

陽子の加速から電車の加速へ

KEK 加速器研究施設/J-PARC センター

大森 千広

chihiro.ohmori@kek.jp

2019 年 (平成 31 年) 3 月 9 日

1 はじめに

「電車の加速」という高エネルギー界限ではあまり聞かないことばをタイトルとした。これは後で述べるように、われわれが開発してきた広帯域空洞のための技術を鉄道などの輸送システムに応用するための R&D がすでに企業ベースで行われているという話である。今回の記事は 2012 年から続いている LHC 高輝度化のための LHC 入射器アップグレード (LIU: LHC Injector Upgrade) の RF への協力を中心に、金属磁性体を用いた広帯域空洞とその技術の応用についてまとめたものである。

1.1 広帯域空洞の開発

広帯域空洞は、KEK PS などこれまでの陽子やイオン加速器の高周波加速空洞で用いられてきたフェライトの代わりに、金属の薄膜でできた金属磁性体を用いることで実現した空洞である [1, 2]。フェライト空洞が狭帯域であるのに対し、幅広い周波数範囲で高周波電圧を出力できることが特徴である。加速によってリングでの周回周波数が変化するイオンや陽子加速器ではこの違いは大きなものとなる。金属磁性体はアモルファスのほかにナノ結晶材料「ファインメット®」[3] などが使われている。われわれがこの空洞の開発をはじめた背景には、Japanese Hadron Project (JHP), Japan Hadron Facility (JHF) と呼ばれた大強度陽子加速器計画があった。3GeV の RCS (早い繰り返し回数のシンクロトロン) は当時 TRIUMF の KAON 計画や米国の SSC 計画でも検討されていた。しかし、これらの計画の R&D の中で高い性能を持ち早い繰り返し加速に対応できる高周波加速空洞の開発には困難があることが分かってきた。また、日本の計画では中性子利用が計画の主目的の一つだったため、使用する周波数帯が SSC や KAON 計画とは異なるものにせざるを得ず、独自の開発研究が 1995 年から東京大学原子核研究所 (現高エネルギー加速器研究機構) においてスタートした。幸いなことに、われわれが

今使っているファインメット® が 1986 年に発明され [3]、低損失の材料として、従来のフェライトやアモルファスとともに、加速空洞に装填する材料として研究をはじめた。結果として、高電圧でも特性が劣化しないこと、加速に合わせて空洞の共振周波数を変えるための同調回路が不要となるほどの広帯域が確保できることなどから、この空洞の開発に進んでいった [2]。最初に、この種の空洞 (MA Cavity=Magnetic Alloy Loaded Cavity) を加速器で使ったのはフランスのサックレー研究所のイオン加速器である [4]。しかし、これにはバイアス巻き線というフェライト空洞では必須の共振周波数調整機能が使われていた。これに対し日本での金属磁性体空洞の開発では、比較的当初からバイアス巻き線なしの広帯域かつより高い電圧のできる空洞を独自に目指した。

2 空洞の更なる低損失化と高勾配化

2.1 磁場中熱処理

ファインメット® は鉄、シリコン、ボロン、ニオブ、銅からなる合金を一度急冷法によりアモルファスとし、それを高温で結晶化させることで優れた軟磁性特性を得ている。従来の結晶質の材料では粒径が小さくなるに従って軟磁性特性が低下するが、この材料の場合、ナノメートルレベルに近づいたところで、優れた軟磁性特性を発揮する。さらに、この結晶化過程で磁場をかけることにより、B-H 曲線を制御することができる。これは、Fe₃Si ベースのナノ結晶の持つ磁化容易軸が磁場により方向が揃うことによるものである。磁化容易軸の向きの揃った軟磁性材料では磁区構造も変化する。高周波空洞の用途の場合、高周波磁場の向きに対して、磁化容易軸が垂直であれば、磁区の磁壁 (磁区と磁区の間境目) も垂直となるためである。この場合、高周波磁場の向きが変化したとしても磁壁の位置は変わらず、磁区の中の磁荷のみが変化する。無磁場の熱処理でできた磁性材料では磁壁が高周波磁場の向きと平行な磁区が存在し、磁壁移

動が起こることになる(図1)。この磁壁移動は高周波損失の大きなプロセスであり、磁性材料の発熱に繋がる。当初、J-PARC に設置した空洞では無磁場での熱処理により作られたファインメット[®]が使われていた。これに対し、磁場中で熱処理をすることでより高性能な空洞ができるのではないかと考えたわけである。とは言え、J-PARC 加速器に使えるサイズの大型磁性体リングを磁場中熱処理できる装置は世の中にはなかった。また、このような装置が必要となる用途はわれわれのみであった。このため、自分たちの力で、大型磁性体の製造装置を作るところからはじめなければならなかった。

