

季刊誌

J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complex

No. 1

2015 秋

A U T U M N

創 刊 号

世界最高クラスの大強度陽子ビームを作る

特集

陽子の加速器

<http://j-parc.jp>



特集

陽子の加速器

世界最高クラスの大強度陽子ビームを作る

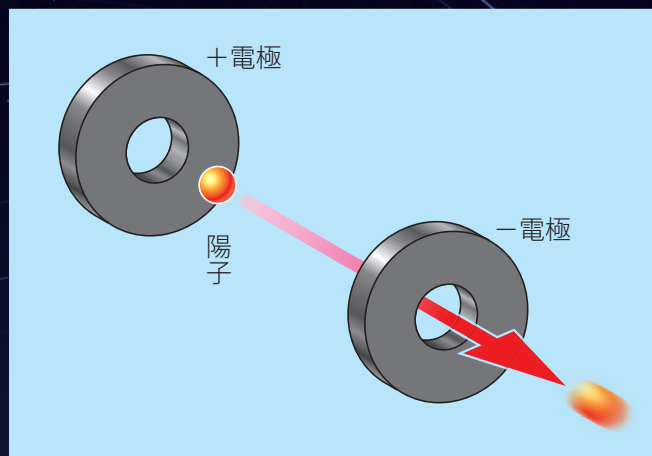


大強度陽子加速器施設J-PARCでは、陽子を加速して標的に照射することで、中性子や中間子・素粒子などの二次粒子を作り、多用な実験に用いている。この陽子ビームを加速する役割を担っているのが「加速器」だ。J-PARCでは3種類の加速器を組み合わせることで、世界最高クラスの大強度陽子ビームを作り出している。今号では、その加速器について特集する。

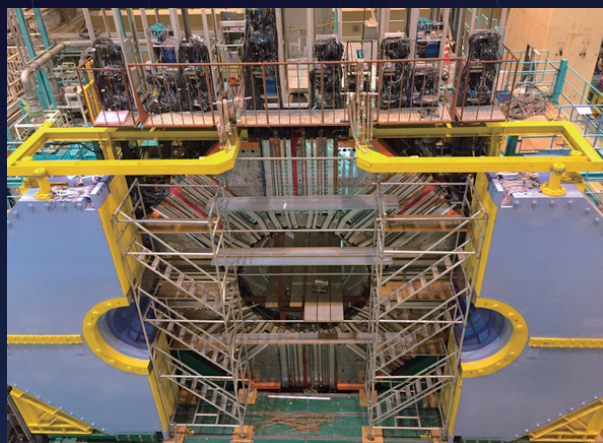
写真：J-PARCのRCS(3GeVシンクロトロン)入射部。リニアックで加速されたビームは写真右上から手前方向に入射される。周回したビームは左上から戻ってくる。

加速器とは

陽子や電子、イオンのような電荷を持った粒子のことを荷電粒子といいます。この荷電粒子を、電気力で引っ張って、より速く、より高いエネルギーにする装置が、加速器です。原子核や素粒子などの学術研究のほか、産業利用・医療応用にも用いられています。



加速器の原理：2枚の電極にそれぞれ+と-の電荷をかける。
2枚の電極の間に、例えば陽子を入れると、陽子は-電極の方に加速される。



高エネルギー加速器研究機構のSuperKEKB加速器で生じる素粒子の反応をとらえる測定装置 BelleII (ベル・ツー)

世界の加速器・日本の加速器

世界には、イギリスのラザフォードやアメリカのフェルミなど、目的に応じてたくさんの加速器があります。スイスには全周27 kmもある世界最大の加速器LHCがあり、素粒子の研究に用いられています。

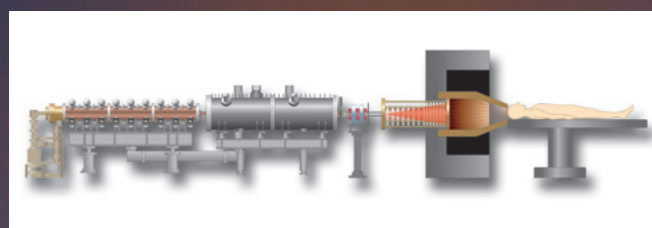
日本にも世界最高性能の放射光施設SPring-8や原子番号113番の元素を世界で初めて発見した理化学研究所のRIBF、2008年のノーベル賞の受賞に貢献した高エネルギー加速器研究機構のKEKBなどがあります。

