

大強度陽子加速器用リニアックの開発状況

伊藤 崇^{1,A)}

A) 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

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）において、大強度陽子加速器計画が共同して進められている。計画で用いられる加速器は、常伝導リニアック（～400MeV）、超伝導リニアック（400MeV～600MeV）、3GeV シンクロトロン、50GeV シンクロトロンであり、両者の協力の下、鋭意開発が行われている。

ここでは、大強度陽子加速器計画で用いられるリニアック部分の各構成機器に関する開発状況について報告する。

1. はじめに

大強度陽子加速器計画は、原研における中性子科学研究計画（NSP）及び KEK における大型ハドロン計画（JHF）という 2 つの計画を基盤とし、原研、KEK 両者の共同のもと推進されている^[1]。本計画では、原子核物理・素粒子物理、物質科学、生物科学、核変換実験等の研究がなされる予定であり、加速されたビームがそれぞれの研究施設へ供給される。

これらの各実験施設及び加速器は、核燃料を扱う核変換実験施設を建設するなどの点から原研東海研究所内に建設される。

2. リニアック構成

大強度陽子加速器計画で用いられるリニアックの構成を図 1 に示す。イオン源で生成された負水素イオンは高周波四重極型リニアック（RFQ：Radio Frequency Quadrupole linac）によって 3MeV まで加速される。加速ビームは中間エネルギービーム輸送系（MEBT：Medium Energy Beam Transport）で縦及び

横方向のマッチングが行われ、ドリフトチューブ型リニアック（DTL：Drift Tube Linac）に入射される。DTL は 3 つのタンクからなり、ビームは 50MeV まで加速される。50MeV から 190MeV の加速には分離型ドリフトチューブリニアック（SDTL：Separated type Drift Tube Lineac）が用いられる。SDTL の加速原理は DTL と同じであるが、各タンクセル数を 5 セルとし、ビーム収束用の四重極電磁石をタンク間に配置している。190MeV から 400MeV の加速には環状結合空洞型リニアック（ACS：Annular Coupling Structure linac）が用いられる。ビームの収束は SDTL と同じく、各空洞間に設置する四重極電磁石によって行われる。ACS から出射したビームはスイッチング電磁石によって 2 つに振り分けられる。一方は約 176m のビーム輸送系（L3BT：Linac - 3GeV Beam Transport）を通して 3GeV シンクロトロンへ導かれる。他方は超伝導加速器（SCC：Superconducting Cavity linac）へ振り分けられ、600MeV まで加速された後、核変換実験（ADS）で利用される。

これら各加速器の主要パラメーターを表 1 に示す。

3. 加速器構成機器

3.1 イオン源

本計画で用いられるビームは、荷電変換を行った後 3GeV シンクロトロンに入射を行うため、負水素イオンを用いる。現在、原研では Cs 添加型負イオン源の開発^[2]を、また KEK では Cs 不添加型負イオン源の開発^[3]を並行して行っている。リニアックでの加速ビームの平均ビーム電流は 333 μ A、ピーク電流値は 50mA であり、イオン源には 60mA のピーク電流値が要求される。