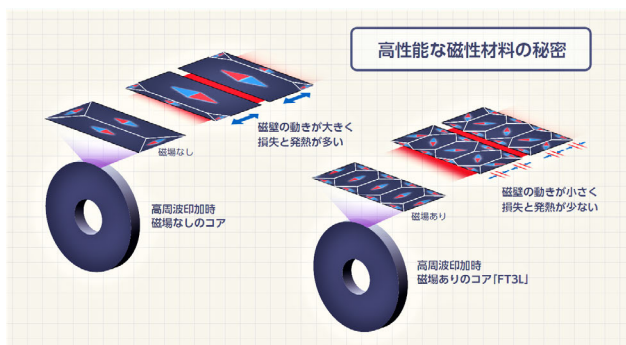


図 1: 高周波による磁壁移動の違い。J-PARC 季刊誌 No.10 より [5]。

2.2 大型磁性体コアの磁場中熱処理

J-PARC 加速器に用いられている磁性体コアは RCS で外径 85 cm, MR で 80 cm の大型のものである。とは言え、磁場が無ければ、このサイズのものを処理するオーブンは市販されている。磁場中熱処理ではまず磁場をかけるための大型電磁石が必要となるが、幸い KEK には高エネルギー実験に使用した電磁石があり、まず素粒子原子核研究所の田中万博氏に相談することから開発は始まった。そのとき、提案されたのが Kappa 電磁石(図2)であり、最終的な量産装置に使われている。これに合うオーブンは当然ないので、これを製作するために科研費を申請したのだが、不採択が3年続くことになった。結局 KEK の予算を工面してもらい、オーブンを制作することができたのだが、すぐに Kappa 電磁石を使うことができず、代わりに J-PARC ハドロンホールに設置され実験まで少しの期間余裕のあった FM 電磁石を借りて 2011 年に製造試験をはじめることになった(図3)。最初に製造したコアの写真が図4である。これまで J-PARC 加速器で使われていたものと比較して、高周波損失を半分にすることができた[6]。この製造試験で制作したコアは、その後 MR の空洞に使われ空洞の性能が向上することを実証した。その後製造試験は終了し、Kappa 電磁石を用いた量産へとつながっていった。



図 2: Kappa 電磁石を使った磁場中熱処理炉。Kappa 電磁石は改造により一回り大きくなっている。



図 3: リング RF グループに加え日立金属と日本アドバンステクノロジーの協力で製造試験をおこなった。

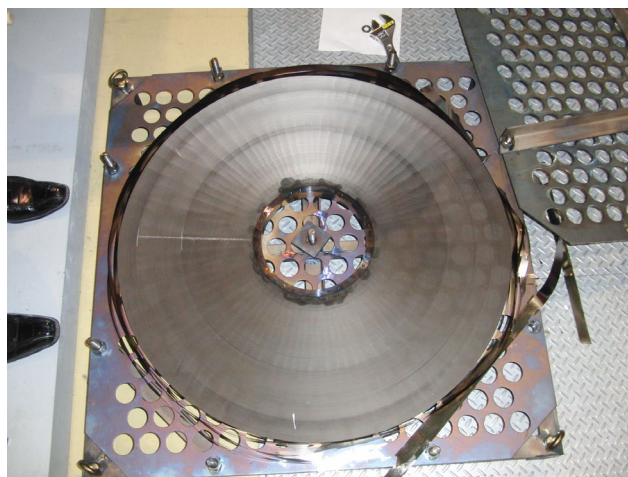


図 4: 磁場中熱処理により最初に製造した大型磁性体コア。

2.3 J-PARC だからできた開発

大型コアの開発ができた背景には J-PARC が多目的の研究施設であることがある。量産機の試験はニュートリノ施設を借り、低温グループから窒素の供給を受けながらおこなった。また、MLF のミュオンビームを用いた小サンプルでのナノ結晶生成の観察で得られた貴重な情報なしには製造はできなかった。X 線を用いた観察よりも高感度でナノ結晶生成で生じる内部磁場を観察することで、より低い温度で結晶化が始まっていることが分かった。言い換えれば結晶化が始まらない温度が分かることにより、初期に頻発した熱処理炉の故障にも的確に対処することができた。詳細については紙面の都合で割愛する。現在もミュオンを用いたナノ結晶の研究は、磁場がナノ結晶生成においてどのように機能しているかを調べることを目的としてファインメット® の発明者である吉沢克仁氏も参加し、継続している (図 5)。

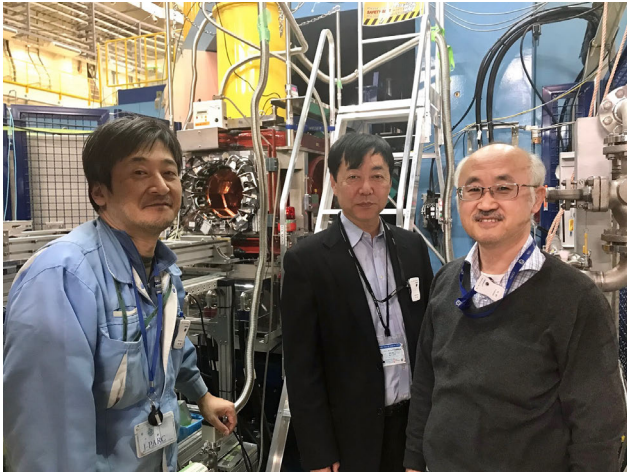


図 5: MLF のミュオン S ラインで行われているナノ結晶生成過程における磁場の影響の研究。左からミュオングループの幸田章宏氏、吉沢氏、筆者。

2.4 MR 空洞の性能向上

現在、MR のすべての高周波加速空洞には、磁場中熱処理によって製造された磁性体コアが使われている (図 6)。これにより現時点では次の 3 つの点で加速器運転に貢献出来ている。

