



季刊誌

2017

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

NO. 10

加速空洞を知る

加速器の仕組みと、加速空洞の役割
高性能な加速空洞用磁性体 FT3L とは？

interview

加速器の性能を上げるには？
大森千広

「加速器のしくみと働き」

加速器は、荷電粒子に電場をかけることで加速させる装置です。加速器には、まっすぐ加速する線形加速器や、螺旋形に加速するサイクロトロンなど、用途に応じていくつかの種類があります。

J-PARCのMR（メインリング）などで使われているシンクロトロン（円形加速器）は、円形のリングの中で、軌道半径を一定に保ちながら何10万回も加速空洞を通すことで荷電粒子を加速する加速器です。同一リング内を周回させるので、限られた面積で効率よく加速することができます。軌道半径を一定に保つためには、電磁石の磁場と加速空洞の電場の周波数を高度に調整しながら加速する必要があります。

シンクロトロンは主に以下の装置で構成されています。

加速空洞： 荷電粒子に電場をかけて加速する装置。加速器全体の周長に対して、加速空洞の長さは非常に短いです。

偏向電磁石： 荷電粒子ビームの軌道を曲げて円形に回すための電磁石。

四極電磁石： 荷電粒子を収束させるための電磁石。

その他、六極電磁石、キッカー電磁石などを用いて、荷電粒子の塊（バンチ）を調整したり、後段の装置に送り出したりします。

「FT3L 加速空洞」

短い加速空洞の中で荷電粒子を光速近くまで加速するためには、いかに短い距離で高い電場をかけ、高い加速勾配^{※1}を得ることができるかが、重要になります。そこで J-PARC では、高い加速勾配を得ることができる金属磁性体「FT3L」の大型コアを世界に先駆けて開発しました。

FT3L は、従来のフェライトコアに比べ以下の利点があります。

- ・ 飽和磁束密度^{※2}が数倍高い
- ・ 高電圧出力時に特性が劣化しない
- ・ 温度によらず性能が安定している
- ・ ビーム加速の調整が容易

これらの利点により、加速空洞としては画期的な加速勾配を実現できました。

このように、金属磁性体コアは性能の高さや価格の点で優れているため、CERN（欧州原子核研究機構）の LHC（Large Hadron Collider）の入射器群など海外の加速器でも用いられ始めています。

※1 単位長さあたりの高周波電圧。加速勾配が大きいほど、同じ加速空洞の長さでより速く加速できます。

※2 磁束密度（N 極から S 極へ流れる磁気の流れ）の限界。飽和磁束密度が高いほど、強力な磁石になります。

加速器の性能を上げるには？

大森 千広

OOMORI CHIHIRO

高エネルギー加速器研究機構加速器第一研究系

——加速空洞とは？

【共振】で加速する「空洞」

加速器の中で電子や陽子、イオンなどの荷電粒子（電気を帯びた粒子）を加速する仕組みが、加速空洞です。これは、真空パイプの一部を円筒形のセラミックに置き換えて加速ギャップをつくり、そのまわりにリング状の磁性体コアを置き、全体を金属でカバーした構造です。加速ギャップがコンデンサー、コアがコイルの役割をし、コンデンサーとコイルの共振で加速ギャップに高い電場が生じます。交流ですから加速ギャップの電場は荷電粒子を加速する向きになったり、減速する向きになったりします。荷電粒子が塊を作り、加速電場があるときに空洞を通過することですべての粒子を加速します。

——電子より重い、陽子や重粒子を光速まで加速する

光速近くまで加速器で電子を加速すると、陽子や重粒子（様々な原子核のイオン）を加速するのでは必要なエネルギーが大きく違います。陽子は電子よりはるかに重く、重粒子はさらに重いからです。電子は数十 MeV（メガ電子ボルト）の運動エネルギーを与えるとほとんど光速になりますが、陽子はおよそ 1000 倍の数十 GeV（ギガ電子ボルト、10 億

電子ボルト）のエネルギーが必要です。

加速される荷電粒子の集団を、バンチと言います。円形加速器は荷電粒子のビームを曲げて、バンチをぐるぐる周回させながら加速する装置です。1 周する途中に加速空洞を置いて、そこを通るたびにバンチはエネルギーを受け取って加速されます。シンクロトロンでは磁場の変化に同期して粒子の運動量が変わることで細かいビームパイプの中を粒子が回ることができます。このようになるようにバンチが 1 周する周期と加速空洞の周波数を合わせて、バンチが加速空洞を通るときに電場が加速方向になるようにしています。電子は軽いのですぐに光速近くまで加速できるため、周波数はほぼ一定で済みます。しかし陽子は重いのではなかなか光速に近づきません。陽子の加速に合わせて加速空洞の周波数を上げていく必要があります。

