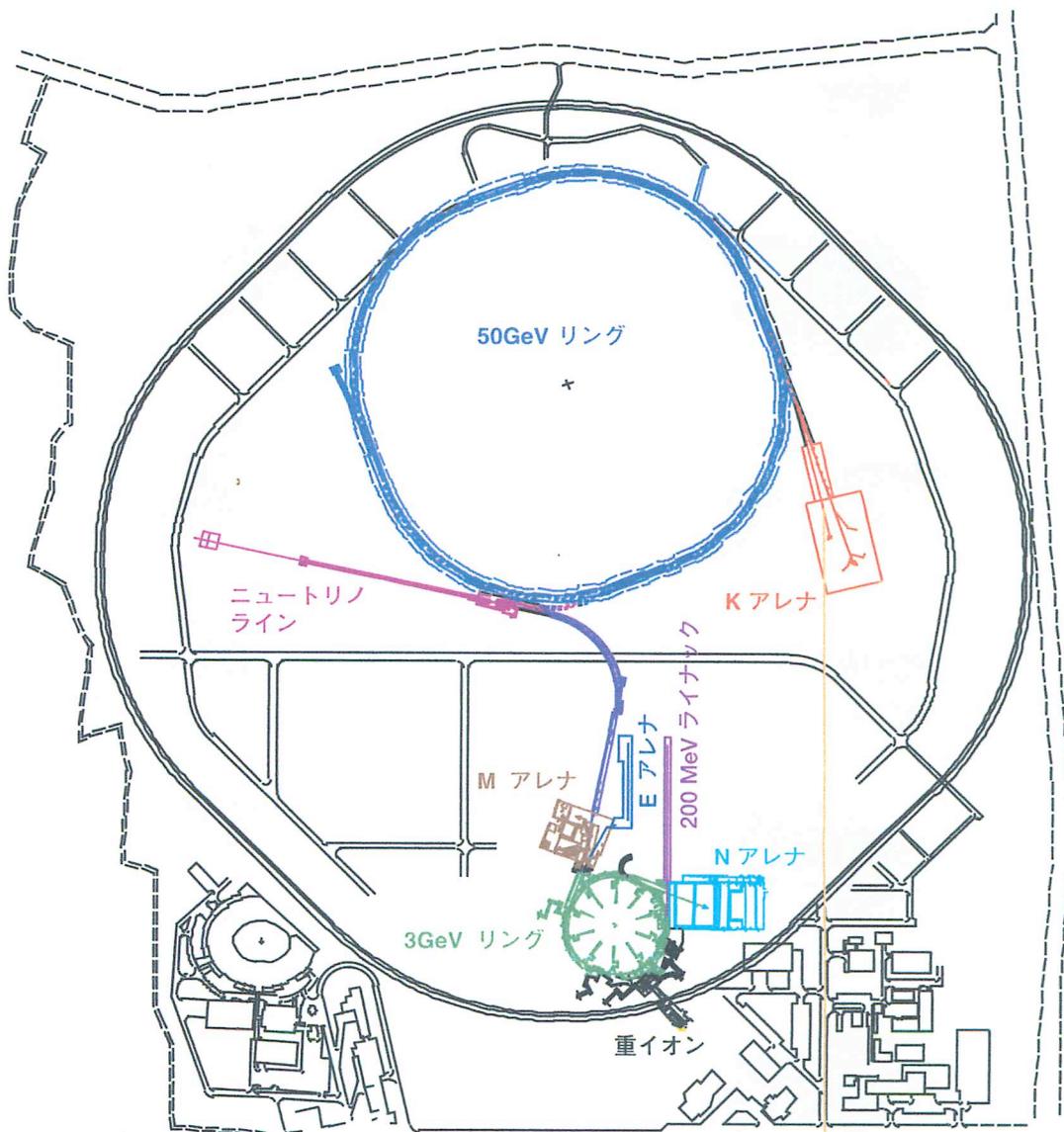


大型ハドロン計画 提案書



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

I. 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 のブースターリングは、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、 μe 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。