加速器が拓く未来

現在の加速器は、粒子のエネルギーをあげる方向でどんどん進化してきました。エネルギーを高めることで、今まで見えなかった世界が拓けてきます。それは例えば、ダークマターの探索や物質の起源、宇宙誕生の謎、標準模型を越える新しい物理理論など、現在の物理学では解けていない問題を解決する糸口になるかもしれません。

また、加速器で作られる中性子やミュオンなどの二次粒子を使用することで、新素材開発や創薬への応用も期待されます。重粒子線加速器では、がん治療など医学へも応用されています。

このように、加速器の進化は、基礎科学だけでなく、日々の暮らしの向上にも役立つのです。



ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT : Boron Neutron Capture Therapy)
加速器で加速した陽子をベリリウムターゲットに当てて発生した中性子と、中性子に増感効果のあるホウ素との反応を利用したがん治療法
画像：筑波大学附属病院 陽子線医学利用研究センター提供

世界最高強度の陽子加速器

— J-PARCの加速器 —



世界で最もたくさんの陽子数を加速できる加速器※、それがJ-PARCの加速器です。この世界最高強度の陽子ビームを使うことで、たくさんの二次粒子を作り出し、精度の高い実験を行うことができます。これにより、他の施設では見えないものでも、J-PARCだからこそ見えてくるのです。2015年のノーベル物理学賞の「ニュートリノ振動」の裏付けとなったT2K実験などもその一例です。

