

J-PARC 加速器

山崎良成

日本原子力研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

J-PARC 計画は 400 MeV のリニアック、エネルギー 3 GeV でビーム出力 1 MW の速い繰り返しのシンクロトロン (rapid-cycling synchrotron, RCS)、50 GeV 主リング (main ring, MR) の加速器群とそのビームを使う実験施設群からなっている。施設は、現在平成 18 年度完成を目指して建設中である。J-PARC 加速器のために、その高いビーム出力を実現すべく、多くの新しい技術を考案した。例えば、磁性合金 (magnetic alloy, MA) を装着した空洞を備える高周波加速系、 π モード安定化ループ (π -mode stabilizing loops, PISL) を装着した RFQ リニアック、高周波チョッパーなどである。これらの新技術の最近の開発状況および加速器建設状況を報告する。

1 序

原研と KEK が東海に共同で建設している大強度陽子加速器施設 [1-7] は、昨年から “J-PARC” 計画 (Japan Proton Accelerator Research Complex) と呼称されることとなった。建設予算が既についている計画第 1 期は、平成 13 年から建設が開始され、19 年に終了する 6 年計画であり、400 MeV のリニアック、3 GeV の速い繰り返しのシンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、50-GeV のシンクロトロン (Main Ring, MR) からなる (図 1 参照)。

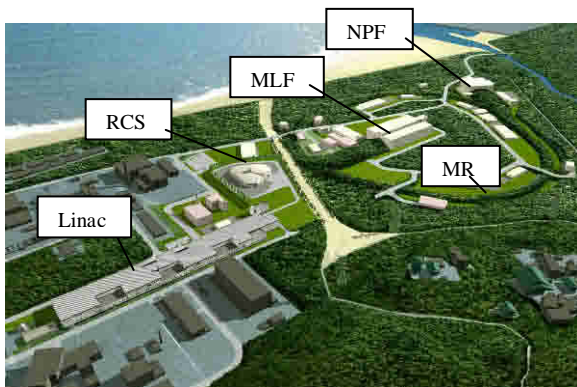


図 1：施設の完成予想図

リニアックにおいては、ピーク電流 50 mA でパルス幅 500 μ s の負水素イオンビームを、400 MeV まで加速し、繰り返し 25 Hz で RCS に入射する。入射においては、従来一般的である断熱捕獲法では入射時のビーム損失が避けられないため、予めリニアックで、ビームの 44% 分だけ間引き (chopping) しておく方法が採られる。リニアック自身は、最大 50 Hz で運転可能にしておき、第 2 期で加速器駆動核廃棄物処理システム (Accelerator-Driven nuclear waste transmutation System, ADS) の基礎研究の予算が認可された時には、そのために残りの 25 Hz が使えるよう準備してある。

こうして RCS では平均 333 μ A のビームが 3 GeV まで加速され、ビーム出力 1 MW になったところで、速い取り出しで、物質生命科学実験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility, MLF) にビームが送られる。そこでは、ミュー粒子生成標的、中性子生成標的をビームが串刺しに通過し、10% がミュー粒子の生成に使用される。一方、RCS から取り出されたビームの内、3.5 秒毎に、4 回続けて MR にビームが入射される。そこで、加速された後、原子核素粒子実験施設 (Nuclear and Fundamental Particle Experimental Facility, NPF) に、遅い取り出しで 1.6 秒間、ビームが供給される。そこではケイ粒子稀崩壊実験やハイパー核実験等が予定されている。

一方、MR のビームは速い取り出しでニュートリノ生成にも使用され、そのニュートリノは 300 km 離れた SUPER KAMIOKANDE 検出器に送られて、長基線実験が行われる。この部分は第 1 期に含まれていなかったが、平成 16 年度から 4 年で建設する計画が、文部科学省から財務省に予算要求された。ただし、MR のエネルギーについては、第 1 期ではフライホイールシステムが未整備のため、40 GeV で運転される。

J-PARC 加速器の特徴については文献 [6] に、設計については Technical Design Report (TDR) [7] に詳しいので、特筆すべきことのみを次節で述べ、その後、最近の J-PARC 加速器研究開発結果および建設状況を報告する。

