

J-PARC リニアックにおける 181MeV 加速の達成

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

池上 雅紀

masanori.ikegami@kek.jp

2007年3月12日

1. はじめに

2007年1月24日、J-PARC リニアックにおいて目標エネルギーである181MeVの加速に成功した。J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と日本原子力研究開発機構(JAEA)が共同で茨城県東海村に建設している大強度陽子加速器施設である。J-PARC 第一期計画の加速器は181MeVのリニアック、3GeVの速い繰り返しのシンクロトロン(Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、50GeVの主リング(Main Ring, MR)から成り、リニアックの出力ビームエネルギーについては、第二期に移行する前に環結合型結合空洞リニアック(Annular-Coupled Structure linac, ACS)を追加し、400MeVに向上させることが計画されている[1,2]。図1はJ-PARCのレイアウトを示した図であり、図2は最近撮影されたJ-PARCサイトの航空写真である。

計画第一期の加速器の建設は2001年から開始され、2008年3月に終了する予定である。図3、図4に示すように、RCSはすでに建屋が完成し機器のインストールも完了しつつある。MRの建設も最終段階に入り、建設が完了したセクションから機器のインストールが始まっている。J-PARC リニアックは2006年3月に建屋が完成し、7月から8月にかけての機器の最終アライメント、9月から11月にかけての高周波空洞の高電力コンディショニングを経て、11月20日にリニアック単独のビームコミッショニングを開始した。今回のビームコミッショニングは2007年6月末までおこなわれる予定であり、夏期のシャットダウンを経て、下流のRCSまでを含めたビームコミッショニングとして9月下旬に再開される予定である。また、リニアックの初段部分については、東海村のJ-PARCサイトへのインストールに先立ち、2002年から2004年にかけて高エネルギー加速器研究機構のつくばキャンパスでビームコミッショニングをおこなっている[3-7]。

J-PARC 加速器の特色やつくばキャンパスにおけるビームコミッショニングについては過去の高エネルギーニュース[1]で詳しく報告されているので、本稿では概要を述べるにとどめ、J-PARC サイトで現在おこなわれているリニアックのビームコミッショニングに重点をおいて報告する。

2. J-PARC リニアック

2-1. 概要

J-PARC リニアックのビームコミッショニングについて述べる前に、まず、J-PARC リニアックにおいて求められているビーム性能とその背景について簡単に整理しておきたい。

J-PARC のリニアックは、図5に示すように3MeVのRFQ(Radio-Frequency Quadrupole)リニアック、50MeVのドリフトチューブリニアック(Drift-Tube Linac, DTL)、181MeVの機能分離型ドリフトチューブリニアック(Separate-type DTL, SDDL)の三つのタイプの加速構造を組み合わせて、イオン源で発生した50keVの負水素イオンビームを181MeVまで加速する[1,2]。RFQは長さおよそ3mの空洞1台、DTLは長さおよそ9mの空洞3台からなる。また、SDDLは長さおよそ1.4mから2.6mの空洞30台からなっている。各空洞の運転周波数は324MHzであり、高周波電力は最大出力3MWのクライストロン19本によって供給される。

このように複数のタイプの加速構造を組み合わせてビームを加速するのは、いうまでもなく、電子や陽電子の場合と異なり、負水素イオンの速度がすぐに光速に近づかないためである。加速する粒子の β が異なると電力効率のよい加速構造が異なるため、J-PARC リニアックでは上記のような三つのタイプの加速構造を組み合わせた構成を採用している。

このことはまた、負水素イオンの加速においては各加速空洞に供給する高周波電場の位相と振幅をとくに精密に調整する必要があることを意味している。**一般にリニアックでは荷電粒子は高周波空洞の中の加速ギャップで電場を受けて加速される。**加速ギャップには高周波の電場がかかっているため、粒子が次の加速ギャップに到達したときに再び加速される位相に乗るように、加速ギャップの間隔が調節されなければならない。粒子の速度が光速に近づいてしまえばこの間隔は一樣でよいが、上述の負水素イオンのように加速に応じて β が大きく変化していくときには、それに応じてギャップ間隔も調節する必要がある。ギャップ

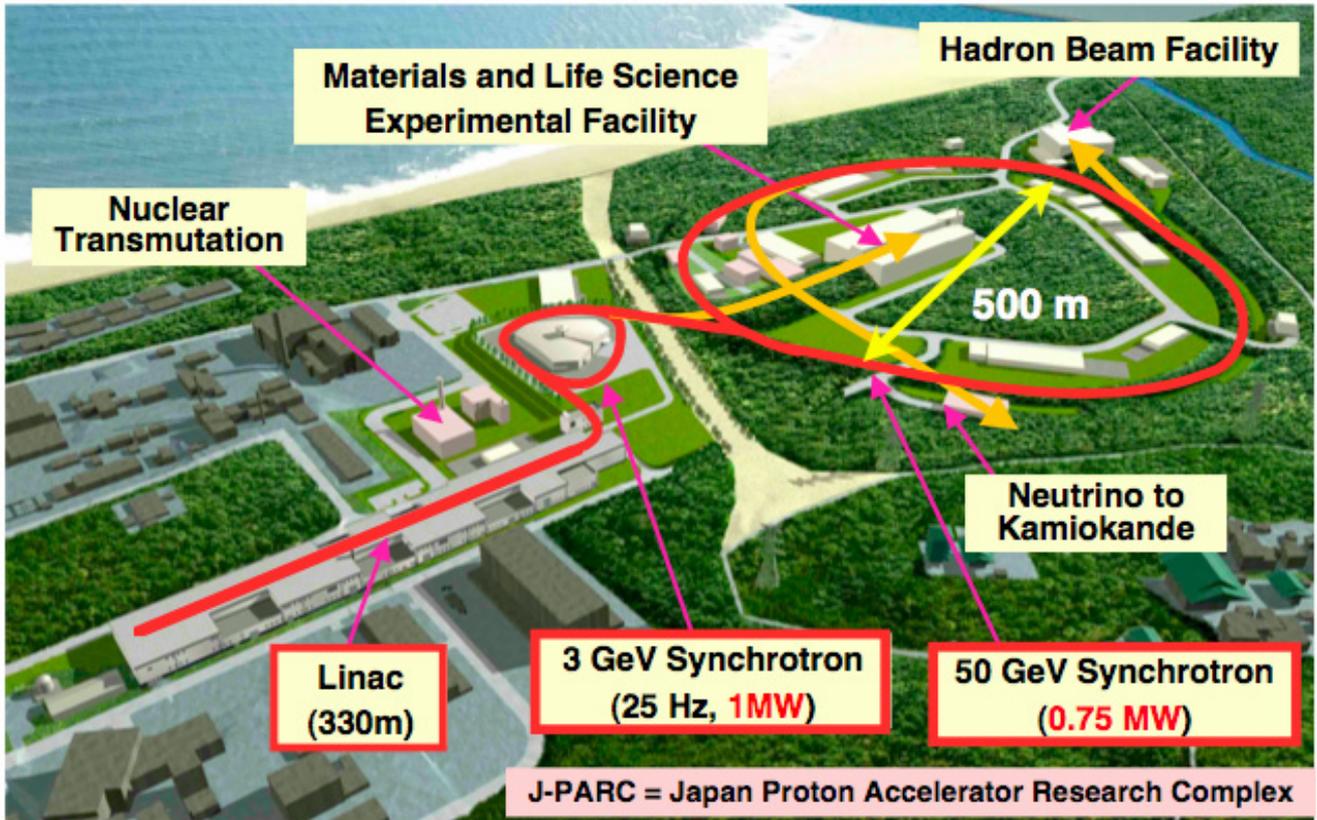


図 1. J-PARC 加速器のレイアウト



図 2. J-PARC サイトの航空写真 (2006 年 11 月撮影)

