などを冷却するための純水及び循環ポンプなどから構成されています。

## 安全監視システム

5

ビームによって生じる放射線及び放射能の影響から人々を保護します。

## 放射線管理システム

地上部

放射線及び放射能を持つ物質を閉じ込め、加速器トンネルからの出入り及び個人線量の管理と加速器周辺の放射線量を監視します。



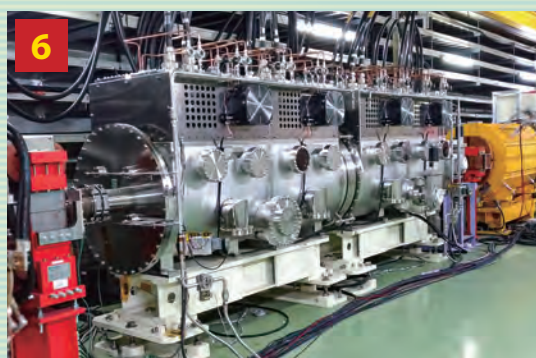
**中央制御室**：写真に見える多数の端末装置には、巨大な加速器の各装置や陽子ビームの状態が表示されています。加速器を最適な状態で運転するため、これらの端末装置から機器に指令を送ります。



**安全監視システム**：加速器は放射線発生装置であるため入退域が厳密に管理、監視されています。



**3-50BTビーム輸送路**：写真向かって奥側やや上方の隔壁の向こうに位置するRCSからMRIにビームを約220mにわたって輸送します。



**入射キッカー電磁石**：ビーム輸送路から斜めに入射されて来たビームを、MRの周回軌道にあわせるために横向きに磁場で蹴り入れます。



**速い取り出し用セプトム電磁石とビームアポートライン**：ラテン語で隔壁を意味する「セプトム」構造をもつ電磁石が周回ビームラインの左右両側に並んでいます。中央の周回ビームラインを周回する陽子パンチは、上流のキッカー電磁石で右または左に蹴られ、さらにセプトム電磁石の隔壁の外側の磁場で軌道が曲がります。右に曲がったパンチはリング外側のビームアポートラインを通してビームアポートダンプへ捨てられます。左に曲がったパンチはニュートリノ二次ビームラインを進みます。



**ニュートリノ二次ビームライン**：ニュートリノビームラインの超伝導電磁石



**ビームコリメータ**：ビームの周辺に分布している、密度の低い粒子の雲(ビームハロー)を削り取ります。ビームハローはビームロスが発生させ、加速器本体を放射化する原因となるため、決められた場所で取り除く必要があります。



**真空システム**：加速器を構成する電磁石などの機器は金属製のパイプ(ビームダクト)が貫通していて、さらにそれらをビームダクトで繋ぎ、一周1567.5mの極めて細長いドーナツリングを構成しています。この中で陽子ビームが飛行するとき、空気などの残留分子は飛行の妨げとなるため、点在する真空ポンプによって排気し1兆分の1気圧前後の超高真空に保ちます。加速器は1つの巨大な真空容器なのです。



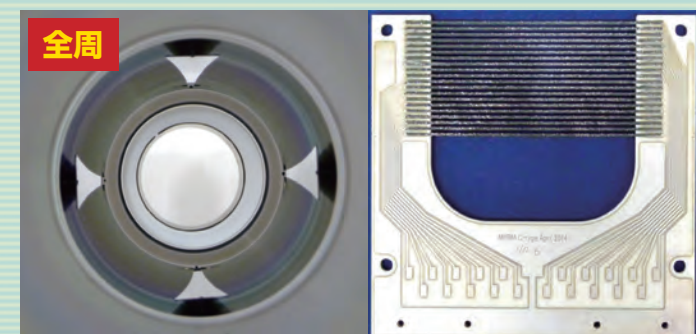
**高周波加速装置群**：大強度陽子ビームはここを約12万回通過することで運動エネルギー 30 GeVを獲得します。写真は世界最大級の数の陽子を加速できる、世界最高の加速勾配を持つ新型空洞と高周波増幅器です。



**電源棟**：電磁石電源や、加速空洞電源、制御機器等が置かれています。地下トンネルの加速器の各機器まで高電圧・大電流の電力を供給し、またビーム制御のための微弱なモニタ信号をトンネル内から受け取ります。当初D1～D3の3棟だけでしたが、増強計画のためD4～D6の3棟が新たに建設されました。