予算については、平成 15 年度までは、当初予算に補正予算を加えることにより、ほぼスケジュール通りという結果となっている (図 2)。来年度分については、文部科学省から財務省への当初予算の要求だけでは、1 年遅れとなっている。したがって、今後の補正予算のつき方がスケジュールに大きく影響する。平成 15 年度までの契約はほぼスケジュール通りであるが、リニアックの高エネルギー部 (190-400 MeV) については、加速器の主要部分の開札状況を勘案して契約されることとなる。加速器建設は、現時点までは当初のスケジュール通りであるが、今後については、たとえ予算が 1 年遅れになるにしても、加速器の建設は半年遅れに止めるよう調整中である。ただし、MR についてはいづれにしても半年遅れは避けられない。それは、MR および NPF の建設予定地に中世の塩田遺跡が発見されたためである。現在考古学的発掘調査中であるが、これに 1 年程度の期間を要する。建築等はほぼ遅れを生じないように工程を組み直すことができたが、加速器機器搬入スケジュール、性能検査スケジュール等の関係から、ビーム試験開始は半年遅れとなる見込みである。

リニアックおよび RCS の建物はそれぞれ平成 13 年度、14 年度に契約され、ともに平成 16 年度竣工の予定である。一方、MR は 4 工区に分割されており、それぞれ各年に契約されるが、17 年度中には竣工される予定である。現在の建築状況を図 3 に示す。

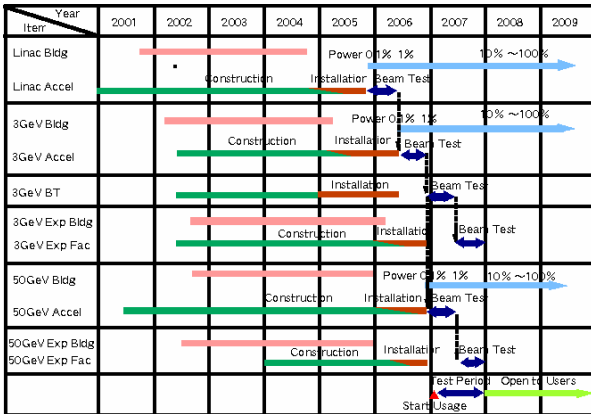


図 2：当初の J-PARC 建設スケジュール。会計年度で表わしてある。



図 3：現在の施設の航空写真

2 J-PARC 加速器の特色

J-PARC 加速器の加速器としての特色は全くその多目的性から生じているといっても過言ではない。すなわち、数 GeV エネルギー領域と数 10 GeV エネルギー領域の両方で MW 級のビーム出力を実現するということである。そこでは、MLF に 3 GeV で 1 MW のビームを供給する RCS が、同時に 50 GeV MR の入射器ともなっているのである。一方、米国の SNS (Spallation Neutron Source) 計画は、中性子源という単一目的の施設であるため、リングでは加速しない蓄積リング (Accumulator Ring, AR) とリニアックの組み合わせという方式も可能であった。

しかし、J-PARC において RCS 方式を選んだ理由が、その多目的性にあつたにしても、RCS 方式自身 AR 方式と比較して以下のような長所を有しているのである。まず第 1 に、RCS でビームエネルギーを高くすることにより、同じビーム出力に対してビーム電流が少なくて済むことがあげられる。入射エネルギーが高くなると、入射に必要な磁場によるローレンツ力が強くなり、負水素イオンの電子が剥ぎ取られやすくなる。そのため、入射ビームのエネルギーはせいぜい 1.3 GeV 程度に限られ、事実上 J-PARC のような 3 GeV の AR は不可能である。第 2 に、入射時のビーム損失率に余裕が出るということがあげられる。一般に、ビーム入射時のビーム損失は避けられず、そのために生じた加速器機器の残留放射能がある一定水準を越えると、人間が立ち寄れなくなり、機器の修理が不可能になる。したがって、残留放射能をその水準以下に抑える必要があり、

そのために、許されるビーム損失量に限界が出、最終的にビーム出力を決めてしまう。ところが、残留放射能生成断面積はビームエネルギーにほぼ比例するので、入射エネルギーが AR より低くて済む RCS では、入射時に許されるビーム損失量が多いのである。

一方、大出力の高エネルギー RCS 方式の実現には多くの問題を解決する必要がある。中でも、以下の項目は特に重要である。まず第 1 に、速く加速するためには高電場勾配の高周波加速空洞の、それも大きなシステムが必要である。この要請は、磁性合金 (magnetic alloy, MA) 空洞の開発によって初めて可能となった[8]。第 2 には、磁石[9]も真空チェンバーもともに速く変化する磁場による渦電流の発生を極力抑制する構造にしなければならない。第 3 には、低エネルギー入射での空間電荷効果を軽減するために、大きなビーム口径の磁石を使用せねばならず、中でも入射系の設計、製作は多くの困難がある。第 4 には、多くの磁石ファミリー間の磁場振幅および位相を正確に制御する必要がある。