大型ハドロン計画(JHF)の全体図

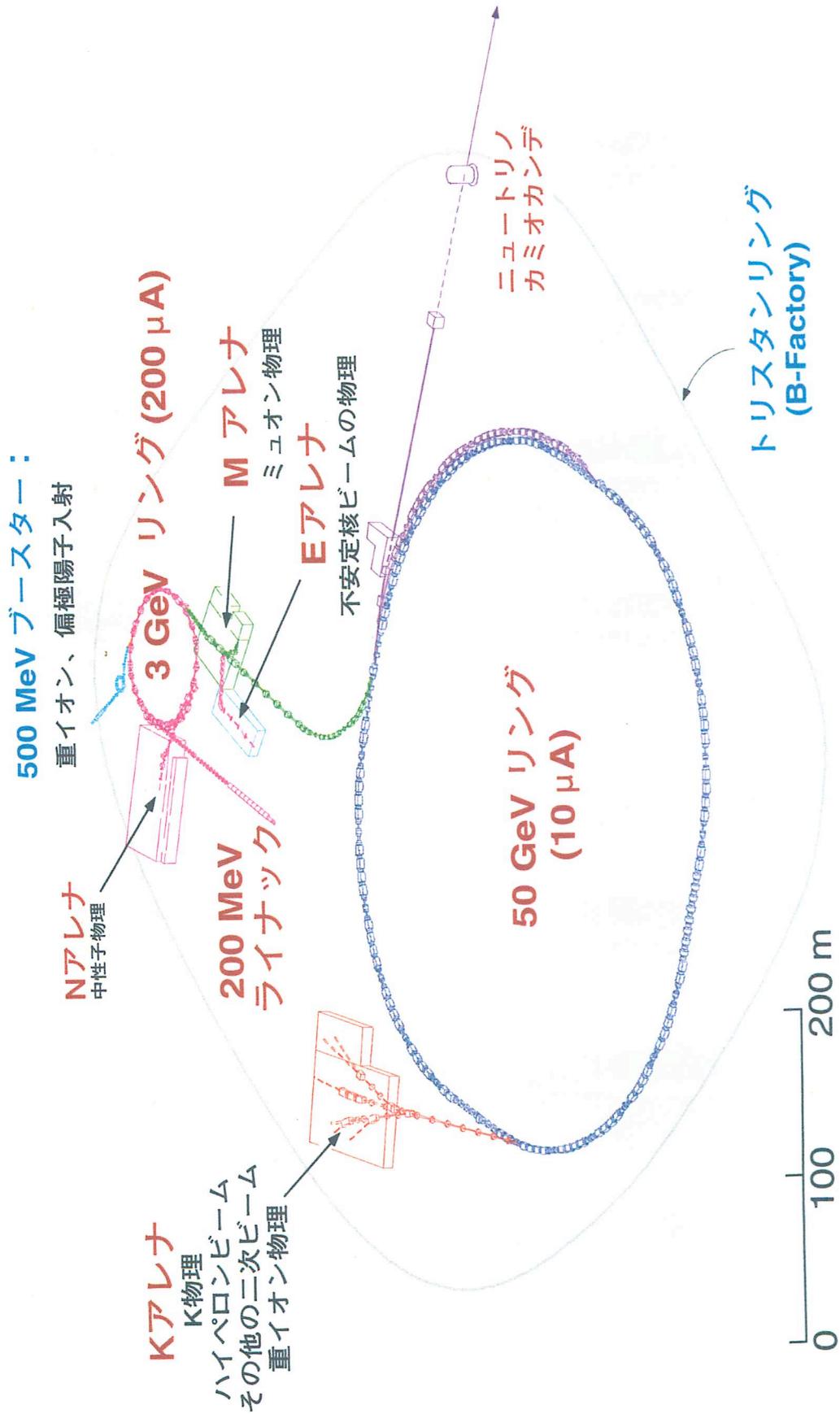


図1.1 大型ハドロン計画の複合加速器群と実験施設。

International Comparison

| | [50 GeV Ring] | | | |
|-------------------------|-----------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| | Energy (GeV) | Particles per Pulse | Repetition (Hz) | Current (μ A) |
| <u>This 50 GeV Ring</u> | 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] | | | |
|------------------------|-----------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| | Energy (GeV) | Particles per Pulse | Repetition (Hz) | Current (μ A) |
| <u>This 3 GeV Ring</u> | 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 \times 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、 5×10^{13} ppp (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 2×10^{14} ppp 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 μ A、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、3 GeV 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ーターを示す。

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 324 MHz と設定されている。この線型加速器では、繰り返し周波数 25 Hz で、パルス幅 400 μ sec、ピーク電流 30 mA 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 envelope 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 | μ sec |
| 繰り返し周波数 | 25 | 50 | Hz |
| 平均電流 | 200 | 800 | μ A |
| 長さ | <150 | ~220 | m |
| 運動量の広がり | ± 0.1 | ± 0.1 | % |

II.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

