

GENRFQ-PREBUNCHER の入力データ

新井 重昭

国立研究開発法人理化学研究所 仁科加速器研究センター

1. はじめに

低電流イオンビーム用 RFQ の設計では、ヴェイン電極パラメータを生成する GENRFQ^[1] と、その生成パラメータを使ってビームシミュレーションを行う PARMTEQ^[2] の二つの計算コードが使用される。GENRFQ は、ヴェイン電極をビーム軸に沿って Radial matcher、Shaper、Prebuncher、Buncher、Booster、Accelerator の 6 セクションに分け、それぞれの機能を最適化する事によって、短い電極で高い伝送効率を実現している。各セクションは次のような役割を持っている^[1,3]：1) Radial matcher は RFQ のアクセプタンスを入射位相に依らず一様にする、2) Shaper は同期位相 ϕ_s を -90 から -88° に徐々に変える事により高い捕獲効率を持つセパトトリクスを形成する、3) Prebuncher は Shaper で作られたセパトトリクスの面積を保存した状態で、位相振動が半周期の間に発散係数 Δ が粒子速度 β の 2 次関数で増えるように同期位相を -88 から -60° に変えて行く、4) Buncher は Prebuncher 出口でのセパトトリクスの面積と発散係数を保存したまま、ヴェイン変調係数 m を増加させながら同期位相を最終値に持って行く、5) Booster は同期位相と発散係数を一定に保ちながらヴェイン変調係数を最小開口半径 a がビーム半径に近づくまで増加させる、6) Accelerator は同期位相、発散係数、最小開口半径を一定に保ったまま最終エネルギーまで加速する。GENRFQ の出力は PARMTEQ の入力データとなる。

2. GENRFQ の入力データ

GENRFQ の制御ファイル gen.sh の入力データが表 1 に示されている。RUN、TITLE、LINAC、SHAPER、RMATCH、PREBUNCHER、BUNCHER、BOOSTER、OUTPUT の 9 個のラベルから成り、各ラベルに必要なデータは次のとおりである。表 1 には SLOWRI 後段 RFQ 設計の為の入力データが示されている。PREBUNCHER のデータの求め方がここでの主な課題である。

RUN

1) RUN No. (整数)

TITLE

1) RFQ の名称

LINAC

表 1 : gen.sh の入力データ

```
RUN 1
TITLE
** SRI (79.0 MHZ) **
LINAC 79.0 0.125 0.06 0.005 0.5 -90 -25 1.6573
SHAPER 12.3881
RMATCH 30
PREBUNCHER 2 1.0423 0.17095
BUNCHER 3.8 -0.075
BOOSTER 1.15
OUTPUT 10 0
```

- 1) 周波数 (MHz)
- 2) 荷電質量数比
- 3) 規格化エミッタンス ($\pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$)
- 4) 入射エネルギー (MeV/u)
- 5) 出射エネルギー (MeV/u)
- 6) 入射同期位相 (通常-90 度)
- 7) 出射同期位相 (度)
- 8) キルパトリック・ファクター

SHAPER

- 1) 長さを与える (cm)

通常 20 セルの長さであるが、エネルギーの増大を無視して、近似値として入射エネルギーに対するセル長の 20 倍が使われる。

$$\frac{\beta\lambda}{2} (m) = \frac{\sqrt{T^2 + 2m_0c^2T}}{m_0c^2} \cdot \frac{c}{2f} = \frac{\sqrt{T(\text{MeV})^2 + 2 \times 938.2796 \times T(\text{MeV})}}{938.2796} \cdot \frac{299.7929}{2f}$$

GENRFQ では $m_0c^2 = 938.2796 \text{ MeV}$ 、 $c = 2.997929 \times 10^8 \text{ m}$ が使われている。この近似値を GENRFQ に入れ計算すると、Shaper 出口で同期位相は -88° になる。実際の Shaper の長さは、上の近似値を使って PARMTEQ で計算した 20 セル分の長さである。

RMATCH

- 1) Radial matcher の cell 数

PREBUNCHER

- 1) RF 発散係数 $\Delta(\beta)$ の関数形を与える (1 : 1 次関数、 2 : 2 次関数)
- 2) 出口速度の入口速度に対する比 : $R_\beta = \beta_2/\beta_1$
- 3) 入口発散係数の出口発散係数に対する比 : $R_\Delta = \Delta_1/\Delta_2 = \Delta_1/\Delta_b$