RCS 自身の課題に加え、リニアックのビームにも、RCS への入射器として厳しいビーム性能が求められる。すなわち、精確な運動量(J-PARC では $\Delta p/p < 0.1\%$) および低エミッタンス(J-PARC では $4\pi \text{ mm mrad}$) が求められるのである。これらは、入射時のビーム損失を 1% 以下に止める必要性から要求されているので、いわゆる rms エミッタンスではなく、99% エミッタンスである。また、RCS のビーム口径が大きいにも関わらずこのような小さなエミッタンスが要求されるのは、小さなエミッタンスのビームで大きな口径にまんべんなくビームを分布させるためである。これらの高品質なビームを供給するために、まず RFQ(Radio-Frequency Quadrupole) リニアックに π モード安定化ループ (π -mode stabilizing loop, PISL) [10, 11] を考案した。また、横方向振動数に融通性を持たせるため、DTL(Drift-Tube Linac) のドリフトチューブ内に装着された 4 重極磁石は、永久磁石ではなく、電磁石を使用することとした。一般に、低エミッタンスで大電流のビームを、エミッタンス増大なく輸送していくためには、ビーム進行方向にも横方向にも頻繁にかつ強い収束力を必要とし、そのためには加速周波数はなるべく高いことが望ましい。これは、高周波技術上も、放電限界や高周波機器のサイズの観点から望ましい方向である。しかしながら、その結果、加速管のサイズが小さくなり、ドリフトチューブも小さくなることから、その中に装着される磁石を電磁石にすることは非常に難しくなる。それに対し、電鑄法とワイヤーカッティング技術を組み合わせて、非常に小さく、空間効率のよい、水冷管路を備えたコイルを開発した[12]。

リングの運動量コンパクション因子 (Momentum Compaction Factor) についていえば、RCS は非常に小さい値、MR は負の値としてある[13]。したがって、加速途中でトランジションを横切ることにはない設計となっており、トランジションを横切の際に不可避なビーム損失が起こらないようになっている。MR についていえば、ビーム損失を 1% 以下に抑えながら、大電流の遅いビーム取り出しを行うのが最も解決困難な課題であったが、0.1 mm のワイヤーからなる静電セプトラムを開発することによりめどを得つつある[14]。

3 リニアック

J-PARC リニアックは、体積生成型負水素イオン源、50 keV の低エネルギービーム輸送系 (low-energy beam transport, LEBT)、エネルギーが 3 MeV で加速周波数が 324 MHz の RFQ リニアック、50-MeV で 324 MHz の DTL、190 MeV で 324 MHz の分離型 DTL (Separated DTL, SDTL) および 400 MeV で 972 MHz の高エネルギーリニアックから成り立っている。SDTL とは、4 重極磁石がタンクの外にある DTL のことである[15]。高エネルギーリニアックには環結合型構造 (Annular-Ring Coupled Structure, ACS) [16, 17]を開発している。高エネルギーリニアック以外の殆どすべての加速器機器は 14 年度末までに製造契約が終了している。高エネルギーリニアックについては、以下のような方針で契約される。

RCS の空間電荷効果について、更に十分な余裕度を確保するため、RCS のビーム口径を当初の計画より大きくした。すなわち、エミッタンスの値にして当初の設計の 1.5 倍とした。これで、ラスレット・チューン・シフト (Lasslette tune shift) が -0.16 という小さな値となった。その上、RCS に将来必要となりうる機器の装着が可能となるよう、その全周を 10/9 倍した。これに充てる予算を手当てするため、まず高エネルギー・リニアック以外のすべての加速器機器の契約を行い、その残額で高エネルギー・リニアックを建設することとした。それは、リニアックのエネルギーが 400 MeV より低くても、RCS へビームを入射することができ、かつリニアックのエネルギーは後に増強することが可能であるからである。当然、低いエネルギーでの入射はビーム強度を低くしてしまうので、リニアックのエネルギーを当初の 400 MeV とするべく努力を続けている。

