

DESIGN AND BEAM TEST OF A 7 MEV PROTON ALTERNATING PHASE FOCUSED LINEAR ACCELERATOR FOR SYNCHROTRON INJECTORS

Hirofumi Tanaka^{A)}, Kazuo Yamamoto^{A)}, Hisashi Harada^{B)}, Kengo Sugahara^{A)}, Hiromitsu Inoue^{B)}, Sadahiro Kawasaki^{B)}, Satoshi Ueda^{C)}, Takahisa Nagayama^{C)}

^{A)} Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R & D Center,
8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661, Japan

^{B)} Mitsubishi Electric Corporation, Energy Systems Center,
1-1-2, Wadasaki-Chyo, Hyogo-Ku, Kobe, Hyogo, 652-8555, Japan

^{C)} Mitsubishi Electric Corporation, Manufacturing Engineering Center,
8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661, Japan

Abstract

A 7 MeV proton injector for particle therapy has been developed, and beam current more than 10 mA has been successively accelerated. The injector consists of an 1.5 MeV Radio Frequency Quadrupole (RFQ) linac, a 7 MeV Alternating Phase Focused Interdigital H-mode (APF-IH) linac, an 2.45 GHz ECR ion source, and a 200 MHz RF power supply.

陽子 7MeV APF ライナックの設計とビーム試験

1. はじめに

陽子シンクロトロンを主加速器とする粒子線治療装置の入射器システムを開発した。医療現場で長期間使用されるシステムであり、構成機器や加速手法選択といった設計初期段階から高信頼なシステムとすることに注力して開発を行なった。開発した入射器システムは、1.5MeV RFQ 加速器、7MeV APF(Alternating Phase Focusing)加速器の2台の線形加速器と、ECR イオン源、200MHz 高周波電源、電力分配装置で構成される。主要な特長は以下の2点である。

- 後段加速器に APF 加速器を用いた。炭素線入射器としては放射線医学総合研究所で 2006 年に 4MeV/u のビーム加速に成功している^[1]が、陽子線入射器として実用化されている例はない。APF 加速器では収束磁石を用いずに、加速電界による高周波収束力を用いてビーム収束を行なうため、横方向の収束力が弱く空間電荷による発散力が大きい陽子の大量加速は難しいと考えられていたためである。APF 加速器の採用により、加速電極(ドリフトチューブ)が簡単な構造になり、また加速電極の設置精度が±0.2mm 強に緩くできるので、全体システムの高信頼化に寄与した。
- 1台の高周波電源から2台の線形加速器に、高精度に電力を分配することができる磁気共鳴型の電力分配装置(レゾナントカップラ)を開発した。これにより機器点数が少ない装置を実現できると共に、2台の高周波電源間の位相調整が不要になり、ビーム調整試験が容易なシステムが実現できた。



図1：陽子線入射器システムプロト機の外観写真

表1：入射器システムの主要パラメータ

加速核子	H+
エネルギー	7.4 MeV
加速周波数	200 MHz
ビーム電流	10 mA
繰り返し(最大)	20 Hz
パルス幅	40 μ s
入射器全長	4.2 m

本報告は、開発した陽子線入射器システムに関し、主として APF 加速器のビーム物理設計と加速試験結果に関し記載する。

2. 陽子線入射器システム設計

開発した入射器システムは、ECR イオン源、1.5MeV RFQ 加速器、7MeV APF 加速器、高周波電源、電力分配装置で構成される。それぞれに関し、概要を以下にまとめる。

2. 1 イオン源

主にメンテナンスの容易化を考え 2.45GHz の陽子 ECR イオン源^[2]を採用した。20mA 以上の 25keV 陽子ビームを安定に生成することができる。

2. 2 RFQ 加速器

陽子を 7MeV まで加速するために、RFQ 加速器、DTL 加速器の 2 段の線形加速器を用いる。我々は後段の DTL 加速器として、APF-IH 加速器を選択しており、それゆえに前段の RFQ 加速器にもビーム設計上の工夫が必要であった。APF 加速はビーム収束力が弱いので、RFQ 加速器でビームを絞りすぎると APF 加速器内でビームが急激に広がり大電流を加速することができない。また IH 加速器では加速位相 180 度毎に加速電極（ドリフトチューブ：DT）を配置するために低エネルギーでは DT 長が短くなり、加速電極内に高周波電磁界が漏洩し、加速電極の中心($r=0\text{mm}$)を通るビームと端($r=6\text{mm}$)を通るビームのエネルギーゲインの差が大きくなり安定加速が難しくなる。このため、前段の RFQ 加速器のビーム設計は下記の 2 点に注意して行なった。

