

DESIGN OF THE 50MEV LINAC OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

Masashi Yamamoto^{*A)}, Masako Shimano^{A)}, Ed Villaseñor^{A)}, Kosuke Nakanishi^{A)}, Taku Ito^{A)}, Takeshi Sakai^{A)},
Tetsuichi Higuchi^{A)}, Masaru Murakami^{A)}, Naoki Nakamura^{A)}, Joichi Kusano^{A)}, Hiroji Mizushima^{A)}, Eiji Tanabe^{A)},
Takio Tomimasu^{A)}, Yusuke Ishikawa^{B)}, Yujiro Tajima^{C)}, Teruyasu Nagafuchi^{C)}, Koichi Nakayama^{C)},
Yoshifumi Takashima^{D)}, Masahito Hosaka^{D)}, Naoto Yamamoto^{D)}, Kiyoshi Takami^{D)}, Atsushi Mano^{D)}, Taku Takano^{D)},
Hiroyuki Morimoto^{E)}, Masahiro Katoh^{F)}, Yoichiro Hori^{G)}, Shigeaki Sasaki^{H)}, Shigeru Koda^{I)}

^{A)}AET, Inc.

2-7-6 Kurigi, Asao-ku, Kawasaki, Kanagawa, 215-0033

^{B)}YDK Co., Ltd.

2-7-5 Kurigi, Asao-ku, Kawasaki, Kanagawa, 215-0033

^{C)}TOSHIBA Corporation

2-4 Suehirocho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa, 230-0045

^{D)}Nagoya University Synchrotron radiation Research center

Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

^{E)}Aichi Science & Technology Foundation

250-3 Minamiyamaguchi-cho, Seto, Aichi, 489-0965

^{F)}UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences

38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{G)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{H)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/Spring-8)

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{I)}Saga Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005

Abstract

We have developed a 50MeV electron linac for the injector to the booster synchrotron of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility. This linac can supply a electron beam 1 [nsec] of pulse width and 1 [nC] of charge to the synchrotron. In this paper, we describe the design of the linac.

中部シンクロトロン入射用 50MeV ライナックの設計

1. はじめに

中部シンクロトロン^[1]の放射光施設は、50MeV ライナックと 1.2GeV のブースターシンクロトロン、1.2GeV の光源リングから構成される。本稿では、このライナックの設計について報告する。ブースターシンクロトロンから見るとライナックのエネルギーが高いほど、設計や運転が楽になる。一方、ライナックや全体のコストを考えると、ライナックのエネルギーが低いほど望ましい。このような相反する要求の他に、磁石の精度などにより、シンクロトロンでの加速は概ね 30 倍という制約もある。これから、ブースターシンクロトロンへの入射エネルギーは 40 [MeV] が最低条件になる。RF 源(クライストロン)や敷地サイズも含めた検討から、ライナックのエネルギーは 50 [MeV] が適当と判断した。

これまでのシンクロトロン入射ライナックは、シングルバンチが入射できる短パルスモードとマルチバン

チの入射が可能な長パルスモードの両方に対応できるものが多かった。しかし、中部シンクロトロンへの入射用ライナックは、シングルバンチ入射のみとした。トップアップ運転が予定されており、シングルバンチ入射で十分であると考えたからである。詳細は後で述べるが、この選択により、ライナックの設計・製作は大幅に容易になり、運転時の安定性も向上した。コスト削減にも大きく寄与した。

施設のスペースの関係から、ライナックはブースターリング内の端のほうに設置することになった。その結果、ライナックを構成する全ての機器は、約 5 [m] × 11 [m] の範囲に設置する必要性が生じた。できるだけコンパクトに機器をまとめることにより、この要請にこたえることができた。特に、制御系機器や全ての電源を 19 インチラック 3 本に収め、従来のものよりかなりコンパクトに仕上げた。