**放射線モニタ**：加速器の制御のために運転中に発生する放射線を測定するモニタです。MRでは地上に4カ所設置しています。



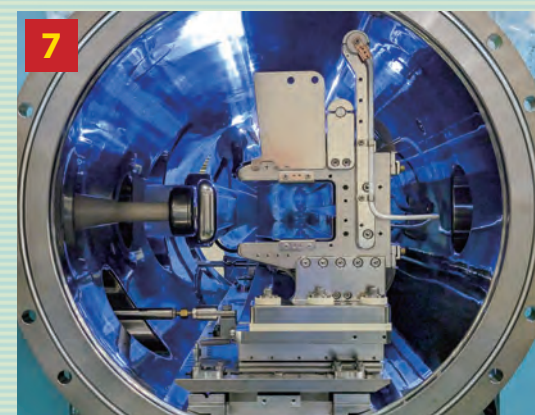
**ビーム位置モニタ、ビームプロファイルモニタ**：左はビームの重心位置を10～100 μm程度の位置分解能で測定するビーム位置モニタの一例です。ビームが通る位置から撮影した写真です。真空ダクトの内側に4つの電極があり、ビームが通過する時に生じる電気信号から演算により重心が求まります。MRIには4種類の電極形状の位置モニタが約200台分配されています。右は、ビームの密度分布形状を測定するビームプロファイルモニタのための多層グラフェン・リボン・ターゲットです。



**冷却水システム**：電磁石や高周波加速空洞へ供給される電力は最終的に熱となり、そのままでは装置が高温になります。その熱の除去のため、純水を用いた冷却システムが3カ所の機械棟に整備されています。



**ハドロンビームライン**：MRから取り出されたビームは写真中央のビームラインを通してハドロン実験ホールに輸送されます。



**遅い取り出し静電セプトム装置内部**：1.5mの長さを持つコの字型のフレームに張られた500本のリボンとチタン電極の間に約100kVの高電圧を印加し、電場によって陽子ビームを少しずつ削り出します。リボンはタンングステン-レニウム合金でできており、厚さは約30 μmです。

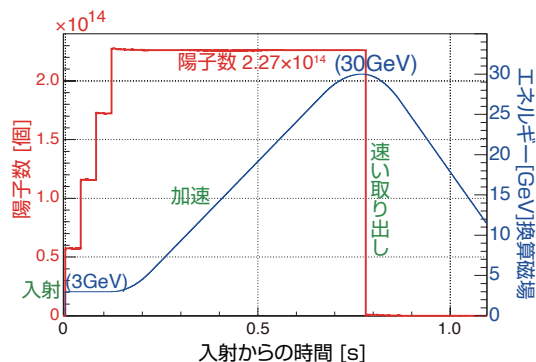


**曲線部に並ぶ電磁石群**：電荷を帯びた粒子が磁場で曲がる性質を利用し、偏向電磁石96台、四極電磁石216台を用いて陽子ビームを正確な軌道で安定に周回させます。

# MR加速器の運転モード

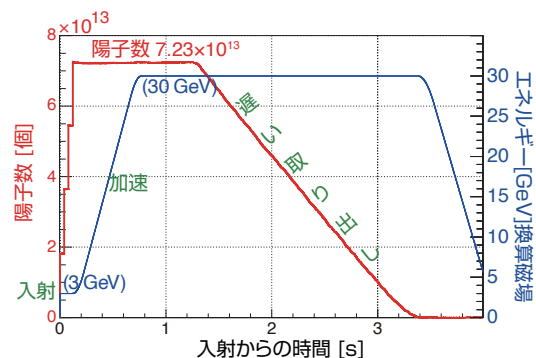
## 速い取り出し（800kW 2024/6/21）

ニュートリノ施設に向けてビームを送るときにはリングを周回するビームを一気に取り出すので「速い取り出し」と呼ばれます。右図は加速器内の陽子数とエネルギーの時間変化を表したグラフです。まずRCSから2個ずつ4回、計8個のビームバンチが入射され、陽子の総数は $2.3 \times 10^{14}$ 個に積み上がります。そのまま加速器リング内を0.65秒周回する間に加速空洞からエネルギーをもらい加速し、30 GeVの運動エネルギーを獲得します。その後1マイクロ秒という短い時間で取り出しキッカー電磁石を励磁すると、列車が線路のポイントを切り替えて進行方向を変えるように、周回していた陽子全部が取り出されます。この陽子ビームをニュートリノ実験施設内のターゲットにぶつけ、ニュートリノビームを生成し、295 km離れたスーパーカミオカンデに向かって射出します。この速い取り出しモードの運転周期は1.36秒です。粒子数を増やし運転周期を短くするビーム強度増強計画が進行中です。



## 遅い取り出し（82kW 2024/5/31）

ハドロン実験施設に向けてビームを送るときには「大根の柱むき」のように少しずつ時間をかけてビームを取り出すので「遅い取り出し」と呼ばれます。右図のようにリングに入射したビームを3 GeVから30 GeVまで0.6秒かけて加速し、2秒間に $7.2 \times 10^{13}$ 個の陽子をできるだけ滑らかに取り出します。ハドロン実験施設では陽子ビームを金属標的にぶつけた時に取り出される素粒子を用いて原子核や素粒子の様々な実験を行います。遅い取り出しモードの運転周期は4.24秒です。取り出すビームの量をより一定に揃え、損失を抑えてビーム強度を増強する計画が進行中です。



