

# 大強度陽子加速器計画用リニアック

長谷川 和男<sup>1,A)</sup>、大強度陽子加速器計画リニアックグループ<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup> 日本原子力研究所

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村

<sup>B)</sup> 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

原研と KEK は大強度陽子加速器計画を共同で推進している。加速器は常伝導と超伝導のリニアック、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る。リニアックの全長は約 360m であり、常伝導リニアックで加速した 400MeV のビームは 3GeV シンクロトロンと超伝導リニアックへの入射用に、さらに、超伝導リニアックで加速した 600MeV ビームは核変換実験 (ADS) に用いられる。ここではリニアックの設計および現状について報告する。

## 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、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、それぞれの計画である中性子科学研究計画 (Neutron Science Project: NSP) と大型ハドロン計画 (Japan Hadron Facility: JHF) を統合し、「大強度陽子加速器計画」として共同で推

進することとなった<sup>[1]</sup>。施設は原研東海研究所内に建設する予定であり、その配置案を図 1 に示す。計画は第一期と第二期に分けられる。第一期の加速器構成は、

- (1) 400MeV 常伝導リニアック
- (2) 3GeV-1MW のシンクロトロン
- (3) 50GeV-0.75MW のシンクロトロン

であり、ビームは物質科学、生命科学、素粒子物理や原子核物理に利用される。第二期には 400~600MeV の超伝導リニアックを建設し、核変換実験 (Accelerator driven nuclear waste transmutation system: ADS) にビームが利用される。ここでは、この大強度陽子加速器計画に用いるリニアック部分について報告する。

