



1997年5月14日

高エネルギー加速器研究機構 大型ハドロン計画推進室

1.計画の概要

I.1. 大型ハドロン計画(JHF)とは?

大型ハドロン計画とは大強度加速器からのビームを用いて、広範な科学分野を飛躍的 に進展させることを目的とする計画である。加速器の構成は、1) 200 MeV リニアック、 2) 200 μ A 陽子を3 GeV まで加速するブースターリング、3) 10 μ A 陽子を 50 GeV ま で加速する主リングにより構成される。 50 GeV 陽子シンクロトロン (PS) では、二次 粒子として生成される K 中間子、 π 中間子、反陽子、ハイペロン、さらには重イオンを 含む一次粒子を用いて、多種の原子核物理実験が計画され ている。さらにK 中間子の稀 崩壊による対称性のテスト、スーパーカミオカンデを検出器として用いたニュートリノ 振動実験も企画されている。50 GeV PS を用いたこのような研究領域は、大型ハドロン 計画では K アレナと総称される。

3 GeV のブースタリングは、50 GeV PS の入射器としてだけでなく200 μ A (0.6 MW) のビームを供給する。ここでは、固体物理、物質科学、生命科学を中心に、原子核・素 粒子物理をも含む広範囲な科学を展開する。3つの研究領域があり、第一は、スパレー ション中性子を用いた中性子科学である。これは N アレナとよばれ、パルス状の熱中性 子を駆使して、物質科学や生命科学の研究を展開する。第二は、M アレナとよばれ、ミュ オンを用いた科学、たとえば μ SR (ミュオンスピン回転/緩和)、ミュオン触媒核融合や 物質科学の研究が展開される。さらに、 μ e 転換の探索などの素粒子物理も計画されてい る。第三は、E アレナとよばれ、ISOLタイプの不安定核ビームを用いた原子核物理研究 が展開される。

加速器および実験施設を図 I.1 に示す。200 MeV リニアックは 3 GeV ブースターリ ングの入射器である。この 3 GeV リングは、現存する KEK 12 GeV PS のトンネル内に 設置される。 目下建設中のニュートリノビームラインは、3 GeV から 50 GeV PS への ビーム輸送ラインに使われる。また、50 GeV PS リングは、地下5 m に建設される。表 I.1 では、これら 3 GeV および 50 GeV リングから得られるビーム性能を、世界の加速 器と比較した。

大型ハドロン計画では、現存する実験ホールも活用されることになっている。現存の 東カウンターホールは N アレナに、また、北カウンターホールは M アレナに利用され る予定である。しかし、E アレナと K アレナの実験室は新設予定である。現 12 GeV PS の入射器である 500 MeV ブースターは、将来、重イオンや偏極陽子の入射器として利 用することが可能である。ちなみに500 MeV ブースターでは、すでにα粒子までの加速 に成功している。

1



2

International Comparison

[50 GeV Ring]					
	Energy (GeV)	Particles per Pulse	Repetition (Hz)	Current (µA)	
This 50 GeV Ring	50	20×10^{13}	0.30	10.0	
CERN PS	26	2×10^{13}	0.50	1.60	
KEK PS	12	0.4×10^{13}	0.25	0.16	
BNL AGS	30	6×10^{13}	0.30	3.0	
Serpukhov	70	1.7×10^{13}	0.10	0.27	
	[3 GeV Ring]			
This 3 GeV Ring	3.0	5.0×10^{13}	25	200	
KEK PS Booster	0.5	0.2×10^{13}	20	6	
Rutherford ISIS	0.8	2.5×10^{13}	50	200	
LAMPF PSR	0.8			100	

Power = Energy × Current (0.6 MW for JHF 3 GeV Ring)

表 1.1

大型ハドロン計画の加速器と世界の他の 加速器の強度比較。

II. 加速器

II.1. 加速器の構成

大型ハドロン計画(JHF)の加速器は次のように構成される。

(1) 主リング:50 GeV 陽子シンクロトロン (50 GeV PS)

(2) ブースター:3 GeV 陽子シンクロトロン (3 GeV BS)

(3)入射器:200 MeV 陽子リニアック(200 MeV linac)

これらの加速器は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の北側敷地に建設される。 加速の初段はリニアックであり、負水素イオンビーム(H)を200 MeVのエネルギー まで加速する。リニアックでのビーム強度は30 mA以上であり、パルス幅及び繰り返し はそれぞれ400 µ sec、25 Hz(将来50 Hz)である。

ブースターは繰り返し25 Hzの陽子シンクロトロンである。ビーム強度は、5x10¹³ppp (particles per pulse)であり、平均のビーム強度は200 μ A に達する。ブースターへのビー ム入射は、荷電交換多重入射方式であり、陽子は3 GeV まで加速される。ブースターで のビームパワーは0.6 MW である。3 GeV ブースターは現在の KEK 陽子シンクロトロン (KEK PS) 主リングトンネル内に設置される。KEK PS 主リング内のすべての機器(電磁 石、真空容器等)は、取り外される。3 GeV の陽子ビームは3 つの実験施設、すなわち、 パルス中性子源施設(Nアレナ)、ミュオン施設(Mアレナ)及び不安定核施設(Eアレ ナ)、と 50 GeV 主リングに供給される。

ブースターからの陽子ビームは主リングに入射され、50 GeV まで加速される。主リン グでのビーム強度は2x10¹⁴pppであり、繰り返しは0.3 Hz である。50 GeV 陽子ビームは 2つの実験施設に取り出される。1つは、遅いビーム取り出しによる2次ビーム(K、反 陽子等)及び1次陽子ビームを用いた実験施設、いま1つは速いビーム取り出しによる ニュートリノ振動実験施設である。遅い取り出しビームの場合には、平均のビーム電流 は9.4 μA、デューティーファクターは、0.2 である。

大強度陽子ビーム加速以外にも、重イオン、偏極ビーム加速が要求されている。現 在の KEK PS の 500 MeV ブースターを、3 GeV ブースターの入射器として使うことにより、これらのビームの加速が可能となる。

加速サイクルの典型的なパターンを図 II.1.1に示す。ブースターからの4 バッチが主 リングに入射される。主リングの17個ある高周波バケツのうち16個のバケツにビー ムが入る。主リングが加速を始めると、3GeV ブースターを使う実験施設にビームが供給 される。表 II.1.1には全加速器系の主なパラメターを示す。

