

J - P A R C用リニアックの現状

長谷川 和男^{1,A)}、大強度陽子加速器リニアックグループ^{A,B)}

A) 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

B) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1 - 1

概要

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、大強度陽子加速器計画（J-PARC計画）を共同で推進している。加速器はリニアック、3GeVシンクロトロン、および50GeVシンクロトロンから構成され、それぞれについて開発、建設を行っている。

ここでは、J-PARC計画で用いるリニアックの各構成機器について、その現状を報告する。

1. はじめに

大強度陽子加速器を用いた科学技術の展開を図るために、原研とKEKは、「大強度陽子加速器計画、愛称J-PARC計画（Japan Proton Accelerator Research Complex）」を共同で推進している。施設は原研東海研究所内に建設中であり、ビームは物質科学、生命科学、核変換実験、素粒子物理や原子核物理に利用される。

2. リニアックの構成

J-PARC計画のリニアックの構成および主なパラメータをそれぞれ図1、表1に示す。詳細な設計パラメータ等は技術検討書[文献1]を参照されたい。加速粒子は、次段の3GeVシンクロトロン（Rapid Cycling Synchrotron, RCS）への荷電変換入射のために負水素イオンであり、平均ビーム電流は333 μ A、ピーク電流は50mA、ビームパルス幅は0.5msecである。イオン源、RFQ（Radio

Frequency Quadrupole）、DTL（Drift Tube Linac）、SDTL（Separated-type Drift Tube Linac）、ACS（Annular Coupled Structure）の加速器で構成される。加速構造が変化する部分では、MEBT（Medium Energy Beam Transport）を用いて横方向および縦方向のマッチングを取る。

エネルギーは400MeVまでの加速でRCSに入射するが、将来の第2期計画では超伝導リニアックで更に加速し、超寿命放射性廃棄物の核変換実験（Accelerator Driven Nuclear Transmutation System, ADS）にビームを利用する計画である。

繰返し周波数は、RCS入射時は25Hz、ADSとの同時利用時で50Hzである。

3. リニアックの開発、建設の現状

3.1 イオン源

負水素イオン源として、原研ではセシウム添加型[2]、KEKではセシウム不添加型[3]を中心に開発を行っている。セシウム添加型では、磁気フィルターの最適化によりビーム電流向上を図ることで72mAが得られ、イオン源での目標ビーム性能60mAを達成した。現在はメンテナンス周期を長くするためのフィラメントの長寿命化を中心に、研究開発を進めている。一方、セシウム添加によりビーム強度の向上が実証されてはいるが、イオン源の引き出し部分やRFQでの放電によるビームの不安定性も懸念される。KEKで行っているセシウム不添加型のイオン源では、プラズマ電極温度やプラズマ電極厚さなどの最適化により、ピーク電

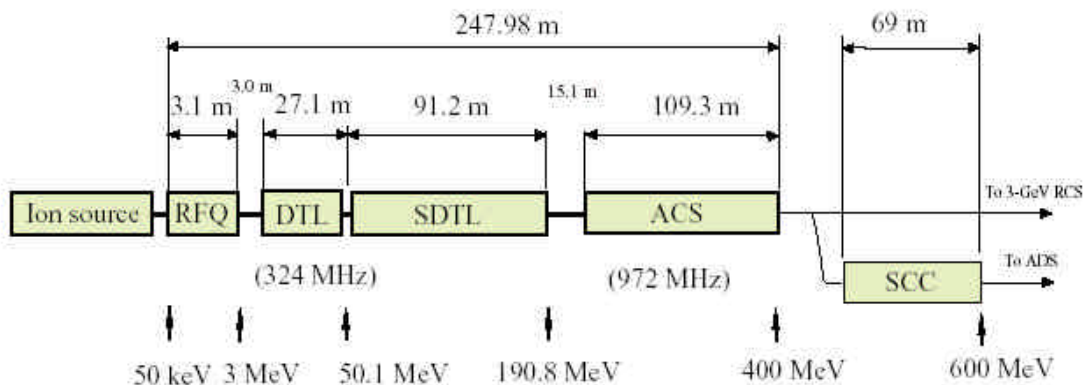


図1 J-PARC用リニアックの構成

¹ E-mail: hasegawa@linac.tokai.jaeri.go.jp

表1 リニアックの主なパラメータ

Parameter	RFQ	DTL	SDTL	ACS
Output energy (MeV)	3	50	190.8	400
Frequency (MHz)	324	324	324	972
Section length (m)	3.1	27.1	91.2	107.2
Number of cells	294	146	160	714
Accelerating field (MV/m)		2.5 ~ 2.9	2.5 ~ 3.7	4.12
Vane voltage (kV)	82.9 (1.8KL)			
Number of cavities	1	3	32	42
Synchronous phase (deg)	-30	-30	-27	-30
Drive power (MW)	0.34	3.3	16.6	32.0
Beam power (MW)	0.15	2.4	7.0	10.5
Total RF power (MW)	0.48	5.7	23.6	42.5
Number of klystrons	1	3	16	21