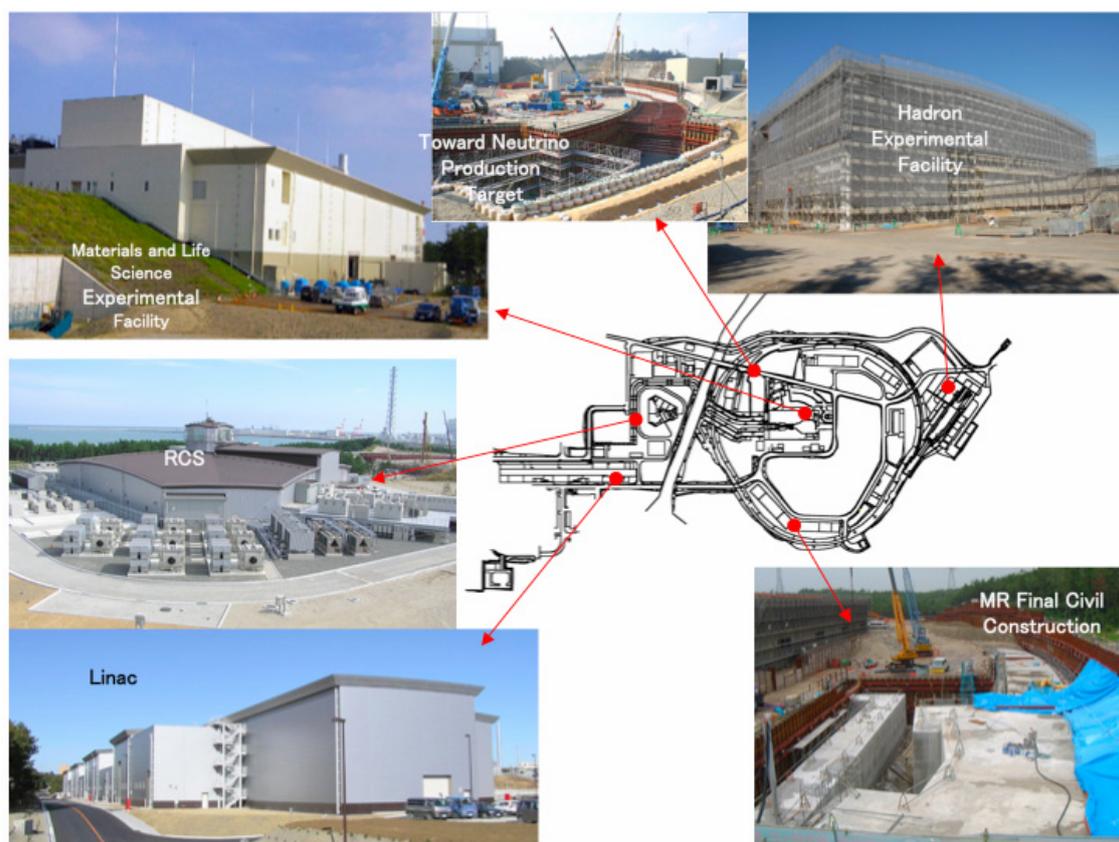


図 3. J-PARC 加速器の建設状況（外観）

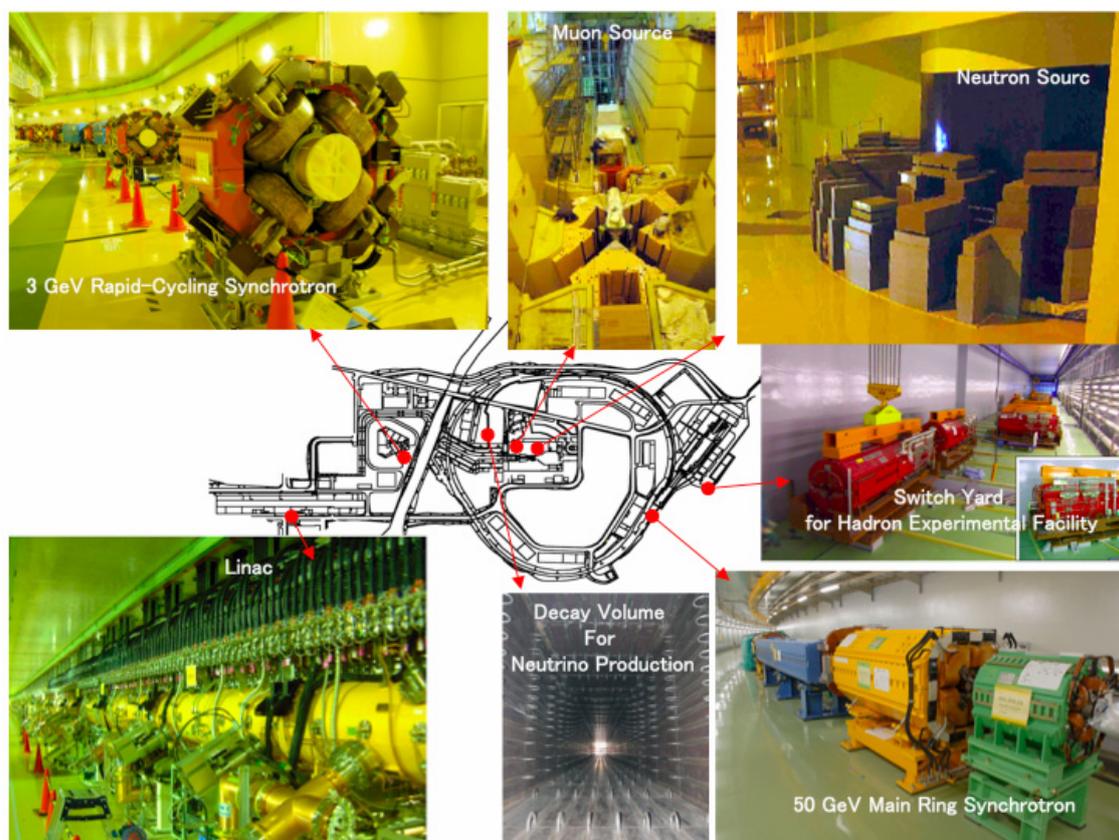


図 4. J-PARC 加速器の建設状況（内部）

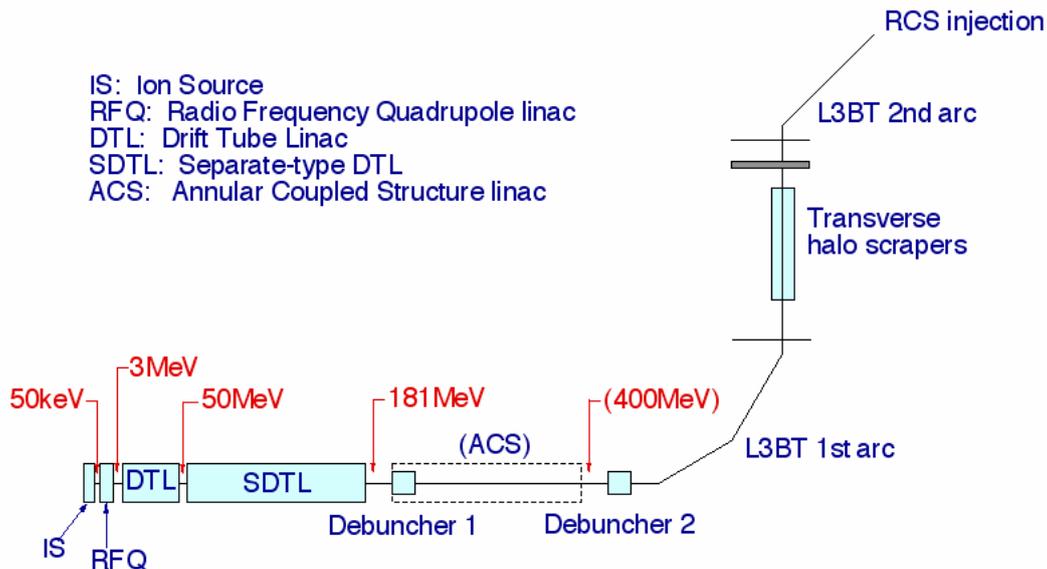


図 5. J-PARC リニアックのレイアウト

ブ間隔とビームの β の間に不整合があると、ビームのエネルギーに不要な振動が誘起され、ビームの質の劣化を招くこととなる。

たとえば、J-PARC リニアックに 3 台ある DTL の第 1 空洞においては、長さがおよそ 9m の空洞の内部に 76 の加速ギャップがあり、そのギャップ間隔は最上流の 7.4cm から最下流の 18.6cm まで、一つずつ異なる値に調整されている。このギャップ間隔に整合した β の変化をビームに与える、すなわち加速をおこなうためには、設計値通りの加速電場を各ギャップに印可する必要があり、そのために精密な高周波電場の位相と振幅の調整が要求されるのである。