ここでは、加速器ディビジョン長の長谷川和男さんに、J-PARCの加速器についてお話を伺いました。

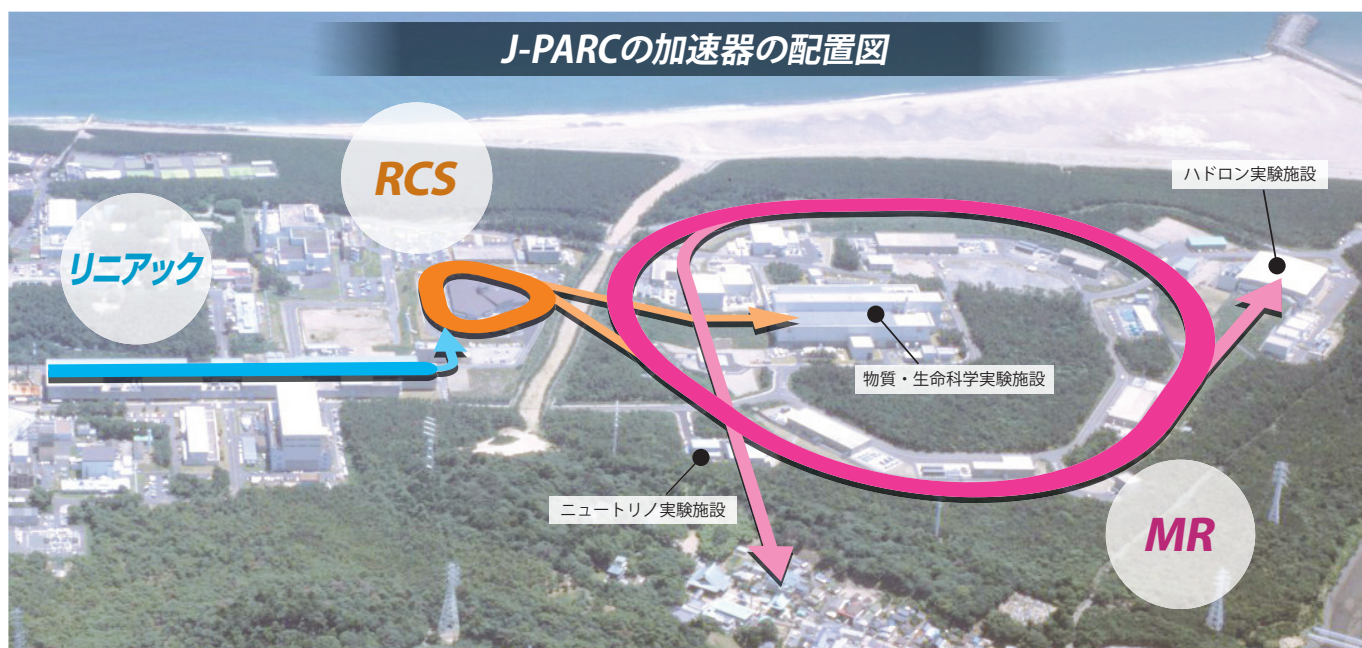
※1バンチ（パルス1回で加速する陽子の塊）あたりの陽子数が世界最大クラス

さまざまなユーザーにビームを供給する際に、実験によってそれぞれ必要なエネルギーが異なります。例えば、中性子の場合は1 GeV（10億電子ボルト）～3 GeV、素粒子・原子核実験では、数10 GeVの高いエネルギーが必要です。J-PARCでは3種類の加速器を組み合わせることで、ユーザーがそれぞれ必要とするエネルギーとビームの強さを実現しています。

このように、中性子と素粒子・原子核物理の実験を一緒に行うことのできる加速器は、J-PARCだけなのです。

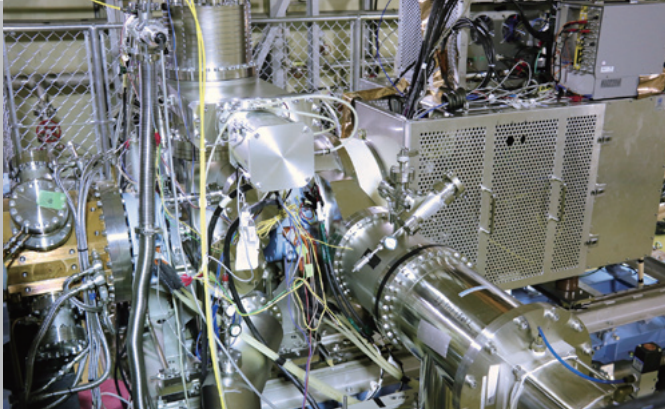
J-PARCセンター 加速器ディビジョン長
長谷川 和男 さん

J-PARCの加速器の配置図

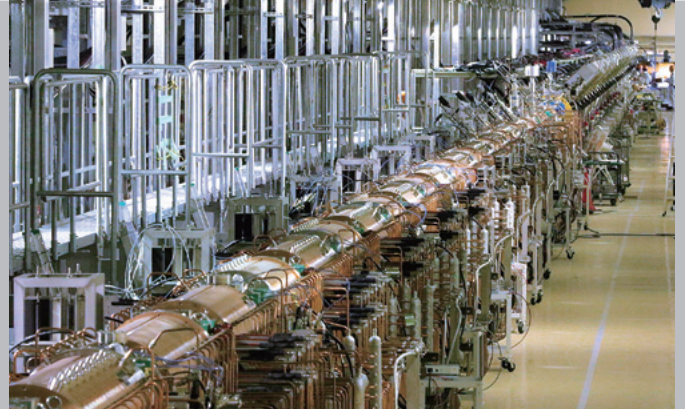


リニアック LINAC

J-PARCの3つの加速器のうち、一番最初にあるリニアックは、高い電流の粒子（負水素イオン）を生成・加速し、後ろの加速器に渡します。後段の加速器（RCS、MR）では加速する粒子の数を増やすことができないので、リニアックでどれだけたくさんの粒子を加速できるかがカギとなります。