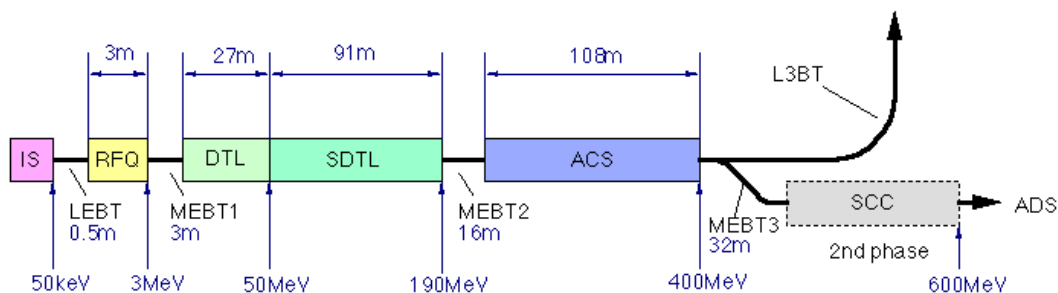


図 1 . リニアックの構成

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

表1. 大強度陽子加速器計画で用いられるリニアックの主要パラメータ

Parameter	RFQ	DTL	SDTL	ACS	SCC
Input Energy (MeV)	0.05	3	50	190.8	400
Output Energy (MeV)	3	50	190.8	400	600
Section Length (m)	3.1	27.1	91.2	109.2	57.7
Frequency (MHz)	324	324	324	972	972
Accelerating Field (MV/m),E0		2.5 ~ 2.9	2.5 ~ 3.7	4.3	9.7~11.1
Vane Voltage (kV)	82.9 (1.8Kilp)				
Number of cavities	1	3	32	46	22
Total RF power (MW)@50m	0.48	5.7	22.1	39.9	10
Number of klystrons	1	3	16	23	15
Bore radius (mm)	3.7 (average)	6.5 ~ 13	18	20	30@Q, 45@Cav.
Number of Cells	294	146	160	690	198

これまでの R&D において、KEK イオン源では約 23mA、原研イオン源では約 73mA というピーク電流値を得ている。表 1 に今までに得られた原研及び KEK それぞれのイオン源の実験結果を示す。

表 2 . イオン源実験結果

	JAERI	KEK
Type	Volume Filament discharge	Volume RF-driven or
Cesium	Used	Not Used
Beam Current	14mA(Pure volume) 72mA(Cs seeded)	23.5mA (Pure volume)
Electron H- Ratio	<1 (Cs seeded)	~5
Life Time	~250	Not measured
Breakdown Frequency	~2/hour	<1/hour
Norm. Emit. (Pmm)	0.13(x), 0.15(y) @60mA, 70keV	0.10(x)0.11(y) @7mA, 50keV (Filament operation)

今後の課題としては、長時間安定したビームを供給するためのフィラメントの長寿命化などが挙げられ、現在、フィラメント寿命試験などが継続して行われている。

今後これらの実験結果に基づき実機となる新たなイオン源を製作する予定である。

3.2 RFQ

イオン源から引き出されたビームは RFQ へと導かれる。JHF 用に開発された RFQ (JHF-RFQ) の加速電流値は 30mA であり、高エネルギー(3MeV 出射)モード安定化ループの採用等が特徴として挙げられる^[4]。JHF-RFQ は既に加速に成功しており、後段の MEBT へ安定してビームを供給している。

図 2 に加速試験時の結果を示す。ビーム電流は 9.7mA (入射 10.4mA)、透過効率は約 93% である。

本計画でのビーム電流は最大 50mA であり、50mA 加速に対応した RFQ も開発中である。Cold Model を

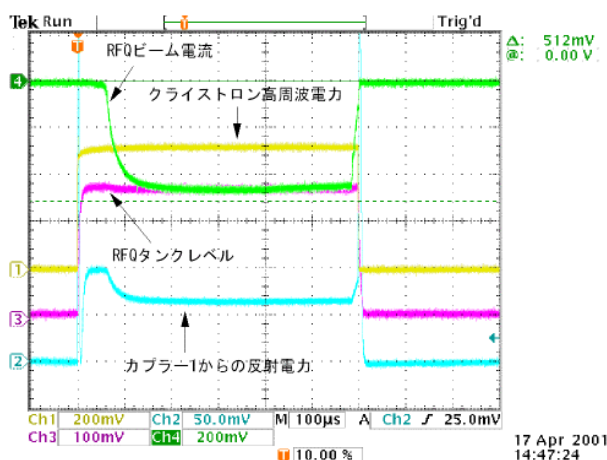


図 2 . JHF-RFQ ビーム加速時の各種波形

用いた技術開発、高周波測定など各種試験を行い、現在、実機の 1/3 の試作機が試験中である。図 3 に開発中の試作機の写真を示す。

タンクは 4 分割構造とし、材質は無酸素銅である。それぞれのブロックはレーザー溶接によって接合される。周波数の調節は冷却水の温度によって行われる。この試作機は実機の前段部の 1/3 に相当し、実機としても使用される予定である。



