

# Alternating Phase Focusing Structure in PIGMI

— PIGMI計画の現状 —

高エネルギー物理学研究所

梶 垣 慈 見

## § 1. はじめに

筆者は1978年8月から1年余りLASLに滞在する機会を得た。これは3年計画でスタートし翌年の6月30日で終了するPIGMIプロジェクトの最後の年にあたり、筆者は当初このグループに参加し後にRFQにうつったが、PIGMIプロジェクトこの1年間の進捗状況をAPFを全体に述べることにする。

## § 2. PIGMI Program

PIGMI (Pion Generator for Medical Irradiation) の目的は、現存するものよりもより小型で経済性・信頼性の高い医療用陽子線形加速器を作るのに必要な技術開発を行う点にある (Fig. 1)。表1はそのパラメータを示す。

Injection Energy: 入射エネルギーを下げることにより入射器系IF conditioning, low source 交換等の操作性、breakdown による与えらる周辺機器損傷対策といった制約から大幅に解放される。これには古いイオン光学系と low energy を受け入れ加速するための linac structure の開発が不可欠である。250 kV ではまだ扱いにくい面があるが、これを 50 ~ 100 kV 程度に下げられると、高压技術は非常に簡単になる。

Double Harmonic Buncher: 450 MHz TM<sub>010</sub> および 900 MHz TM<sub>020</sub> mode で excite される (Fig. 2)。

Low Beta Structure: PIGMI 計画では当初 APF structure が考えられていたが現在では RFQ が有力である。

Permanent Magnet Quadrupoles: linac の transverse stability region はかなり広い。KEK proton linac における励磁電流はビームの入口・出口附近の教団を調整するのみで、他の磁石は計算値に固定しおまきである。この5年位の間に急速な進展をみた稀土類元素磁石を利用すれば十分実用可能な収束磁場が得られる。

Higher Gradient Drift Tube Linac: drift tube 端面に勾配を保持せ、r 周波数を上げることでより、4 MV/m の電場を得る (Fig. 3)

Side-Coupled or DAW Linac: S. Schieber の F<sub>2</sub> と DAW cavity は LAMPF-1

shaped cavity 及び 2割以上 effective shunt impedance を上げることができるといえる。group velocity は1桁大きく heavily-beam loaded structureには有利である(表2, Fig. 4)。ただし washer の supporter が coupling cavity を短絡する構造となるため所期の性能を得るにはなお検討の必要がある。Fig. 4は KEK で TRISTAN 用 rf cavity として試作したものの accelerating mode と coupling mode を示している。

### Computer Code の開発:

SUPERFISH: rf cavity 内の電磁場(軸対称でなければならぬ)計算

PANDIRA: 磁気異方性をもち物質を含む磁気回路の計算

PARMILA: linac における phase and radial motion を計算する。space charge の計算にはいくつかの option がある。

SNOW: plasma boundary を含む光学系の計算

### §3. APF structure

Alternating Phase Focusing の歴史は 1953 年以降で逆上りか<sup>(1)</sup>, magnet による AG focusing が実用されるに到りあまり顧みられず、むしろ最良のローマクターを選んでも phase acceptance が数度であるといわれていた<sup>(2)</sup>。D. Swenson は単純な FODO ではなく FODO DOFO 構造にして PIGMI の low energy 部分に採用した<sup>(3)</sup>。Fig. 5 は transverse focusing と longitudinal focusing の様子を示す。PIGMI PROTOTYPE は 4つの section に分割される。APF, QUAD RAMP, PHASE RAMP および DTL である。DTL は  $\phi_s = -20^\circ$  の 4極磁石を用いた Alvarez 構造である。APF では 4極磁石を全く用いず、1.1 MeV まで加速する。次に QUAD RAMP section をもうけ、1つおきに 4極磁石を入れ、rf focusing を除々に 4極磁石におまかえる。PHASE RAMP では、alternating phase section を更に damp して DTL の synchronous phase  $-20^\circ$  に導く部分である。phase damp は APF section から superperiod の最初の gap を 2<sup>(4)</sup> ずらす、他の gap phase をそれなりに除々に行かれています。constant phase の Alvarez linac でも数回の phase oscillation でかたりの damping が起ることを考えると、従来の APF に較べてかなり改善されているといえる。PARMILA による beam trace の結果を Fig. 6 に示す。APF section における space charge による current limit は所定の電場が得られれば 220 mA である<sup>(4)</sup>。