2-2. ビーム強度とバンチ構造

J-PARC リニアックの第一期計画の設計ピークビーム電流は 30mA、パルス幅は $500\mu\text{sec}$ 、ビームパルスの繰り返しは 25Hz であり、後述のチョッピングを考慮しないときの平均ビーム電流は $375\mu\text{A}$ 、平均ビームパワーは 67.9kW になる。

J-PARC のリニアックで、陽子ではなく負水素イオンを加速するのは、下流の RCS への入射時に荷電変換入射と呼ばれる入射方法を採用しているためである。リニアックの加速空洞の運転周波数は 324MHz であるため、パルス幅 $500\mu\text{sec}$ のビーム(マクロバンチ)の中に、およそ 3nsec 間隔の微細なバンチ構造(マイクロバンチ)をもっている。一方、入射エネルギーである 181MeV 付近では、RCS 中のビームの周回周波数は 0.5MHz 程度なので、リニアックからの 1 マクロバンチのビームを入射している間に、最初に入

射したマイクロバンチはおよそ 250 回リングの中を周回することになる。すなわち、リニアックのビームを RCS に入射する際には、先に入射したマイクロバンチの上に次々と重畳していく形でマイクロバンチを入射しなければならない。しかし、古典力学においてよく知られているように、すでに周回しているビームの軌道に同種の粒子の入射ビームの軌道を重ね合わせようとした場合、その重畳の度合いはリウビウの定理(Liouville's theorem)によって限界が定められてしまう。J-PARC で採用している荷電変換入射では、リニアックで負水素イオンを加速し、RCS への入射の際に荷電変換フォイルを用いて陽子に変換することにより、リウビウの定理に起因する限界に制限されずに限られた位相空間の中にマイクロバンチを効率よく重畳していくことを可能にするのである。

上記のようにリニアックのビームを RCS に入射すると、RCS の全周にわたってビームが分布してしまう(厳密には、RCS の加速空洞を用いた断熱捕獲法と呼ばれる手法によって後述のリングバンチを形成することができるが、バンチの間隙に取り残される粒子の密度を十分低いレベルにまで抑えることが難しい)。一方、RCS からビームを取り出す際には、RCS 軌道上に設置されたキッカー電磁石でパルス的に磁場を発生させ、ビームを横方向に蹴り出す必要がある。このとき、全周にわたってビームが分布していると、キッカー電磁石の立ち上がり、立ち下がり時の過渡状態で、一部のビームが中途半端に蹴られ正しく取り出されない。正しく取り出されなかったビームはビーム損失の原因となり、加速器本体の放射化を引き起こす。このようなビーム

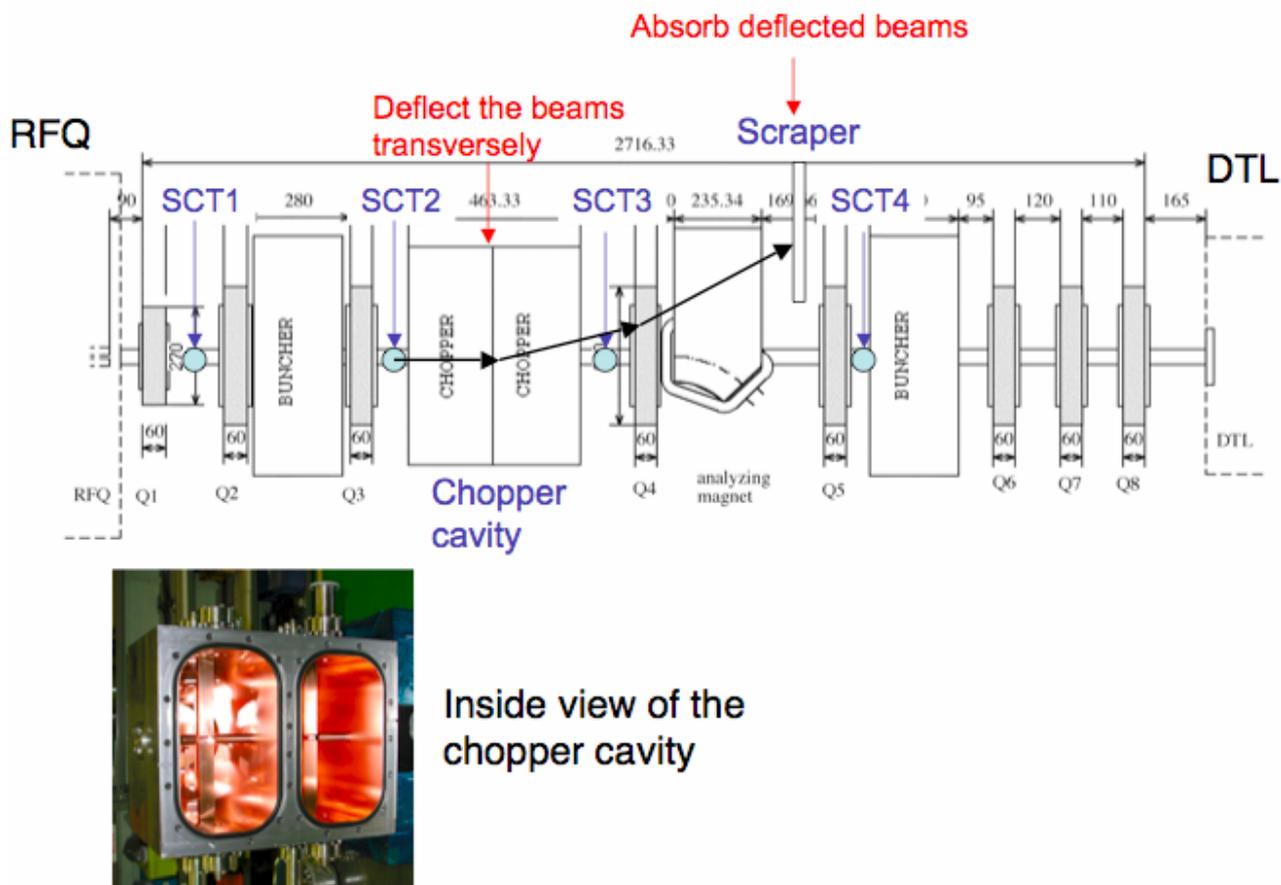


図 6. 高周波チョッパーの概要

写真で、上下から突き出している角柱のようなものが電極、左右から突き出しているパイプがビームパイプ。

損失による加速器本体の放射化は、J-PARC のような大強度加速器施設では、機器のメンテナンスを著しく困難にする。そのため、加速器の性能向上のためには、いかにビーム損失を低く抑えるかが本質的に重要な課題となる。