- 空洞発熱減少による安定した加速器運転を実現した
- 出力電圧の余裕度による 2 次高調波電圧増加。これによってバンチ長が長くなり空間電荷効果を緩和されビーム強度の増強に繋がった
- 予備空洞を準備できたことで、空洞電源など故障時への素早い対応が可能となった

ただし、2022 年以降の MR 高繰返し運転では、より高い加速電圧が必要となるため、出力電圧の余裕度は無くなり、新たに 2 次高調波や予備システムを導入することが求められている。高周波機器の高電圧部品の多くは寿命があり、定期的な交換と故障時の対応体制が常に必要となるためである。ところで、図 6 右上のパイプ 2 本は空洞専用の冷却水である。鉄を主成分とする磁性体コアの入った空洞と電磁石系を分離する工事はニュートリノ実験の多田将氏らに協力してもらった。

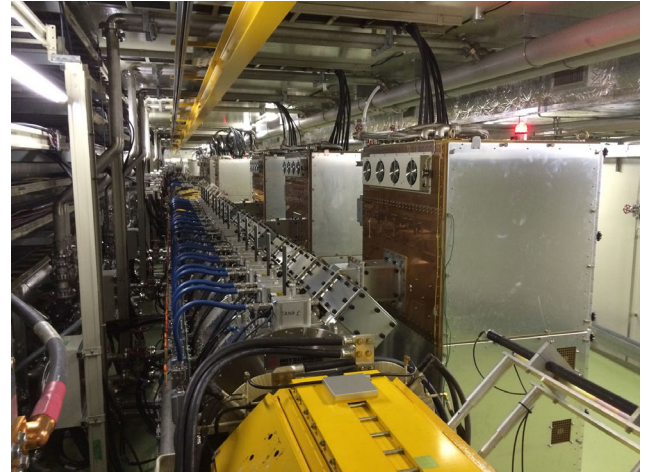


図 6: J-PARC MR に設置された高周波加速空洞。磁場中熱処理によって製造された大型磁性体コアが装填されている。

3 CERN との国際協力

2010 年あたりから、CERN のブースター加速器の高周波システムの老朽化対策として、広帯域空洞をバックアップとして考えたいとの相談があった。ただ、磁場中熱処理しないコアを用いた場合、性能がぎりぎりでも余裕もなく不安があった。これに対し、KEK/J-PARC で磁場中熱処理をしたコアを開発していること、80 cm は無理でも 30 cm であれば、その時点でも実現可能かもしれないと提案し、試作がスタートした。2011 年のスペインでの加速器会議 IPAC11 の帰りに、そろそろ納品されているだろうと期待して CERN を訪れた。ところが日立金属のタイ アユタヤ工場からの納品が遅れており、その場で日本に電話をかけ色々交渉して出荷の手配をおこなった。そして、帰国した直後のことだが、アユタヤで洪水があり多くの工場が水につかっていると報道されていた。作ったコアも全滅かと思ったのだが、幸いその直前に出荷されたそうで、その後無事 CERN に到着した。このコアの一部はブースターで試験され、また一部は CERN が協力しているオーストリアの医療加速器で使われている。CERN との共同研究は、ぎりぎりのところで何とかスタートすることができた [7]。

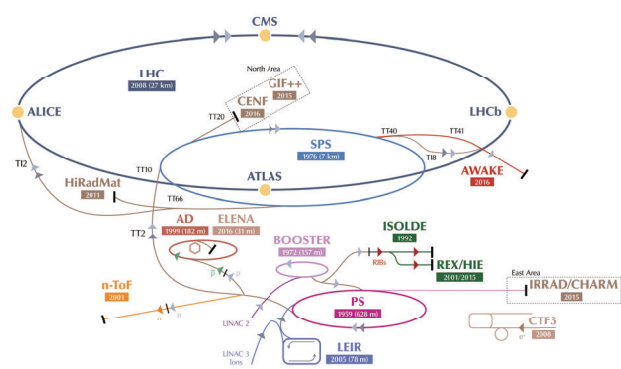


図 7: CERN の加速器構成。

CERN の加速器は図 7 のような複雑な構成となっている。LHC は周長 27 km の巨大加速器で山手線より少し小ぶりで、だいたい名古屋の名城線くらいの大さきである。LHC での陽子陽子衝突ではライナック-ブースター加速器-PS-SPS-LHC と多段構成となる。イオン衝突ではライナック-LEIR (Low Energy Ion Ring)-PS-SPS-LHC という構成である。それぞれの加速器には実験ユーザーがついておりブースター加速器であれば ISOLDE, PS であれば反陽子ビームのユーザー, SPS では遅い取り出しユーザーなど多数の実験が行われている。反陽子ビームは減速リング AD で減速されたのち、後述の ELENA でさらに減速される。PS と SPS のビームは IRRAD/CHARM と呼ばれる放射線照射施設にも供給され、後述の半導体アンプの放射線損傷試験は CHARM にて行なった。