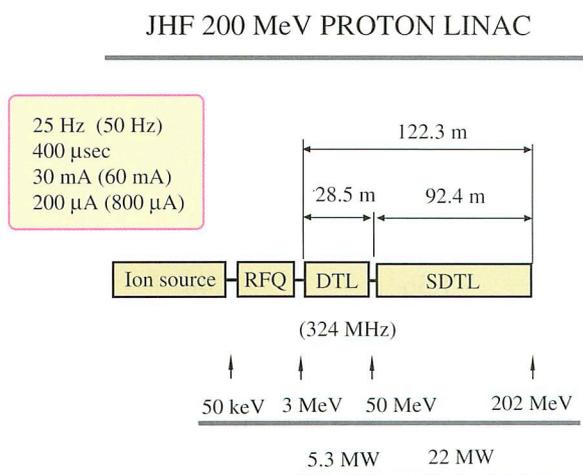


図 II.4.1. JHF 200 MeV 陽子リニアックの模式図。

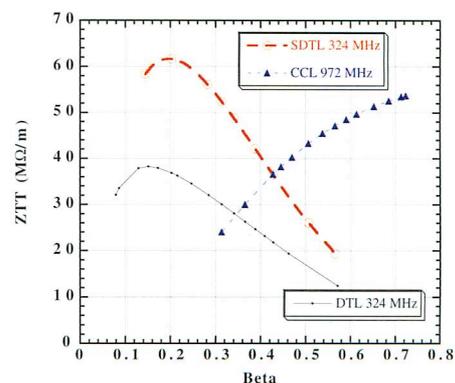


図 II.4.2. JHF 陽子リニアックに使われる有効シャントインピーダンス。

表 II.4.2. JHF 陽子リニアックのパラメーター。

| | | | | |
|--------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-------------------|
| 入射エネルギー | 3.0 | MeV | SDTL | |
| 出力エネルギー | 202.5 | MeV | 周波数 | 324 MHz |
| 周波数 | 324 | MHz | 入射エネルギー | 50.058 MeV |
| 加速粒子 | H ⁺ | | 出力エネルギー | 202.488 MeV |
| ピーク電流 | 30 | mA | タンク数 | 31 |
| ビーム幅 | 400 | μsec | セル数 | 155 |
| 繰り返し周波数 | 25 | Hz | 全長 (加速管のみ) | 65.9 m |
| 平均電流 | 200 | μA | 全長 | 92.4 m |
| 全長 (加速管のみ) | 92.9 | m | 高周波励振電力 (*) | 17.4 MW |
| 全長 | 122.3 | m | ビーム電力 (30mA) | 4.6 MW |
| 高周波励振電力 | 21.3 | MW | 全高周波電力 (30mA) | 22.0 MW |
| 全高周波電力 (30 mA) | 27.3 | MW | クライストロン数 | 14 |
| クライストロン数 (*) | 19 | | 加速電場 | 3.86 MV/m |
| (*)RFQ 用とデバンチャー用を含む | | | エネルギー利得 | 2.86 - 1.92 MeV/m |
| RFQ | | | ドリフトスペース (**) | 0.67-1.03 m |
| 周波数 | 324 | MHz | アクセプタンス | |
| 入射エネルギー | 50 | keV | A _x (規格化 90%) | 21.3 π mm-mrad |
| 出力エネルギー | 3 | MeV | A _y (規格化 90%) | 18.6 π mm-mrad |
| DTL | | | A _z (規格化 90%) | 40.4 π MeV-deg |
| 周波数 | 324 | MHz | (*) 因子 1.2 を含む。 | |
| 入射エネルギー | 3 | MeV | (**) 一層短い長さも可能である。 | |
| 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 _x (規格化 90%) | 43 | π mm-mrad | | |
| A _y (規格化 90%) | 41 | π mm-mrad | | |
| A _z (規格化 90%) | 9.3 | π MeV-deg | | |
| 収束法 | Equipartitioned focusing | | | |