この問題を克服するために、J-PARC では高周波チョッパーと呼ばれるシステムを採用している[7,8]。図 6 に示すように、高周波チョッパーはビームを横方向に蹴り出す電場を発生する高周波偏向空洞（チョッパー空洞）と高周波偏向空洞で蹴り出されたビームを取り除くスクレーパからなる。高周波偏向空洞は、チョッピングの過程で中途半端に蹴られるマイクロバンチを極力減らすため、10 nsec という極めて速い立ち上がり、立ち下がり特性をもつように設計されている。この高周波チョッパーを用いて、マクロバンチを構成するマイクロバンチのうちおよそ 46% をエネルギーが低いうちに間引いておくことによって、図 7 に示すような中間バンチ構造が形成される。リニアックのビームがビームのリング周回周波数の整数倍に同期した中間バンチ構造をもつことにより、RCS に入射した際に全周にビームが分布するのではなく、整数個の大きなバンチ構造（リングバンチ）を形作るようにすることができる。J-PARC の

チョッパーシステムでは、ビームのリング周回周波数の 2 倍に同期したおよそ 1 MHz の繰り返しをもつ中間バンチ構造が形成されるため、2 個のリングバンチが RCS 中に形成される（入射過程において、奇数番目の中間バンチが一方のリングバンチに、偶数番目の中間バンチがもう一方のリングバンチに重畳されていく）。このリングバンチの間隙をぬってキッカー電磁石の立ち上げ、立ち下げをおこなうことにより、ビームの損失を大幅に低減したビームの取り出しを可能にするのである。

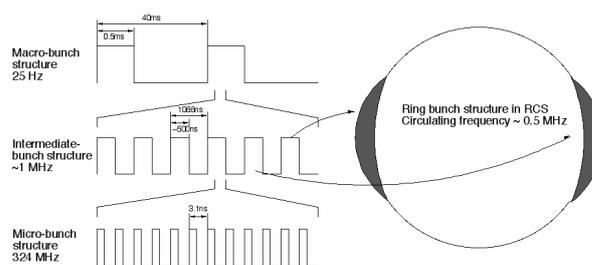


図 7. リニアックのビームバンチ構造（左）と RCS のビームバンチ構造（右）

上記の目的のための高周波チョッパーシステムは、RFQ と DTL をつなぐ長さ 3m のビームトランスポートライン (Medium Energy Beam Transport, MEBT) に設置されている。また、リニアックと RCS をつなぐビームトランスポートライン (Linac to 3-GeV synchrotron Beam Transport, L3BT) には、高周波偏向空洞の立ち上がり、立ち下がり時に中途半端に蹴られた粒子を取り除くために、ハロースクレーパーが設置されている[9,10]。

このチョッパーによるビームの間引きを考慮に入れると、リニアックの設計平均ビーム電流はおよそ $200\mu\text{A}$ 、平均ビームパワーはおよそ 36.7kW になる。

チョッパーは RCS における大強度ビームの加速を可能とするための鍵となる機器の一つであり、その性能試験は現在おこなわれているリニアックのビーム試験における大きなテーマの一つである。

2-3. エミッタンスと運動量広がり

J-PARC のような大強度加速器施設では、空間電荷効果、すなわちビームを構成する個々の粒子間に働くクーロン力の効果が最終的なビームの品質やビーム損失に大きな影響をもたらす。J-PARC や米国の SNS (Spallation Neutron Source) に代表される次世代の大強度加速器の実現に向けて精力的におこなわれてきた数多くの研究の結果から、空間電荷効果そのものや、空間電荷効果が周期的な外場と絡み合って引き起こす種々の共鳴現象がビームのエミッタンス (位相空間においてビームが占める体積) の増大を引き起こし、ひいてはビーム損失の原因となると考えられている[11]。この空間電荷効果を軽減するため、リニアックから RCS への入射に際して、J-PARC ではペインティングといわれる入射手法が採用される[12]。ペインティング入射においては、入射過程完了後のビームの空間密度が小さくなるよう個々の中間バンチの入射位置が制御される。ビームの空間分布に疎密があると密な部分の空間電荷効果が顕著になるため、ビームを広い範囲に一樣に分布させなければならない。このペインティング入射を効率よくおこなうためには、リニアックから入射されるビームの横方向 (ビームの進行方向に垂直な方向) のエミッタンスを小さくする必要がある。

一方で、空間電荷効果を抑制するためには、縦方向 (ビームの進行方向) についてもビームの空間密度を小さくする必要がある。J-PARC では、縦方向の位相平面 (粒子のエネルギーとその地点への到達時刻 (位相) で張る位相平面) において、ビームの分布をできるだけ広い範囲に一樣に分布させるためにオフセット入射という入射方法が計画されている[13]。一般に高周波空洞を用いた加速器では、設計エネルギーよりも高いエネルギーの粒子は減速し、低い

エネルギーの粒子は加速するような動作点 (高周波空洞の同期位相) を選択することにより、縦方向の収束作用を働かせることができる。このような収束作用を働かせた場合、設計エネルギーで、かつ設計位相に入射したビームは入射した位相平面上の点 (安定不動点) に留まるが、位相方向あるいはエネルギー方向にオフセットを加えた位置に入射されたビームは、高周波空洞のもつ収束作用によって安定不動点の周りを周回し始める。この縦方向位相平面における安定不動点の周りの周回をシンクロトロン振動と呼ぶ。シンクロトロン振動をおこなうビームは高周波空洞に印加された高調波成分の効果や、加速電場自身の非線形性、空間電荷力のもつ非線形性によって、振動数にばらつきが生じ、やがて位相平面の広い範囲を埋め尽くすようになる。J-PARC では、わずかにビームエネルギーを設計エネルギー (安定不動点のビームエネルギー) からずらして入射することによってシンクロトロン振動を誘起し、縦方向の空間分布密度を下げるのが計画されている。このようなオフセット入射を制御しておこなうためには、リニアックから入射するビームのエネルギーのばらつきが十分小さい必要がある。

上記のようなペインティング入射とオフセット入射を実現するために、リニアックの出力ビームの横方向エミッタンス (非正規化エミッタンス) を $6\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下、運動量分散を 0.2% 以下 (中心運動量のジッターを含む) にすることが求められている。これらは、機器の設置誤差や種々の運転パラメータの安定性など、現実的なエラーを考慮した際に到達しうる限界に近い値であり、極めて精密な運転パラメータのチューニングなくしては、その実現はおぼつかない。J-PARC リニアックのビームコミッショニングにおいては、機器のメンテナンス性を維持するためにビーム損失を極めて低く抑えることに加えて、上記の条件を満たすための極めて精密な運転パラメータのチューニングが要求されている。

3. ビームコミッショニングの経過

J-PARC 加速器のビームコミッショニングは、各加速器の完成に合わせて段階的におこなう計画になっている。リニアックのビームコミッショニングは 2006 年 11 月に開始され、2007 年 6 月末まで続ける予定である。その間、RCS は機器の最終アライメントとオフビームコミッショニング (ビームを用いない試運転) をおこなっている。2007 年 9 月から 2008 年 3 月にかけて RCS のビームコミッショニングをおこない、2008 年 5 月から MR のビームコミッショニングを開始する計画である。現在おこなわれているリニアックのビームコミッショニングでは、下流の RCS で機器の