8

II.4. 200 MeV リニアック

II.4.1. 概要

JHFの200 MeV 陽子線型加速器[1]は、出力エネルギーが3 MeV の電気四重極リ ニアック (RFQ)、50 MeV のドリフトチューブリニアック (DTL)、そして 200 MeV の分離型ドリフトチューブリニアック(SDTL)により構成される。全ての加速管の周 波数は324MHzと設定されている。この線型加速器では、繰り返し周波数25Hzで、 パルス幅400µsec、ピーク電流30mAの負水素イオンが加速される。将来、エネル ギーを 400 MeV まで増加させる場合には、150 MeV もしくは 200 MeV より高いエ ネルギー領域で、周波数972 MHzの環結合型空洞(ACS)を使用する予定である。 このデザインの一つの特徴は、加速過程におけるビーム損失の問題がよく考慮され ている事である。それは、縦運動の遷移位置と横運動の遷移位置を分離することに より達成されている。比較的低めのエネルギーで起こる横方向の遷移は、空間電荷 効果を低減する。一方、比較的高いエネルギーで起こる縦方向の遷移は、ACSの加 速過程における非線形問題の効果を低減する。収束系のデザインには、coupled enevelope equations と等分配理論 (equipartitioning theory) を使用した。SDTLの採用 により、有効シャントインピーダンスと収束磁石を含むドリフトチューブの製作の 難しさが改善されている。加速過程のビーム損失の問題は、並列型スーパーコン ピュータ上で走る正確なビームシミュレーションコードを使って検証されている。

II.4.2. JHF リニアックの要求仕様

JHF 陽子リニアックの主な要求仕様を表 II.4.1. に示す。リニアックの建設計画は 二段階に別けて考えられているが、本論では、第一期計画について主に述べる。KEK の既存の陽子リニアックに比べると、平均電流が高い点と出力エネルギーが高い点 にパラメーターの特徴がある。

表 II.4.1. リニアックの主な要求仕様。

	第一期	第二期	
加速粒子	H^{-}	H	
出力エネルギー	200	400	MeV
ピーク電流	30	60	mA
ビーム幅	400	400	μsec
繰り返し周波数	25	50	Hz
平均電流	200	800	μΑ
長さ	<150	~220	m
運動量の広がり	± 0.1	± 0.1	%

||.4.3. 設計の指針

- リニアック設計の基準は、次の3項目である。
 - 1) 最小のビーム損失と安定な運転

ピーク電流も平均電流も非常に大きいので、ビーム損失の問題は、最重 要課題の一つとなる。ビーム損失を最小に抑えながら安定な運転を達成する ために、以下の方策を施す。第一に、横方向と縦方向の位相空間において良 質のビームを得ることをめざす。第二に、加速管、高周波電源、冷却システ ム、真空システム、そしてモニターとコントロールシステムを含む全システ ムの、安定で信頼性ある運転を達成するために、適切なる余裕度を以てリニ アックを設計し建設する。

2) ピーク電流の変化に応じて容易にチューニングできること

ビーム損失の問題は、ピーク電流が増加する場合に問題となることが多 いので、ピーク電流の変化に対応して、リニアックの全ての部分において、 有効なチューニング法を確立する事が、大強度リニアックにおいては重要で ある。