図 3 . 50mARFQ の 1/3 試作機

3.3 MEBT

RFQ からのビームを用いて MEBT^[5]におけるビームテストが行われている。図4に MEBT の構成図を示す。MEBT は Q 磁石：8 (内 5 台は軌道補正機能付き)、パンチャー：2、チョッパー：2、スクレーパー (電流測定可能)：1、ストッパー：1、ゲートバルブ：2 から構成される。また、電流モニター (CT)：4、位相モニター (FCT)：3、プロファイルモニター (PR)：2、ビーム位置モニター (BPM)：8、エミッタンスモニター (EM)：1、パンチモニター (BM)：1 が設置される^[6-7]。

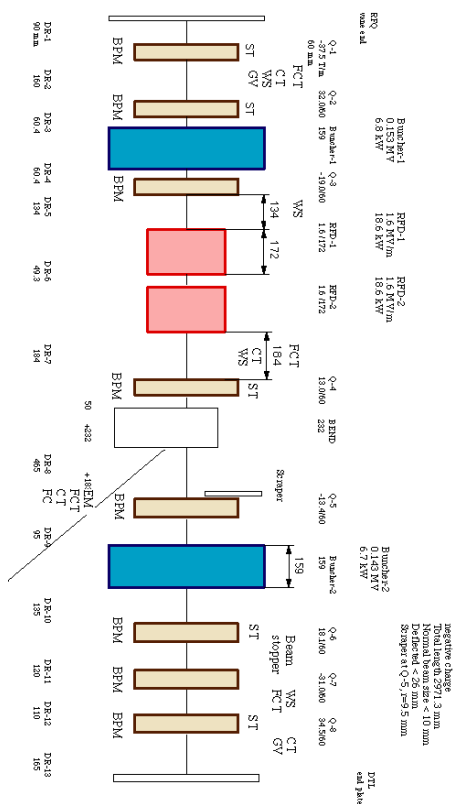


図4 . MEBT の構成

MEBT では、ビームを DTL に入射するためのマッチングを達成し、また、シンクロトロンからの縦方向アクセプタンス外へ入射する粒子を削る (ビームチョッピング) ことが求められる。

現在 KEK においてチョッパー試験が行われている。チョッパーを動作させた時の MEBT 最下流の BPM での測定結果を図5に示す。

ビーム条件は 5mA、ビーム幅 50 μ s、繰返し 5Hz、測定されたビームの立ち上がり時間は 15ns、立下り時間 10ns、ビームオン時の幅 300ns、チョッピング周波数 2MHz である。期待を上回る立ち上がり時間を持つチョップビームを達成している。

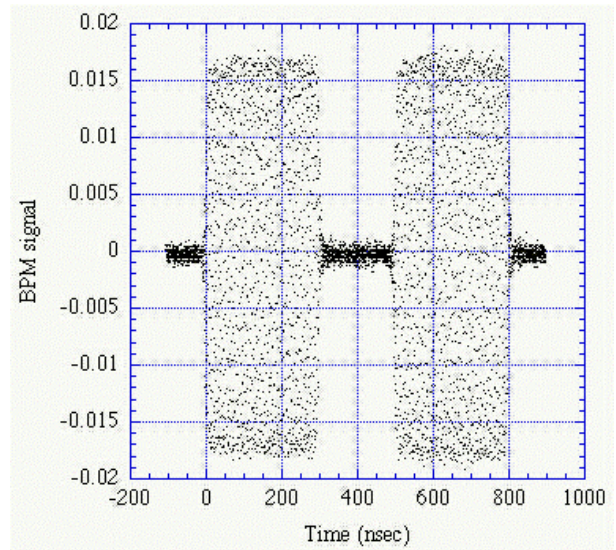


図5 . チョップビーム波形

3.4 DTL

DTL 部は 3 台のタンク (DTL1 ~ DTL3) で構成される。現在までにほぼ全てのパーツの製作が終了し、DTL1 に関しては DT を装着済みである。図6に DTL1 の写真を示す。