BUNCHER

- 1) 集束係数 B の値
- 2) 発散係数 $\Delta_2(\Delta_b)$ の値

BOOSTER

- 1) ビームとボア半径のマージン (a_{\min}/a_{beam})

OUTPUT

- 1) 出力セル間隔数：10 なら 10 セル毎に出力
- 2) ビーム電流 BEAMI の値

3. PREBUNCHER、BUNCHER の入力データの導出

入力データ B を指定する事によって Δ_2 が概算される。更に、これら 2 つの値を使って Δ が β の 2 次関数である時の R_β 、 R_Δ が計算コード GENPARA によって求められる。以下に GENPARA による計算方法が説明される。

3.1. BUNCHER で入力する B と Δ_2 (Δ_b) の最大値の決め方

B を指定したとき、 Δ_2 は次の経験式を満足する値の近辺で選ぶと良いとされている。

$$B = 2.2 + 20 \times |\Delta_2| \quad (1)$$

LITL では $B = 5$ 、 $\Delta_2 = -0.11$ (上式では $B = 5$ のとき $\Delta_2 = -0.14$ となる)

TALL では $B = 3.8$ 、 $\Delta_2 = -0.075$ (上式では $B = 3.8$ のとき $\Delta_2 = -0.08$ となる)

SCRFQ では $B = 5.5$ 、 $\Delta_2 = -0.17$ (上式では $B = 5.5$ のとき $\Delta_2 = -0.165$ となる)

3.2. PREBUNCHER で入力する R_β と R_Δ の決め方

安定位相が -88° から -60° に変化する Prebuncher に於いて、セパトリックスの面積が一定となるように、更に位相振動が 0.5 となるように、 R_β と R_Δ は決められる。

3.2.1. 位相振動を計算する式

一般粒子の同期粒子に対する位相振動はセル数 $n = z/(\beta\lambda/2)$ の関数として次の様に表される。

$$\varphi - \varphi_s = B e^{j\Omega_l n} \quad (2)$$

ここで、 B は振幅を表す係数、 Ω_l は位相角周波数で次式で与えられる。

$$\Omega_l = \sqrt{-\frac{e\pi^2 V A_{10}}{4m_0 v_s^2} \sin \varphi_s} \quad (3)$$

位相振動数 N と角周波数の関係は $\Omega_l = 2\pi N$ であるから、セル当りの位相振動数は次の様になる。

$$dN = \frac{\Omega_l}{2\pi} dn \quad (4)$$

よって、位相振動数は(4)式を積分して求められる。

$$N = \int \frac{\Omega_l}{2\pi} dn \quad (5)$$

ここで、位相振動数が 0.5 となる R_β を求める為に n を β で書き換える。
 加速器の軸に沿って運動する同期粒子の、セル当たりのエネルギー変化は次式で与えられる。

$$\frac{dW}{dn} = \frac{e\pi V A_{10}}{4} \cos \varphi_s \quad (6)$$

粒子の運動エネルギーは、 $W = m_0 c^2 \beta^2 / 2$ であるから、 W の β に対する変化率は：

$$dW = m_0 c^2 \beta \cdot d\beta \quad (7)$$

(6)、(7)式から dn と $d\beta$ の関係は次のようになる。

$$dW = dn \frac{e\pi V A_{10}}{4} \cos \varphi_s = m_0 c^2 \beta \cdot d\beta \quad (8)$$

これを(5)式に代入すると、 β の積分で次のように表される。

$$N = \int \frac{\Omega_l}{2\pi} dn = \int \frac{\Omega_l}{2\pi} \frac{4m_0 c^2 \beta}{e\pi V A_{10} \cos \varphi_s} d\beta \quad (9)$$

一方、高周波発散係数 Δ は次式で与えられる。

$$\Delta = \frac{\pi^2 e V A_{10}}{2\beta^2 m_0 c^2} \sin \varphi_s \quad (10)$$

故に、位相角周波数 Ω_l は次のように Δ で表される。

$$\Omega_l = \sqrt{-\frac{e\pi^2 V A_{10}}{4m_0 v_s^2} \sin \varphi_s} = \sqrt{\frac{|\Delta|}{2}} \quad (11)$$