3) 最小の費用

高周波特性においても、また、機械的な構造においても簡潔な加速管構造が望ましい。それが、結局は、全体として最小の費用で信頼性がある安定な運転につながるからである。

II.4.4. リニアックの構成

先に述べた指針に従って、200 MeV 陽子線型加速器が設計された。それは、出力



JHF 200 MeV PROTON LINAC

図 II.4.1. JHF 200 MeV 陽子リニアックの模式図。



図 II.4.2. JHF 陽子リニアックに使われる 有 効シャントインピーダンス。

表 II.4.2. JHF 陽子リニアックのパラメーター。

田力 エネルギー 202.5 MeV 周波数 324 MHz 周波数 324 MHz 人類エネルギー 20.058 MeV 加速粒子 H H 出力エネルギー 20.488 MeV ビーク電流 30 mA $2 > 2 > 3 \\ 2 > 2 > 4 \\ 2 > 5 \\ 4 > 2 > 4 \\ 2 > 4 \\ 2 > 5 \\ 4 > 2 > 4 \\ 2 > 5 \\ 4 > 2 > 4 \\ 2 > 5 \\ 4 > 2 > 4 \\ 2 > 4 \\ 2 > 6 \\ 4 > 2 > 4 \\ 2 \\ 4 \\ 2 > 4 \\ 2 \\ 4 \\ 4$	入射エネルギー	3.0	MeV	SDTL		
周波数 加速粒子 加速粒子 加速粒子 化之 -5 電流 (1)324 HZ HZ HZ MD (1)MHZ MD (1)人制工ネルギー (1)500 (1)SMeV MD (1)(ビー -5 電流 (1)30 (10)mA (10) 4.6 (10)MeV (10) 5.5 (10)ma (10) 4.6 (10)MeV (10)(W)(1)(1)(1)(1) 4.6 (10)MeV (10) 4.6 (10)MeV (11)(W)(1)(1)(1)(1)(1) 4.6 (10)MeV (11) 4.6 (10)MeV (11)(W)(1)(1)(1)(1)(1) 4.6 (10)MeV (11) 2.6 (10)(1)(1)(W)(1)(1)(1)(1)(1) 4.6 (10)MeV (10) 2.0 (10)MeV (10) 2.0 (10)MeV (10) $7.7 \times 7.7 \times 7.8$ (10)MeV (10) $7.7 \times 7.7 \times 7.8$ (10)MeV (10) $7.7 \times 7.7 \times 7.8 \times $	出力エネルギー	202.5	MeV	周波数	324	MHz
加速粒子 H ⁻ H ⁻ HDxネルギー 20.288 MeV ビーク電流 30 mA $2 \vee D X$ 31 $2 \vee D X$ $2 \vee X$ $3 \vee X \vee Y$ $2 \vee X \vee X$ $3 \vee X \vee Y \vee Y \vee Y \vee X$ $2 \vee X \to X \vee Y \vee Y \vee Y \vee X$ $2 \vee X \to X \vee Y \vee Y \vee Y \vee X$ $3 \vee X \vee Y \vee Y \vee Y \vee X \vee X \vee Y \vee Y \vee X \vee X$	周波数	324	MHz	入射エネルギー	50.05	58 MeV
ビーク電流 30 mA $92/5$ 数 31 ビーム幅 400 µscc 155 426 155 梁長 加速管のみ) 25 Hz 425 (1)加達管のみ) 52.9 m 会長 122.3 m 426 (30mA) 4.6 MW クライストロン数(*) 19 7.3 MW $2cl$ 386 MV/m クライストロン数(*) 19 7.4×7.4 7.4×7.4 7.4×7.4 7.4×7.4 RPQ 19 $7.4 \times 7.4 \times 7.4$ 8.6 $7.4 \times 7.4 \times 7.4$ Mix $3.4 \times 7.4 \times 7.4$ 3 MeV $7.4 \times 7.4 \times 7.4$ $8.6 \times 7.4 \times 7.4 \times 7.4$ DTL $3.4 \times 7.4 \times 7.$	加速粒子	H^{-}		出力エネルギー	202.48	88 MeV
ビーム幅 400 usc $t \nu \delta \Sigma$ 155 繰り返し周波数 25 Hz $t \nu \delta \Sigma$ 155 学均電流 200 μA $c E C$ ($m \pm \delta C S$) $m E C$ 公員 ($m \pm \delta C S$) 2.9 m $d E C$ $m E C$ $S C$ $m E C$ Act C ($m \pm \delta C S$) 2.9 m $d E C$ $m E C$ $S C$ $m C$ Self 12.3 MW 2.63 $m C$ $d C C S C$ $m C C S C$ $M W$ $\sqrt{2} 7 A \Gamma \tau D S U$ 14 $m E C - \Delta \pi T$ $M W$ $\sqrt{2} 7 A \Gamma \tau D S$ $M W$ $\sqrt{2} N T T T T T T T T T T T T T T T T T T $	ピーク電流	30	mA	タンク数	31	
輪り返し周波数25Hz平均電流200 μA 全長(加速管のみ)92.9 $g R$ 金長(加速管のみ)92.9 $g R$ 金長(加速管のみ)92.9 $g R$ 金長(加速管のみ)92.9 $g R$ 電周波融励振電力21.3MW空高周波電力(30mA)24.6MWクライストロン数(*)19(*) RFQ 用とデバンチャー用を含む $r A$ RFQ $r A = 7 R P$ 周波数324MHz入射エネルギー3A(規格化 90%)13.6Thy $r A = 7 R P$ 周波数324MHz(規格化 90%)18.6オロン菜150全長28.51アクセブタンス3セル数150全長28.51アクセブタンス3イ(規格化 90%)43オロン数150全長23.3アクセブタンス3イ(規格化 90%)41オロン数3アクセブタンス4人(規格化 90%)41オロン数3アクセブタンス3イ(規格化 90%)41オロン教5.33MWクシク香号123アクセプタンス人14イ(規格化 90%)41アクセプタンスイ19.196ストロン数3アクセンタンスイ10101.61361.40MWビーム電力(30mA)0.41101.6111.6121.6131.614<	ビーム幅	400	µsec	セル数	155	
平均電流 200 μA 全長 () 加速管のみ) 92.9 m 全長 () 加速管のみ) 92.9 m 会長 () 加速管力 92.9 m 高周波励振電力 21.3 MW 2 全長 () 加速管力 30.0 $()$ $()$ (*) RFQ () ロンガ・シティークランティトロン数(*) 19 $()$ $()$ (*) RFQ () ロンディンティーカを含む 14 $)$ $)$ $)$ RFQ () () $)$ $)$ $)$ $)$ $)$ $)$ アクセブタンテオンホンギー 3 MeV $)$ <td>繰り返し周波数</td> <td>25</td> <td>Hz</td> <td>全長(加速管のみ)</td> <td>65.9</td> <td>m</td>	繰り返し周波数	25	Hz	全長(加速管のみ)	65.9	m
全長(加速管のみ)92.9 m高周波励振電力第1.2.3 m公司周波電力 (30 mA)21.3 MW公司周波電力 (30 mA)22.0 MW公司周波電力 (30 mA)27.3 MW公司周波電力 (30 mA)22.0 MWクライストロン数(*)1914(*)RFQ 用とデバンチャー用を含む $rx h x^2 - \pi q = 28.6 - 1.92$ MeV/mドリフトスペース (**)0.67-1.03 m $ry d ry d$	平均電流	200	μA	全長	92.4	m
全長122.3 mビーム電力 (30mA)4.6 MW湾周波競電力 (30mA)27.3 MWクライストロン数 (30mA)22.0 MWクライストロン数(*)19小波電場3.86 MV/mアクイストロン数(*)19小波電場3.86 MV/mRFQアクセブタンスス射エネルギー3.86 MV/m広射エネルギー50 keVA, (規格化 90%)21.3 π mm-mradム(規格化 90%)18.6 π mm-mradA, (規格化 90%)13.6 π mm-mradス射エネルギー3 MeVA, (規格化 90%)40.4 π MeV-degDTLアクセブタンス3(**) 一層短い長さも可能である。商周波励振電力(*)3.92 MW(**) 一層短い長さも可能である。グライストロン数37アクセブタンス3ス(規格化 90%)43 π mm-mrad人(規格化 90%)43 π mm-mrad人(規格化 90%)9.3 π MeV-deg収束法Equipartitioned focusingDTL の詳細2 3グンク番号1 2 3アクセブタンス3人(規格化 90%)9.3 π MeV-deg収束法Equipartitioned focusingDTL の詳細30 41 29広射エネルギー19.196 35.407 50.058 MeVダンク長さ10.36 8.87 7.81 mムル教80 41 29高周波励振電力(*) (30mA)1.64ビース電力(30mA)1.64レカ教2.5シク長さ30ビース電力(30mA)2.5シク長さ30ビース電力(30mA)2.5シク長さ30ビース電力(30mA)2.5シク長さ30ビース電力(30mA)2.5シク長さ30ビース電力(30mA)2.5シク長さ30ビース電力(30mA)2.5	全長(加速管のみ)	92.9	m	高周波励振電力(*)	17.4	MW
高周波励振電力21.3MW 263全高周波電力 (30mA)22.0MW 27.3 MW 77.4 Comparison of the system(*) RFQ 用とデバンチャー用を含む19第7.4第7.414(*) RFQ 用とデバンチャー用を含む第7.4第7.4142.861.92MV/mアク大射エネルギー50keV L力エネルギー7.4147.41.3mm-mrad A (規格化 90%)18.6 π mm-mrad A (規格化 90%)14.1 π MWグライストロン数150 全兵28.51m 3.33MW γ /	全長	122.3	m	ビーム電力 (30mA)	4.6	MW