## 2. リニアックの設計

### 2.1 設計の概要

最終段の加速器となる 50GeV シンクロトロンは、数 GeV の入射エネルギーが必要となるために、その

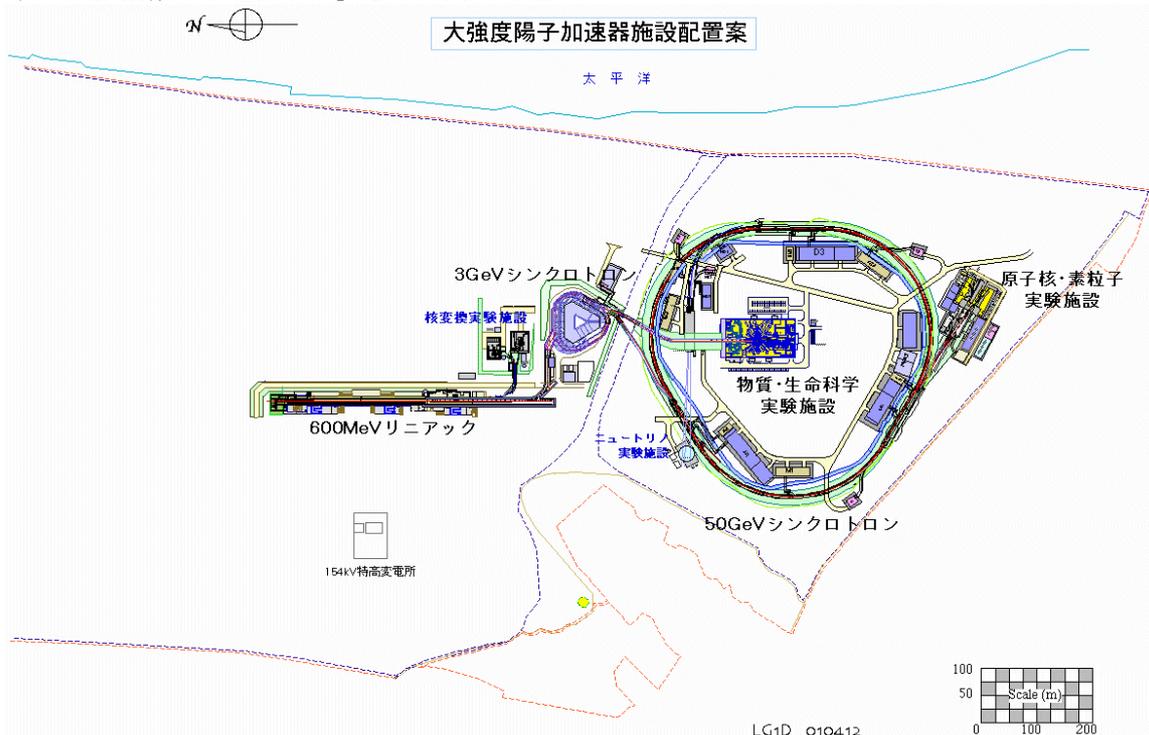


図 1 : 大強度陽子加速器施設配置案

<sup>1</sup> E-mail: hasegawa@linac.tokai.jaeri.go.jp

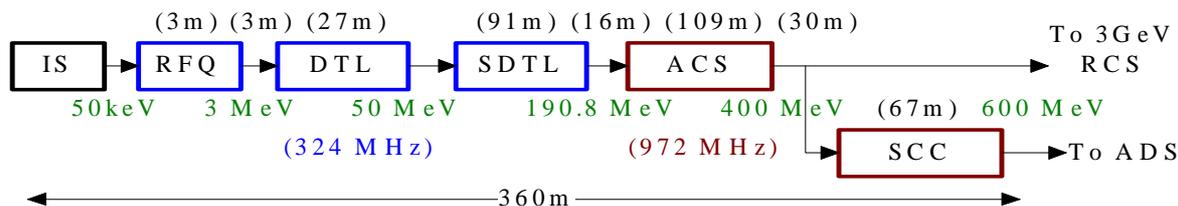


図2：リニアックの構成

ブースターとして速い繰り返しを持つシンクロトロン（Rapid Cycling Synchrotron：RCS）を用いた加速器構成となり、リニアックの設計方針も RCS の入射器としての役割が主となる。RCS 出口でのビームパワー1MWを達成するための加速器として、建設費、運転費の観点から RCS のエネルギーを3 GeV、リニアックのエネルギーを400MeVとした。ビーム時間幅は、RCS の繰り返し 25Hz の時間変化する電磁石の磁場が受け入れられる時間として 0.5msec となる。また、加速粒子としては、荷電変換を利用した RCS 入射のために負水素イオンとなる。

リニアックの構成と主なパラメータを図2および表1に示す。平均ビーム電流は333 $\mu$ A、リニアックピーク電流は50mAである。400MeVまでは常伝導空洞で加速し、RCSへ入射すると同時に、ADSへのビームも並行して利用することを考え、ここまでの繰り返しは50Hzとした。400MeV位置でスイッチング電磁石を用いてそれぞれ25Hzづつ振り分ける。超伝導リニアックではさらに600MeVまで加速し、ADSでビームを利用する。加速周波数は、低エネルギー部で324MHz、高エネルギー部で972MHzである。第一期の加速器はJHFの加速器との共通点が多く、その設計の詳細は文献<sup>[2]</sup>を参照願いたい。

## 2.2 低エネルギーリニアックの設計

リニアックでのピーク電流50mAを達成するために、負水素イオン源は60mA以上の電流を持つもの

が必要となる。このビームをRFQ（Radio Frequency Quadrupole linac）で3MeV、DTL（Drift Tube Linac）で50MeV、SDTL（Separated-type DTL、機能分離型DTL）で190MeVまで加速する。RFQには電場安定機構として $\pi$ モード安定化ループ（PISL）<sup>[3]</sup>を用いている。ビーム電流やエミッタンスの変化に対して運転条件を変更できるメリットがあることから、ビーム収束には電磁石を用いることとした。DTLの構造は周波数を高くすることで小さくなるが、収束電磁石がドリフトチューブに納められる大きさの範囲内であるべく高い周波数を選ぶという観点と、クライストロンが使える周波数の範囲との両方を考慮し、324MHzが選択された。

RFQの下流には、中間エネルギーのビーム輸送系<sup>[4]</sup>（Medium Energy Beam Transport: MEBT）が続く。約3m長のMEBTには8個のQ磁石と2個のバンチャー空洞を持ち、RFQとDTLの横方向および縦方向のマッチングの役割を担う。さらに、RCSの入射部分でのビームロスを減らすために、高速のビームチョッパー<sup>[5]</sup>をこの部分に配置する。このチョッパーを用いて、733nsecの周期（RCS入射時の周回時間）のバンチ幅内に337nsecのビームoffとなる中間パルス構造を生成する。このビームoff時間を利用して取り出しのキッカーを働かせる。