表 2：RFQ 加速器のパラメータ

加速核子	H+
入射エネルギー	25 keV
出射エネルギー	1.5MeV
加速周波数	200 MHz
ビーム電流	20 mA
運動量分散(95%)	±1.4%
エミッタンス(95%)	14 π mmmrad
繰り返し(最大)	20 Hz
パルス幅	40 μ s
タンク長さ	1730mm
セル数	115
投入高周波電力	120kW

- RFQ 加速器の高エネルギー側のビーム収束力を徐々に小さくしビームを平行に近い形で取り出す。即ち、高エネルギー側の RF 収束係数(B)を徐々に小さくしたベイン構造に設計した。
- RFQ 加速器の加速エネルギーを 1.5MeV に設定した。この値は、後段の APF 加速器の加速ビームの 70%以上を運動量分散±0.3%以内に捕獲する為に必要な値である。

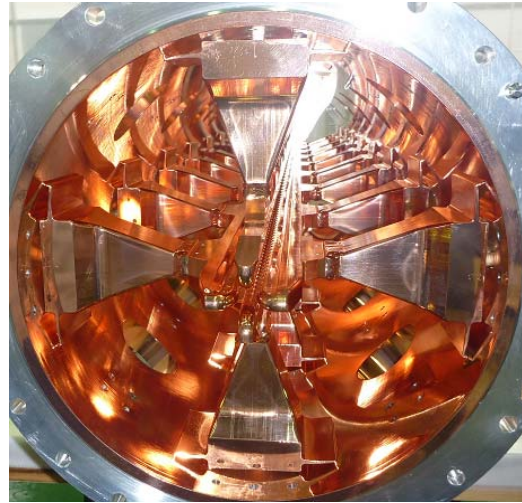


図 2：RFQ 加速器の電極形状

2. 3 APF 加速器

陽子 APF-IH 加速器は設計技術として確立されておらず、独自の 3 次元ビーム解析コードと DT 配列最適化コードを開発しビーム設計を行なった。設計を行なう上でのポイントを以下にまとめる。

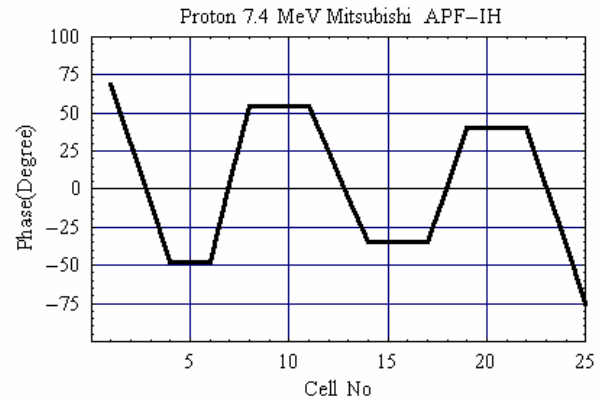


図 3：APF 加速器のセル毎の位相変調

表 3：APF 加速器のパラメータ

加速核子	H+
入射エネルギー	1.5 MeV
出射エネルギー	7.4MeV
加速周波数	200 MHz
ビーム電流	10 mA
運動量分散	±0.3%に 70%ビーム
エミッタンス(1 σ)	3.2 π mmmrad
繰り返し(最大)	20 Hz
パルス幅	40 μ s
タンク長さ	1680mm
セル数	25
投入高周波電力	280 kW