3.1 イオンビームから陽子ビームへ LIU への日本の貢献

私が初めて CERN と共同研究をしたのは LHC での重イオン衝突のために反陽子の減速リングだった LEAR を鉛を加速する LEIR に改造したときだった。2002 年に協定を結び、空洞（筐体）を作ることと交換に J-PARC 用の半導体アンプの原型を作ってもらうこととした。当時われわれは半導体アンプの故障で困っており、これはとてもありがたい話であった。この半導体アンプは、日本で量産され J-PARC の RCS と MR 両方で 140 台以上が稼働している。LEIR は図 8 にあるようにコンパクトな加速器で、空洞が設置できるスペースは限られていることがわかる。旧来のフェライト空洞では 1 台しか設置できないため、空洞故障時には LHC での鉛ビーム衝突実験そのものも停止になる。このため、予備機も含め 2 台設置できるようにコンパクトな空洞が必要だった。最終的に広帯域空洞は 1 台で必要な加速はもちろん 2 次高調波やバンチ回転もできる期待以上の空洞となった。

CERN はさらに予備として 3 台目の高周波増幅器も用意しており、LHC 計画のための高い稼働率に対する執念を感じた。また、LHC に関わるすべての装置は電子ファイルとして図面を管理することになっており、空洞の図面もすべて DXF ファイルとして提出した [8]。

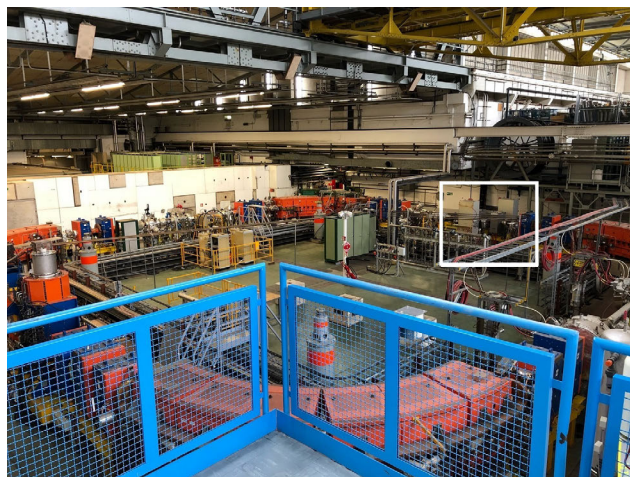


図 8: 重イオン加速器 LEIR。イオン加速器のため、天井シールドがなく近くに設けられた見学ポイントから全体をみることができる。広帯域空洞がおかれている部分を白く囲った。

LEIR の加速空洞は順調にトラブルもなく稼働したことはもちろんだが、ビーム調整をしている人たちに強い印象をあたえた。一つは、ビーム調整が簡単になったということである。もう一つは、フェライト空洞ではできなかったこと（2 次高調波やバンチ回転）が可能になった点である。こうした LEIR 空洞での成功が、数年後にブースターの空洞も広帯域空洞にしたいという動機につながったと聞いている。このときの共同研究との違いとして、LEIR の広帯域空洞では基本設計は KEK によるものだったが、ブースター加速器では CERN の Mauro Poluzzi 氏の基本設計によるものになったことがある (図 9)[9]。

3.2 ブースター加速器への貢献

ブースター加速器のもっとも際立った外見的特徴は 4 階建ての加速器 (図 10) である点だと思う。偏向電磁石や四極電磁石、高周波空洞も 4 台が積み重なった構造となっている。特に入出射部は圧巻で線形加速器からのビームが 4 つのリングへと振り分けられ、加速後取り出されたビームが今度は一つにマーキングされている。この 4 階建て構造のため、ブースターは早い繰り返しの加速器でなくても PS に短時間に 4 バンチのビームを一瞬で打ち込むことができる。ただ、近年では 6 バンチを PS に入射することがあり、この場合はブースター 1 サイクル分を待つことになっている。LIU では、この

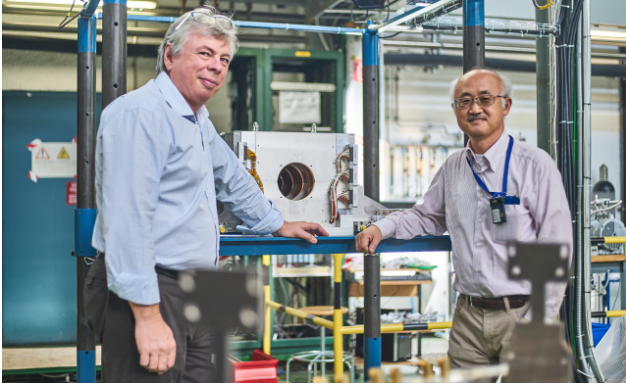


図 9: Booster 空洞の前で Poluzzi 氏と筆者 (CERN 2017 Annual Report の写真ページより) ©CERN。この空洞を 4 段に重ねたものが図 10 右である。