我々はこのサイズのライナックの設計の経験が乏しいので、可能な限り計算機シミュレーションを多用した。

*yamamoto@accuthera.com

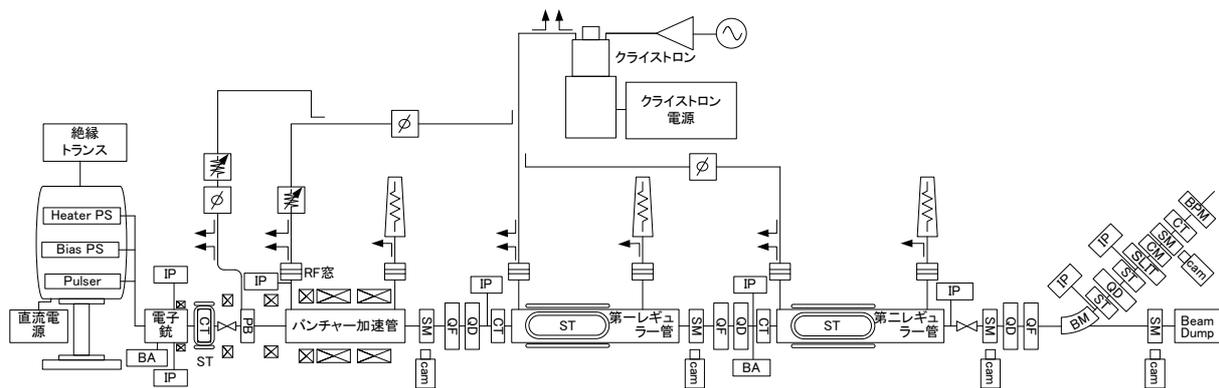


図 1: ライナックのシステム構成図。図中の機器記号は本文中で説明。

近年のシミュレーションの精度の向上はめざましく、この程度のライナックの設計であれば十分に対応できる。

2. 仕様とシステム

表 1 にライナックの基本仕様を、図 1 にシステム構成を示す。ビーム仕様のエネルギー拡がりやエミッタンスは、ブースターリングのアクセプタンスから決まっている。パルス幅はブースターリングの RF 加速空洞の運転周波数 500 [MHz] の半周期で、ひとつの RF バケットに入射するためである。

表 1: ライナックの仕様

運転周波数	2856 [MHz]
ビームエネルギー	50 [MeV] 以上
エネルギー拡がり	±0.5 [%] 以下
パルス幅	1 [nsec] 以下
電荷量	1 [nC] 以上
90%非規格化エミッタンス	2π [mm · mrad] 以下

1 [nsec] の電子ビームは、100 [kV] の電子銃で発生させている。この短パルスのビームをそのまま加速する。電子銃からのビームはプリバンチャーである程度バンチングされてから、バンチャー加速管に入射される。その出口で約 12 [MeV] まで加速された電子は、二本のレギュラー加速管で 50 [MeV] 以上に加速され、BT 系へ送られる。BT 系でブースターリングとのマッチングをとり、入射セプタムにビームを導く。

3. ライナックのビーム計算

ライナックのビーム計算には、General Particle Tracer(GPT)^[2] を用いた。計算に用いたエレメントは、電子銃とフォーカスコイル、プリバンチャー、加速管、Q 磁石である。これらのうち、Q 磁石を除いたエレメントの電磁場は SUPERFISH と POISSON で計算されたマップファイルを用いた。Q 磁石も三次元計算結果の磁場を取り込むことも可能ではあるが、GPT に用意されている漏れ磁場のない Q 磁石エレメントを用いた。加速管は進行波型なので、その電磁場を求めるのがやや複雑である。ここでは境界条件を変えて計算された SUPERFISH の電磁場のマップファイルを重ね合わせることで、

進行波を得た。加速セルごとに進行波を作成し、それを GPT に取り込んだ。電子銃とフォーカスコイルの静電磁場は、POISSON の計算結果を使った。プリバンチャーは定在波型なので、SUPERFISH の計算結果をそのまま GPT に取り込んだ。