計 3 台の DTL については、すべての部品が完成納入され、計 32 台の SDTL のうち、12 台の部品が完成している。このうち、3 台の SDTL と DTL の 5 セル試験機の大電力試験が終了している。DTL の 1 号機 (20 MeV) は、組立が終了し、チューナー位置およびポスト結合器の位置調整も終了した。この調整の結果、要求性能の 1% の電場一様性が既に得られている [18, 19]。最近、大電力投入試験が行われ、高周波パルス幅 600 μ s、繰り返し 50 Hz の要求性能で、ピーク電力は要求性能の 1.2 倍の 1.2 MW を達成し、現在長時間耐久試験中である。

RFQ リニアックおよび中間エネルギー・ビーム輸送系 (medium energy beam transport, MEBT) のビーム試験は今年の 3 月まで、ほぼ 1 年近く KEK で続けられていた。上述の DTL 第 1 タンクは、その後トンネルに装着され、ビーム試験のために高周波大電力を投入しているものである。ビーム試験の詳細は第 6 節で述べる。



図 4: KEK でのビーム試験のために装着された DTL 第 1 タンク

4 3 GEV RCS

RCS の加速器機器についてはほぼ半分が 14 年度末までに製造契約が終了している。すなわち、すべての偏向電磁石 (BM)、すべての 4 重極電磁石 (QM)、これらの電源の内 2/3 相当、これらのためのセラミックス真空チェンバーのすべて、すべてのキッカーおよびその電源である。今年度の発注はしたがって、残りの電磁石電源、バンパ電磁石およびその電源などの入射系、高周波空洞、高周波源の残りなどである。特に、バンパ電源は、入射時の荷電変換薄膜の温度上昇を低減するために、ビームの薄膜通過回数を極力減らす必要があり、入射終了後直ちに磁場を下げねばならない。その上、入射系が大口径の電磁石に対応せねばならないので、非常に大掛かりな電源になってしまう。

ところで、BM、QM の渦電流低減のために、以下の手だてを行っている。まず、コイルにはアルミ・ストランド線を使用して、渦電流による温度上昇および熱損失の低減と、回路網の Q 値の劣化を抑制している。次に、鉄芯には、厚さ 0.5 mm の積層シリコン鋼を使用し、芯線および縁板には細い溝を加工してある。さらに、磁場の集中と飽和を避けるため、ロゴスキー様の外縁処理を施してある。渦電流効果の低減に関しては、計算機による解析に加え、BM および QM の試験機を製作しての実験を通じ、最適化を行ってきた。このような渦電流低減による交流損失の低減は、電磁石系の安定な運転にとって特に重要である。電磁石系は BM の 1 個を含め全体で 8 個の回路網から成り立っており、その間の位相安定性の確保には回路網の Q 値を出来るだけ高く保持する必要があるからである。

しかしながら、アルミ・ストランド線へのポリミド樹脂含浸は非常に困難を伴う。エポキシ樹脂ではなく放射損傷の比較的少ないポリミド樹脂を使う必要があるが、ポリミド樹脂は非常に流れにくい性質を持っているからである。多くの試験の結果、真空含浸したうえに圧入して、最終的には図 5 に示すごとく、ポリミド含浸アルミ・ストランド線コイルの製作に成功した。



図5：ポリミド樹脂を含浸してコイルに成形された
ストランド線の断面図

5 50-GEV MR

50 GeV MR については、高周波系、入出射系以外の殆どの加速器機器は既に発注されている。96 台の長さ 5.85 m の BM の内、最初の 1 号機が納入され、磁場分布測定および励磁試験が行われた (図 6)。

第 2 節で述べたように、MA 空洞は以下のような画期的な性質を持っているが故に、両リングとも MA 空洞を使用する。まず、従来のフェライト空洞に比較して、10 倍近い高電場勾配を生成することができる。この MA 空洞なくしては、高ビーム出力 RCS は不可能であったと言っても過言ではない。さらに、その極めて低い Q 値のために (場合によっては 1 以下も可能)、周波数同調系の必要がなく、高周波制御系が著しく簡素化できる。しかしながら、この Q 値が極めて低いにも関わらず、分流抵抗 R が実用になるほど高いということは、R/Q が極めて高いことを意味し、空洞での蓄積エネルギーが極めて低いこととなる。その上、Q 値が低いのであるから、極めて広帯域のビーム負荷補償系が必要となる。これは言わば、空洞がほとんど純粋抵抗に近く、ビームの作る逆電場をそのままの形で相殺する必要があるということである。その結果、非常に広帯域の大電力高周波源を開発する必要がある。不必要に広帯域の系にすることを避けるため、リングの特性に応じて Q 値と共振周波数を最適化する。それには、MA コアを切断してギャップを設けるのであるが、RCS には $Q = 2.9$ にするために、1.5 mm のギャップを、MR には $Q = 10$ にするために、10 mm のギャップを設ける必要がある。