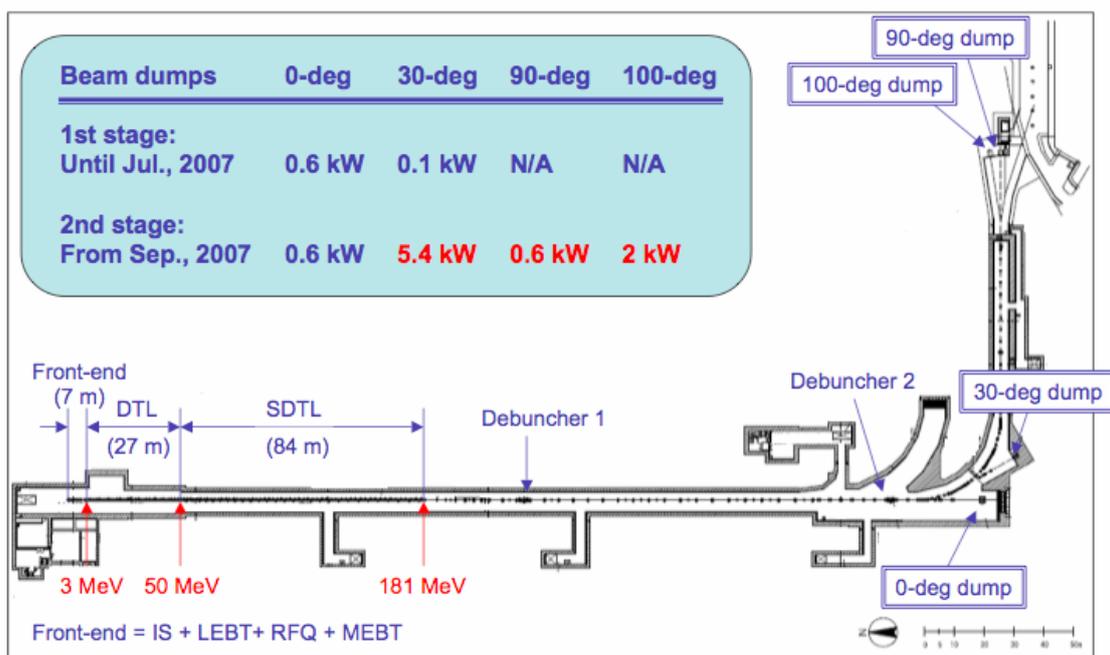


図 8. ビームダンプのレイアウトとダンプ容量

設置が進められていることから、図 8 に示すように四つあるビームダンプのうち二つだけが利用可能である。現在、利用可能なビームダンプは 0 度ダンプと 30 度ダンプの二つであり、ダンプ容量はそれぞれ 0.6 kW と 0.1 kW である。このダンプ容量が今回のビームコミショニングで加速できるビームパワーの上限となる。

リニアックのビームコミショニングは 2 週間の連続運転を 1 サイクルとし、途中でメンテナンスのための休止期間を挟みながら 2007 年 6 月末までに 9 サイクルのビーム試験を予定している。本稿執筆時点（2007 年 3 月初旬）で最初の 4 サイクルが終了しているため、本稿は今回のビームコミショニングのほぼ半ばでの経過報告となる。

J-PARC リニアックのビームコミショニングはまだシステムとしての基本的な動作確認の域を脱していないが、それでもこれまでのビームコミショニングの中でわれわれにとってハイライトと呼ぶべき場面が二つあった。一つは初めてビームを DTL に入射したときであり、もう一つは初めて 181 MeV 加速を達成したときである。

3-1. DTL へのビームの入射

DTL へのビームの入射は 2006 年 12 月に第 2 サイクルでおこなわれた。それまでのビーム試験は MEBT に設置されたビームストッパーでビームを止めておこなわれたが、DTL にビームを入射するにあたって、初めて 300 m 下流の 0 度ダンプまでビームを輸送する必要が生じたのである。ビームラインの途中にビームストッパーを設置するとビームストッパー本体が放射化するため、周りの機器のメンテ

ランスに支障をきたす。そのため、DTL 以降は最下流の 0 度ダンプまでビームストッパーが設けられていない。また、前述のように、イオン加速器においては個々の加速空洞に供給する高周波電場の位相と振幅を正しく調整しないとビームが正しく加速されないため、上流から 1 台ずつ加速空洞の位相と振幅を調整していく必要がある。したがって、第 1 DTL 空洞 (DTL1) へのビーム入射試験は、DTL1 で加速された 19.7 MeV のビームを 300 m 下流のビームダンプまで導きながらおこなう必要があった。本来、181 MeV まで加速したビームを輸送するよう設計されたビームラインに約十分の一のエネルギーのビームを 300 m 近く通すことになるため、ビーム輸送を確立するまでにどの程度の労力を要するか、皆、予想だにできなかった。収束のための四重極電磁石は 19.7 MeV のビーム輸送に最適化した値に設定したが、DTL1 で正しく加速がおこなわれないことには収束力が強すぎてビームは失われてしまう。DTL1 の振幅と位相が正しくなければビームが加速されないため、ビームを入射したら速やかに振幅と位相をスキャンしてビームが透過する設定を探さなければならない。また、正しくビームが加速されたとしても、四重極電磁石のミスアライメントによってビームが大きく蛇行し、ビームが途中で失われる可能性もある。

DTL1 以降 0 度ダンプまでに 25 台のビーム電流モニターがある。ビーム軌道を補正するステアリング電磁石をいつでも操作できるように準備して、25 台の電流モニターの波形を 4 台のディスプレイいっぱいに表示しながらビームシャッターを開けた。DTL1 の位相を 10 度、20 度と振っていき、ビームを入射した数分後には 0 度ダンプまでのビーム

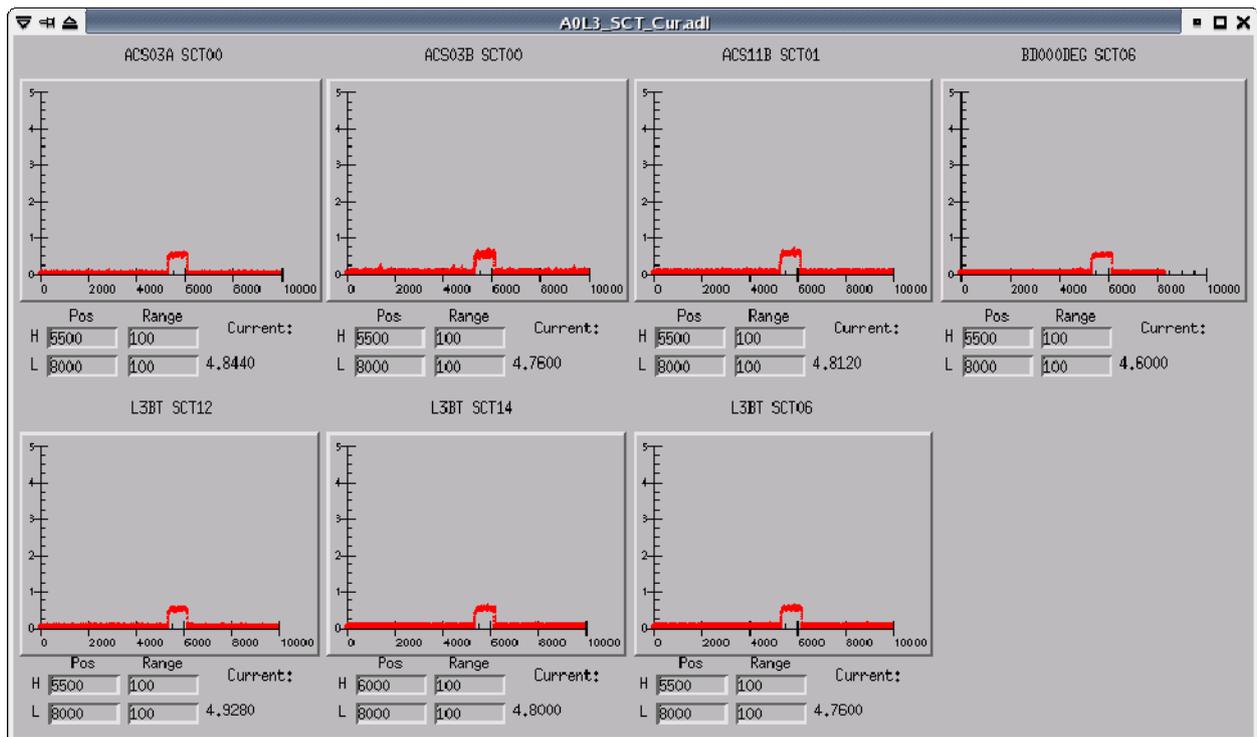


図 9. DTL にビームを初めて入射した際のビーム電流波形

上段左端が L 出口から 20m ほど下流の電流モニター，上段右端が ダンプラインの電流モニターにあたる．各波形の右下の数字がピーク電流の値 (mA)．

輸送を確認することができた．われわれも驚いたことに，ステアリング電磁石をまったく使うことなく，300m のビーム輸送においてほぼ 100% の透過効率を達成できたのである．