——加速空洞のカギを握る磁性体

空洞の中には磁気を通しやすい性質を持つ物質、磁性体を置きます。空洞に加えられた電気エネルギーは電磁誘導により磁性体の中の磁場から加速ギャップの電場に形を変えます。そして再び電場から磁場へと形を変えるのですが、条件がそろえば加えられたエネルギーが蓄えられて、より高い交流電圧を加速ギャップに出すことができます。これが共振です。

電子の加速では周波数が固定なので磁性体は必要ありませんが、陽子の加速には磁性体が必要です。ここが電子の加速器と陽子の加速器の大きな違いになっています。またシンクロトロンでは陽子の加速に合わせて周波数を変えなければなりません。

15 年ぐらい前まで、加速器の磁性体はフェライト（酸化鉄を主体としたセラミック）が使われていましたが、フェライト空洞では共振の幅が狭いので加速に合わせて共振周波数の位置を変える必要がある上に、温度によっても性質が変わるため、必要な周波数で性能を得るには職人的な調整が必要です。

幅広い周波数で高い性能が得られる磁性体があれば、このような調整なしにボタンひとつで誰でも操作できる加速空洞が作れます。それが金属磁性体です。

——手作りでスタートした金属磁性体コア開発



J-PARC製 金属磁性体コア1号

我々が使っている金属磁性体は、メーカーの日立金属ではファインメットという商標で呼んでいます。材料は主に鉄とシリコンで、ニオブやホウ素、銅などを混ぜて溶かしたものを急冷し、まずアモルファス（結晶構造を持たない金属）の薄膜を作ります。これをテープのように巻いて円盤状にしたものを高温で熱処理すると、アモルファスから 10 ナノメートルくらい微細な結晶構造に変わります。ファインメットはフェライトより強い磁場で使うことができるなど、優れた性質を持っています。また金属の結晶には磁化容易軸と言って、磁界が向きやすい方向軸があるのですが、加速空洞の磁場の方向と結晶の磁化容易軸を揃えてやれ

ば、さらに損失が減ります。具体的にはアモルファスに磁場を掛けながら熱処理をすれば、結晶の磁化容易軸を揃えることができます。

——J-PARC だから可能になった

J-PARC の加速器には直径 80cm ほどの金属磁性体が必要なため、そのような大きさを磁場を掛けながら熱処理できる設備を作らなければなりません。

震災直後の 2011 年の夏に、昔の東京大学原子核研究所（現 KEK・高エネルギー加速器研究機構の前身のひとつ）のサイクロトロンで使っていた電磁石を借りて、中にオープンを入れて実験しました。1 回の熱処理で 1 枚の磁性体が作

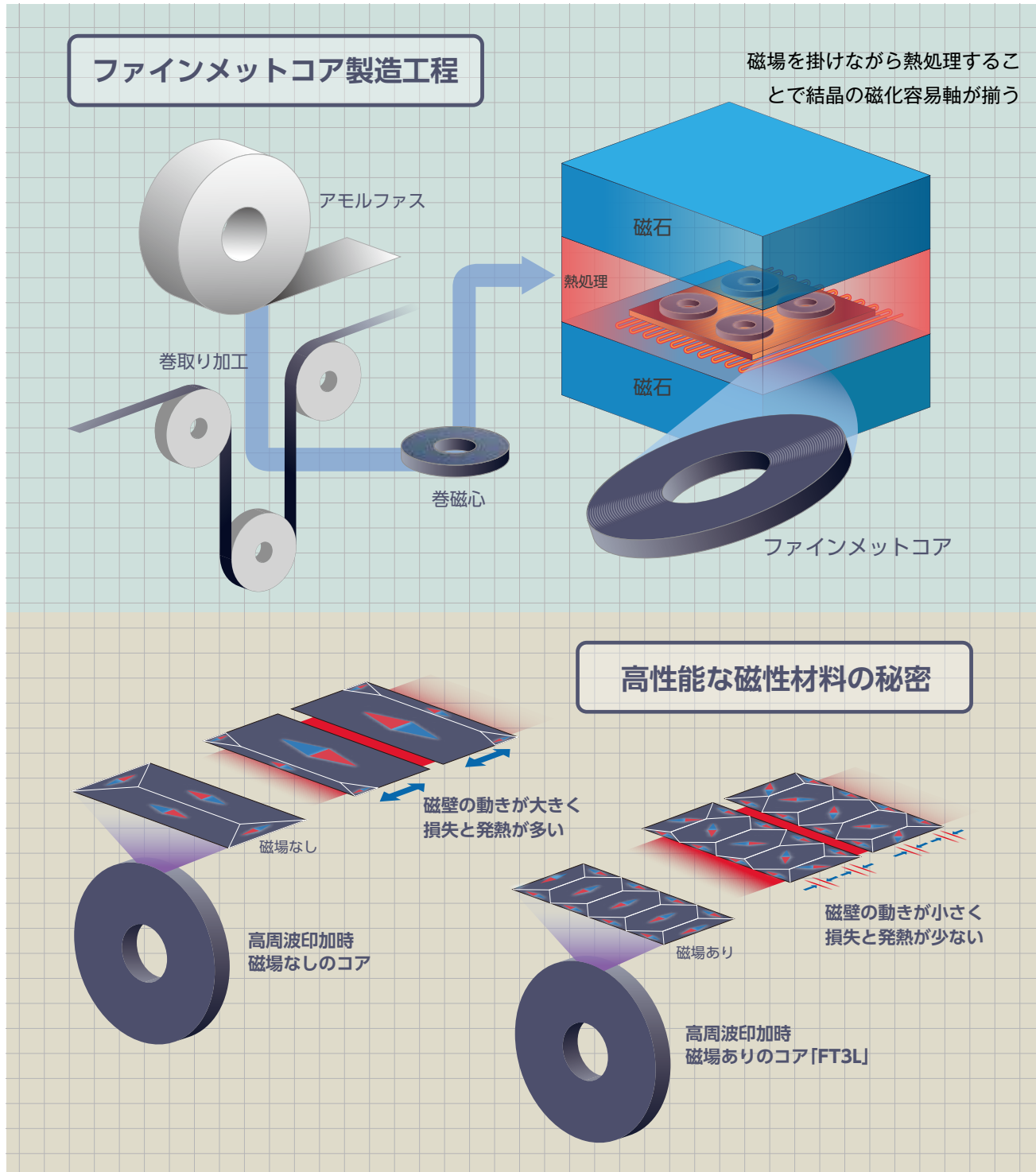
れますが、準備を含めて 1 回 24 時間ほどかかります。現在は日立金属と量産契約を結んで、製作してもらっています。