ブースターの入射と出射のエネルギーを上げ、PS での低エミッタンスビームを実現することで LHC 高輝度化に結び付けようとしている。この際、これまでのフェライト空洞が老朽化していること、ISOLDE でより強度の高いビームが要求されていることから、高周波システムの強化が計画された。当初はフェライト空洞を駆動する増幅器などを増強することが基本であった。オブションとしての検討のために設置された最初の広帯域空洞が写真左である。4 階建ての一番上のリングにのみ設置されていることがわかる (図 10 左)。ここはリングの内側と外側を行き来するためのスペースにもなっている。CERN と J-PARC の両方で様々なビーム試験や実際の運転での長期間での使用など様々な試験が行われた。こうした検討の中で広帯域空洞を用いることでフェライト空洞にくらべ大幅にコストを削減することができるだけでなく、予備機も含んだ高性能な高周波システムも実現できるということが確認され、広帯域空洞が実施案として CERN で承認された。これまで 3 種類のフェライト空洞が別々にカバーしていた帯域を 1 種類の広帯域空洞でまかなうというものであった。図 11 に広帯域空洞の電圧波形を示す。加速に使用する基本波 (図 11 左) に 2 次高調波を加え (図 11 中)、さらに 10 次高調波も加えている (図 11 右)。図 11 の 10 次高調波の波形はノイズのようにしか見えないが、これによりビームのエミッタンスを積極的に制御している。図 10 右は 4 段積みの加速空洞で、同じものを 3 台製造している。KEK はコアの 4 割弱を供給すると同時に製品管理面、つまり初期のトラブルシューティングでも貢献した。これまでフェライト空洞を設置していたスペースは 4 か所あったが広帯域空洞では 3 か所で済むため、1 か所がフリースペースになった。このことは将来のブースター性能向上にとって有意義だと思う。このフリースペースを生み出したのは言うまでもなく、磁場中熱処理による磁性体コアの性能向上であった [12, 13, 7, 15]。

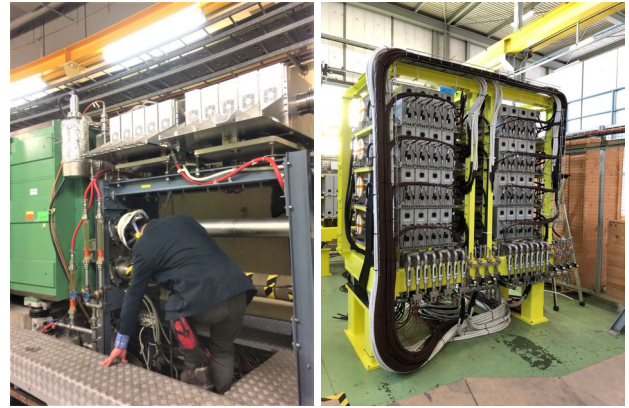


図 10: ブースター加速器の 4 段目に設置された広帯域空洞 (左) と今年フェライト空洞と置き換えられる 4 段重ねの広帯域空洞 (右)。左図では一緒に訪れた田村文彦氏がトラテープで巻かれた一番下のビームパイプの下を潜り抜けようとしている。

3.3 PS 加速器への貢献と LHC 高輝度化

CERN PS は稼働開始が 1959 年というもっとも古いシンクロトロンだが、いまだに現役で LHC 入射器群の一つとして CERN 加速器を支えている。この PS のすごいところは単にビームを加速するだけではなく、ブースター加速器から来たビームバンチを分割し、次の SPS にあったバンチ構造に変える役割も担っていることである。この過程はビームの入射後の加速前と加速後の取り出し直前の 2 回に分けて行われている。この PS で加速の後半で縦方向結合バンチ不安定性と呼ばれる現象が観測された。これによって、ビームバンチが振動し SPS に行くビームのエミッタンスが悪化するため、バンチ強度を増やすことができず LHC でのルミノシティ向上の妨げになる。このビーム不安定性の対策として当初はフェライト空洞の 1 台をダンパー空洞として使っていた。しかし、LHC の高輝度化に向けバンチ強度を上げるためには、多数のビームバンチの振動モードを抑え込む必要が生じた。この対策として、広帯域空洞でダンパー空洞を作り多数のモードの振動を同時に減らしていく試験が始まった。図 12 はダンパー空洞の測定をする長谷川豪志氏と設置後のダンパー空洞である。このダンパー空洞によって結合バンチ不安定性のダイポールモードはきれいに抑えることができた (図 13)。しかし、困ったことに 4 極モードと呼ばれるバンチ長の振動がさらに強度を上げていくと顕著になってきた。最終的に CERN の Heiko Damerau 氏らのアイデアにより、PS にある 40 MHz の空洞でランダウダンピングを促進し、LHC の高輝度化に必要なビーム強度を実現することができている (図 14)[11]。