DTL^[8]はおよそ約 3m のユニットタンク 3 台を繋ぎ合わせることで、1 台の DTL となる (約 9m)。DT の内部には Q 電磁石が内蔵されており、DT は磁場中心に対し $\pm 50 \mu$ m の精度で取付けられている。固定チューナーはタンク斜め上方に取り付けられるが、写真では低電力試験用に可動タイプのチューナーが取付けられている。タンク横に出てるのが電場安定のためのポストカプラー及び、タンクレベル測定用のピックアップである。

現在 DTL1 の低電力試験を行っており、チューナー、ポストカプラーの挿入量を決定した後、これらパーツの最終加工を行う。図7に測定開始直後及びチューニング後のビーズ測定の結果を示す。

右図がチューニング前、左図がチューニング後で横軸は測定ポイント (加速器長)、縦軸は周波数差 (E^2) を表す。チューニング前はタンク内での



図6 . DTL1 外観図

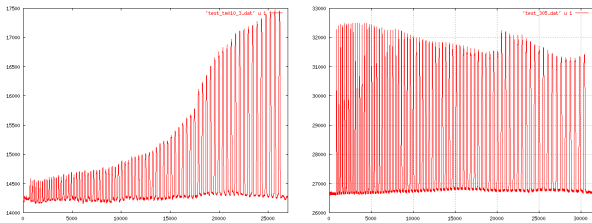


図7 . DTL1 の電場分布測定

電場の傾きが大きいのが、チューニング後で加速電場が大きく改善されている事が分かる。中央部やや後ろで段になっているが、この部分はユニットタンクの接続部で、DT のボア径が変わっている為である。

図8 にチューニング後(図7右図)における DTL1 の平均電場強度分布を示す。横軸はセル No.、縦軸が平均電場強度を表す。チューニング後の平均加速電場のばらつきは $\approx 0.6\%$ であり、最終的に全幅で

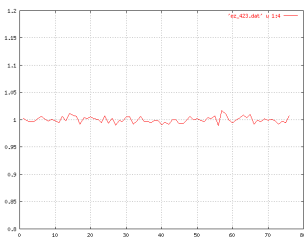


図8 . チューニング後の平均電場強度分布

1%以内に納めるようチューニングを継続している。

今秋にはKEK 陽子リニアック棟加速器トンネルに搬入予定であり、今年中の DTL1 のビーム加速に向け、各種付属機器等の整備が進められている。

3.5 SDTL

SDTL 部は全 32 タンクで構成される (SDTL1 ~ SDTL32)。各タンク間にはビーム収束用のダブレット Q 電磁石が設置される。現在までに SDTL1 及び SDTL2 が製作され、大電力試験試験までが終了している。図9 に SDTL1 の大電力試験の結果を示す。

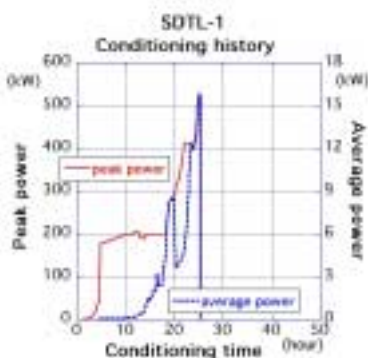


図9 .SDTL1 大電力試験投入電力

横軸は時間、縦軸はタンクへの投入電力を表し、定格電力は 170kW (ピーク) である。

試験では、およそ 1 日で定格の 3 倍まで電力を投入したが、タンク、カプラーなど各機器とも特に問題の発生はなく、順調に電力の投入が可能であった。

今夏から SDTL3 以降のタンクも納入予定であり、納入後順次 DT 取付け等の組立て、低電力試験、大電力試験が行われる。

3.6 ACS

図10 に ACS 加速空洞の概略図を示す。ACS は 1 モジュールが 2 空洞で構成され、各空洞は 15 セル、2つの ACS 空洞がブリッジ空洞によって接続される。