DTL の詳細

| | 1 | 2 | 3 | |
|---------------|--------|--------|--------|------|
| タンク番号 | | | | |
| 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、実際に必要な電力を比較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324MHz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350 μ sec）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0.41 π mm-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1 π mm-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。
3. 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]

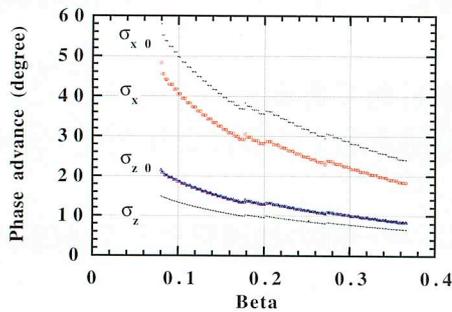


図 II.4.3. DTL 内の横と縦の位相空間における位相進み。ピーク電流 30mA を仮定している。

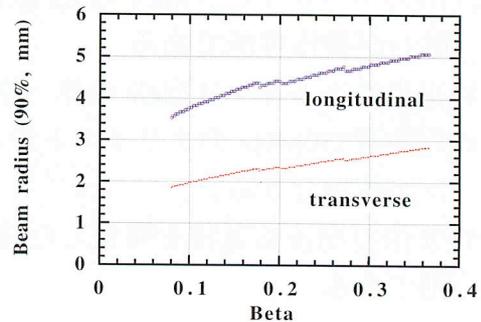


図 II.4.4. DTL 内のビームの大きさの変化。

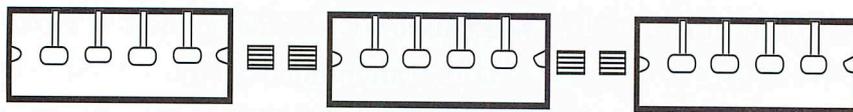


図 II.4.5. SDTL 加速管の構造図。収束磁石は四角で示している。

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3 MeVから50 MeV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($\beta = 0.31$)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 | MΩ/m |
| T | 0.703 | 0.830 | |
| ZTT | 38.6 | 52.3 | MΩ/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。全体に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 (Objective) | Operated (Saturation) | TH-2134 (Test Linac) |
|--------------------------|-----|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Structure | | 5 cavities, horizontal position | | |
| RF window and connection | | coaxial, WR-2300 | | pill box, WR-1800 |
| Frequency | MHz | 324 | | |
| Peak output power | MW | 3.0 | 2.5 | 2 |
| Average output power | kW | 98 | 81 | 65 |
| Pulse width | μs | 650 | | |
| Repetition rate | pps | 50 | | |
| Duty | % | 3.25 | | |
| Beam voltage | kV | 110 | 102 | 95 |
| Beam current | A | 50 | 45 | 40 |
| Mod. Anode voltage | kV | 93 | 86 | 80 |
| Efficiency | % | 55 | | |
| Gain | dB | 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又は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).