## ●放射線安全管理システム

放射線安全管理システムは放射線量を監視する、人の被曝線量を管理する、加速器トンネル内からの汚染を外に持ち出せないようにゲート(写真)で管理する等を行っています。J-PARCの加速器では、放射線安全システムと下に述べるPPSはそれぞれ加速器の機器自体を制御する加速器制御システムとは独立したシステムとなっており、操作はそれぞれのシステムから行います。

## ●人員安全保護システム (Personnel Protection System, PPS)

加速器トンネルには放射線を発生する装置や大電流の電磁石等の装置があり、この区域の出入口を扉で区切って管理しています。PPSは人が加速器トンネル内に入域しているときには加速器の運転ができないように、また逆に運転をしているときには人が入域できないように管理します。さらに万が一運転中に扉が開いた場合にはビームを停止させます。このように加速器の運転と人の安全を集中管理しているシステムです。

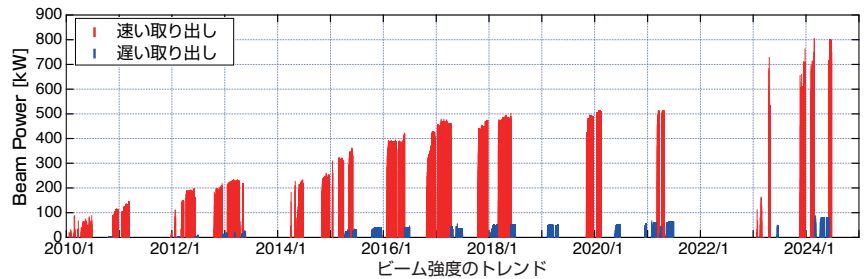


放射線管理区域へ入退域するためのゲートシステム

## MRのあゆみ

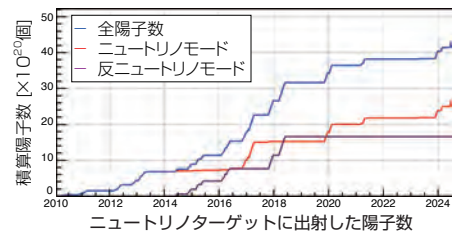
### MR

- 2008年 5月 ビーム運転開始
- 2008年 12月 30 GeVへの加速に成功
- 2011年 3月 東日本大震災により被災
- 2011年 12月 復旧しビーム試験開始
- 2012年 1月 利用運転再開
- 2022年までに 主電磁石電源、RF、入出射機器、コリメータを増強



### 速い取り出し運転

- 2009年 4月 MRからニュートリノビームラインへビームを出射して試験を開始
- 2010年 2月 スーパーカミオカンデで最初のニュートリノ事象を観測
- 2023年 12月 ニュートリノターゲットでの積算陽子数  $4 \times 10^{21}$  個を達成
- 2024年 6月 利用運転で 800 kWのビーム強度を達成



### 遅い取り出し運転

- 2009年 1月 MRからハドロンビームラインへビームを出射して試験開始
- 2009年 10月 共同利用運転を開始
- 2013年 5月 ハドロン実験施設における放射性物質漏えいにより運転停止
- 2015年 4月 安全を確認し利用運転再開
- 2024年 6月 利用運転で 80 kWのビーム強度を達成



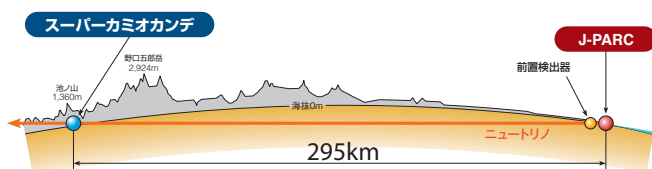
## MRを利用した実験

### T2K長基線ニュートリノ振動実験

MRから速い取り出しモードで取り出された大強度陽子ビームを使い、大強度ニュートリノビームを作り出します。ビームは地球内部を飛行し、295 km離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデでニュートリノ事象が観測されます。

#### 世界初！ 電子型ニュートリノ出現現象を捉える

2013年5月までに取得した全データを解析した結果、ミュー型ニュートリノが飛行中に電子型ニュートリノに変化する「電子型ニュートリノ出現現象」が確実に存在することを、世界で初めて示すことができました。