J-PARC 加速器は，海岸沿いというアライメントの観点からいうと非常に厳しい立地条件の下に建設されている (図 2 にも海岸線を見ることができる)．サイトの地下深くに泥岩層があるが，その上は厚い砂の層に覆われており，その砂の層の中には地下水脈があることが確認されている．とくにリニアックの建屋は地下水脈を遮断するように配置されており，建設当初から床レベルが地下水位の変動の影響を受けることが懸念されていた．そのため，アライメント期間中の床レベルの変動に細心の注意を払いながら，機器のアライメントをおこなう必要があった．J-PARC リニアックでは，機器の設置開始から最終アライメント完了まで，ほぼ 1 年を要している．精密な測距機能を備えたトータルステーションやレーザートラッカーなど最新の測量機器を駆使して機器のアライメントをおこなうとともに，床レベルの確認測量をアライメント期間中幾度となくおこなった．高精度の水管傾斜計 (連通管) と伸張ワイヤーを用いた床変動の常時モニタリングは現在もおこなっている [14,15]．ステアリング電磁石をまったく使うことなく 300m のビーム輸送を確立できたことは，われわれのこのような努力の結実であるといつてよいと思う．

この日，4 台のディスプレイいっぱいに表示されたビーム電流波形を見たときの感慨はうまく言い表せない．図 9 はそのときのビーム電流波形の一部である．まだソフトウェアの操作に不慣れで縦軸の調節がうまくできず，ビーム波形がとても小さく表示されているのもご愛嬌である．この日のランは，筆者がリニアックのアライメントシナリオの立案に関わったこともあり，とくに感慨深いものがあった．

3-2. 181MeV 加速

181MeV 加速へのトライは 2007 年 1 月に第 3 サイクルの中でおこなわれた．第 2 サイクルの最後に第 3DTL 空洞 (DTL3) までの調整を終え，50MeV までの加速は確立していた．181MeV 加速へのトライは，上述の DTL1 へのビームの入射とはだいぶ趣の異なるものとなった．実は，181MeV 加速は 1 月 19 日に一度挑戦したがうまくいかず，準備をやり直して 1 月 23 日に再挑戦することとなったのである．このサイクルは 1 月 24 日までの予定であったため，ラン最終日の前日でのトライということになる．このサイクルのランの目標は「次のサイクルで原子力安全技術センターの運転時検査を受検するための条件を満たす」ことであり，そのために必要な事前の線量測定などの時間を考えると，その日のうちに 181MeV 加速を達成する必要があった．

SDTL は、30 台の SDTL 空洞からなるが、隣り合う 2 台の空洞が 1 台のクライストロンで駆動されており、振幅と位相の調整はこの 2 台を 1 組としておこなう。振幅と位相の調整は、下流にある二つのビーム位相モニターでビームのエネルギーを測定しながらクライストロンの振幅と位相をスキャンすることによっておこなわれる[16]。急遽方針転換したこともあって、ソフトウェアの準備が間に合わず、マニュアルで振幅と位相をスキャンすることになった。その日の午前 10 時頃から調整を開始したが、1 台のクライストロンの調整におよそ 1 時間かかる。休憩もそこそこに調整を続け、明けて翌 24 日の午前 0 時 53 分によやく 181MeV 加速を達成した。図 10 はそのとき測定したビームエネルギーである。このときのピーク電流は 5mA、パルス幅は $20\mu\text{sec}$ 、繰り返しは 2.5Hz であった。ビームパワーでいうと、およそ 45W ということになる。23 日の深夜には、181MeV 達成の瞬間を分かち合おうと駆けつける人も多数いたが、次の日のランもあるため、お祝いもそこそこに、その日のランは切り上げた。

DTL への初入射の際は、構えた割にあっさりビームが通ってしまい少し拍子抜けした感もあったが、今回は試験が深夜に及んだこともあり、疲労の入り交じった独特の緊張感の中での達成となった。図 11 は「一眠りしたあと」24 日の朝に中央制御棟で記念撮影した写真である。

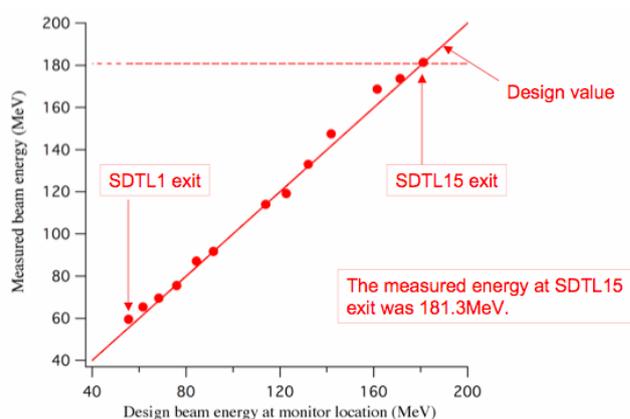


図 10. 181MeV 加速時のビームエネルギー
2 台のビーム位相モニターを用いた飛行時間法による測定結果。

24 日にはパルス幅を $50\mu\text{sec}$ にのばしてビームパワー 120W の運転をおこなうとともに、30 度ダンプへ初めてビームを入射する試験をおこなった。平行してビーム加速中の線量測定をおこない、運転中の漏洩線量が申請値を下回るレベルであることが確認できた。SDTL の調整時には二つのビーム位相モニターを用いた飛行時間法 (Time-Of-Flight method) でビームのエネルギーを測定していたが、30 度ダンプへの入射時に偏向電磁石でビームを曲げることによって、エネルギーが 181MeV 付近であるこ



図 11. 181MeV 達成時の記念撮影 (2007 年 1 月 24 日)

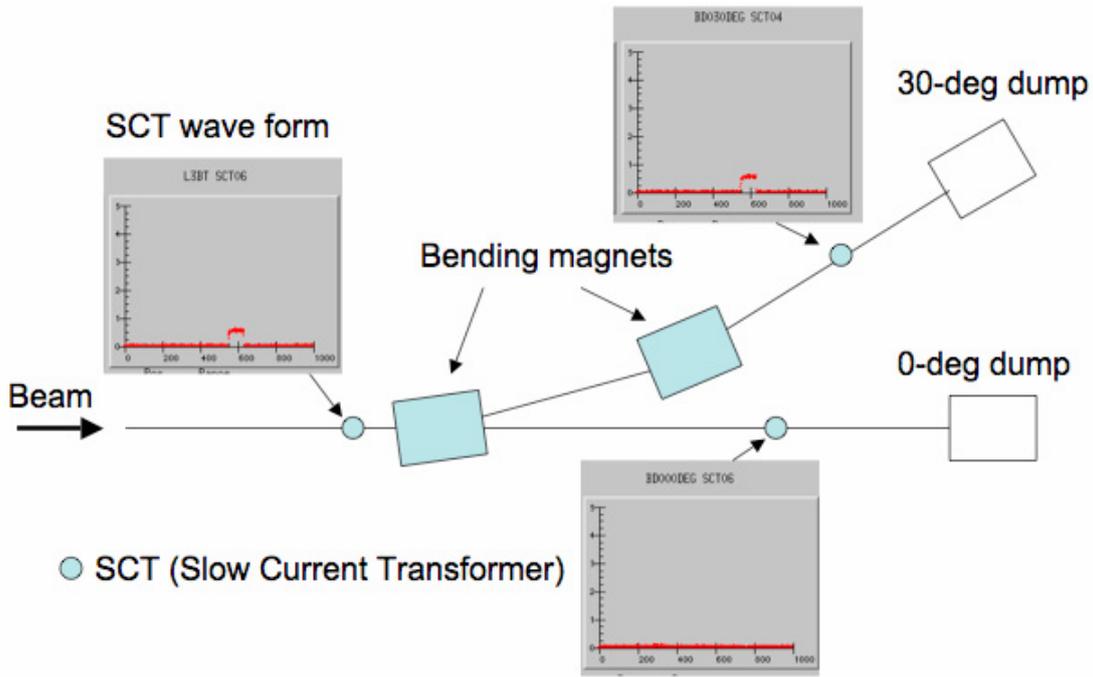


図 12. 30 度ダンプへの入射試験
 ビーム電流モニターによる測定ビーム波形 .