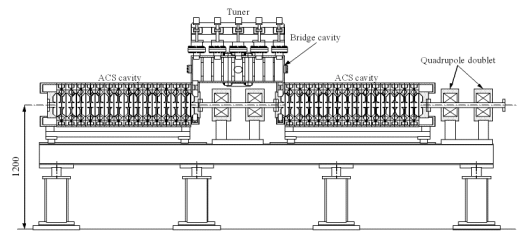


図10 .ACS モジュール概略図

ACS 加速空洞に関しては、これまでにアルミを用いたモデル空洞の製作及び測定試験を行っている^[9]。測定では切削したセルの平面度や面圧等の影響に関する評価を行い、現在これらの測定を元に、最終的な設計形状での実寸アルミモデルを製作しており、同時に実機用セルの試切削も進められている^[10]。

これらの実寸モデルの加工を通じ、変形量等各部寸法検査、高周波測定による必要精度の検証、加工手順の確認などを行い、年末には ACS 加速管初号機が完成予定である。ACS 初号機は、統合計画用 ACS の大電力実証機として、原研(東海研究所)において各種試験が行われる予定である。

3.7 SCC

原研では、パルス運転時における空洞の振動抑制と安定な加速電界の実証のための R&D が進められている^[11]。図11 に 600MHz クライオモジュール試作機の写真を示す。

600MHz クライオモジュール試作機を用いた実験では、温度 2K で最大表面電界 10MV/m(CW)、16MV/m(パルス)の運転に成功しており、現在 RF ロールレベル系の最適化を行っている。

KEK では、共振周波数 972MHz、 $Q=0.725$ の単セル空洞を用いた R&D が進められており、最大表面電界 38MV/m を得ている。現在、ポート無しの 9 セル空洞の表面処理が終了し、また、ポート付き 9 セル空洞は製作が終了し、詳細な形状測定が行われている。



図 1 1 . 600MHz クライオモジュール

4 . まとめ

大強度陽子加速器計画では、平成 17 年度末からのリニアックビーム加速が予定されており、これに向け、各機器の設計・製作が鋭意進められている。

ここでは本計画に用いられるリニアック部の各構成機器の開発状況を述べた。各機器の R&D や製作状況などがポスターセッションにおいて数多く紹介さ

れているので、それらも御覧頂き参考にして頂きたい。

参考文献

- [1] 原研・KEK 共同推進チーム, “大強度陽子加速器計画”, JAERI-Tech 2002-0003, KEK Report 99-5, (2000)
- [2] H. Oguri et al., "Development of an H- ion source for the high intensity proton linac.", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol. 73, No. 2, p1021(2002)
- [3] A. Ueno et al., "First Beam Test of a Bolome Production H- Ion Source with a LEBT.", Proc. 2000 Linac Conf., MOD20(2000).
- [4] A. Ueno et al., "Beam Test of the Pre-injector and the 3-MeV H- RFQ with a New Field Stabilizer PISL", Proc. 1996 Linac Conf., p293 (1996)
- [5] S. Fu and T. Kato, "Design of Beam-Transport Line Between the RFQ and the DTL for the JHF 200-MeV Proton Linac", Proc. APAC98, p101 (1998)
- [6] 五十嵐 前衛 他, in these proceedings
- [7] 高崎 栄一 他, in these proceedings
- [8] F. Naito et al., "Development of the 50-MeV DTL for the JAERI/KEK Joint Project.", Proc. 2000 Linac Conf., TUD08(2000)
- [9] 青 寛幸, 他, in these proceedings
- [10] 林崎 託規, 他, in these proceedings
- [11] N. Ouchi et al., "600MHz Prototype Cryomodule for High Intensity Proton Linac at JAERI", Proc. of SRF2001, Tsukuba, Japan, PT029, in press