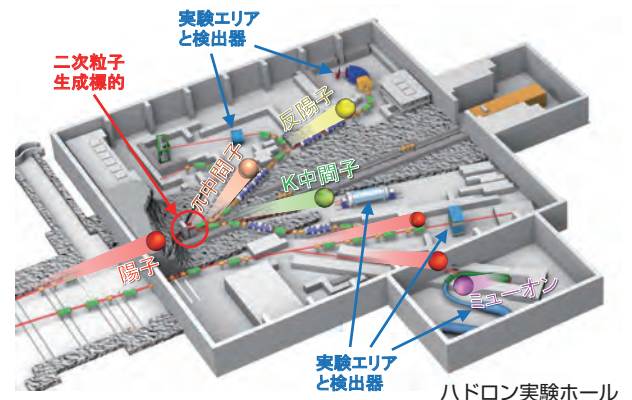


#### ニュートリノの「CP対称性の破れ」解明への挑戦

ニュートリノと反ニュートリノの違いについて検証を進めるため、2014年から反ニュートリノビームを用いた実験を開始しました。2016年に世界で初めて両者に違いがあることを90%の信頼度で示し、2017年に $2\sigma$ (95.4%)の信頼度まで高めています。今後、さらに実験を進め、 $3\sigma$ (99.7%)の信頼度で検証することを目指しています。

### ハドロン実験

MRから遅い取り出しモードで取り出された大強度陽子ビームを200mのビームラインでハドロン実験ホールに輸送し、二次粒子生成標的に照射してK中間子、 $\pi$ 中間子、ミュオンなどの大強度ビームを作り出し、様々な原子核・素粒子物理学の実験を行います。また最近では、加速された陽子ビームの一部を直接利用する実験も行っています。



#### 宇宙の歴史を遡る

ハドロン実験施設は、物質を構成する究極の要素が何であるか、どのような力がそれらを結びつけているかといった、物質の根源の謎を最先端の測定装置で極微のスケールで探究する施設です。「ハドロン」とは素粒子・原子核物理の用語で「強い相互作用で結合した複合粒子」という意味です。

# ビーム強度増強計画進行中

～インテンシティブフロンティアをめざして～

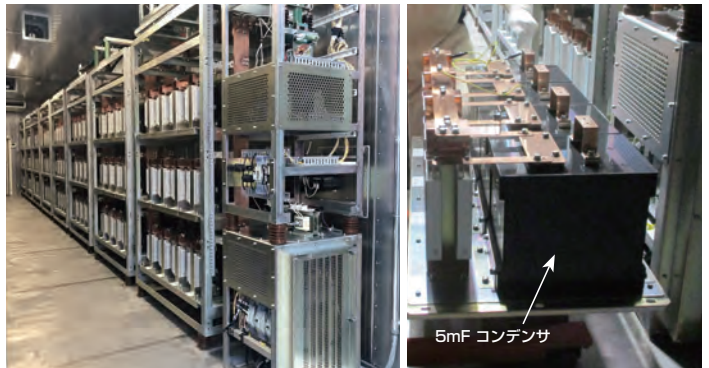
2024年6月現在、MRでは運転周期1.36秒でビーム強度800kWを達成しています。計画当初の性能目標750kWに対し、2021年までに運転周期2.48秒で500kWを達成していました。電磁石電源の更新、高周波加速空洞の増強、入出射機器の更新、コリメータの増強を行い、周期を短くする高繰り返し化によって、2023年12月に750kWを超えるビームをニュートリノ実験施設に供給できました。さらなる目標強度1300kWを掲げ、増強計画を進めています。

## 計画その1：電磁石電源の高繰り返し化

運転周期を短くするには、磁場の立ち上げ・立ち下げをより高速に行う必要があります。これは、より大きな電力を発生する電磁石電源を必要とすることを意味しますが、電力会社から受電するピーク電力に制約があり従来の電源では実現することができませんでした。このため大容量コンデンサバンク(1電源あたり3ファラッド)を用いた新しい方式の電源が開発され、高繰り返し運転の実現と共に、受電電力の平坦化に成功しました。

## 計画その2：高周波加速空洞の増設

加速時間を短くするには、より高い加速電圧が必要です。そのため加速空洞ユニットを増設していきます。またこれにより、より多くの粒子をロスすることなく加速することが出来ます。さらに空洞にパワーを供給する電源も増強し、大強度のビームに負けずに加速できるようにします。



より速いサイクルで動く新電源システムのため新規開発された、(左)コンデンサバンクと(右)コンデンサユニットです。



1 運転周期あたりのビームの粒子数  $N$  [個]、エネルギー  $K$  [eV]、電気素量  $e$  [C]、運転周期  $T$  [s] の時、ビーム強度  $P$  [W] は  $P = N \times e \times K \div T$  で求まります。



## J-PARCセンター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4  
TEL 029-284-4578  
<https://j-parc.jp>

高エネルギー加速器研究機構  
日本原子力研究開発機構

発行：  
大学共同利用機関法人  
高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1  
TEL 029-864-1171  
<https://www.kek.jp>

ver. 202408