とを再確認することができた . 図 12 は 30 度ダンプへのビーム輸送試験をおこなったときのビーム電流波形を示したものである . ビーム電流は Slow Current Transformer (SCT) と呼ばれる電流モニターで測定されている .

この結果をもって , 2 月の第 4 サイクルで原子力安全技術センターの運転時検査を受検し , 無事合格することができた . これで J-PARC リニアックは晴れて公式に放射線利用施設として完成したと認められ , 「調整運転」を完了して今後は「運転」をおこなうことになる . J-PARC リニアックの場合 , 単独のビーム利用施設をもたないため「運転」といっても利用者に対するビーム供与を意味しないが , われわれのプロジェクトにとって , この合格は形式的なもの以上の大きな意味をもっている . J-PARC では , リニアックに続いて RCS , MR と段階的に施設を完成させ , ビームコミッショニングをおこなうことが計画されているが , その節目節目で放射線利用施設としての「変更申請」をおこなうことになる . この変更申請のためには , 変更前の申請に対して施設検査を合格していることが前提条件となる . すなわち , RCS を追加申請するためには , リニアックの検査に合格していることが必要であり , MR を追加申請するためには , RCS の検査に合格していなければならない . 今回のリニアックの合格は , 当初の予定よりも 2 ヶ月ほど早く得ることができたが , 機器の故障などの不測の事態が後続の加速器の申請スケジュール , ひいては建設スケジュールに影響を与えるというリスクを早期に取り除けたという意味で大きな意義をもっている .

4. ビームコミッショニングの今後

第 4 サイクルでは , 運転時検査の受検の他に 181MeV 加速での高周波チョッパー駆動試験とシングルショット運転の試験をおこなった . 図 13 は高周波チョッパーによって生成された中間バンチの波形を示したものである . 高周波チョッパーの運転は , 前述のように , 下流の RCS における定常運転時のビーム損失を低減するためにとくに重要なものである . 一方 , シングルショット運転は下流の RCS や MR

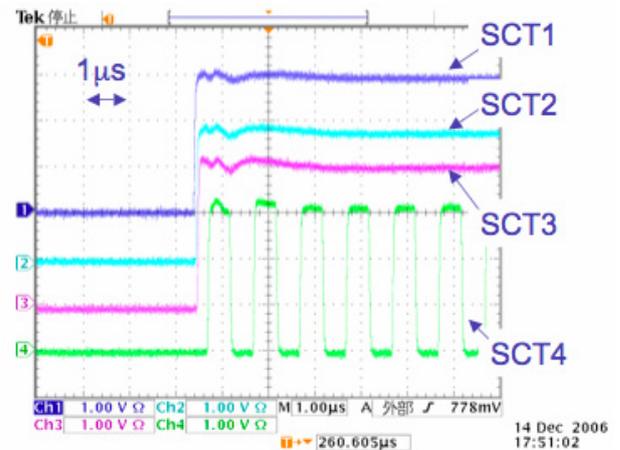


図 13. チョッパー運転時のビーム電流波形

上から , SCT1 , SCT2 , SCT3 , SCT4 と呼ばれるビーム電流モニターで測定したビーム電流 . SCT4 で中間バンチ構造が形成されていることがわかる . 各ビーム電流モニターの位置は , 図 6 を参照のこと .

のコミッショニング初期のビーム損失を低減する上で重要な意味をもつ。リニアックは通常一定の繰り返しでマクロバンチの加速をおこなうが、シングルショット運転ではビームリクエストのあったタイミングでのみマクロバンチが加速される。ビームコミッショニングのごく初期においては、未調整のパラメータがあることに起因するビーム損失を避けることができない。しかし、下流のRCSやMRのビームコミッショニングにおいては、ビームエネルギーが高いため、たとえコミッショニングのごく初期にしか起こらないビーム損失であっても、それによって一度機器が放射化されてしまうと長期にわたって残留放射能が残ることも懸念される。ビーム損失の影響を軽減するため「コミッショニングの初期にはビームのピーク強度を極端に小さくする」という考え方もあるが、RCSやMRのビーム診断機器は大強度ビームの診断に最適化されているため、それではチューニングに必要なビーム診断が難しくなる。そのため、シングルショット運転のような運転モードを用いて、ビームの繰り返しを極限まで下げ、コミッショニング初期におけるビーム損失の影響をできる限り小さくするという戦略が取られるのである。このような運転モードは、限られたショットのビームから最大限のデータを取得するよう設計されたビーム診断系と連携することにより、RCSおよびMRのコミッショニングにおいて、大きな威力を発揮すると期待される。J-PARCリニアックでは運転を開始してまだ間もないが、少しずつ制御システムが整うとともに運転経験も徐々に蓄積され、このような多彩な運転モードも実現できるようになった。今後も、下流からのビーム要求により迅速に、より柔軟に対応できるようシステムを高度化していく必要がある。

J-PARCリニアックでは、設計値のビームエネルギーである181MeVを達成したが、ビームパワーで考えるとまだ120Wで、設計値の0.2%にも満たない。チョッピング後の設計値と比較しても0.33%である。181MeVという定格エネルギーは達成したが、ビームパワーという尺度で測ると、まだ「なんとか無事にスタートが切れた」といったところであろう。今後は、チューニングの精度を上げながら、ビームパワーの向上を目指すことになる。前述のように、J-PARCのような大強度陽子加速器施設では、損失するビームの割合を極めて低く抑えることがビームパワーの増強には不可欠であり、そのためには精度の高いチューニングが要求される。現状では、ビーム加速後の残留放射能は問題ないレベルであるが、このレベルを保ちながらビームパワーを300倍にする必要がある。精度の高いチューニングを実現するためにはビームモニターの精度を高めるとともに、高周波空洞をはじめとするハードウェアが高い再現性をもって安定に動作する必要がある。それと同時に、制御系を成熟させ、ヒューマンエラーのリ

スクを極力排した堅固でインテリジェントな制御システムを構築することも重要になる。

一方で、前述の運動量分散の条件を満たすためのデバンチャー空洞[16]や、エミッタンスの条件を満たすためのハロースクレーパー[10]など、RCSの入射条件を満たすための鍵となる機器の調整も残っている。さらに、その先には、RCSとMRのコミッショニングが待っている。2008年度以降に予定されているビーム供与の開始までに克服しなければならない課題はまだまだ山積しているが、最後にJ-PARCリニアックで現在到達しているモニターの精度と機器の再現性を象徴する実験データをあげて、この報告の締めくくりとしたい。

図14はDTL3に供給する高周波電場の位相と振幅をチューニングしたときの実験データである。再三繰り返しきたように、陽子リニアックにおいては、高周波空洞の位相と振幅を精度よくチューニングすることがビームの質を高める上の生命線であり、位相と振幅のチューニングスキームが思惑通りに機能するかどうか、越えなければならない最初の大きな山となる。とくにDTLはひとつの空洞の中に含まれる加速ギャップの数が多いことから、チューニングの過程でビームが複雑な挙動を示す。また、ビーム診断系を設置するスペースも極端に限られることから、とり得るチューニングスキームも限定され、バックアップスキームを用意することが難しい。図14では、クライストロンの振幅を固定して位相をスキャンしながら、DTL3出口でのエネルギーを飛行時間法で測定している。このときのエネルギーの位相依存性が、図14上での一つの曲線になる。こ