流で34mA以上、パルス幅も要求仕様の8割である0.4msecを達成した。J-PARC用リニアックでは、このイオン源を用いてコミッショニング、当初の運転を行う予定である。

3.2 RFQ,MEBT

RFQではイオン源からのビームを3MeVまで加速する。コミッショニング開始当初ではJHF用に開発されたピーク電流30mAのRFQを用いる予定である。リニアック上流部のシステムとしての完成度を高める目的で、RFQに続くMEBTまでのビーム試験をKEKで行った。この試験ではMEBT通過後のエミッタンス、RFチョッパーによる高速チョッピングの試験などを行った[4-7]。

エミッタンス測定では、ダブルスリット型のモニターを用い、その結果は3次元Particle-in-cell法を用いた粒子シミュレーションコードであるIMPACTと比較し、実験を定性的に再現できる結果が得られた[4]。

次段のRCSにビームを入射・蓄積し、ビーム損失を低減するために、ビームを約1MHzでチョップ、整形する必要がある。このために、MEBTには2台の324MHzのチョッパー空洞(RFD)を設置している。RFDはTE11モードで励振し、ビームを横に偏向させる。当初は空洞の共振周波数とビームの周波数がずれていたが、カップリングループの改良によって、特性を悪化せず改善できた[5]。このチョッパーを用いたビーム試験の結果、立上がりりと立下り時間が10nsecと非常に高速であり、かつ、チョッパー動作中での漏れビームが測定限界以下に抑えられる良好なOn/Off特性であることが確認された[6]。このシステムは、チョップパルス列をコントロールできる手段として、J-PARC加速器の運転に有益なものとなる。

MEBTまでの試験で得られたエミッタンス情報は、PARMTEQMやTOUTATISといったRFQのビームシミュレーションコードを用いた計算値と比較検討を行い、実験データをほぼ再現する結果が得られた

[7]。今後は、この結果を更に下流のシミュレーションに反映する予定である。

最終目標となるビーム電流である50mAの加速に対応したRFQは、これらのビーム試験と並行して開発を行っている。無酸素銅製の4分割構造をレーザー溶接で接合した試作機を製作し、調整を行っている。

3.3 DTL, SDTL

DTLは3-50MeV、SDTLは50-190MeVの領域の加速を行う。SDTLは、収束用Q磁石を空洞と空洞の間に設置し、空洞内のドリフトチューブに内蔵しない構造である。

DTLは3空洞で構成し、3-20MeVまでの最初の空洞は、現在KEKの陽子リニアック棟において、ビーム加速のための設置、調整を精力的に行っている。空洞にドリフトチューブやチューナ、カプラを取り付け低電力試験を行った。ポストカプラをグループ化して挿入量を変化させ、TM011とポストモードを揃えることで電場の安定化が図られ、平均加速電場を±2%以内に抑えた良好な結果を得ることができた[8]。

SDTLは32台の空洞で構成されるが、その内3台までの大電力試験を行った。試験では空洞の定格電力の3倍以上を問題なく投入し、耐電力性能が非常に高いことが実証された[9]。3台目以降は端板の真空シールを、バイトン-0リングから金属シールに変えた結果、到達真空度が大幅に改善されることも、この試験で確認された。

3.4 ACS

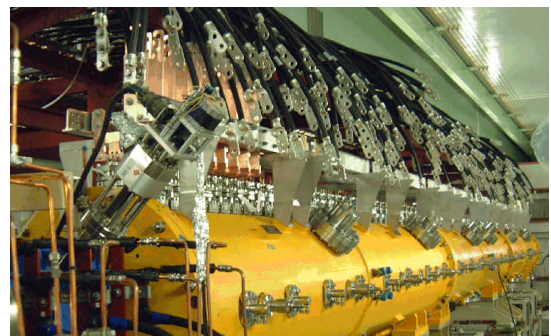


図2 KEKの陽子リニアック棟地下トンネルに設置されたDTL

上部には、つなぎこむ途中のDTQ用給電ケーブルが見える。

190~400MeVの範囲は、電場の軸対称性が良くビームの品質劣化が少ないことが期待される環状結合型構造(ACS)を採用した。現在、加工方法を考慮した空洞形状の最適化、冷却性能の向上、量

産化への対応、などの開発を行っている[10]。初号機として、実際の加速空洞より短いバンチャー空洞（SDTLとACSの間のMEBTに設置する予定）を製作中であり、完成後は大電力試験を始め、各種試験を行う予定である。

電磁気的な最適化設計は、ACSの量産の検討と並行して実施している。導波管と接続されるブリッジカプラ部分について、電磁場解析結果とアルミ製のコールドモデルでの測定結果を比較し、解析の妥当性と測定方法の問題点の確認を行った[11,12]。これらの結果を開口部の形状最適化などに進め、バンチャー空洞の形状決定に反映する予定である。