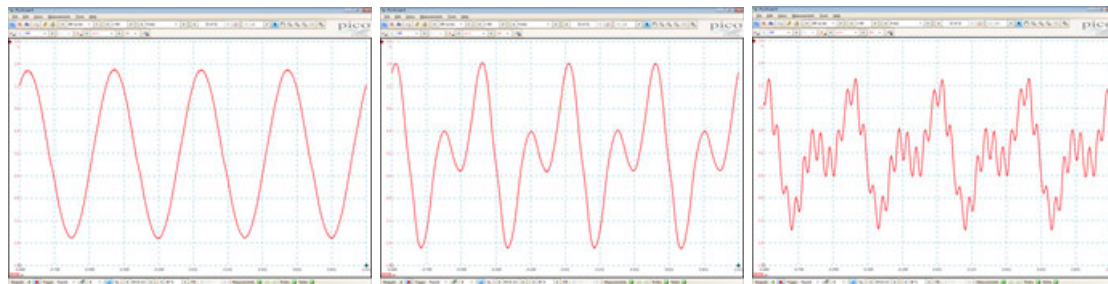


図 11: 広帯域空洞の加速電圧 (M. Paoluzzi 氏提供)。左から基本波のみ, 2 次高調波混合, さらに 10 次高調波混合。3 種類の異なる RF を混合して出力することで高性能なビームを実現できる。

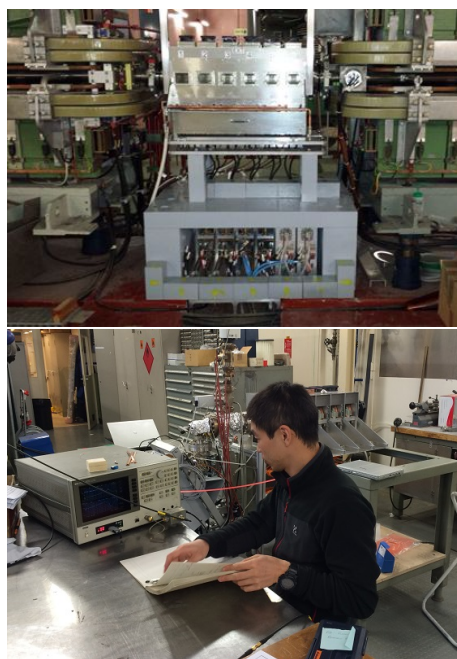


図 12: PS トンネルに設置されたダンパー空洞 (上) と設置前に空洞の特性を測定する長谷川氏 (下)。ダンパー空洞を駆動する広帯域の半導体増幅器は鉄シールドの中に設置されている。

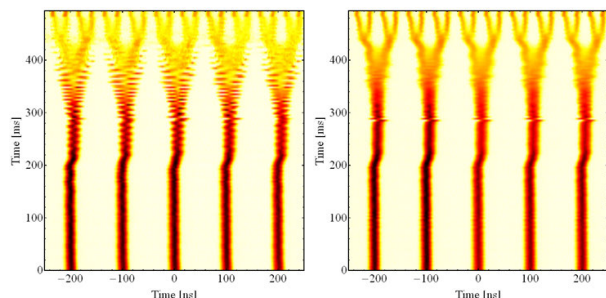


図 13: 加速後半から現れる結合バンチ不安定性の様子 (H. Damerau 氏提供)。10 MHz 帯の空洞により加速されたバンチは SPS の高周波 (200 または 400 MHz) によって捕獲するには大きすぎるため、加速終了後バンチは 4 つに分割される。この際、左図のようにビームが振動していると SPS の高周波で捕獲できなくなる。ダンパー空洞より右図のように振動を抑えることができる。

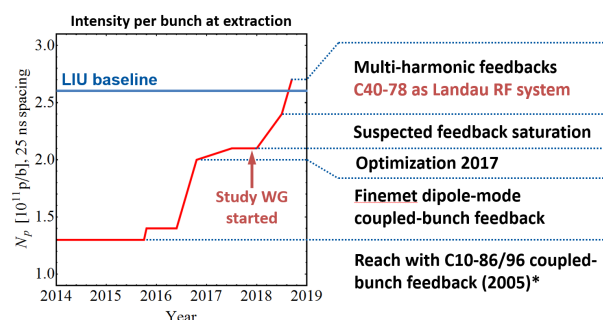


図 14: PS におけるビーム強度増強の経緯 (H. Damerau 氏提供)。これまでの運転では C10 (フェライト空洞) が用いられてきた。LHC 高輝度化に向け、広帯域空洞に加え C40 と呼ばれる 40 MHz の空洞が Landau RF system として導入され、目標強度 (2.6×10^{11} p/b) を達成することができている。

3.4 反陽子の減速

CERN でもっとも新しい加速器 (減速器) は反陽子を減速する Extra Low Energy Antiproton Deceleration ring (ELENA 図 15) である。これは Antiproton Decelerator (AD) で 5.3 MeV まで減速した反陽子をさらに 100 keV まで減速するためのものである。2011 年だったか CERN のカフェテリアで理研の方に ELENA の RF が難しいという話を聞いて、広帯域空洞使えばいいんじゃないと軽口をたたいたが、結局自分がそれほどかわらないうちに広帯域空洞がセットされ減速に成功していた (図 16)[10]。空洞の設置とか、もう少し参加したかったと思うが、空洞のコアは量産機で CERN 用に焼いた最初のコアなので満足はしている。私にとって初めての減速なので、よく考えれば当たり前のことかもしれないが聞くことが色々新鮮であった。減速するとビームのエミッタンスは広がるので途中と減速後に電子冷却する必要があるが、100 keV 反陽子を冷却する電子のエネルギーは約 50 eV である。RF 機器もより低い周波数まで帯域をのぼす必要があり、100 kHz での動作が必要となる。このほか、電磁石のリップルも相対的に影響が大きくなっていくなど減速の難しさを知ることができた。