表 1 に示したライナックの仕様の中で、当初、エネルギー拡がりや最も達成が困難と思われた。パルス幅が 1 [nsec] なので、ライナックでは 3 バンチ程度が加速されることになる。ウェークフィールドによるバンチ間のエネルギー拡がりが問題になるからである。そこで、GPT の計算結果にウェークポテンシャルを追加してエネルギー拡がりを求めた。ウェークポテンシャルは、SLAC の加速管のデータ^[3] を用いた。GPT の計算にウェークポテンシャルを加えて得られた加速管出口でのビームのエネルギー分布を図 2 に示す。この計算結果により、エネルギー拡がりの仕様を満足する見通しを得た。その他の仕様については、もちろん十分満足している。

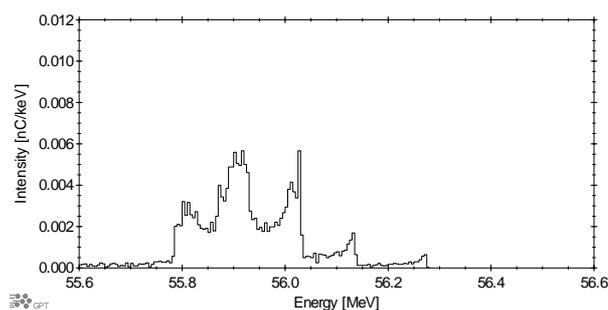


図 2: ライナック出口でのビームのエネルギー分布。

ライナックで生成されたバンチは、BT 系へ送られる。BT 系では、ブースターリングでの取り合い点である入射セプタム磁石でのツイストパラメータが決められている。また、運転を容易にするために、ライナックの最終スクリーンモニターでビームを X/Y 方向ともフォーカスさせることが望ましい。これらの条件に合致する BT 系の磁石の配置と磁場強度は、TRACE-3D^[4] を用いて計算した。Q 磁石が 3 個と少ないため、かなり制約が厳しかったが要求する磁石配置は得られた。BT 系でのビームサイズの計算結果を図 3 に示す。

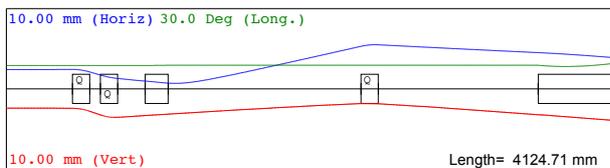


図 3: TRACE-3D で計算された BT 系でのビームサイズ。

4. 各機器の設計

4.1 立体回路

クライストロンは、最大出力は 50 [MW] の東芝 E3730A を選定した。本ライナックの必要な RF 電力は 36 [MW] 程度、パルス幅は 0.6 [μ sec] であるため、クライストロンには十分余裕がある。ピーク電力が 36 [MW] と高いので導波管は真空タイプとしたいところではある。しかし、これまでの実績とパルス幅が短いことを考慮し、コストの低い SF₆ 加圧 (0.2 [MPa]) タイプを選択した。ただし、15 [MW] 以上の大電力部分は SLAC フランジを用い、それ以下の電力では CPR-284G (シーメンスタイプ) フランジとした。これまでの運転で導波管での放電は観測されていないので、正しい選択であったと考えている。

具体的な立体回路の構成は、図 1 に示す通りである。プリバンチャーとバンチャー加速管に接続される系には移相器と減衰器が設置されている。第二レギュラー加速管に接続される系には移相器が取り付けられている。これらの減衰器や移相器は PLC で制御される。