磁場を掛けながらの熱処理工程は微妙な作業です。J-PARC には高温 μ SR という実験を行える MLF 施設があり、ファインメットが熱処理によってアモルファスからナノ結晶構造に変化する様子を、ミュオンを打ち込んで観察することができます。このような施設は日本には J-PARC しかありませんでした。そこで得られた知見をもとに大型コアの製造に進みました。

最初の電磁石を使った熱処理はハドロン実験施設、2 つめの電磁石ではニュートリノの実験施設を借り、熱処理中の酸化を

高輝度化を目指す LHC では、入射器の大幅なアップグレードを予定しています。PS ブースター加速システムのリニューアルは、LHC 入射器アップグレード (LIU) プログラム内の主要プロジェクトの 1 つです。長年にわたり、低/中エネルギー円形加速器の RF システムは、狭帯域のフェライト装填空洞を使用していました。これにはエネルギーの増加による粒子の回転周波数上昇に追従する高価な調整システムと複雑な電子機器が必要でした。新しい PS ブースターの RF システムは全く異なるアプローチをしています。ファインメット® 複合磁性材料の特有の特性を利用してすることで、調整システムを必要としない広帯域周波数応答を示す空洞を設計することができます。単一の空洞で、PS ブースター (1MHz~18MHz) に必要なすべての全周波数範囲帯をカバーすることができます。さらに、ファインメット® 空洞では、半導体パワーアンプとマルチハーモニック RF の使用、空洞を小型の空洞に分割して実装することが可能となり、性能・信頼性・使いやすさの点で大幅な改善が期待できます。

Mauro Paoluzzi
CERN PS ブースター用新高周波システム
プロジェクトリーダー



防ぐための窒素ガスは、低温施設からもらうことができました。そして高温 μ SR と、様々な設備や研究者、技術者の協力が金属磁性体 FT3L コアの実現には欠かせませんでした。様々な研究施設が集まっている複合実験施設、J-PARC だからこそ可能になった研究と言えるでしょう。

——フェライトの2倍の加速勾配を実現した金属磁性体 FT3L コア

こうして新しい金属磁性体 FT3L 大型コ

アを実現しました。FT3L を使った加速空洞は幅広い周波数で容易に扱えるだけでなく、フェライトでは不可能な高性能も実現しました。加速空洞の加速能力(電場の強さ)を、加速勾配と言います。フェライトを使った加速空洞では1mあたり十数kV程度でしたが、FT3Lを使用するJ-PARC MR 加速器の加速空洞では約2倍の加速勾配を実現しています。J-PARC のMR 加速器はFT3L 金属磁性体空洞を使う事で世界最強クラスの性能を実現しました。