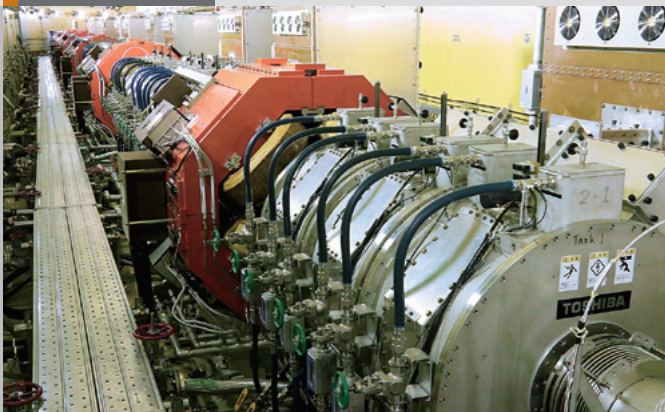
イオン源：水素ガスをプラズマ化することで、負水素イオンを生成します。2014年に新型のイオン源に交換することで、従来の約2倍の陽子数を生成できるようになり、RCSの所期性能である1 MW相当の陽子ビームの加速に成功しました。



ACS加速器：J-PARCが世界で初めて実用化した、大強度ビームを加速するのに適した構造を持つ加速器。非常に難しい構造をしているので、世界でもここにしかない加速器です。

RCS Rapid-Cycling Synchrotron

リニアックで加速された粒子（負水素イオン）は、RCS到達直前に電子を2個剥ぎ取られ、陽子になります。この陽子と同じ軌道でぐるぐると回しながら、効率よくエネルギーを上げていく加速器がRCS（3 GeVシンクロトロン）です。RCSで加速した陽子は、MLF（物質・生命科学実験施設）やMRに送られます。



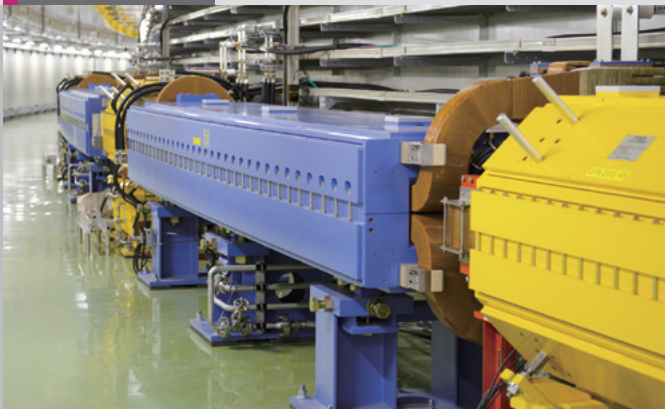
加速空洞：「金属磁性体コア」を使用することで高い加速勾配を実現し、短い区間で効率よく高い加速電圧を得ています。この技術もJ-PARCの世界最高強度の加速性能を支えています。(P6-7、野村さんインタビュー参照)



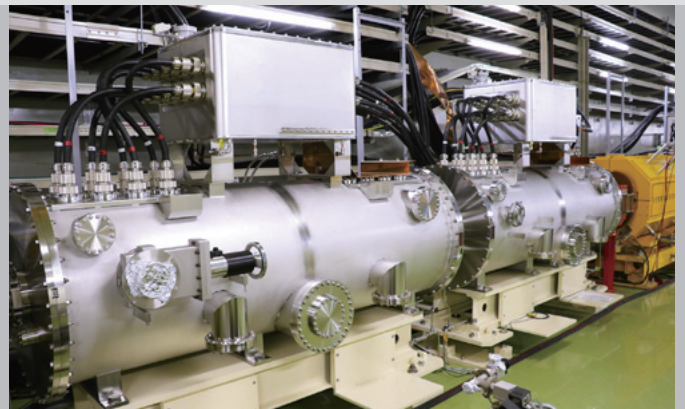
出射部：RCSの出射部では、加速した陽子ビームを精密にコントロールすることで、ビームをほとんどロスすることなく、下流のMLF（写真左奥側）やMR（写真中央奥側）に送り出しています。(写真右側はRCSの周回ライン)

MR Main Ring

RCSで3 GeVまで加速した陽子を、最大50 GeVまでエネルギーを高める加速器がMRです。素粒子原子核実験では数10 GeVのエネルギーが必要なので、周長のより長いMRで陽子をさらに加速し、エネルギーを上げています。J-PARCはパワーフロンティアといって、ビーム出力が高く、たくさんの二次粒子を作ることができるので、それらを使って新しい物理学の展望を拓いています。