現在 AD リングではフェライト空洞により減速を行っているのだが、こちらも老朽化などの問題があり、ブースター加速器で試験に使っていた広帯域空洞をこちらに移設することになっている。これにより、図7で示した CERN のスイス キャンパスにある稼働中の全てのシンクロトロンに広帯域空洞が入ることになるのはすこし自慢である。中には「メイラン地区 (CERN スイス キャンパス) の広帯域化」と言っている人もいる。

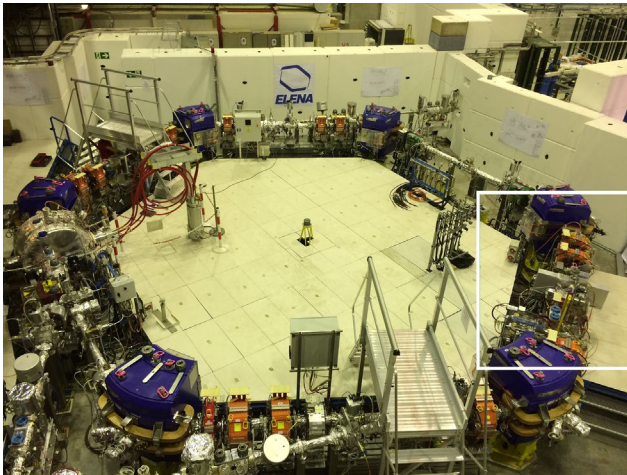


図 15: CERN であらたに建設された反陽子減速リング ELENA。広帯域空洞が設置されている場所を白く囲っている。

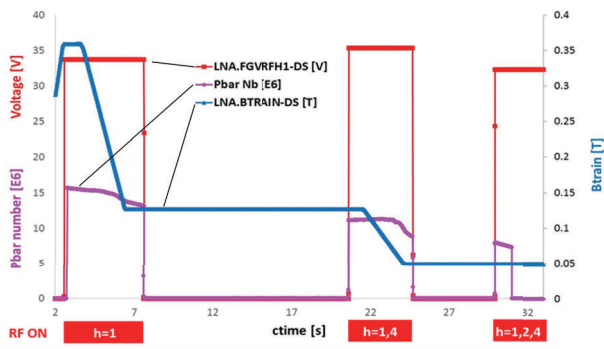


図 16: 反陽子減速リング ELENA での減速の様子 (M. Angolleta 氏提供)。加速リングとは逆に高いエネルギー=高い磁場で入射されたのち減速される。減速後反陽子の冷却のため広帯域空洞の高周波電圧を落としている。冷却後は再度電圧を印加し2度目の減速をおこなっている。この後も空洞電圧を落とし、冷却が行われている。空洞電圧がなくなるとビーム電流の測定ができないため、粒子数が一時的に0になっている。

3.5 耐放射線性アンプの開発

イオン加速器 LEIR 以外の広帯域空洞は半導体アンプにより駆動される。ご存知のように、半導体は放射

線による損傷があるため、これについても対策を行っている。われわれが使う半導体は MOSFET であるが、DMOS と呼ばれるものはシングレイメントによる損傷が少なく、照射線量によるバイアスドリフトを補正することで、寿命を延ばすことができる。CERN の中にある照射施設 CHARM での試験では中性子などを含んだ環境下で 2 kGy を照射、また日本の高崎にある量研機構では 8 kGy までガンマ線を照射し、両者ともゲイン低下が 1 dB 程度以下であることを確認している。ブースター加速器ではビームロスの少ない場所を選ぶことで約 100 年に相当する長寿命が期待できる。この技術をさらに一歩進めて、線量の高い PS 加速器でも数年使えるアンプとして 10 kGy を目標に J-PARC での試験を準備している。

4 大型コア製造技術と電車の加速

話を磁場中熱処理炉にもどしたい。J-PARC MR のビーム増強、CERN との LHC 入射器アップグレードの協力を可能にしたのは、われわれが開発した大型の磁場中熱処理炉であった。この装置は加速器用コア製造を目的に製作したが、用途をそれにのみ限る理由はない。近年電力変換に用いるスイッチング素子として SiC や GaN などのより高い周波数での動作が望まれるものも多くなりつつある。この際に従来のケイ素鋼板などで作るトランスに比べアモルファスやさらに低損失のナノ結晶材料は性能面で優位であることが指摘されている (図 17)。ナノ結晶材料は電気・電子・情報通信機器はもちろん電気自動車の充電回路など様々な用途に使われている。これを一歩進め、より高効率で低損失な電力変換装置への応用として大型の低損失トランスを製造するために、われわれが開発した磁場中熱処理炉を利用できないだろうかとの提案がファインメット®の製造メーカー日立金属からあった。KEK での慎重な議論を得て、省エネルギー社会の実現という点で社会貢献にもなるため、KEK と日立金属との間で契約が昨年まとまった。これにより、磁場中熱処理炉を用いた低損失なトランスの開発研究が進められている。この主眼は大電力を使用する鉄道などの公共交通システムであり、実用化できれば省エネルギー効果の大きな分野でもある。