3.5 高周波源

高周波源にはモデレーティングアノード型パルスクライストロンを用いる。324MHzのクライストロンは開発が終了し、量産の段階にある。また、電源については、すでに納入されたものを用い、KEKにおいてはビーム加速試験やSDTL空洞の大電力試験に、原研では972MHzのクライストロンやRFコンポーネントの大電力試験に使用している[13,14]。

立体回路は電磁場解析ソフトHFSSを使って設計を行い、その計算値と実測値は、VSWRが最小となる寸法の差で数パーセントと良く一致した結果が得られた[15]。さらに、分配器による振幅と位相差を、それぞれ $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$ 以内に測定方法を確立し、この方法を今後の調整に応用していく予定である。

加速電場の安定性はビームの品質を決め、ビームロスを抑えるための重要な要素となる。このためには、全長約300mにわたる各クライストロンステーションに高い安定性を持ってRF基準信号を分配するシステムが必要であり、その開発研究を行っている[16]。恒温化を図った光ケーブルと、ジッターの小さいE/O, O/Eを開発し、要求性能を満たす見通しが得られた。

3.6 制御、モニター、周辺機器等

制御機器として、VME機器、シーケンサーなどのハードウェアと、それを実行するソフトウェアの整備を行っている。KEKでのビーム試験においては、EPICSドライバ開発などを行い、制御系の評価や改良により実機制御の準備を行っている[17]。

J-PARCは大強度ビームを取り扱うことから、わずかなミスやトラブルが大きな事故にまで波及する可能性があり、これを防止し保護する必要性が、他の加速器以上に要求される。このための安全系として、極めて高い信頼性が要求される人的安全系PPS (Personnel Protection System)、機器を保護する目的でマイクロ秒オーダーの高速性を持ってビームを遮断する機器保護系MPS (Machine Protection System) [19]が昨年度発注され、設計検討や試作等を行っている。

また、トラブルに伴うビームロスにより放射化や破壊を防ぐために、リニアックで加速される50Hzの全ビームを取りこぼしなく監視し、トラブル原因を究明するためのプレコーディング機能付き監視装置を設計・製作した[18]。

ビームモニターは電流や位相モニター、ビーム位置モニターなど、運転調整に欠くことができないものである。また、ビームロスを速やかに検知してビームを停止するための損失モニターも、保護システムと相まって重要である。これらのモニターは初号機の試験を経て量産に入り、ビームコミッションまでに整備される予定である[20]。

電力会社との受電点での電圧ひずみは、許容値であるガイドライン以下にすることが要求されている。リニアックでは高周波用の電源や電磁石電源など、多数の電源機器を用い高調波電流が発生する。これらの発生量を評価し、対策として、特高変電所に設置する受動型の高調波フィルターの検討を行っている[21]。また、DTL用のQ磁石電源を100台以上運転するにあたり、ラインチョークと同調フィルターの設計と試作を行い、第11次高調波以上をガイドライン以下に抑制可能であることを実証した[22]。

4. まとめ

大強度陽子加速器に用いるリニアックについて、その開発と建設の現状を示した。各機器について、開発、試験、建設を推進している。

リニアック建家の建設が昨年度着工され、2003年6月時点では、地下トンネル部分の掘削や下流部の杭打ちが終了し、コンクリート打設の段階にある。建家竣工後、リニアック機器の据付、調整を経て平成18年にビーム加速を開始する予定である。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, "Accelerator Technical Design Report for JPARC", JAERI-Tech 2003-044 または KEK Report 2002-13 (2003)
- [2] 小栗英知ほか、本研究会、WP-7
- [3] 池上清ほか、本研究会、WP-16
- [4] 池上雅紀ほか、本研究会、WP-58
- [5] S.Wangほか、本研究会、WP-53
- [6] 加藤隆夫ほか、本研究会、WP-50
- [7] 近藤恭弘ほか、本研究会、TB-2
- [8] 田中宏和ほか、本研究会、TB-3
- [9] 内藤富士雄ほか、本研究会、TP-12
- [10] 林崎則託ほか、本研究会、TB-4
- [11] 青寛幸ほか、本研究会、WP-38
- [12] 秋川藤志ほか、本研究会、WP-39
- [13] 川村真人ほか、本研究会、TP-23
- [14] 山崎正義ほか、本研究会、TP-21
- [15] 菅沼和明ほか、本研究会、TB-5
- [16] 小林鉄也ほか、本研究会、TP-22
- [17] 上窪田紀彦ほか、本研究会、TP-47
- [18] 榊泰直ほか、本研究会、TC-3
- [19] 榊泰直ほか、本研究会、TP-56
- [20] 富沢哲男ほか、本研究会、TP-43
- [21] 千代悦司ほか、本研究会、TP-60
- [22] 掘利彦ほか、本研究会、WP-54