クライストロンの出口とプリバンチャーの入口、加速管の入口と出口に方向性結合器が設置されており、RF 電力や位相の観測が可能である。

4.2 電子銃とその電源

電子銃とその電源の仕様を表 2 に示す。直流 100 [kV] 印加の電子銃である。パルス印加に比べて、安定度が高く、ノイズを出さないことが有利である。反面、放電の問題が付きまとう。それを防ぐために、電子銃の表面電場を 7 [MV/m] 以下、特にトリプルジャンクション部は 1.5 [MV/m] 以下^[5] に抑えるように設計を行った。POISSON による表面電場の計算結果を図 4 にしめす。最大表面電場はアノード電極部分で 6.49 [MV/m]、トリプルジャンクション部で 0.43 [MV/m] である。しかしながら、それでも放電は発生した。ただし、以降に述べるような理由から致命的なことは生じなかった。

POISSON の計算結果から電子銃の静電容量は、33 [pF] 程度であることが分かった。したがって、電子銃から 2 [nC] の電荷が放出されれば、電圧低下は 66 [V] 程度である。この電圧低下は十分低く、電子銃本体やその高圧電源には余分な静電容量が不要であることが分かる。そもそも、パルス幅が 1 [nsec] 程度なので、30 [cm] 以上距離が離れている電源に静電容量を持たせても意味がない。したがって、放電が発生した場合のダメージを少なくするためには高圧電源の静電容量を少なくすることが重要である。

余分なコンデンサーが不要になったことで、電子銃部の静電エネルギーを抑えることができた。先に示した 33 [pF]、100 [kV] の場合、静電エネルギーは

0.16 [Joule] となる。放電が起きた場合、最大この程度のエネルギーで電極の損傷を与えることになる。これがどれだけのインパクトがあるかは分からないが、実際にこの電子銃で発生した放電は小さく、耐電圧低下はおきていない。

カソードは、表面積が 0.5 [cm²] の CPI 社の Y-845 である。このカソードは、コンフラットフランジ (ICF-70) 付きで使いやすい反面、位置決めが難しい。本電子銃では、このフランジの外径を基準に位置決めを行う構造とした。アノードは、3次元測定器による実測により位置決めを行った。

グリッドパルサーは、Kentech 社製のものを使っている。ユニットを交換することで、0.56, 0.7, 1.05 [nsec] のパルス幅が選択可能である。この中から、ブースターリングへの入射効率のよいものを選ぶことになる。このパルサー電圧とバイアス電圧は、新たに開発した短パルス伝送線路を通して、カソードに供給される。

電子銃の電極の設計には、GPT と POISSON により行った。POISSON により静電場を計算し、計算された静電場のマップファイルを GPT に取り込んで、ビームトラッキングを行った。

チェンバーは残留磁場の少ない SUS316L を用いた。効果のほどは分からないが、放電防止を目指し、その内面は複合電解研磨を行い鏡面状態に仕上げた。

直流の電子銃は、その静電場によりホコリを吸着しやすい。これは放電に対して望ましくないため、電子銃の高電圧部と電源はヘパフィルターを備えた簡易的なクリーンルームで囲んだ。これは、人に対する感電防止も兼ねている。

表 2: 電子銃とその電源の仕様

電子銃電圧 (通常運転)	DC100 [kV]
ビームパルス幅	1 [nsec] 以下
アノード電流 (ピーク)	3 [A] 以上
カソード	CPI 社 Y-845
高電圧電源	DC 0-120 [kV] 連続可変
グリッドパルサーパルス幅	0.56, 0.7, 1.05 [nsec] 選択
グリッドパルサー電圧	180-300 [V] (負荷 50 Ω)
グリッドバイアス電圧	0-200 [V] 連続可変

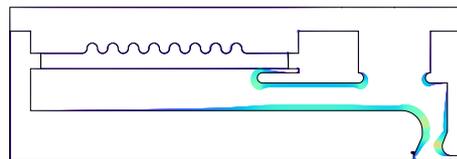


図 4: 電子銃の表面電場。表面から法線方向に伸びた色つきの長さ、色で電場強度を表現。

4.3 プリバンチャー・加速管

表 3 にプリバンチャーおよび加速管の仕様を示す。

プリバンチャーは標準的なダブルリエンタラント型空洞で、RF は N 型コネクタによりフィードされる。410 [W] の RF 電力を投入し、100 [keV] のビームに