- APF 方式として「のこぎり波型位相変調技術」を開発し、ドリフトチューブ(DT)の電極配列を決定した。従来の位相変調方法として、①セル毎の加速位相を正弦波に近い形で変化させる方式^[1]、②セル毎の加速位相を矩形波で正と負に急激に変化させる方法^[2]の2種類の位相変調方法が提案されている。陽子線で大電流を加速する線形加速器の場合、前者は空間電荷による粒子間反発力の影響により加速可能な粒子が減少する。一方、後者では横方向のアクセプタンスが小さくなり大電流加速は難しい。我々は、図3の様な「のこぎり波型」の位相変調を行えば10mA級の大電流加速が可能であることを、空間電荷を考慮した3次元ビーム解析を行なうことで実証した。
- 出射時の運動量分散を後段のシンクロトロンから決まる所定の値以内とする為、DTの電極長の最小値を15mmに設定した。この長さより短くなるとDT内で中心部 $r=0$ を通過するビームと端部 $r=6\text{mm}$ を通過するビームの運動量の差が大きくなり出射時の運動量分散が大きくなる。この最小電極長は陽子のエネルギーと強い相関を持つ。また、DT間の加速ギャップ距離は陽子の速度に比例させて変化させた。
- IH加速器ではDTを支えるステムの影響により高周波電磁界分布が完全な3次元軸対称にならず、横方向への力、即ちダイポール成分が生じる^[4]。IH加速器では1加速電極毎にステムが逆方向となるので、ダイポール成分の電界方向は電極毎に反転する。しかしAPF収束を行なうために加速位相をセル毎に変えているのでダイポール成分の積分値は完全に打ち消されず、横方向の力が残る。DTの配列最適化作業では上記ダイポール成分の積分値を制御パラメータとした。即ちダイポール成分の影響が大きい低エネルギー領域の8セルまでのダイポール成分の積分値が0になるようにDTの配列を決定した。
- 低エネルギー領域では空間電荷による粒子間反発力が大きいので、できる限り早く高エネルギーまで陽子を加速する必要がある。IH加速器では高周波電磁界の共振モードとの関係で加速空洞の両端部、即ち、入射部と出射部付近での高周波電磁界強度が弱くなるが、本装置では加速器両端部の空洞内径を図4の様に大きくし、加速電界強度を入射部で大きくする工夫をした。
- 高周波加速電界分布は空洞側面に設置された6個の銅ブロックにより整形する。3次元電磁界設計と実測の局所電界の差異を±4%以下に抑えることに成功した。



図4：APF加速器の加速空洞内部

2. 4 高周波電源と電力分配装置

2台の線形加速器に高周波電力を供給するために、周波数200MHz、出力先頭値540kWの高周波電源を開発した。高周波電源は高周波電力発生器、半導体増幅器、中段増幅器、終段増幅器から構成される。中段と終段増幅器は、真空管と空洞共振器を用いた増幅器であり、大電力を得るために真空管を複数個並列に並べて駆動する方式を採用し、比較的安価で取り扱いやすい真空管を選択することを可能にした。

レゾナントカプラはRFQ加速器とAPF加速器を連結する同軸共振器であり、両端に磁場結合用ループを有し、APF加速器に供給された高周波電力の一部をRFQ加速器に分配する機能を有する。図5の等価回路が示す様に、RFQ加速器、レゾナントカプラ、APF加速器の3つの空洞共振器が結合した構成である。この場合、0モード、 $\pi/2$ モード、 π モードの3種類の共振モードが励振されるが、レゾナントカプラでは $\pi/2$ モードを用いる^[5]。即ちRFQ加速器とAPF加速器には π ずれた位相で高周波電磁界が励振されるが、間のレゾナントカプラには励振されない。全体が1つの共振器として振舞うので、ビームローディングの影響を受けても2つの加速器の間の加速位相の調整は不要である。RFQ加速器とAPF加速器の加速電極間の距離は、加速位相調整手段が無い場合、ビーム解析により高精度に決定した。RFQ加速器とAPF加速器の高周波電力の分配割合の調整は2つのスタブチューナを用いて行なう。高周波電力を0.1%の高精度で分配することが可能である。以上の様に、調整パラメータが少なく非常に安定なシステムを構築できた。

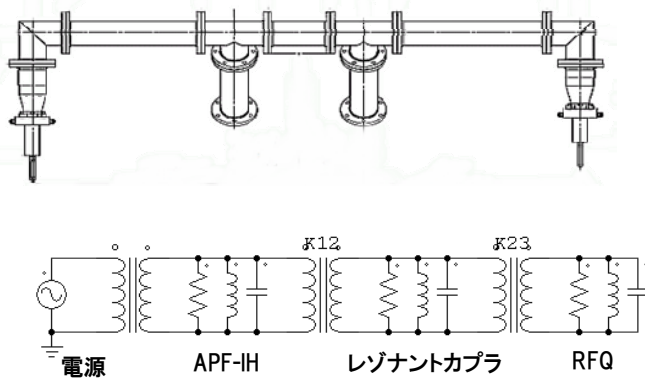


図 5 : レゾナントカップラと高周波電力投入システムの簡易等価回路モデル (回路解析は伝送線路解析で実施したが、概念を示す為に集中定数回路で図示した)