全高周波電力 (30 mA) 27.3 MW クライストロン数 14 $\gamma P (3) = 2\pi \sqrt{3} + \pi \sqrt{3} +$	高周波励振電力	21.3	MW	全高周波電力 (30mA) 22.0	MW
クライストロシ数(*) 19 (*) RFQ 用とデバンチャー用を含む 加速電場 3.86 MV/m RFQ エネルギー利得 2.86 - 1.92 MeV/m 周波数 324 MHz ハボースペース(**)0.67-1.03 m 入射エネルギー 50 keV A、(規格化 90%) 21.3 π mm-mrad 力財エネルギー 3 MeV A、(規格化 90%) 18.6 π mm-mrad 周波数 324 MHz (**) 四号 1.2 を含む。 (**) 四号 1.2 を含む。 周波数 324 MHz (**) 四号 1.2 を含む。 (**) 四号 1.2 を含む。 アクセブタンス A、(規格化 90%) 40.4 π MeV-deg (**) 一層短い長さも可能である。 全長 28.51 m 高周波励振電力 (**) 3.92 MW (**) 一層短い長さも可能である。 アクセプタンス A、(規格化 90%) 43 π mm-mrad (.4.(現格化 90%) (**) 一日 オレ教 150 2 3 7.54 (**) 0.67 (**) 0	全高周波電力 (30 mA)	27.3	MW	クライストロン数	14	
(*)RFQ 用とデバンチャー用を含む RFQ 周波数 324 MHz 人射エネルギー 50 keV 出力エネルギー 50 keV 出力エネルギー 3 MeV DTL 周波数 324 MHz 人射エネルギー 3 MeV DTL 周波数 324 MHz 人射エネルギー 3 MeV 出力エネルギー 3 MeV ロン 全長 28.51 m 高周波励振電力 (*) 3.92 MW ビーム電力 (30mA) 1.41 MW 全高周波電力 (30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセブタンス A, (規格化 90%) 43 π mm-mrad A, (規格化 90%) 43 π md-mrad A, (規格化 90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細	クライストロン数(*)	19		加速電場	3.86	6 MV/m
RFQ ドリフトスペース (**)0.67-1.03 m 周波数 324 MHz 入射エネルギー 50 keV 出力エネルギー 3 MeV DTL 周波数 周波数 324 MHz 入射エネルギー 3 MeV プリアレスペース (**)0.67-1.03 m アクセブタンス 人財工 (規格化 90%) 18.6 π mm-mrad 高波数 324 MHz 人射エネルギー 3 MeV ウンク数数 3 セル数 150 全長 28.51 m 高周波動振電力 (*) 3.92 MW ビーム電力 (30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセブタンス 4 A、(規格化 90%) 41 mm-mrad A、(規格化 90%) 41 mm-mrad A、(規格化 90%) 9.3 m MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 2 3 タンク番号 1 2 3 人財エネルギー 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 MeV ビーム電力 (30mA) 0.41 29 高周波電力 (*) 1.16 1.36 1.40	(*)RFQ 用とデバンチャー用を	含む		エネルギー利得 2.	.86 - 1.92	2 MeV/m
RFQ アクセプタンス 周波数 324 MHz 入射エネルギー 50 keV 出力エネルギー 3 MeV DTL A (規格化 90%) 18.6 π mm-mrad 周波数 324 MHz 人射エネルギー 3 MeV 出力エネルギー 3 MeV 出力エネルギー 50.06 MeV オン数 150 (第格化 90%) 全長 28.51 m m 高周波動振電力(*) 3.92 MW (**) 一層短い長さも可能である。 グライストロン数 3 7 アクセプタンス 3 (#4化 90%) 女との数 3 7 アクセプタンス 4.1 MW 空高間波電力(30mA) 1.41 MW 空高間波電力(30mA) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 9.20 人(規格化 90%) 4.1 π mm-mrad 人(規格化 90%) 4.1 π mm-mrad 人(規格化 90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DT				ドリフトスペース (*	*)0.67-1	.03 m
周波数 324 MHz 人射エネルギー 50 keV 出力エネルギー 3 MeV DTL 個力エネルギー 3 周波数 324 MHz 人気想名化90%) 18.6 π mm-mrad 人気想名化90%) 40.4 π MeV-deg DTL (現名化90%) 40.4 π MeV-deg 出力エネルギー 3 MeV (第日:1.2 を含む。 小数エネルギー 3 MeV (**) 一層短い長さも可能である。 少ク数 3 - - 空長 28.51 m (**) 一層短い長さも可能である。 クライストロン数 3 7 7 クラインクシス 4 π mm-mrad A、(現格化90%) 43 π mm-mrad A、(現格化90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing - DTL の詳細 9.2 3 π MeV-deg 収束法 10.36 8.87 7.81 ガレキルギー 19.16 1.56 1.40 A、(現名化190%) <	RFQ			アクセプタンス		
入射エネルギー 出力エネルギー50keV MeVA (規格化90%)18.6 π mm-mrad A (規格化90%)A (規格化90%)40.4 π MeV-deg MeV-degDTL 周波数324MHz (別子 1.2 を含む。入射エネルギー シク教 セル数3MeV H ウンク数(**) 一層短い長さも可能である。**) 一層短い長さも可能である。**) 一層短い長さも可能である。**) 一層短い長さも可能である。**) 小菜 クライストロン数3**) 小菜 クライストロン数3.92MW どーム電力 (30mA)1.41 MW 2A (規格化90%)43 41 mm-mrad A (規格化90%)A (規格化90%)43 41 mm-mrad A (規格化90%)A (規格化90%)43 41 mm-mrad A (規格化90%)A (規格化90%)43 41 mm-mrad A (1規格化90%)DTL の詳細 タンク番号 取支法1 2 Equipartitioned focusingDTL の詳細 タンク長さ 周波励振電力(*)1.16 1.162 高周波励振電力(*)1.16 1.161.16 セル数 高周波励振電力(30mA)0.49 0.440 公司 公式 公式 公式 公式 2.70 2.9 0.742 m(*) 因子1.3 を含む。 これは SUPERFISH による計算結果と 生態 と とる計算結果と 生態(*) 四子1.3 を含む。 これは SUPERFISH による計算結果と 生態(*) 四子1.3 を含む。 これは SUPERFISH による計算結果と 生態	周波数	324	MHz	A. (規格化 90%)	21.3	π mm-mrad
田力エネルギー 田力エネルギー 周波数 324 MHz 人財エネルギー 3 MeV 出力エネルギー 50.06 MeV $\phi > 2 \phi \chi$ 2 851 m 高周波動振電力(*) $\psi = 2 8 51$ m 高周波電力(30mA) $\psi = 2 8 51$ m 高周波電力(30mA) $\psi = 2 8 51$ m $\phi = 2 8 51$	入射エネルギー	50	keV	A [*] (規格化90%)	18.6	π mm-mrad
DTL 周波数 入射エネルギー 出力エネルギー 少ク数 全長 28.51 m 高周波励振電力 (*) 3.92 MW ビーム電力 (30mA) 1.41 MW 全高周波電力 (30mA) 5.33 MW グライストロン数 7 クセプタンス A (規格化 90%) 43 π mm-mrad A (規格化 90%) 9.3 π MeV-deg Equipartitioned focusing DTL の詳細	出力エネルギー	3	MeV	A (規格化 90%)	40.4	π MeV-deg
周波数 324 MHz 入射エネルギー 3 MeV 出力エネルギー 50.06 MeV タンク数 3 セル数 150 全長 28.51 m 高周波励振電力 (*) 3.92 MW ビーム電力 (30mA) 1.41 MW 全高周波電力 (30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセプタンス $A_{($ 規格化 90%) 43 π mm-mrad $A_{(}$ 規格化 90%) 41 π mm-mrad $A_{(}$ 規格化 90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 タンク番号 1 2 3 入射エネルギー 3.0 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 29 高周波励振電力 (*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力 (30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力 (30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 βA 0.737 0.742 m (*) 因子 1.3 を含む。これは SUPERFISH による計算結果と、実際に必要な電力を比較	DTL			(*)因子1.2を含む。		0