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。



出射キッカ電磁石：陽子の軌道を周回軌道から取り出し軌道へと進行方向を変更するための電磁石。MRのこの電磁石では約5マイクロ秒の「速い取り出し」で、ニュートリノターゲットにビームの行き先を変更しています。

より高い加速勾配 をめざして

シンクロトロン「加速空洞」。加速勾配を高めることで加速器を取り巻く状況は劇的に変わる。その研究に携わっている野村昌弘さんにお話を伺いました。

日本原子力研究開発機構
J-PARCセンター 加速器ディビジョン
加速器第二セクション 研究副主幹

野村 昌弘 さん



■加速器なのに、加速している部分 は実は少し

私が担当しているのはシンクロトロン「加速空洞」という粒子を加速する部分です。J-PARCのシンクロトロンの周長は、RCSが350 m、MRは1.6 km位あるのですが、その中で実際に粒子を加速している部分は、実は少しなんです。RCSには12台、MRには9台の加速空洞が入っていて、1台の加速空洞が大体2 m。この僅かな部分で粒子を加速しています。

■いかに効率よく粒子を加速させるか

短い加速空洞の中で、いかに効率よく粒子を加速させるか。人類はまだ、電磁気力以外で粒子を加速する方法を知りません。そこで、電荷を持った粒子がやってきたら、そこに電場をかけて粒子を加速しています。いかにその短い加速空洞の中に高い加速電圧を発生させ、高い加速勾配を達成させるかは加速器に取っては最も重要なテーマの一つです。J-PARCに来てからはずっとこの研究をやっています。

■加速勾配を高めると…

加速勾配が高くなれば、陽子ビームのパワーを上げることができま

す。J-PARCでは、陽子ビームをターゲットに当てて、出てくる二次粒子でいろんな研究を行っています。加速勾配を高め、陽子ビームのパワーを上げると二次粒子をたくさん作ることができます。その結果、例えば今まで1年以上もかかった実験も半年でできるようになります。J-PARCは現在、通常の陽子シンクロトロンと比較して2倍以上の高い加速勾配を達成することに成功しています。この技術は世界的にも注目され、海外の加速器でも採用され始めています。

■金属磁性体コアと難航した開発

開発の段階で、J-PARCシンクロトロン「加速空洞」には、通常の約2倍の高い加速勾配が要求されていました。通常の加速空洞ではフェライトコアが使われていますが、これだと要求されている加速勾配を達成することは出来ません。そこで、私たちは高い加速勾配を実現できる可能性のある金属磁性体コアを加速空洞のコアとして採用し、その開発を行いました。この開発は実に大変でした。いざ始めてみると、なかなかうまくいかない。試験をしても否定的な結果が出てくる。周りからは、この方式ではダメなんじゃないかとも言われたりもしましたが、着実に進

めていけば、なんとかなるんじゃないかとは思っていましたが、なんとかしなければならぬとも思っていました。その後、多くの人の協力もあり、高い加速勾配を達成することのできる金属磁性体コアの開発に成功しました。

■実際に使い始めたら…

J-PARC RCSが稼働し始めた2007年からは高い加速勾配で実際に陽子ビームを加速していたのですが、何年か運転するうちに重大なトラブルが出てきました。金属磁性体コアが運転を重ねるに従って次々と物理的に壊れていきました。その時の衝撃は非常に大きかったですね。この形状のコアでは解決は無理じゃないかという意見も出ました。そう言った状況の中で私は壊れているコアと壊れていないコアを徹底的に比較していったんです。違いが何かをコツコツと調べて行くうちに、作り方の段階で、ほんのちょっとした違いがあることを見つけました。そのちょっとした違いによって、壊れるか壊れないかが分かれることが分かったんです。耐久性の問題は、実際に何年間も運転を継続した結果でしか判断することができません。ここ最近、ようやくこの金属磁性体コアは本当に大丈夫なんだと思える