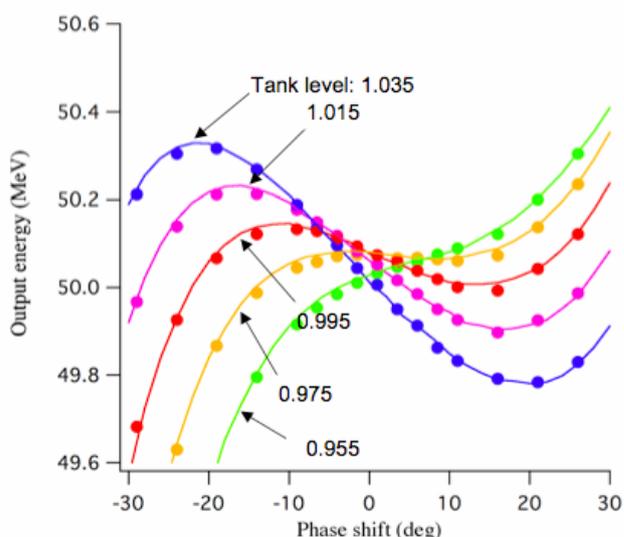


図14. DTL3の位相スキャン曲線

各曲線が、クライストロン電圧をある値に保ったときの、出力エネルギーのクライストロン位相に対する依存性を示している。マーカーが飛行時間法による出力エネルギーの測定値、曲線がビーム力学シミュレーションの結果を示す。

の実験では、五つのクライストロン振幅について同様な測定をおこなっており、測定値がマーカーで、ビーム力学シミュレーションの結果が曲線で示されている。図 14 を見ると、細かいところで微妙なずれが見られるものの、最終的なチューニングの目標が位相で 1 度、振幅で 1% であることを考慮すれば、測定値とシミュレーションは非常によく合っている。これだけ測定とシミュレーションが一致していれば、測定で得られた曲線の形から十分な精度で適切なクライストロンの位相と振幅を決定することができる。ビームの振る舞いがシミュレーションとよく合うということは、ハードウェアが設計通りにより精度でできていることを意味しているのと同時に、ビームモニターがビームの挙動を正確に捉えていることをも意味している。また、このデータは 1 時間程度の時間をかけて取得されたものであるが、それに関わらずシミュレーションとよく合うということは、加速器が安定に運転されておりクライストロンの位相や振幅の設定の再現性がよいことを示している。実際、つくばキャンパスでのビームコミッショニングの際に同様のデータをとったときには、お世辞にもきれいな曲線が描けるという訳にはいかなかった。そのときと比較すれば、長足の進歩である。

J-PARC リニアックのビームコミッショニングはまだまだ多くの課題を残しているが、これまでに大きな山をいくつか越えることができた。いくつか山を越えるうちに少しずつ明るい視界が開けてきたようにも思う。ビーム試験のたびに「どれだけ自分が J-PARC リニアックという巨大なシステムを熟知しているかが試されている」と感じると同時に、本当に得難い経験をさせてもらっていると心から感じている。J-PARC 加速器のビームコミッショニングは RCS, MR とまだまだ続く。一日も早く「RCS での加速成功」、「MR での加速成功」の報告がおこなわれる日が来ることを願うと同時に、より多くの人たち、とくに若い世代の人たちの J-PARC 加速器ビームコミッショニングへの増々の参加を期待したい。

謝辞

図 11 にたくさんの方が写っていることからわかるように、J-PARC リニアックのビームコミッショニングは各ハードウェア担当グループ、制御グループ、安全グループ、運転監視員の皆さんをはじめ、数多くの方々に支えられておこなわれています。J-PARC リニアックのグループは、KEK のスタッフと JAEA のスタッフの混成部隊です。各メンバーが所属の壁を意識せず、スムーズに連携できるのは J-PARC のマネジメントに関わる多くの方々のご尽力のおかげです。また、本文中でも触れましたが、ビームコミッショニングにおいて、リニアックの機器のアライメント精

度の高さには本当に助けられています。現場でアライメント作業をおこなわれた空洞グループの方々、ビーム輸送系グループの方々、また関係した企業の方々のご努力に、この場を借りて敬意を表します。

本来、ここでコミッショニングチームのメンバーを列挙すべきところなのかもしれませんが、ここでは敢えてそれはしないでおこうと思います。それは、シフト表の上でコミッショニングチームにアサインされていなくても、コミッショニングに積極的に参加されている方が大勢おられるからです。「コミッショニングチームはここからここまで」と明確に線引きできないところが、むしろ J-PARC リニアックのコミッショニングが健全におこなわれていることの証なのかもしれません。

最後に、陰に日向に現場の人たちを支え、また筆者のような若輩に本稿を執筆する機会を与えてくださった KEK の神谷幸秀施設長、小林仁主幹、山崎良成教授 (J-PARC センター副センター長) に、この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 山崎 良成, 長谷川 和男, 鈴木 寛光, 冨澤 正人, “J-PARC 加速器”, 高エネルギーニュース Vol. 24, No. 1, pp. 13-24.
- [2] Y. Yamazaki ed., “Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC”, KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [3] A. Ueno *et al.*, “Beam Test of a Front-End System for the JAERI-KEK Joint (JKJ) Project”, Procs. 2002 International Linac Conference, p. 356 (2002).
- [4] M. Ikegami *et al.*, “Beam Commissioning of the J-PARC Medium Energy Beam Transport at KEK”, Procs. 2003 Particle Accelerator Conference, p. 1509 (2003).
- [5] F. Naito *et al.*, “Results of the High-Power Conditioning and the First Acceleration of the DTL-1 for J-PARC”, Procs. 2004 International Linac Conference, p. 300 (2004).
- [6] Y. Kondo *et al.*, “Beam Dynamics and Commissioning of the J-PARC Linac”, AIP Conference Proceedings 773, p. 79 (2004).
- [7] T. Kato *et al.*, “Beam Study with RF Choppers in the MEBT of the J-PARC Proton Linac”, Procs. 2003 Particle Accelerator Conference, p. 1455 (2003).

- [8] S. Fu *et al.*, “RF-Chopper for JHF linac”, Nucl. Instr. Meth. A, **440**, p. 296 (2000).
- [9] M. Ikegami *et al.*, “A Simulation Study on Chopper Transient Effects in J-PARC Linac”, Procs. 2004 International Linac Conference, p. 342 (2004).
- [10] T. Okamoto *et al.*, “Present Status of the L3BT for J-PARC”, Procs. 2006 European Particle Accelerator Conference, p. 1756 (2006).
- [11] たとえば, T. P. Wangler *et al.*, “Particle-core model for transverse dynamics of beam halo”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **1**, 084201 (1998).
- [12] F. Noda *et al.*, “The Status of Optics Design and Beam Dynamics Study in J-PARC RCS”, Procs. 2005 Particle Accelerator Conference, p. 2759 (2005).
- [13] M. Yamamoto, “Longitudinal Beam Dynamics on 3 GeV PS in JAERI-KEK Joint Project”, Procs. 2002 European Particle Accelerator Conference, p. 1073 (2002).
- [14] M. Ikegami *et al.*, “J-PARC Linac Alignment”, Procs. 2004 International Linac Conference, p. 474 (2004).
- [15] T. Morishita *et al.*, “An Alignment of J-PARC Linac”, Procs. 2003 Particle Accelerator Conference, p. 2851 (2003).
- [16] M. Ikegami *et al.*, “RF Tuning Scheme for J-PARC DTL and SDTL”, Procs. 2004 International Linac Conference, p. 414 (2004).