入射エネルギー 3 MeV 出力エネルギー 50.06 MeV タンク数 3 セル数 150 全長 28.51 高周波甌振電力(*) 3.92 MW ビーム電力(30mA) 1.41 MW 全高周波電力(30mA) 1.41 グライストロン数 3 アクセプタンス 4 A、(規格化 90%) 43 ボmm-mrad A、(規格化 90%) 41 エロmm-mrad A、(規格化 90%) 9.3 アクセプタンス A、(規格化 90%) 9.3 東波 Equipartitioned focusing DTL の詳細 タンク番号 1 2 成新エネルギー 19.196 35.407 出力エネルギー 19.196 35.407 松数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 ビーム電力(30mA) 0.49 0.44 MW 公支長 2.5 2.7 2.9 MV/m 全高周波励振電力(*) 1.16 1.84 1.84 MW 全高周波電力(30mA)		324	MHz	(**) 一層短い長さも可能	能である	0
田力 エネルギー 50.06 MeV タンク数 3 セル数 150 全長 28.51 m 高周波励振電力 (*) 3.92 MW ビーム電力 (30mA) 1.41 MW 全高周波電力 (30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセブタンス A _x (規格化 90%) 43 π mm-mrad A _x (規格化 90%) 41 π mm-mrad A _x (規格化 90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 タンク番号 1 2 3 入射エネルギー 3.0 19.196 35.407 MeV 出力 エネルギー 19.196 35.407 50.058 MeV タンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 高周波励振電力 (*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力 (30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力 (30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 βA 0.737 0.742 m (*) 因子 1.3 を含む。これは SUPERFISH による計算結果と 実際に必要な雪力を比較	入射エネルギー	3	MeV			
タンク数 3 セル数 150 全長 28.51 m 高周波励振電力(30mA) 1.41 MW 全高周波電力(30mA) 1.41 MW 全高周波電力(30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセプタンス 43 π mm-mrad A、(規格化90%) 43 π mm-mrad A、(規格化90%) 41 π mm-mrad A、(規格化90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 2 3 人射エネルギー 19.196 出力エネルギー 19.196 出力エネルギー 19.196 カンク長さ 10.36 80 41 タンク長さ 10.36 80 41 29 高周波励振電力(*) 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW 全高周波電力(30mA) 0.49 0.41 29 高周波励振電力(30mA) 1.64 1.84 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 7.7	出力エネルギー	50.06	MeV	in the second second		
セル数 150 全長 28.51 m 高周波励振電力(*) 3.92 MW ビーム電力(30mA) 1.41 MW 全高周波電力(30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセプタンス 3 A、(規格化90%) 43 πmm-mrad A、(規格化90%) 41 πmm-mrad A、(規格化90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 タンク番号 1 人射エネルギー 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 MeV タンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力(30mA) 0.49 0.44 MW 金高周波電力(30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 βλ の.737 0.742 m m	タンク数	3				
全長 28.51 m 高周波励振電力(*) 3.92 MW ビーム電力(30mA) 1.41 MW 全高周波電力(30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセプタンス 3 A、(規格化90%) 43 πmm-mrad A、(規格化90%) 41 πmm-mrad A、(規格化90%) 9.3 πMeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 $\frac{9 > 7 4 = 7 + 2 = 3}{\sqrt{3} \pi MeV - 4 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 +$	セル数	150		fin in the state of the state		
高周波励振電力(*) 3.92 MW ビーム電力(30mA) 4.141 MW 全高周波電力(30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセプタンス A、(規格化90%) 4.3 π mm-mrad A、(規格化90%) 4.1 π mm-mrad A、(規格化90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 $\qquad \qquad $	全長	28.51	m	10.00 C		
ビーム電力(30mA) 1.41 MW 全高周波電力(30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アケセプタンス A A、(規格化 90%) 43 π mm-mrad A、(規格化 90%) 41 π mm-mrad A、(規格化 90%) 41 π mm-mrad A、(規格化 90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 $9 \lor 7 \oplus \oplus = 1$ $y \lor 7 \oplus \oplus = 1$ 1 L力エネルギー 3.0 19.196 35.407 出力エネルギー 19.196 レンカ長さ 10.36 化数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.6 1.36 1.64 1.84 小酸電電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 空定位相 -30 -26 ドリフトスペース 4 0 月入 (*) 因子1.3を含む。これはSUPERFISHによる計算結果と、実際に必要な声力な比較	高周波励振電力(*)	3.92	MW			
全高周波電力 (30mA) 5.33 MW クライストロン数 3 アクセプタンス A (規格化 90%) 43 π mm-mrad A (規格化 90%) 41 π mm-mrad A (規格化 90%) 9.3 π MeV-deg 収束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	ビーム電力 (30mA)	1.41	MW	1 P		
クライストロン数 3 アクセプタンス Ax(規格化 90%) 43 π mm-mrad Ax(規格化 90%) 41 π mm-mrad Ax(規格化 90%) 9.3 π MeV-deg 取束法 Equipartitioned focusing DTL の詳細 $p > 2 p a B B$ $p > 2 p a B B$ 1 2 3 入射エネルギー 3.0 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 MeV カンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 9 高周波励振電力 (*) 1.16 1.36 1.40 MW 业支言周波電力 (30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 $\beta\lambda$ 0.737 0.742 m m (*) 因子 1.3 を含む。 これは SUPERFISH による計算結素史と 室際に必要な意言力を比較 5	全高周波電力 (30mA)	5.33	MW	Shanning the state of the		
アクセプタンス A _x (規格化 90%) A _y (規格化 90%) A _y (規格化 90%) A _y (規格化 90%) A _x (規格化 90%) A _y (規格化 90%) $9.3 \pi \text{MeV-deg}$ Equipartitioned focusing DTL の詳細 $\begin{array}{r} & & & & & & & & & & & & & & & & & & &$	クライストロン数	3				
A、(規格化 90%)43π mm-mradA、(規格化 90%)41π mm-mradA、(規格化 90%)9.3π MeV-deg取束法Equipartitioned focusingDTL の詳細 $y > p$ 番号1 $y > p$ 番号12入射エネルギー3.019.196出力エネルギー19.19635.40750.058MeV $y > p$ 長さ10.36 41 29高周波励振電力(*)1.161.161.361.40MW $\psi = a \pi j$ (30mA)0.490.44MW全高周波電力 (30mA)1.641.841.84Mw加速電場2.52.72.9MV/m安定位相-30-26-26ドリフトスペース430 0.737 0.742m(*) 因子 1.3 を含む。これは SUPERFISH による計算結果と、実際に必要な雪力を比較	アクセプタンス					