DTLは3つの空洞から構成され、それぞれの空洞はポストカプラを使って電場の安定化を図る。最大表面電場はキルパトリック限界（17.8MV/m）以下で設計してある。Q磁石の収束力の設計は、エミッタ

表1：リニアックの主なパラメータ

Parameter	RFQ	DTL	SDTL	ACS	SCC
Output energy (MeV)	3	50	190.8	400	600
Section length (m)	3.1	27.1	91.2	109.2	69.0
Structure length (m)	3.1	26.7	65.7	68.2	24.4
Frequency (MHz)	324	324	324	972	972
Accelerating field (MV/m),E0		2.5 ~ 2.9	2.5 ~ 3.7	4.3	13.3
Vane Voltage (kV)	82.9 (1.8Kilp)				
Number of cavities	1	3	32	46	30
Synchronous phase (deg)	-30	-30	-27	-30	-30
Copper RF power (MW)	0.34	3.3	15.1	29.4	
Total RF power (MW)@50mA	0.48	5.7	22.1	39.9	10
Number of klystrons	1	3	16	23	15
Aperture radius (mm)	3.7 (average)	6.5 ~ 13	18	20	30@Q, 45@Cav.
Number of cells	294	146	160	690	210

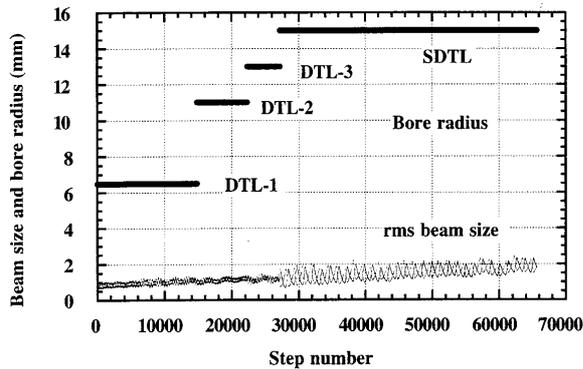


図3 : DTL 内での RMS ビームサイズの変化

ンス増加を抑える観点から Equipartitioning<sup>[6]</sup>の考え方を取り入れている。この場合、図3に示すように横方向のビームサイズは加速につれて徐々に大きくなるため、ドリフトチューブのボア半径も DTL で 6.5,11,13mm と、ビーム径との比を十分に取るようにしている。

50MeV 以降には、新しい構造である SDTL<sup>[7]</sup>を採用した。SDTL の加速原理そのものは DTL と同じであるが、数セルの短い空洞を用い、Q 磁石は空洞の外に配置する構造としたものである。SDTL は、Q 磁石をドリフトチューブ内に内蔵しないために構造が単純化され、また、電場の安定化のためのポストカプラが不要となるなどのメリットがある。

### 2.3 中間エネルギーリニアックの設計

中間エネルギー加速部で対象としている 190~400MeV の範囲では、結合空洞型リニアック (Coupled Cavity Linac: CCL) が通常用いられる。CCL にはサイドカップルやディスクアンドワッシャなど、種々の種類があるが、これら中でも、電場の軸対称性から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 (Annular Coupling Structure : ACS) が、最も有力な候補である。図4に ACS の概略図を示す。空洞は 15 セルから構成され、2 個の空洞の中央部に配置したブリッジカプラ