ここで、(9)式を Δ で表すと次のようになる。

$$N = \int \frac{\Omega_l}{2\pi} dn = \int \sqrt{\frac{|\Delta|}{2}} \frac{\sin \varphi_s}{\beta \Delta} \frac{1}{\cos \varphi_s} d\beta = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{\sqrt{2|\Delta|}} \tan \varphi_s \frac{d\beta}{\beta} \quad (12)$$

上式を変数 ($\xi = \beta/\beta_1$ 、 $R_\beta = \beta_2/\beta_1$) を使って書きかえると次のようになる。

$$N = \int_1^{R_\beta} \frac{1}{\sqrt{2|\Delta|}} \tan \varphi_s \frac{d\xi}{\xi} \quad (13)$$

上式の ξ の積分範囲は $\beta = \beta_1$ のとき $\xi = 1$ 、 $\beta = \beta_2$ のとき $\xi = R_\beta$ となる。この式を使って、 $N = 0.5$ となる R_β を求める訳であるが、 Δ と ξ の間の関係と φ_s と ξ の間の関係は、 Δ が β の 2 次関数で表され、セパトリックスの面積が一定であるという条件から決められる。これ等の変数間の関係を使って(13)式の積分は数値計算で求められる。

3.2.2. セパトリックスの面積一定の条件から求まる Δ と φ_s と ξ の関係

図 1 に示すように、セパトリックスを同期粒子と非同期粒子の速度差 Δv と粒子の位相 φ の面上で表すと、 Δv の最大値は次式で与えられる。

$$(\Delta v)_{\max} = \frac{2v_s \Omega_l}{\pi} \sqrt{1 - \varphi_s \cot \varphi_s} \quad (14)$$

$\Omega_l = \sqrt{|\Delta|/2}$ の関係を使うと上式は次のようになる。

$$(\Delta v)_{\max} = \frac{v_s \sqrt{2|\Delta|}}{\pi} \sqrt{1 - \varphi_s \cot \varphi_s} = \frac{\sqrt{2|\Delta|}}{\pi} \beta c \sqrt{1 - \varphi_s \cot \varphi_s} \quad (15)$$

セパトリックスの位相長を Φ_C とすると、バンチ長 Z_C は次式で与えられる。

$$Z_C = \Phi_C \frac{\beta_s \lambda}{2\pi} \quad (16)$$

セパトリックスの面積を $(\Delta v)_{\max} \times Z_C$ で近似すると次のようになる。

$$S = (\Delta v)_{\max} \times Z_C = \frac{\lambda c}{\sqrt{2}\pi^2} \sqrt{\Delta} \beta^2 \Phi_C \sqrt{1 - \varphi_s \cot \varphi_s} \quad (17)$$

ここで、 $\Phi_C \sqrt{1 - \varphi_s \cot \varphi_s} = g(\varphi_s)$ で置き換えると、セパトリックスの面積が一定であるという条件から、プリバンチャー入口、出口の速度と発散係数と同期位相を $\beta_1, \beta_2, \Delta_1, \Delta_2, \varphi_1 = -88^\circ, \varphi_2 = -60^\circ$ とすると、次の関係式が得られる。

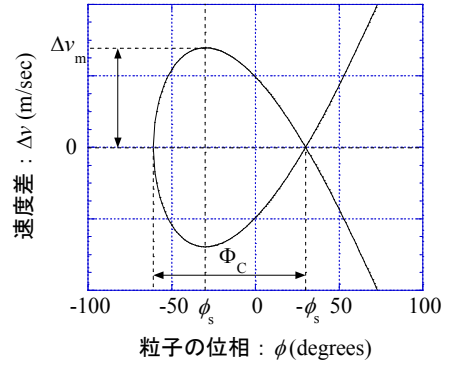


図 1

$$\sqrt{|\Delta|}\beta^2 g(\varphi_s) = \sqrt{|\Delta_1|}\beta_1^2 g(-88^\circ) = \sqrt{|\Delta_2|}\beta_2^2 g(-60^\circ) \quad (18)$$