13.5 [keV]の速度変調を与える。機械加工に必要なプリバンチャーの寸法は、MW-Studio^[6]を用いた三次元電磁場解析により決められた。結合度は、周波数と位相の関係を計算し、計算結果を理論式でフィッティングすることにより求めた外部Qにより評価した。

バンチャー加速管および二本のレギュラー加速管は、進行波型の加速管となっている。これらの加速空洞のコーナーはR8 [mm]としている(図5を参照)。これにより、従来のコーナーが直角になっているものに比べ、シャントインピーダンスが8 [%]向上した。また、レギュラー加速管は、従来の準定電界型とは異なり完全な定電界型としている。これらの二つの方式を比べると性能はほとんど変わらない。また、設計や製作の手間も変わらないので、定電界型を選択した。RFの条件や製作精度の検討を行い、加速管のディスク穴径の分布を決めた。最終的に決まったディスク穴径の分布は、SLACの3m加速管の後半部と良く似ている。

加速管の場合はカップラー部を除いて軸対称なので、二次元の電磁場解析コードが使える。ここでは、SUPER-FISHよりも精度が良く、進行波も取り扱えるNATSUI^[7]コードを用いた。全ての加速セルにおいて、メッシュサイズによる収束の様子の確認を行い、注意深く寸法計算を行った。その結果、寸法の計算精度は1 [μm]以内に収めることができた。

加速管のカップラー部の寸法計算には、MW-Studioを用いた。その計算モデルを図5に示す。カップラー部の設計で重要なことは、(1)導波管系とのマッチングをとる、(2)ビーム軸付近の電磁場の対称性、(3)2π/3モードの周波数である。マッチングの計算には、外部Qを計算する方法とKyhlの方法^[8]を用いた。カップリングアイリス寸法が最適値から遠い場合には、外部Qを用いる方が便利である。最適値に近づくと、Kyhlの方法が計算精度が高い。ビーム軸付近の電磁場の対称性は、ビーム軸付近の磁場を確認しながら、導波管と反対側のくぼみ(三日月カット)の寸法を調整した。周波数の調整は、空洞壁の寸法調整により行った。2π/3モードの周波数の確認にも、Kyhlの方法が有効である。

実際の調整加工では、カップリングアイリスは計算値よりも、2 [mm]小さい寸法から始めた。最終的には、MW-Studioで計算した寸法に近い値となった。

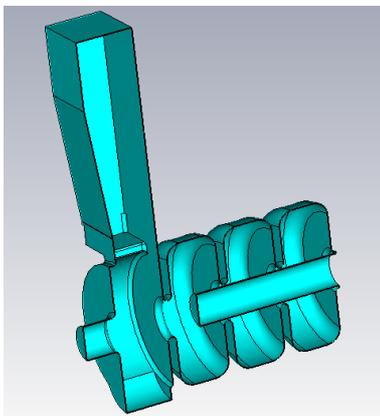


図5: 加速管のカップラーの三次元RF計算の様子。

表3: プリバンチャーと加速管の仕様。これらの高周波空洞のQ値は、計算値の90 [%]以上と仮定している。

運転周波数	2856 [MHz]
プリバンチャー	
シャントインピーダンス	0.8 [MΩ] 以上
Q値	9500 以上
カップリング (β)	5±2 以内
RF電力	410 [W]
ギャップ電圧	13.5 [kV]
バンチャー加速管	
加速セル数	26
全長(フランジ間隔)	976 [mm]
Q値	13700 以上
シャントインピーダンス	57 [MΩ] 以上
フィリングタイム	0.395 [μsec]
RF電力	7 [MW]
加速エネルギー	11.5 [MeV]
レギュラー加速管	
加速セル数	40
全長(フランジ間隔)	1476 [mm]
Q値	13900 以上
シャントインピーダンス	87 [MΩ] 以上
ロスパラメーター	28.5 [kV/nC]
フィリングタイム	0.542 [μsec]
RF電力	11 [MW]
加速エネルギー	22 [MeV]