様になりました。

■KEK 浦川教授

私はもともと、動力炉・核燃料開発事業団に就職して、電子線加速器の研究をしていました。しかし、いろいろあって電子線加速器の計画は突然中止になってしまって、私の将来は、もうほとんど絶望的でした。そんな時、KEKの浦川順治教授が私を引き取ってくれたんです。そこで、加速器の勉強を徹底的にさせてもらいました。だから、私がこうして加速器の研究を続けてい

れるのも浦川教授とKEK ATF (Accelerator Test Facility) の皆さんのおかげです。今でも非常に感謝しています。

■加速器の世界へのきっかけ

高校の頃、TVでトリスタンという大きな加速器の計画を紹介していて、原子核や素粒子物理、加速器を使って宇宙の謎を研究するのも面白いかと思って、それで大学を選んで、気がつくとなんとなくその分野に進んでいました。特に大きな動機があった訳ではありませんが、面白

くて続けていたら現在に至ったと言うのが本当のところですね。最近、科学離れとか言われていますが、本気になってやってみたら面白いと思いますので、みなさんもやってみたらどうですかと伝えたいですね。

PROFILE

野村 昌弘 (のむら まさひろ)

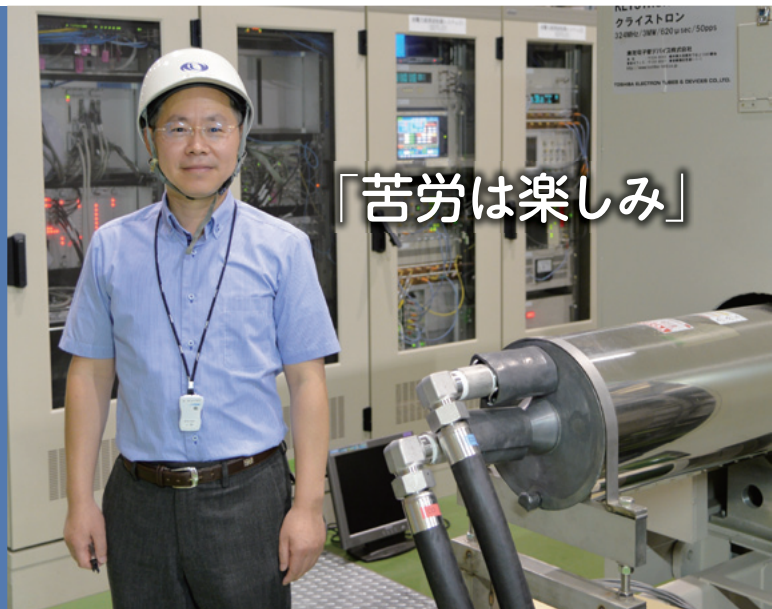
1960年 高知県生まれ
1991年 東北大学大学院 原子核理学専攻
博士課程後期修了
理学博士 (東北大学)
1991年 動力炉・核燃料開発事業団入社
大強度CW電子線加速器の開発に従事
2001年 KEK ATFにて加速器開発に従事
2004年 J-PARCシンクロトロン加速空洞の開発に従事

高品質なビーム供給 と安定運転

加速器の電場の制御、運転と維持を担当し、高品質なビームを供給し新しい物理の世界の発見に貢献している方志高さんにお話を伺いました。

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 加速器第二研究系 准教授
J-PARCセンター 加速器ディビジョン 加速器第七セクション

方志高さん



「苦労は楽しみ」

■専門について

リニアックの加速空洞に入るまでの部分の増幅器や電場の制御を担当しています。専門的に言うと低電力高周波制御、LLRF¹⁾の制御です。加速器では高品質なビームの供給が求められます。そのためには加速空洞の中の電場、振幅と位相を一定に保ち、安定に維持することが重要です。また加速空洞の共振周波数の制御ということも大事で、ずっと安定な周波数を維持できる自動チューニ