上式を $\sqrt{|\Delta_1|}\beta_1^2$ で割ると次のようになる。

$$\sqrt{\frac{\Delta}{\Delta_1}} \frac{\beta^2}{\beta_1^2} g(\varphi_s) = g(-88^\circ) = \sqrt{\frac{\Delta_2}{\Delta_1}} \frac{\beta_2^2}{\beta_1^2} g(-60^\circ) \quad (19)$$

ここで、次の変数 $\xi = \frac{\beta}{\beta_1}$, $R_\beta = \frac{\beta_2}{\beta_1}$, $R_\Delta = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}$ を導入すると、 Δ と φ_s と ξ の関係が次式で与えられる。

$$\sqrt{\frac{\Delta}{\Delta_2}} \xi^2 g(\varphi_s) = \sqrt{R_\Delta} g(-88^\circ) = R_\beta^2 g(-60^\circ) \quad (20)$$

3.2.3. Δ が β の 2 次関数であるという条件から求まる Δ と ξ の関係

図 2 に示すように、 Δ が β の二次関数であるとき一般式は次式で与えられる。

$$\Delta = a\beta^2 + b\beta + c \quad (21)$$

係数 a, b, c は Δ が $\beta = \beta_2$ で極大値 Δ_2 を持つという条件と、 Δ と β の境界条件から決められる。極大値の条件から $\Delta' = 2a\beta_2 + b = 0$ 、故に

$$\Delta = a\beta^2 - 2a\beta_2\beta + c$$

$\beta = \beta_2$ のとき $\Delta = \Delta_2$ であるから

$$\Delta_2 = a\beta_2^2 - 2a\beta_2\beta_2 + c, \text{ 故に}$$

$$\Delta = a\beta^2 - 2a\beta_2\beta + \Delta_2 + a\beta_2^2 = a(\beta - \beta_2)^2 + \Delta_2$$

$\beta = \beta_1$ のとき $\Delta = \Delta_1$ であるから $\Delta_1 = a(\beta_1 - \beta_2)^2 + \Delta_2$ 、故に Δ の関数形は次のようになる。

$$\Delta = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{(\beta_1 - \beta_2)^2} (\beta - \beta_2)^2 + \Delta_2 \quad (22)$$

上式を ξ , R_β , R_Δ で書き換えると

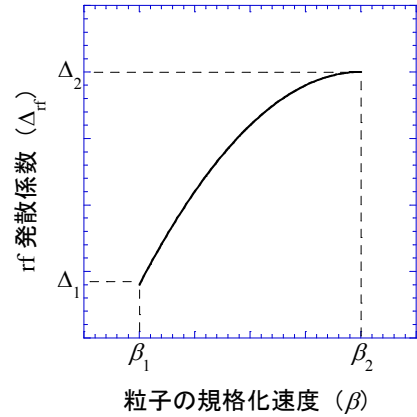


図 2

$$\frac{\Delta}{\Delta_2} = \frac{\Delta_1/\Delta_2 - 1}{(1 - \beta_2/\beta_1)^2} (\beta/\beta_1 - \beta_2/\beta_1)^2 + 1 = \frac{R_\Delta - 1}{(1 - R_\beta)^2} (\xi - R_\beta)^2 + 1 \quad (23)$$

ここで、(20)式より得られた

$$\sqrt{R_\Delta} = R_\beta^2 \frac{g(-60^\circ)}{g(-88^\circ)}$$

を(23)式に代入すると、 Δ と ξ の関係式が次のように求まる。

$$\frac{\Delta}{\Delta_2} = \frac{\left[R_\beta^2 \frac{g(-60^\circ)}{g(-88^\circ)} \right]^2 - 1}{(1 - R_\beta)^2} (\xi - R_\beta)^2 + 1 \quad (24)$$

3.2.4. φ_s と ξ の関係

(20)式から $g(\varphi_s)$ と ξ の関係は次のように与えられる。

$$\sqrt{\frac{\Delta}{\Delta_2}} \xi^2 g(\varphi_s) = R_\beta^2 g(-60^\circ) \quad \therefore g(\varphi_s) = \frac{R_\beta^2 g(-60^\circ)}{\sqrt{\frac{\Delta}{\Delta_2}} \xi^2} \quad (25)$$