図 7 に加速空洞、大電力高周波増幅器を含む MR 用の高周波系の試験機を示す。500 kW、デューティー 50 % というフルスペックで 49 時間の耐久試験が行われた。ここでは、MA コアは直接水冷されている。

3 GeV RCS 用高周波系においてはしかし、そのギャップを 1 mm 程度にする必要があるため、高い精度のコアの加工が必要である。コアといっても、元来 MA のテープに樹脂を含浸したものであり、その精度の高い加工は容易ではない。ただ一つ超音速のウォーター・ジェット加工が、有望であるが、成形コアの密度が様でないため、その加工精度には限界があり、実用化には多くの困難があった。

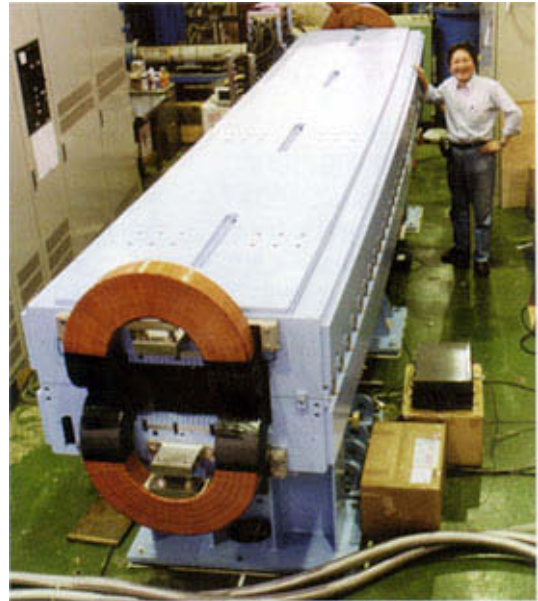


図6：MR 用 BM の初号機



図7：MR 用加速空洞と最終段増幅器

6 リニアック初段のビーム試験

現在 KEK でリニアック最上流部が完成し、そのビーム試験を行っている[20, 21]。現在完成しているシステムは、負水素イオン源、LEBT、3 MeV RFQ リニアック、MEBT、DTL 第 1 タンクである。DTL 第 1 タンクのビーム試験に取り掛かるべく、第 2 節に述べたごとく、その大電力試験を行っている。ここで装着されている RFQ は大型ハドロン (Japan Hadron Facility, JHF) [22]計画用に製作されたものである。フルスペックの 1 MW 用 (リニアック・ピーク電流 50 mA) ではなく、JHF の仕様 30 mA 用である (J-PARC 用フルスペックの RFQ は現在開発中である)。MEBT の出口で 28.5 mA のピーク電流に対し、水平エミッタンスおよび垂直エミッタンスとしてそれぞれ $0.252 \pi \text{ mm mrad}$ および $0.214 \pi \text{ mm mrad}$ (規格化 r. m. s.) が得られており、当初の仕様を完全に満足する結果が得られている。

MEBT に装着されたビーム・チョッパーのビーム試験も行われた[20]。これは、JHF、J-PARC 用に考案された極めて速い立ち上がり、立ち下がり的高周波チョッパーであり、

ビーム試験の結果、所期の 10 ns のビーム立ち上がり、立ち下がりが実現され、ビーム損失の低減から来る仕様を満足する結果が SNS に先駆け得られている。

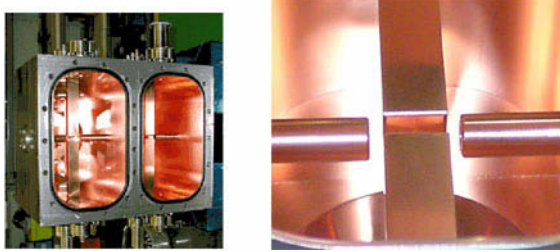


図 8 : MEBT に装着された高周波チョッパー。左図は 2 個の偏向チョッパー空洞を示す。右図は偏向電場電極の近接図である。ここで、ビームは左から右へ通過する。