4.4 電磁石と電源

低エネルギー系の収束には、ブリリアンフローに近い磁場をつくる空芯の5組のコイルを用いている。この磁場がカソード表面まで達するのを防ぐために、電子銃にはバックアップコイルを、電子銃直後には磁気シールドを設けている。ライナックには、バンチャー加速管直後と第一レギュラー加速管直後に、それぞれダブレット(図1のQF, QD)を配置している。また、BT系には、ブースターリングとのマッチングのために、3台のQ磁石がある。ライナック部のステアリング磁石は全て空芯として、加速管に抱かせる方式にした。これは、加速管の間が狭いので、スペースの節約を目的としている。30度偏向後のBT系のステアリング磁石2台(図1のST)はヨーク付きで、手のひらにのるサイズである。この2台の磁石は垂直方向のみの補正に用いる。水平方向の補正は、偏向磁石のトリムコイルを用いることにした。

これらの電磁石設計では、二次元計算にはPOISSONを三次元計算にはEM-Studio^[6]を用いた。これらのシミュレーションコードは、この程度の電磁石設計に十分な計算精度がある。磁場計算よりも、電源容量や線材の選定のための熱計算の方が手間がかかる。コイルの熱計算は、自作のコードあるいはPOISSONを使った。

電源はコストを考慮して、市販のスイッチング電源、(株)高砂製作所のZXシリーズを選択した。特に安定度の厳しい偏向磁石の電源については、その特性も測定

し、問題の無いことを確認している。この市販の電源を用いることにより、大幅なコスト低減が達成できたことは言うに及ばず、小型化および制御の容易性の意味でも大きなメリットがあった。大量に製造販売されているので、故障が生じたときに迅速な交換が可能である。

4.5 ビームモニター

ライナックおよびBT系のビームモニターは、ビーム電流/電荷測定用に4台の高速CT(図1のCT)と1台のチャージモニター(図1のCM)を備えている。それぞれ、Bergoz社製の標準品を用いた。また、ビームダンプはセラミックスにより絶縁されているため、そこでも電荷量の測定が可能である。ビーム位置/形状観測用には、5台のスクリーンモニター(図1のSM)を用いる。また、BT系出口にも、位置モニター(図1のBPM)を備えている。ビームエネルギー測定には、30度偏向磁石(図1のBM)と幅1mmのスリット(図1のSLT)、チャージモニターあるいは高速CTを用いる。また、スリットを用いなくてBT系の最終のスクリーンモニターでもエネルギーの測定が可能である。エミッタンスの測定は、偏向磁石前後のQ磁石とスクリーンモニターで行う。

4.6 真空系

ライナックおよびBT系は、8台の排気速度55[l/sec]のイオンポンプ(図1のIP)で排気する。そのうち2台が電子銃用、4台が加速部用、2台がBT系用である。真空度の監視は、これらのイオンポンプ電流と2台のBAゲージ(図1のBA)により行っている。

ライナックの設置場所が狭いため、ビームライン上の真空機器の接続にコンフラットフランジの使用をあきらめた。代わりに、EVAC社のアルミエッジシールのクイックフランジNW40を採用した。このフランジはスペースの節約になる半面、コンフラットフランジに比べ取り扱いが難しい。接続するフランジのアライメントが悪いとリークが発生することがあった。ビームラインから外れた箇所はコンフラットフランジを用いた。接合するパイプは、SUS304のBA管の電界研磨仕上げとした。