A (規格化 90%) A(規格化 90%) 収束法41 π mm-mrad 9.3 π MeV-deg Equipartitioned focusingDTL の詳細 $g > 2 / 2 \oplus 1$ 入射エネルギー 出力エネルギー2 30DTL の詳細 $g > 2 / 2 \oplus 5$ 人射エネルギー1 19.196 35.4072 St.407 $y > 2 / 5 \oplus 5$ 出力エネルギー10.36 10.368.87 8.87 8.877.81 7.81 m 29 高周波励振電力(*)MW 1.16 1.16 $u \to 2 / 5 \oplus 5$ 高周波励振電力(*)1.16 1.161.36 1.401.40 MW MW MW 26高周波電力(30mA)0.49 0.490.44 MW MW 0.49(*) 因子 1.3 を含む。 (*) 因子 1.3 を含む。 これは SUPERFISH による計算結果と、 主際に必要な電力を比較	A (規格化 90%)	43	π mm-	mrad		
A'(規格化 90%) 収束法9.3 π MeV-deg Equipartitioned focusingDTL の詳細 $\beta > 2 \beta 番号$ 123入射エネルギー3.019.19635.407出力エネルギー19.19635.407MeV出力エネルギー19.19635.40750.058タンク長さ10.368.877.81セル数804129高周波励振電力(*)1.161.361.40ビーム電力(30mA)0.490.490.44如速電場2.52.72.9ボリフトスペース430の子1.3を含む。これは SUPERFISH による計算結果と、実際に必要た電力を比較	A.(規格化 90%)	41	π mm-	mrad		
収束法 Equipartitioned focusing	A'(規格化 90%)	9.3	πMeV	/-deg		
DTLの詳細 タンク番号 1 2 3 入射エネルギー 3.0 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 50.058 MeV タンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力(30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力(30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 $\beta\lambda$ 0.737 0.742 m	収束法	Equipartiti	oned for	cusing		
DTLの詳細 タンク番号 1 2 3 入射エネルギー 3.0 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 50.058 MeV タンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力 (30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力 (30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 βλ 0.737 0.742 m (*) 因子 1.3 を含む。これは SUPERFISH による計算結果と、実際に必要を雷力を比較						
DTLの詳細 タンク番号 1 2 3 入射エネルギー 3.0 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 50.058 MeV タンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力 (30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力 (30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 βλ 0.737 0.742 m (*) 因子 1.3 を含む。これは SUPERFISH による計算結果と、実際に必要な雷力を比較						
タンク番号 1 2 3 入射エネルギー 3.0 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 50.058 MeV タンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 3 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力(30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力(30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 $\beta\lambda$ 0.737 0.742 m m	DTL の詳細					
ス射エネルギー 入射エネルギー 出力エネルギー 19.196 35.407 MeV 出力エネルギー 19.196 35.407 MeV MeV タンク長さ 10.36 8.87 7.81 m セル数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW 全高周波電力(30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力(30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 ドリフトスペース 4 3 0 βλ 0.737 0.742 m (*) 50.058 MeV MW 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW 29 (*) 1.16 1.36 1.40 MW 20 (*) (*) 1.16 1.36 1.40 MW (*) 2.5 2.7 2.9 MV/m (*) (*) 1.3 ϵ^{2} (*) (*) 1.16 1.36 1.40 MW (*) (*) (*) (*) (*) (*) (*) (*)	カンカ釆早	1		2	2	
(*)因子1.3を含む。これはSUPERFISHによる計算結果と、実際に必要な雷力を比較	ノシノ宙ク	1		10 106 25	3 407	MaX
は カンネルマイ タンク長さ レン数 ものののののののののののののののののののののののののののののののののののの	ハカエネルギー	10.10	06	19.190 55 35.407 50	.407	MeV
レル数 80 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力 (30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力 (30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 $\beta\lambda$ 0.737 0.742 m (*) 因子 1.3 を含む。これは SUPERFISH による計算結果と、実際に必要を雷力を比較	ロノエネルマ	19.1	90 6	9 97 7	.036 01	Ivie v
にアメ 30 41 29 高周波励振電力(*) 1.16 1.36 1.40 MW ビーム電力 (30mA) 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力 (30mA) 1.64 1.84 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 $\beta\lambda$ 0.737 0.742 m (*) 因子 1.3 を含む。これは SUPER FISH による計算結果と、実際に必要な電力を比較	ノンノ以て	10.50	5	0.07 /	.01	m
間周波励振電力(*) ビーム電力(30mA) 0.49 全高周波電力(30mA) 1.64 加速電場 2.5 安定位相 -30 -26 ドリフトスペース 4 0.737 (*)因子 1.3を含む。これは SUPER FISH による計算結果と、実際に必要を雷力を比較	三国波励振雲力(*)	00	6	41 1 26 1	10	MIN
全高周波電力 (30mA) 1.64 0.49 0.49 0.44 MW 全高周波電力 (30mA) 1.64 1.84 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 $\beta\lambda$ 0.737 0.742 m (*)因子 1.3 を含む。これは SUPER FISH による計算結果と、実際に必要を雷力を比較	同向仮加派电力(*) ビーム電力(20mA)	1.10		1.30 1	.40	
1.04 1.04 1.04 1.04 MW 加速電場 2.5 2.7 2.9 MV/m 安定位相 -30 -26 -26 ドリフトスペース 4 3 0 βλ 0.737 0.742 m (*)因子 1.3を含む。これは SUPER FISH による計算結果と、実際に必要を雷力を比較		0.49		0.49 0	.44 .01	IVI W
安定位相 ドリフトスペース (*)因子1.3を含む。これはSUPERFISHによる計算結果と、実際に必要な電力を比較	五百四次电力(50mA) 加速雷堤	2.5		27	04	MV/m
ドリフトスペース (*)因子 1.3 を含む。これは SUPER FISH による計算結果と 室際に必要な電力を比較	安定位相	_30		-26		1VI V/111
(*)因子1.3を含む。これはSUPERFISHによる計算結果と、実際に必要を雷力を比較	ドリフトスペース	-50		-20 -	0	ßλ
(*)因子1.3を含む。これはSUPERFISHによる計算結果と、実際に必要を雷力を比較		0.73	37	0.742	0	рл m
	(*)因子1.3を含む。これはSI	UPERFISH	によろ	計算結果と、 実際に 小更	な雷力ズ	や世転