5 おわりに

研究開発と市場投入 (製品の実用化) の間には「死の谷」と呼ばれるギャップが存在するといわれる。加速器に使われる大型装置はこれまでも、FNAL の超伝導電磁石や KEK PS のサイリスタ電源など多くの技術で最先端技術を商用化する間の橋渡しをしてきたように思う。

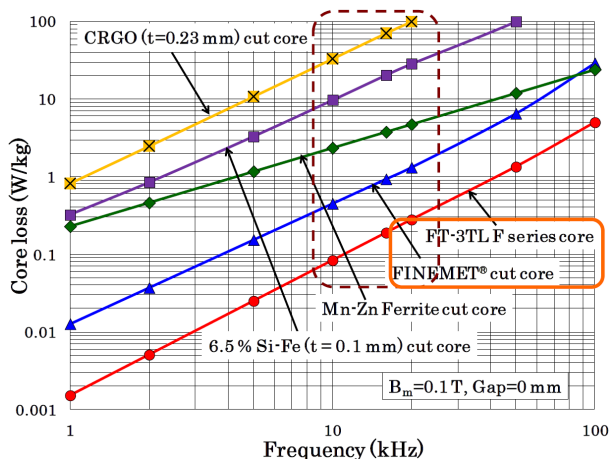


図 17: トランス用磁性材料の損失の比較 (日立金属株式会社提供)。電磁鋼板, ケイ素鋼板にくらべ磁場中熱処理したナノ結晶材料 (ここでは FT3TL) が 100 倍以上の低損失を実現していることが分かる。

今回の大型磁性体コアの磁場中熱処理炉も, 公共交通システムの省エネルギー化など社会に貢献できることを期待している。

磁場中熱処理炉の開発においては J-PARC 加速器をはじめ, ハドロン, ニュートリノ, 低温そしてミュオングループに協力していただいた。コア製造試験では J-PARC リング RF グループの他日本アドバンステクノロジーの方々にも協力をいただいた。KEK ERL グループの方々には Kappa 電磁石の仮置き場所として, 建設直前のもっとも忙しい時期に場所を提供していただいた。KEK の尾崎敏幸氏には Kappa 電磁石電源故障のたびにお世話になりました。J-PARC MR 空洞製造では日立金属, 東芝, 三菱重工のほか, 春川鉄鋼, 下村漆器店の優れた技術に助けられました。また, CERN との共同研究では KEK 加速器, ATLAS グループに多岐にわたり助けていただいた。また半導体アンプ試験では量子科学技術研究開発機構の施設共用制度, PSI および CERN CHARM 施設, J-PARC MR コリメータ部を利用しました。また科研費 18K11930 により現在の照射試験を準備した。最後に私の CERN 出張中の心の支えを 図 18 にしめす。

参考文献

- [1] C. Ohmori *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 112002 (2013).
- [2] C. Ohmori *et al.*, Proc. of PAC99, pp413-417 (invited talk).
- [3] Y. Yoshizawa, S. Oguma and Y. Yamauchi, J. Appl. Phys., **64**, 6044(1988).



図 18: CERN のクロワッサン 3 種類。手前がアーモンドクロワッサン (通称くぜパン), 中のアーモンドクリームの甘さが時差ぼけで眠い日の朝食に最適である。

- [4] C. Fougeron *et al.*, Proc. of EPAC90, pp961-963.
- [5] J-PARC 季刊誌, No. 10(2017), 「加速空洞を知る」.
- [6] 加速器研究施設トピックス 2011/6/27 大強度・高品質陽子ビームの実現を目指して～加速器用高インピーダンス金属磁性体コアの製造に成功～
- [7] 加速器研究施設トピックス 2012/3/8, 「J-PARC の国際協力について～LHC 入射器アップグレードのための CERN-KEK 共同研究～」
- [8] R. Garoby *et al.*, Proc. of PAC2005, pp1619-1621(2005).
- [9] M. Paoluzzi *et al.*, Proc. of IPAC19, to be submitted.
- [10] M. E. Angoletta *et al.*, Proc. of IPAC19, to be submitted.
- [11] H. Damerau *et al.*, Proc. of IPAC19, to be submitted.
- [12] CERN Courier vol. 57 No. 6 July/August p. 12 " LHC luminosity upgrade accelerates " .
- [13] Bulletin for the CERN Community, No. 29-30/2017, July 2017, "A NEW ACCELERATION SYSTEM FOR THE PS BOOSTER " .
- [14] J-PARC ハイライト特集「日欧の加速器の高性能化に貢献 - J-PARC, CERN で使う金属磁性体を製造 - 」 (2017.11.28)
- [15] Bulletin for the CERN Community, Issue No. 5-6/2019, " LS2 Report: metamorphosis of the Booster "