独自に作成したコードで真空システムの真空度の評価を行った。それは、真空領域を適当に分割し、領域間のコンダクタンス、脱ガス量、排気速度から真空度を計算する。コンダクタンスの計算は、参考文献^[9]に示されている計算式を用いた。脱ガス量 $[\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}/\text{m}^2]$ は、SUS材: 4.0×10^{-8} 、無酸素銅材: 4.0×10^{-8} 、セラミックス: 1.0×10^{-8} とした。計算の結果の真空度[Pa]は、電子銃本体: 6.9×10^{-7} 、バンチャー加速管中心: 6.6×10^{-6} 、レギュラー加速管中心: $1.1-1.2 \times 10^{-5}$ となった。各イオンポンプは、 $2.6-8.3 \times 10^{-7}$ である。この計算により、ライナックの運転に支障のない真空度の見通しを得た。実機の真空度も計算で得られたものと同程度で、設計通りになっていると考えている。

4.7 制御

ライナックとBT系を構成する電気機器やモニター類(高速CTを除く)は、PLCにより制御される。これらを制御するプログラムは、全てEPICS上で作成された。ライナック用の1台のGUIを備えたPCで制御可能である。加えて、上位のPCからの制御もできる。

5. まとめ

2012年の3月の後半にライナックの組み立て作業が完了(図6)し、すぐにRFエージングを始め、月末には仕様のビームを確認した。全ての機器が設計通りに動作していると考えている。かなりの短期間でライナックの立ち上げができた。

ビームを出すまでのライナックのコンディショニング(主にRFエージング)は、非常に簡単であった。これは、RFパルス幅が0.6[μsec]程度と短かったからである。ビームのパルス幅が1[nsec]と短いため、RFパルス幅は加速管のフィリングタイムよりも少しだけ長ければ十分である。電子銃同様、ここでもビームパルス幅を1[nsec]としたことで、加速器の運転を容易にしている。

本ライナックを設計する上で、様々な計算機シミュレーションを行った。近年の精度の向上により、物理的内容を理解し注意深く使いこなせば、ほぼ設計寸法を得ることができるようになってきている。我々のように過去の加速器設計の資産がないような者でも、一通りの設計が可能であるという実感が得られた。

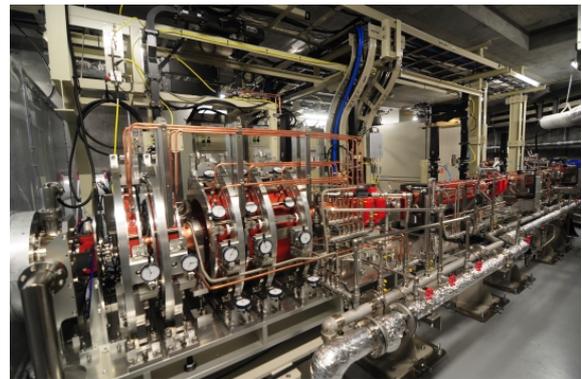


図6: 中部シンクロトロン入射用50MeVライナック

参考文献

- [1] N. Yamamoto, et al., "ACCELERATORS OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY PROJECT", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, May, 23-28, 2010.
- [2] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/index.htm>.
- [3] K. L. Bane, et al., "WAKE FIELD AND WAKE FIELD ACCELERATION", SLAC-PUB-3528, Dec., 1984.
- [4] K. R. Crandall, et al., "TRACE 3-D Documentation".
- [5] T. Shintake, et al., "Design and Construction of Electrostatic Separators for TRISTAN Main Ring", KEK Report 88-17, Mar., 1989.
- [6] Computer Simulation Technology, <http://www.cst.com/>.
- [7] 夏井拓也, "高周波電磁場解析のための2次要素を使った有限要素法の研究", 秋田工業高等専門学校専攻科特別研究論文, 2005.
- [8] E. Westbrook, "MICROWAVE IMPEDANCE MATCHING OF FEED WAVEGUIDES TO THE DISK-LOADED ACCELERATOR STRUCTURE OPERATING IN THE $2\pi/3$ MODE", SLAC-TN-63-103, 1963.
- [9] 株式会社アルバック, "新版 真空ハンドブック", 株式会社オーム社, 2008.