3. ビーム加速試験

社内に入射器から出射された陽子ビームの特性を評価する測定ラインを建設し、入射器の運動量分散やエミッタンス等のビームパラメータを測定した。APF 加速とレゾナントカップラの採用により、入射器のビーム調整パラメータは高周波加速電界強度のみであり、医療用装置として調整が容易なシステムが実現できた。また、最大表面電界強度をキルパトリック値の 1.6 倍以下で設計したので約 30 分の RF エージングにより定格までの高周波電力投入を実現することができた。

図 6 に APF 加速器の直後に設置された電流モニタ(CT)で測定した加速電流波形を示す。10mA の陽子ビームが加速できていることがわかる。また、図 7 に陽子ビームの運動量分散の測定結果とビーム解析結果を示す。解析結果と測定結果は良く一致しており、運動量分散 $\pm 0.3\%$ 以内に全加速電流の 70%以上が捕獲されていることがわかる。また、ダブル・スリット法により陽子ビームのエミッタンスを測定した結果、水平、垂直方向とも、 3.2π mmmrad (1σ) の設計値より小さいエミッタンスとなっていることが検証できた。以上により、開発した入射器が粒子線治療装置用入射器としての仕様を満たしていることを検証できた。

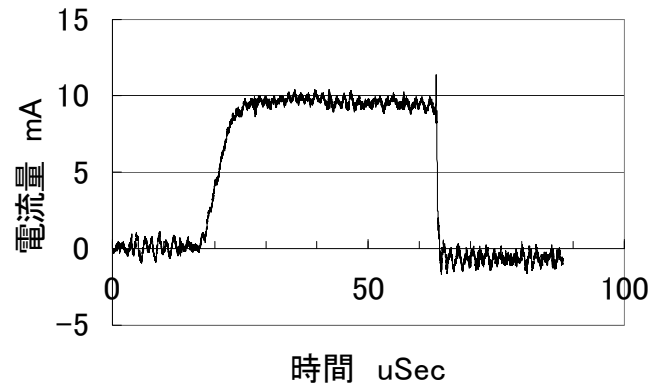


図 6 : APF 加速器の加速ビーム波形

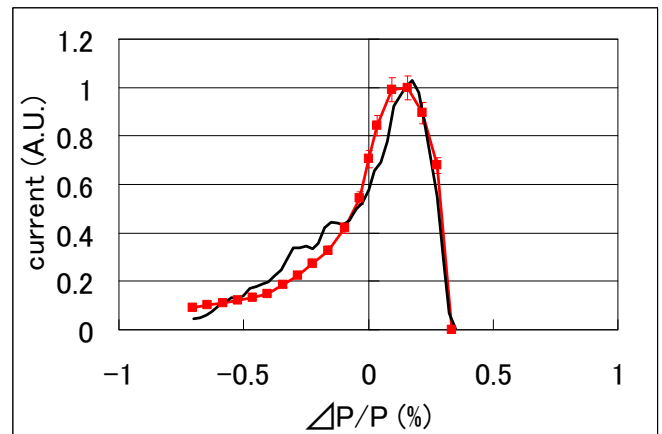


図 7 : APF 加速器の陽子ビームの運動量分散

(黒実線はビーム解析結果、赤四角は実測結果。測定結果は計算結果に対しピーク付近での分散が若干大きい。これは、運動量分散を測定した位置が APF 加速器より 2m 下流のビーム輸送系であるので、空間電荷の影響で広がったためである。)

参考文献

- [1] Y. Iwata, et al. "Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007), 1007.
- [2] J. D. Sherman, et al. "A 75-keV, 140-mA Proton Injector", Rev. of Sci. Instrum., 75(5), (2004), 1851.
- [3] D. A. Swenson, "Alternating Phase Focused Linacs", Particle Accelerators, Vol.7, (1976), 61.
- [4] U. Ratzinger, "Interdigital RF structures", 1990 Linac Conf., Los Alamos, (1991), 525.
- [5] D. Nagle, et al., Rev. of Sci. Instrum., 38, (1967), 1538.