して推定した値である。

エネルギーが3 MeVのRFQ、50 MeVのDTL、そして200 MeVのSDTLにより構成される。エネルギーを400 MeVまで増加させる将来計画では、150 MeVもしくは200 MeVより高いエネルギー領域で、周波数972MHzのACSが使われる。表II.4.2.にデザイン結果をまとめ、図II.4.1.にその構成を示す。3 種類の加速管の有効シャントインピーダンスを図II.4.2.に示す。このデザインの特徴は、以下のようにまとめられる。

1) 200 MeV までの全ての加速管の周波数は 324 MHz に選ぶ。

2) 50 MeV から 200 MeV のエネルギー範囲では、SDTL を選ぶ。

3) 出力エネルギーが3 MeVのRFQを選ぶ。

4) SDTLからACSへの遷移エネルギーとして、150 MeV または200 MeV を選ぶ。
5) 全ての加速管に対して、クライストロンを使う。

このデザインの特徴の一つは、加速過程におけるビーム損失の問題がよく考慮されている事である。それは、SDTLの採用により、縦運動の遷移位置と横運動の遷移位置を分離する事により達成されている。比較的低めのエネルギーで起こる横方向の遷移は、空間電荷効果を低減する。一方、比較的高いエネルギーで起こる縦方向の遷移は、ACSの加速過程における非線形問題の効果を低減する。従って、このデザインでは、SDTL部分までの加速過程において、縦の遷移(周波数の変化)がない。上記の特性は、加速過程の電磁場を一層精密に取り込み、3次元の空間電荷効果を今まで以上に厳密に考慮した最新のビームシミュレーションコード[2]により検証されている。ここで周波数324MHzを選んだ理由は次の通りである。

1) 従来使用されている 200MHz に比べて、空間電荷効果が減少する。

- 2) 出力エネルギー3 MeVの RFQ を想定した時に、ドリフトチューブ用の四極電 磁石が製作可能である。
- 3) 出力エネルギー 3 MeV の単一空洞の RFQ が可能である。
- 4) 周波数350MHzのクライストロンに少しの修正を加える事によりクライストロンが使用できる。
- 5) 3 倍の周波数遷移を仮定した時に、高エネルギー部の加速管として ACS が使用できる。

II.4.5. リニアックの各構成要素

II.4.5.1. イオン源とRFQ [3]、[4]

KEKの実験装置の体積生成型負水素イオン源は、セシウムの無い状態の通常運転時に(繰り返し周波数20Hz、パルス幅350μsec)ピーク電流16mAを達成している。 その時の横方向の規格化エミッタンスは0.41πmm-mradである。少量のセシウムを 用いると、およそ3倍程度ピーク電流が増加する事が知られている。従って、周波 数432MHzのRFQの設計アクセプタンスは約1πmm-mradであり、周波数324MHz のアクセプタンスは、ある因子だけ周波数に反比例して増加するので、30mA以上 のピーク電流を周波数324MHzのRFQから得ることを期待出来ると思われる。

KEK で試作した出力エネルギー3 MeV、周波数 432MHz の RFQ は、ピーク電流 13.2mAを、透過率82.5%、エミッタンス増加率34%で加速するのに成功した。この 世界最高エネルギーは、新たに発明した空洞の安定化法 PISL (π -mode stabilizing loop、[3])により実現された。運転周波数が432MHz から324MHz に下がると、RFQ の製作は一層容易になる。出力エネルギー3 MeV は以下の理由により選択されてい る。

- 1. より低いエネルギーを選ぶと、DTLの入射部に必要となる収束磁場勾配が大き くなりすぎる。
- 2. より高い出力エネルギーを選ぶと、RFQの長さが長くなりすぎて、一つの空洞 の中の一つのユニットとしてベインを簡単に製作出来なくなる。
- 速いビームチョッパーに伴う損失ビームによる放射化の観点から、より高いエネルギーは望ましくない。3 MeVより高いエネルギーの場合にはビームをチョップする事も難しい。
 - 4. 二つのRFQ空洞を並べて置き、その間のビームラインに速いビームチョッパー を設置する方式は採用しない。二つの空洞のチューニングが難しいからであ る。

II.4.5.2. RFQ と DTL の間のビーム輸送系 [5]、[6]



図 II.4.3. DTL 内の横と縦の位相空間 における位相進み。ピーク 電流 30mA を仮定している。



図 II.4.4. DTL 内のビームの大きさの 変化。



図II.4.5. SDTL加速管の構造図。収束磁石は四角で示している。

RFQとDTLの間のビーム輸送系には二つの主な目的がある。第一は、扱いやすい チューニングシステムとモニターシステムを使って、DTLの縦と横のアクセプタン スにビームを整合させることである。第二は、リニアックに続く円形加速器に入射 後のビーム損失を低減させる為に、速いビームチョッパーを使ってビームをチョッ プすることである。

II.4.5.3. DTL

DTLは3本のタンクでビームを3MeVから50MeVまで加速する。それぞれのタンクは、ビーム負荷と製作誤差に起因する摂動の効果を抑えるために、ポストカップラーを使って安定化される[7]。収束系のデザインには coupled envelope equations と equipartitioning theory とを使用する[8]。図II.4.3.と図II.4.4.に典型的な収束パラメーターのリニアック内での変化を示す。この場合、位相進みが一定となるような収束法と比べると、横方向のビーム半径は大きくなるが、バンチの電荷密度が低下するので、空間電荷効果の観点からみると、適切な選択といえる。この収束法を使うことにより、縦の運動と横の運動の間のエミッタンスの転換と同時に、空間電荷効果によるエミッタンス増加を抑制することが可能となる。

II.4.5.4. SDTL [9]

SDTL は、31本のタンクでビームを 50 MeV から 200 MeV まで加速する。それぞ れのタンクは、5 個のユニットセルから構成される。典型的な形を図II.4.5. に示す。 DTL と SDTL の比較を表 II.4.3. に示す。SDTL には次のような長所がある。

- 1. 縦の運動の遷移点と横の運動の遷移点を分離する事により、良質なビームを作 る効果がある。
- 2. 加速システム全体として、一層高い有効シャントインピーダンスを達成できる。
- 表 II.4.3. 周波数 324MHz、エネルギー 50 MeV(β =0.31)の場合の DTL と SDTL の 典型的なパラメーター。

	DTL	SDTL	
タンク直径	56	52	cm
DT直径	13	9	cm
ビーム孔半径	1.3	1.5	cm
外コーナー半径	2.5	2.2	cm
内コーナー半径	1.0	0.5	cm
Z	78.2	75.9	$M\Omega/m$
Т	0.703	0.830	
ZTT	38.6	52.3	$M\Omega/m$
最大表面電場	4.02	5.87	MV/m

3. 通常のDTLと比べると、ドリフトチューブ及びタンクの製作と整列が簡単になる。これは、収束磁石の数が減ると同時に、建設コストの軽減につながる。
 4. SDTLのユニットタンクは数個のユニットセルで構成されるので、空洞を安定

化する必要はない。その結果、DTL に比べて、一層簡単な構造となる。

一方、次のような短所もある。

1. ユニットタンクの数が増える。

2. 隣り合うユニットタンクの間のドリフトスペースの数が増える。

3. チューニングパラメーターの数が増える。

ビームシミュレーションの結果によれば、上記のドリフトスペースに起因する縦 方向のビームの質の劣化はおよそ10%であり、無視できる大きさと思われる。

II.4.5.5. ACS [10]

将来のエネルギー増強において、エネルギーが150 MeV または200 MeV より高 い領域では、周波数972MHzのACSを使う予定である。ACS に関しては、基本的な 高周波空洞の問題は既に解決されており、周波数1296MHzのモデル空洞を使って、 大電力試験にも成功している。従って、少しの修正を加える事により、周波数 972MHzのACSを使ったエネルギーの増強は可能であると思われる。