#### §4. 加速テスト

450 MHz PIGMI test stand 用 klystron power source は 1977 年前半には完成し、79 年 7 月に APF section は RF manifold をともなう PIGLET (6 cell, 45 MeV drift tube geometry の field gradient test cavity) に接続され加速テストを行ったが成功しなかった。平均電界強度 6 MV/m は実用上高すぎるのではないかと、というのが当時の多数意見であった。May 13, 1980 に D. Swenson から T. Nishikawa に宛てた手紙では次のように記されている。" PIGMI continues to be an exciting program. We have tested both the APF and RFQ linac structures. Both work as predicted, but the RFQ is clearly superior. We now see it as a key part of PIGMI. With it, the low energy part of PIGMI becomes very simple (50 keV injection, an einzel lens, no buncher)."

#### 謝辞

LASL に一年間滞在する機会を与えて頂いた諸先生や KIK の皆様、経済的援助を頂いた吉田科学技術財団に感謝いたします。また D. Swenson はじめの AT-1 group member の方々にはいろいろお世話になり教を頂いたことに感謝いたします。

#### 文献

1. M. L. Good, "Phase-Reversal Focusing in Linear Accelerator", Phys. Rev. **92**, 538 (1953)
2. D. Boussard, "Radio-frequency Focusing in Heavy Ion Linear Accelerators"; Linear Accelerator (North Holland, Amsterdam 1970), p.1079.
3. D. Swenson, "The Geometry of the PIGMI Prototype"; LASL Office Memorandum MP-14-2 (1977)
4. S. Inagaki, "Space Charge Limit for an Alternating-Phase-Focusing Structure", LA-8287-MS (1980)

PIGMI PARAMETERS

INJECTION ENERGY	250 keV
FINAL ENERGY	650 MeV
PEAK BEAM CURRENT	30 mA
PULSE LENGTH	10 $\mu$ S
REPETITION RATE	360 Hz
AVERAGE BEAM CURRENT	100 $\mu$ A
FREQUENCY (APF AND DTL)	450 MHz
(CCL OR DAW)	1350 MHz
GRADIENT (APF AND DTL)	6 MV/M
(CCL OR DAW)	8 MV/M
TRANSITION ENERGY (APF/DTL)	7 MeV
(DTL/CCL)	150 MeV
TOTAL LENGTH	$\sim$ 120 M

Table 1 PIGMI Parameters

COMPARISON OF LAMPF SHAPED CAVITY, DISK-AND-WASHER CAVITY AND A SCALED SLAC CAVITY ( $\beta = 1.0, 1350 \text{ MHz}$ )

	LAMPF	DAW	SLAC
OPERATING MODE	$\pi/2$	$\pi/2$	$2\pi/3$
QUALITY FACTOR, Q	25.754	63.671	20.124
Z (M $\rho$ /M)	106.7	137.1	38.8
Z <sub>EFF</sub> (M $\rho$ /M)	69.3	90.6	26.4
TRANSIT TIME FACTOR, T	0.806	0.813	—
STORED ENERGY IN $\beta\lambda/2$ STRUCTURE ELNGTH (J)	0.0032	0.0061	0.0168
EMAX ON SURFACE (MV/M)	4.1	4.0	2.8
GROUP VELOCITY, $v_g/c$	0.05	0.5	0.0122
OUTER RADIUS (CM)	8.343	16.84	8.735
BEAM-BORE HOLE RADIUS	1.1	1.1	2.391
FILL TIME ( $\mu$ S)	6.8	16.9	0.3 FOR 1 M OF STRUCTURE