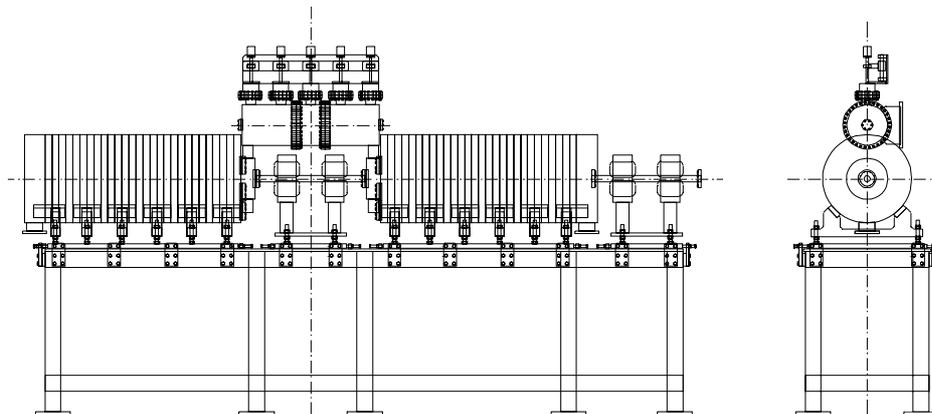


図4 : ACS の概略図

から高周波が給電される。横方向の収束は空洞間に設置するダブレット Q 磁石で行う。

400MeV まで加速されたビームは RCS まで輸送される。この輸送系はリニアックのダブレット収束系から FODO 系へのマッチングセクション、偏向磁石、RCS へのマッチングセクションなどから構成される。また、RCS 内でのビームロスを小さくするために、モーメントムやエミッタンスのフィルターとしてスクレーパーとビームダンプを配置している。また、RCS が要求するビーム入射条件のモーメントム広がり (<0.1%) を満たすように、デバンチャー空洞を輸送系内に配置する。リニアックから約 30m 下流で一度デバンチすることでエネルギーの広がりを抑えることができるが、空間電荷効果によりエネルギーの広がりが大きくなるために、再びデバンチする必要があるがでてくる。ビーム輸送系全体の長さは、現時点では約 170m であるが、建家配置の制約、RCS の位置、マッチング条件などを総合的に考慮して最終的な長さを決定することになる。

### 2.4 高エネルギー超伝導リニアックの設計

400~600MeV の範囲は超伝導リニアックを用いる計画である。この部分のシステム設計は、原研の NSP 用リニアック設計<sup>[8]</sup>と同様に行った。超伝導リニアックは 2 個の 7 セルニオブ空洞を納めたクライオモジュールから構成され、ビーム収束は常温部に設置した Q 磁石のダブレットにより行う。従来、空洞の加速量の評価は、空洞表面での最大電場強度 (Epeak) に基づいて決定してきた。しかし、ここでは空洞の最大電場強度を決定するのは Multipacting であり、電場それ自身の強さではないとする考え方に基づいて設計を行った。この場合、空洞の電場強度は最大磁場によって制限され、その条件を 525 (Oe) とした。この場合の Epeak は約 30MV/m に相当する。この条件に基づいて設計した結果、全長は 69m、クライオモジュール数は 15 である。

エミッタンス増加を抑える観点から、ラティス設計は Equipartitioning に近い条件で行った。PARMILA コードで行ったビームシミュレーション結果として、90%エミッタンスと RMS ビームサイズを図5に示す。エミッタンス増加率は 5%、-3%に抑えられてい

る。ビームサイズは、DTLで見られたように大きくなることは認められず、ほぼ一定である。これは、ここで対象とするエネルギー範囲が狭いためである。なお、ビームサイズのリップルのような振れは、収束系によるモジュレーションから来るものである。RMS ビームサイズは最大でも 0.2cm であり、Q 磁石のボア半径の 3cm や空洞半径の 4.5cm と比べて 15 倍以上あり、リニアック中でのビームロスの観点から十分な値を確保できていると考える。