II.4.5.6. デバンチャー

出力ビームのエネルギー幅を要求仕様の範囲に抑えるためには、リニアック出口の下流に設置するデバンチャーが必要である。加速過程における高周波電場の誤差を考慮した場合には、1 MV から 1.5 MV の電圧が必要となる。

II.4.6. ビームシミュレーション

数種類のビームシミュレーションコードを設計に使っている。KEKで最近開発さ れたコードであるLINSAC[2]を使って、ビームの平均的な性質ばかりでなく、ビー ムのコア部分のまわりに存在するハロー状の粒子の振る舞いを含めた観点から、リ ニアックの主要なパラメーター(周波数、加速管の形式、遷移エネルギーなど)を 検証した。このコードは並列型のスーパーコンピュータを効率よく使うために、 99.9% 以上ベクトル化されている。

II.4.7. 高周波電源

JHFの線型加速器のために必要な高周波出力は、それぞれのセクションで、RFQ のために 0.8 MW、DTL のために 1.6 MW から 1.8 MW、SDTL のために 1.3 MW か ら 1.8 MW、デバンチャーのために 0.5 MW となる。全体で必要なクライストロンの 数は 19 ステーション になる。当然としてクライストロン出力には、導波管やサー キュレーター、分割器等の高周波機器でのパワーロスとして10%程度を見込まなけ ればならない。さらに、クライストロンは、入力パワーの調整で出力パワーを加減 できる不飽和領域で使用しなければならない。ビームの負荷が変動するような環境 下で適切な加速電場を保持するためには、こうした運転条件が欠かせない。以上の ような理由により、クライストロンの動作点を必要な高周波パワーの1.3 倍とした。 ちなみにクライストロンの動作点は、カソードと変調アノードの電圧によって決ま る。こうした条件を満たすために、JHFで使われるクライストロンは、2.5 MW 以上 の能力を有するものでなければならない。

カソード電源のコストの点から、アノードを変調するタイプのクライストロン が望ましい。一方、カソードとその付近で電圧がかからなくなってしまう問題が生 じ易いという点から言えば、アノードを変調するタイプは不利である。カソードを 変調するタイプに比べ、カソード付近が常に直流の高電圧にさらされるためである。 これまで行われてきた、JHFのための線型加速器の開発では、アノード変調タイプ のクライストロン(Thomson TH2134)が使われてきた。ただし、周波数と出力は、

		Maximum	rating	Operated	TH-2134
		(Objective))	(Saturation)	(Test Linac)
Structure		5 cavities,	horizonta	al position	
RF window and connection		coazial, WR-2300		pill box, WR-1800	
Frequency	MHz		324		432
Peak output power	MW	3.0		2.5	2
Average output power	kW	98		81	65
Pulse width	μs		650		650
Repetition rate	pps		50		50
Duty	%		3.25		3.25
Beam voltage	kV	110		102	95
Beam current	А	50		45	40
Mod. Anode voltage	kV	93		86	80
Efficiency	%		55		55
Gain	dB		46		46

表 II.4.4. 324 MHz のクライストロンの性能比較

それぞれ432 MHz と2 MWであり、今の値と若干異なる。現在検討している新しい クライストロンのパラメーターを表II.4.4にまとめる。これは、先のクライストロン Thomson TH2134を基に2.5 MW から3.0 MW にスケールアップした。先のクライス トロンで安定した動作が得られている経験から言えば、出力を2.5 MW から3.0 MW にするためにカソード電圧を102から110 kVにしてもカソードに電圧がかかりにく くなるような問題は起きないと予想される。ただし、より安定した2.5 MW の出力 を得るためには、3 MW を出力できるクライストロンを開発する必要がある。

現在のところ、 クライストロンの出力ポートには、ループカプラー、同軸型 高周波窓、同軸(WX-203)から矩形(WX-2300)への導波管変換器を組み合わせた 構造を想定している。導波管システムは、Y型サーキュレーター、2叉は3分割の 電力分配器、矩形から同軸への変換器等から成る。この分割された高周波電力は、 クライストロンギャラリーから加速器トンネルに貫通する穴を通して空洞へ導かれ る。

はじめに述べたように、線型加速器の各セクションで必要な高周波パワーが 0.7 MW から 2.5 MW という範囲で変わるので、異なる出力電圧を持つ幾つかのカ ソード電源が必要になる。ここでは、クライストロンのパワーを次の様に3つのグ ループに分けた。1.0 MW 以下のもの(2台のクライストロン)、1.2 MW から2.0 MW (7台のクライストロン)、そして 2.0 MW から 2.5 MW (10台のクライストロン)で ある。これらに対応する DC 電源の出力電圧は、それぞれ 72 kV、95 kV、102 kV と なる。2台から数台のクライストロンを1台の共通 DC 電源につなぎ、電源にかかる コストの低減をはかる。各々の電源には、AVR が組み込まれ、使用開始直後に徐々 に電圧を上昇させる過程や、クライストロンをコンディションするために使われる。 クライストロンを保護する上で、クローバー回路も重要な構成要素の1つである。

各々のクライストロンのアノードには、個々にあるパルス変調器によってパル ス電圧が供給される。変調器は各々の分割抵抗比を変えることで、段階的に出力電 圧を調整することが出来る。こうして、1台の共通電源につながるクライストロン の出力設定がまちまちであっても、それぞれのクライストロンを飽和時出力80%の 動作点で運転することが可能となる。

参考文献

- [1] T. Kato, "Design of the JHP 200-MeV Proton Linear Accelerator", KEK report 96-17 (1997).
- [2] T. Kato, "Beam Simulation Code Using Accurate Gap Field Distributions in a Drift Tube Linac", Proc. 1994 International Linac Conf., p.523 (1994).
- [3] A. Ueno et al., "Beam Test of the Pre-Injector and the 3-MeV H RFQ with a New Field Stabilization PISL", Proc. 1996 International Linac Conf., p.293 (1996).
- [4] S. Fujimura and A. Ueno, "Measurement of Precise Distributions in the Emittance Phase Plane of the JHP LEBT", Proc. 1996 International Linac Conf., p.343 (1996).
- [5] T. Kato, "Design of Beam-Transport Line between the RFQ and the DTL for the JHP 1-GeV Proton Linac", Proc. 1994 International Linac Conf., p.59 (1994).
- [6] T. Kato, "New Design of an RF Beam Chopper", Proc. 7th Symposium on Accelerator Science and Technology, p.288 (1989).
- [7] F. Naito et al., "RF Characteristics of a High-Power Model of the 432 MHz DTL", Proc. 1994 International Linac Conf., p.137 (1992).
- [8] M. Reiser, "Theory and Design of Charged Particle Beams", Section 5, John Willy & Sons, 1994.
- [9] T. Kato, "Proposal of a Separated-Type Proton Drift Tube Linac for a Medium-Energy Structure", KEK Report 92-10 (1997).
- [10] T. Kageyama et al., "Development of Annular Coupled Structure", Proc. 1994 International Linac Conf., p. 248 (1994).