加速空洞を短くできれば、シンクロトロン全体を小さくできます。これは国土が狭い日本にとって、決定的に重要です。J-PARC RCS のように大きなビームタイプの加速器では高い加速電圧が得にくいのですが、RCS は金属磁性体空洞を使うことで350m のコンパクトな加速器を実現しました。フェライト空洞では400m から500m の周長が必要です。



——ヨーロッパの研究機関、CERN にも導入

スイスのジュネーブ郊外、フランスとの国境にある欧州原子核研究機構(CERN)にはたくさんの加速器がありますが、ここでもJ-PARC との共同研究でファインメット空洞を導入しています。PS ブースターという加速器は従来、3種類のフェライト空洞を使用してきましたが、これを2019年までに1種類のFT3L 空洞で置き換える計画を進めています。

既にFT3L 空洞を導入しているものもあります。ブースターから送られてきたビームを加速する役割を持つPS という加速器にFT3L 空洞を導入しビームの品質を向上させようとしています。また反陽子を減速して反物質の製造などに使われるELENA、オーストリアにあるMedAustron というがん治療用の加速器にもFT3L 空洞が使われています。

またCERNでは、陽子よりはるかに重い鉛原子核も加速器で加速していますが、この鉛のビームを作り出すLEIR という加速器にもFT3L より1世代前のファインメット空洞を使用しています。PS ブースターとLEIR を合わせると、CERN での加速器実験のほとんどはどこかでファインメット空洞で加速したビームを使用していることになりそうですから、責任は重大です。

——がん治療にも役立つ加速器

日本でも加速器を使ったがん治療が行われています。千葉県の放射線医学総合研究所にあるHIMACは、実は初めてファインメット空洞を試験させていただいた加速器です。ファインメットを使用したことで磁性体の微調整が不要になり、最初の加速試験でいきなり加速に成功しました。炭素線治療は炭素原子核を加速してがん照射します。がん患者の身体を切ったりせず、体内でがん細胞を破壊することができます。陽子線や炭素線治療

施設ではファインメットの他アモルファスを使った空洞も使われています。

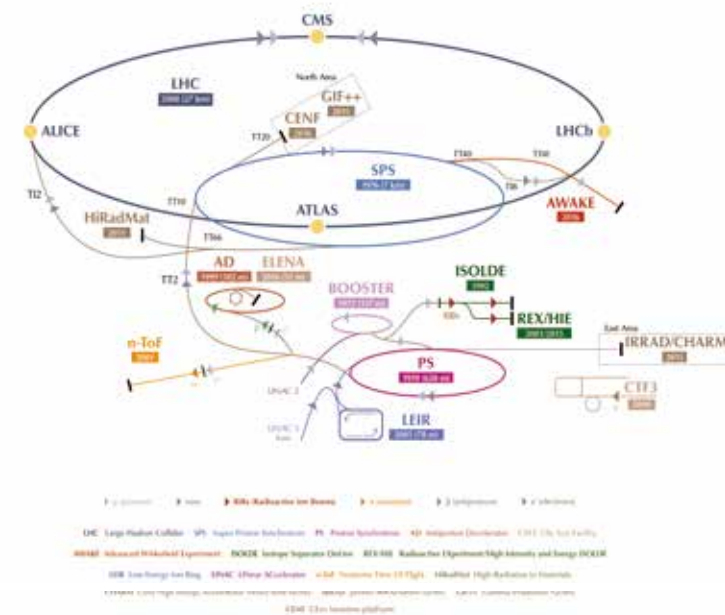
——多様な研究者が、多様な科学を切り拓く

研究は自分の興味も大事なので、役に立つかどうかは二の次でも良いのですが、これまで取り組んできたことはニュートリノやLHCの高輝度化、反物質の研究、更にかん治療のような社会貢献にも繋がっています。

私はもともと素粒子が専門でしたが、加速器の研究者と交流する中で、これは自分に向いているかなと思いました。加速器は1人では作れません。J-PARC 加速器の研究者も素粒子の専門家ばかりではなく、物性や工学、電気やソフトウェアなど様々な分野の人が集まり、協力しています。

またCERN との共同研究も15年ぐらい続いているのですが、お互いの得意分野が異なることが、うまく協力できて波長が合う理由だと思います。シンクロトロンですから、波長が合わないと加速できません(笑)。

面白いことを見つけることが大事です。研究していれば辛い時期もありますが、そういうときこそ前を向いて笑顔で。苦しんで下を向いてやるより、楽しみながら研究の方が良いです。その人に合った研究スタイル、その人だから切り拓ける分野があって多様な研究者がいるのが良いのではないかなと思います。



CERNの加速器構成図 ©CERN
ファインメット空洞導入済み：LEIR, PS, ELENA
導入予定：BOOSTER, AD