ングシステムを世界に先駆けて導入しています。

■震災からの復旧

震災がありました。あの日から半年以上、みんな苦勞しました。建物には大きなダメージがあり、加速器トンネルにも地下水が亀裂から侵入してきました。加速器本体も本来の位置からずれて、たくさんの箇所が破壊されました。これらに対し私たちは、まず全ての機器を点検して、故障したものを修理し、そして全ての機器を再調整しました。また一方

では、復旧作業のほか、J-PARC性能向上のために、いろいろな機器の改善、新機器や新機能の開発を同時に行なっています。

■クライストロン

クライストロンとは増幅器のことで、小さい入力を非常に大きな出力にするためのものです。リニアックの高周波源には周波数324 MHzと972 MHzの2種類のクライストロンが使用され、加速に使われます。324 MHzの横式クライストロンは20台、972 MHzの縦式クライスト

1) LLRF Low-level Radio Frequencyの略。低電力高周波制御のこと。

ロンは25台使用しています。縦式、横式がありスペックは若干違いますが、本質的な区別はありません。

■運転と維持

J-PARCは、夏場はメンテナンスの時期で止まっていますが、秋から利用運転が再開されます。運転中は24時間ずっとユーザーにビームを供給しなければなりません。そのため、ビームが止まるなど何か不具合が出た場合には、すぐにその不具合箇所を特定して修理します。このように加速器の運転状況に応じて、いつも改善開発を積極的に進めて、順調に運転できるようにしています。これも私たちの担当です。RFチームはKEKとJAEAの各メンバーから構成されています。みんな家族のような存在で、協力しながら研究・作業を行っています。

■「苦労」は実は「楽しみ」

加速器の研究は、色々な分野があり非常に複雑です。この中で私が特に面白いと思っているのは「高周波」です。高周波というのは、ビームを加速するための電場です。普段の研究の中で、例えば色々な現象を見て、足らない部分やちょっと不具合がある部分など、どういうふうに改善するか、簡単かつ有効、完璧な方法は何かと考えて、一番いい方法を選んで実現していく。これは私にとっては苦労ではなく、実は楽しみです。

■人との繋がりを大事に

私の場合、高校生の時の物理の先生との出会いがあって、物理に進もうと決心しました。その後、中国科学技術大学に進み、そこで加速器の研究をしました。大学卒業後、この大学で7年間教員を勤め、その間にマスターコースを修了しました。そ

の時の先生の紹介で1998年に日本に渡り、KEK福田茂樹教授のご指導を受け、ドクターコースを修了しました。先生達との出会いがあって、今の私があります。皆さんにも、先生との繋がりを大事にして欲しいです。

■若い皆さんへのメッセージ

加速器の研究は、物理学の新しい発見に貢献します。基礎物理から応用物理まで、物理の世界に興味のある人は、是非、加速器の研究に進んで欲しいです。

PROFILE 方 志 高 (Fang Zhigao)

2001年	総合研究大学院大学 数物科学研究科 加速器科学専攻修了 理学博士
2001年	放射線医学総合研究所 博士号取得若手 研究員
2005年	高エネルギー加速器研究機構 助教
2011年	高エネルギー加速器研究機構 研究機関 講師
2015年	高エネルギー加速器研究機構 准教授

季刊誌創刊に寄せて



J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) では、大強度の陽子ビームから生まれる世界最高強度の二次粒子（中性子、ミュオン、ニュートリノ、K中間子など）のビームを用いて、物質・生命科学から素粒子・原子核物理などの基礎科学の広範囲な科学研究のフロンティアを開拓し続けています。J-PARCの最先端施設を使ったユニークな研究を、より多くの方々に理解してもらいたいという想いを込めて季刊誌J-PARCを創刊すること

にしました。

J-PARCを使って宇宙、物質、そして生命の起源について考える研究の現場、また世界をリードする大強度陽子加速器施設を支える技術開発の現場を、少しでも身近に感じてもらえるよう、今後も進化していく季刊誌にしていきますので、皆様の応援をお願いします！

J-PARCセンター長
齊藤 直人

季刊誌 **J-PARC**
No.1 2015 秋 創刊号

発行：J-PARCセンター
編集：J-PARCセンター広報セクション
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4
<http://j-parc.jp>