加速器長やモジュール数は、今後の空洞開発の状況により更に短縮化や削減が期待される。

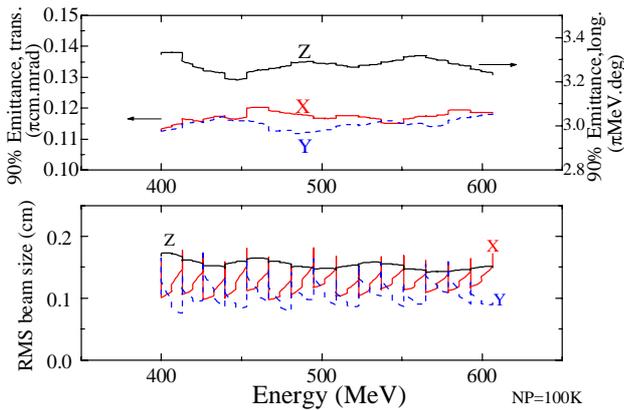


図 5 : PARMILA による超伝導リニアック部のビームシミュレーション結果  
上 : 90%エミッタンス、下 : RMS ビームサイズ

### 3. R&D 状況

リニアックの R&D は、これまでの経緯から KEK においては JHF 計画、原研においては NSP のそれぞれをベースに推進してきた。

KEK においては、60MeV リニアックが 1998 年に製作開始となった。この部分は RFQ、DTL、最初の 2 空洞の SDTL から構成される。イオン源 (Cs 不使用) と RFQ はビーム加速試験を開始し、ビーム幅 0.5msec、繰り返し 20Hz で加速電流 10mA を達成している。透過率は 90% 以上であり、加速電流はイオン源からの引き出し電流で制限されている。今夏にイオン源の改造を予定しており、新イオン源からの引き出し電流、および RFQ 加速電流の向上を目指している。試験中の RFQ は、JHF 計画用に設計されたもので、最大加速電流は 30mA である。現在 50mA の加速が可能な RFQ の設計がほぼ完了し、入口 3 分の 1 に相当する部分の試作を行っている。RFQ に続く MEBT では、バンチャー空洞の試験、ビーム試験を予定している。また、この部分のチョッパー空洞に使うパルス増幅器の試験を行い、立ち上がり、立ち下がり時間が 15nsec と良好な特性であることを確認した<sup>[9]</sup>。

DTL では最初のユニット空洞 (第一空洞の 3 分の 1) へのドリフトチューブの取り付けが終了した。今後ハイパワーテスト、ビームテストを実施し、原研への搬入、据付けを行って実機として用いる予定である。

1296MHz の ACS テスト空洞ではハイパワー試験<sup>[10]</sup>を実施し、基本的な高周波特性の測定が終了している。本計画で用いる 972MHz の空洞については、電磁場的な最適化や構造解析の検討を進めると同時に、試験空洞の製作とロー付け試験を実施中である。

原研では NSP 用に 10% 以上のデューティを目標とした R&D を行ってきたが、大強度陽子加速器計画となり、デューティや加速周波数が変更され、これに対応した R&D を開始した。イオン源の開発では、セシウムの添加を行い 70mA の加速電流 (エネルギー 70kV、デューティ 2% 時) を達成し、電流の点では目標性能を達成する見通しを得た。現在、エミッタンス測定の前準備を行っており、長寿命化の課題を含め試験を継続している。

超伝導リニアックは、陽子加速器用に原研と KEK が共同で精力的に開発を行ってきた。NSP 用のパラメータに基づく 600MHz  $\beta = 0.5$  および 0.8 の 5 セル空洞での Epeak の測定を行った結果、それぞれ 23MV/m、31MV/m が得られた<sup>[11,12]</sup>。また、 $\beta = 0.6$  の 2 空洞を内蔵するクライオモジュールの試作が完了し、冷却試験、高電力試験を開始した。

### 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、その設計、R&D の状況を示した。

今年度からリニアック装置の本格的な製作を開始した。建家については、今年度着工に向け実施設計に必要な加速器側の要求仕様 (トンネルの長さ、断面、クライストロンギャラリーをはじめとする上屋の配置、負荷量集計等) の取り纏めを行っている。平成 16 年 12 月から建家への装置の搬入・据付けを開始し、平成 17 年度末にリニアックのビーム加速を予定している。

### 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 2000-0003, KEK Report 99-5, (2000)
- [2] JHF Project Office, “JHF Accelerator Design Report”, KEK Report 97-16 (1998)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] S. Fu and T. Kato, “RF-chopper for the JHF proton linac”, Nucl. Instr. Meth. A440, p296 (2000)
- [6] R. Jameson, AIP Conf. Proc. 279, p.969 (1993)
- [7] T. Kato, KEK Report 92-10 (1992)
- [8] K. Hasegawa et al., “System Design of a Proton Linac for the Neutron Science Project at JAERI”, Journal of Nucl. Sci. and Technol. Vol.36, No.5, p451 (1999)
- [9] S. Yamaguchi, “324MHz Rf チョッパー用 30kW 高周波パルス増幅器の高周波特性”, these proceedings
- [10] T. Kageyama et al., Proc. 1994 Linac Conf., Tsukuba, p248 (1994)
- [11] M. Mizumoto et al., “Development of Superconducting Linac for the KEK/JAERI Joint Project”, Proc. of Linac2000, Monterey (2000)
- [12] N. Ouchi, “Superconducting Cavity Development for High Intensity Proton Linac in JAERI”, 9th SRF, Santa Fe, (1999)