ところで、すべてのビームを 3 MeV の MEBT で偏向させると、ビームのストッパーがとてもたないで、予め低エネルギーの LEBT でかなりの分は止めておくようにしている。このプリチョッパー[7]は MA を使用した小型インダクション・リニアックであり、RFQ への入射エネルギーより 9 keV だけエネルギーを低くする。ここでは、RFQ がビーム・エネルギーの濾過効果を持つよう、RFQ 自身も特殊な設計としてあり、エネルギーの低くなったビームは透過してこない。このプリチョッパー系もビーム試験を終了しているが、このプリチョッパー系だけでは、ビームのエネルギーが低すぎて、速度が遅いため、速いチョッピング機能を果たすことが出来ない。そこで、プリチョッパーとチョッパーの組み合わせが必要であるので、その組み合わせ試験を現在計画中である。そこでは、両者のタイミングの取り方が課題となる。

7 まとめ

上述したように、400 MeV のリニアック、3 GeV の RCS、50 GeV の MR からなる J-PARC 加速器は、多くの新しく考案、開発された技術をもとに建設が進められている。開発は順調に進んでおり、加速器機器の製造も今までのところ予定通り進んでいる。RCS からの最初のビームは平成 19 年 3 月に MLF に導かれると同時に、MR へも入射する予定であったが、塩田遺跡の発掘もあり、半年程度遅れる見通しである。

参考文献

[1] "The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators", KEK Report 99-4, JHF-99-3 and JAERI-Tech 99-056 (1999).
[2] Y. Yamazaki et al., "Accelerator Complex for the Joint Project of KEK/JHF and JAERI/NSP", Proc. 1999 Part. Accel. Conf., THDL1 (1999).
[3] Y. Yamazaki et al., "High Intensity Proton Accelerators for the JAERI/KEK Joint Project", Proc. 2000 European Accel. Conf., THOAF201(2000).
[4] Y. Yamazaki et al., "The Construction of the Low-Energy Front 60-MeV Linac for the JAERI/KEK Joint Project", Proc. 2000 Linac Conf., TUD07 (2000).

[5] Y. Yamazaki, "The Present Status of the JAERI/KEK Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators," Proc. 2001 Part. Accel. Conf., W0AA007 (2001).
[6] Y. Yamazaki, "The JAERI/KEK Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators," Proc. 2002 European Part. Accel. Conf., TUZGB003, pp. 163 (2002).
[7] "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC," KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
[8] C. Ohmori et al., "High-Field Gradient Cavity for JAERI-KEK Joint Project," Proc. 2002 European Part. Accel. Conf., WEALA001, pp. 257 (2002).
[9] N. Tani et al., "Design of a Dipole Magnet for the 3 GeV Synchrotron of the JAERI/KEK Joint Project," Proc. 2002 European Part. Accel. Conf., TUPD0028, pp. 2376 (2002).
[10] A. Ueno and Y. Yamazaki, Nucl. Instr. Meth. A300, 15 (1990).
[11] A. Ueno et al., Proc. 2002 Linac Conf., TU423 (2002).
[12] F. Yoshino et al., Proc. 2000 Linac Conf., TUD10 (2000).
[13] S. Machida et al., Proc. 1997 Part. Accel. Conf., pp. 1962 (1997).
[14] M. Tomizawa et al., "Design of Slow Extraction from 50 GeV Proton Synchrotron," Proc. 2002 European Part. Accel. Conf., THPLE009, pp. 1058 (2002).
[15] T. Kato, KEK Report 92-10 (1992).
[16] T. Kageyama et al., Proc. 1994 Linac Conf., 248 (1994).
[17] H. Ao et al., "Cold-Model Tests of an Annular Coupled Structure for Upgrade of a J-PARC Linac", Proc. 2003 Part. Accel. Conf., RPAB046 (2003).
[18] F. Naito et al., Proc. 2002 Linac Conf., TH102 (2002).
[19] F. Naito et al., "Tuning of the RF field of the DTL for J-PARC," Proc. 2003 Part. Accel. Conf., RPAB049 (2003).
[20] T. Kato et al., "Beam Study with RF Choppers in the MEBT of the J-PARC Proton Linac," Proc. 2003 Part. Accel. Conf., TPAG014 (2003).
[21] M. Ikegami et al., "Beam Commissioning of the J-PARC Linac Medium Energy Beam Transport at KEK," Proc. 2003 Part. Accel. Conf., TPAG035 (2003).
[22] "JHF Accelerator Design Study Report", KEK Report 97-16 (1998).