Table 2 Comparison of Three Type Cavities

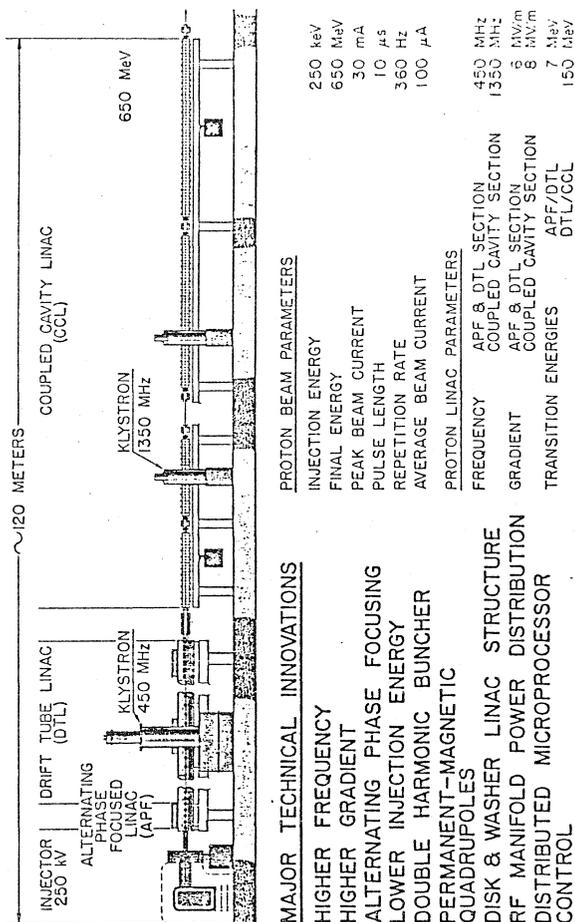


Fig.1 Pion Generator for Medical Irradiation

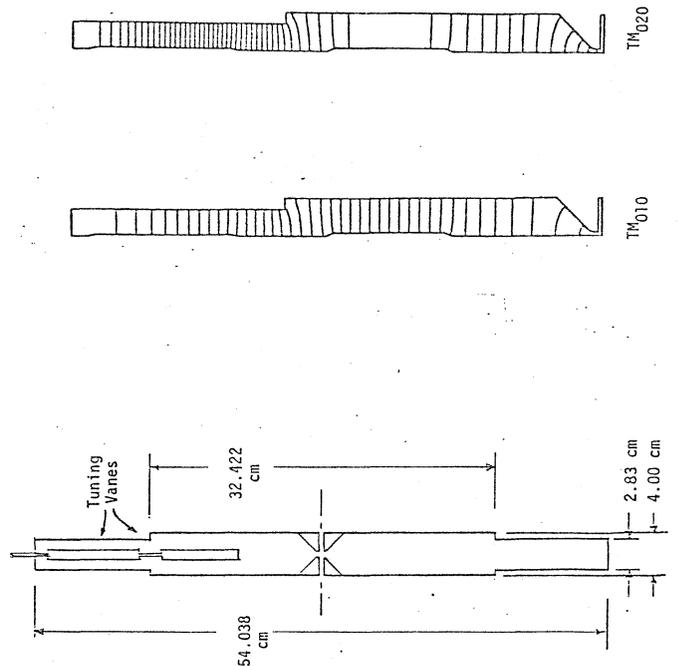


Fig.2 Double Harmonic Buncher

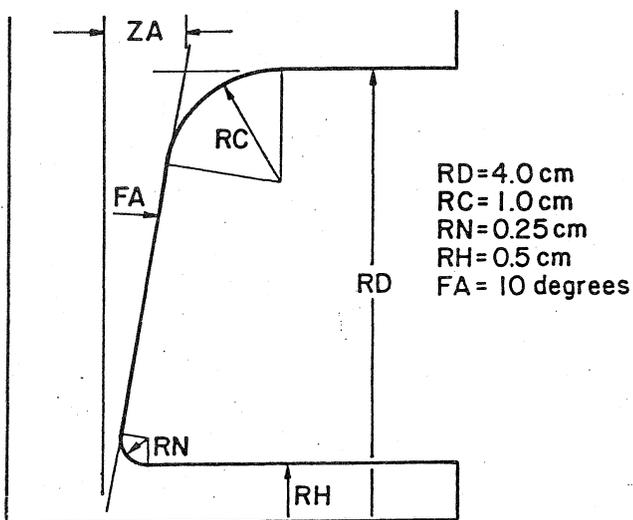


Fig.3 Higher Gradient Drift Tube Face

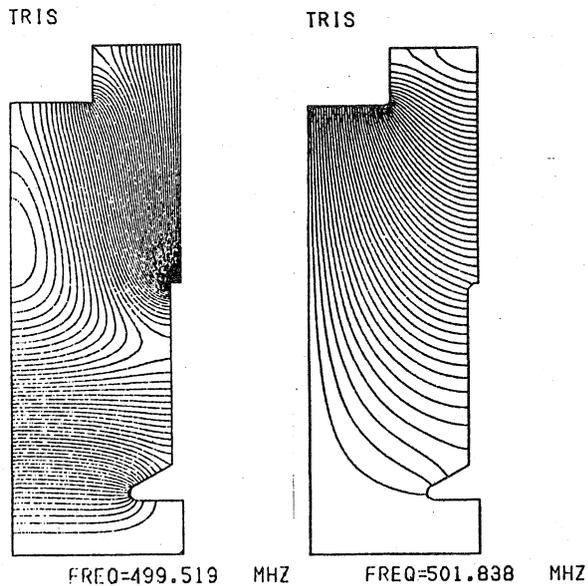


Fig.4 TRISTAN Electron Ring DAW Cavity accelerating mode (left) coupling mode (right)

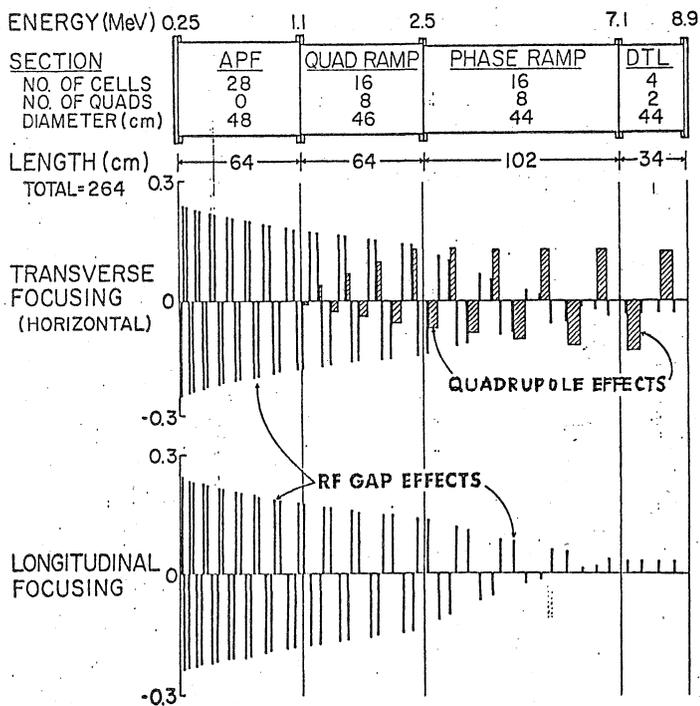


Fig.5 PIGMI Prototype

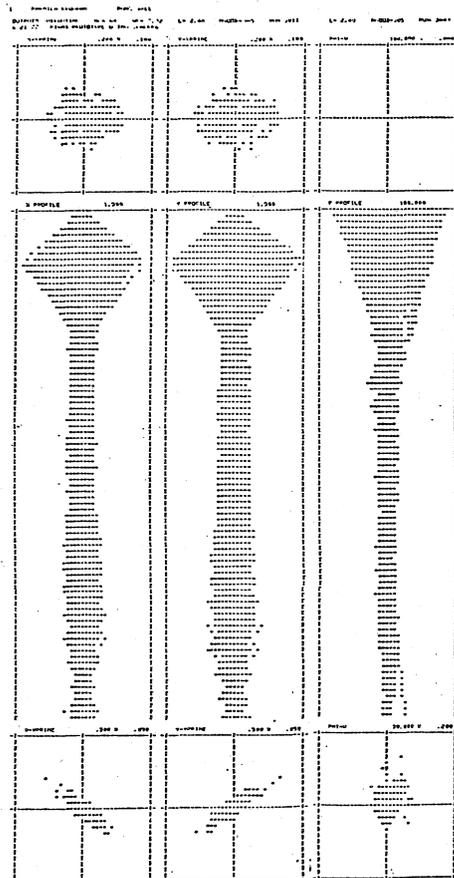


Fig.6 Performance of the PIGMI Prototype