(25)式に(24)式で得られた Δ/Δ_2 を代入すれば、 $g(\varphi_s)$ は ξ の関数で与えられる。 $g(\varphi_s)$ が決まれば次の2つの式を使って φ_s も決まる。

$$g(\varphi_s) = \Phi_c \sqrt{1 - \varphi_s \cot \varphi_s} \quad (26)$$

$$\tan \varphi_s = \frac{\sin \Phi_c - \Phi_c}{1 - \cos \Phi_c} \quad (27)$$

ここで、 Φ_c は安定位相が φ_s であるセパラトリックスの位相長である。

3.2.5. R_β と R_Δ の関係

(20)式の関係を使って R_Δ と R_β の関係は次のようになる。

$$R_\Delta = \left[R_\beta^2 \frac{g(-60^\circ)}{g(-88^\circ)} \right]^2 \quad (28)$$

3.2.6. R_β と R_Δ を求める具体的計算手順

1) 変数 ξ に対する Δ 値を計算する。予め初期設定された Δ_2 、 R_β と、(26)、(27)式から求

められた $g(-60)$ 、 $g(-80)$ の値を(24)式に代入すれば、変数 ξ に対する Δ 値が求まる。

$$\frac{\Delta}{\Delta_2} = \frac{\left[R_\beta^2 \frac{g(-60^\circ)}{g(-88^\circ)} \right]^2 - 1}{(1 - R_\beta)^2} (\xi - R_\beta)^2 + 1 \quad (24)$$

- 2) 次に、変数 ξ に対する $g(\varphi_s)$ 値を計算する。 $g(\varphi_s)$ は(25)式で次のように与えられる。

$$g(\varphi_s) = \frac{R_\beta^2 g(-60^\circ)}{\sqrt{\frac{\Delta}{\Delta_2} \xi^2}} \quad (25)$$

上式に、1)で使われた R_β 、 $g(-60)$ と、1)で求められた Δ/Δ_2 を代入すれば、変数 ξ に対する $g(\varphi_s)$ 値が求まる。

- 3) 次に、2)で求めた $g(\varphi_s)$ 値から(26)、(27)式を使って変数 ξ に対する φ_s 値を求める。具体的には φ_s を少しずつ変えていき、上で求めた $g(\varphi_s)$ 値に一致する φ_s を数値計算で求める。
- 4) このように求めた ξ に対する Δ 値と φ_s 値を(13)式に代入し、 ξ を 1 から R_β まで少しずつ増やし、(13)式の数値積分を行う。1)から 4)の手順を繰り返し、 $N = 0.5$ となる R_β が求められる。 R_β が求めれば、(28)式の関係を使って R_Δ は次のように求まる。

$$R_\Delta = \left[R_\beta^2 \frac{g(-60^\circ)}{g(-88^\circ)} \right]^2 \quad (28)$$

3.2.7. 計算コード GENPARA での R_β と R_Δ の計算

GENPARA は 3.2.6.の方法で R_β と R_Δ を計算する。表 2 に GENPARA の主プログラム、表 3 に制御プログラム、表 4 に計算出力が示されている。計算の為の入力パラメータは集束係数 B と rf 発散係数 $\text{DEL2}(\Delta_2)$ である。RBETA (R_β)、RDEL (R_Δ)の最終値は NPO (phase oscillation の数)が 0.5 の時の値である。

4. 最後に

ここでは、 Δ が β の 2 次関数である時の R_β 、 R_Δ が求められたが、 Δ が β の 1 次関数である時も同様の方法で求められる。経験的には 2 次関数が多く使われていて、東大原子核研究所で開発された RFQ リニアック (LITL、TALL、SCRFQ) は全て 2 次関数で設計された。

表 2 : 主プログラムファイル : genpara.f

<pre> C **** INPUT PARAMETERS FOR GENRFQ ***** CHARACTER A1*70, A2*70 REAL NPO, NPO0, FAI DIMENSION FAI (100), G (100) c CHARACTER XDATE*10, CHDATE*9, XTIME*8, CHDAT (2)*4 CHARACTER XTIME0*9 CALL DATE_AND_TIME (CHDATE, XTIME0) XTIME=XTIME0 (1:2) // ' ' // XTIME0 (3:4) // ' ' // XTIME0 (5:6) XDATE=CHDATE (1:4) // ' ' // CHDATE (5:6) // ' ' // CHDATE (7:8) WRITE (6, 600) XDATE, XTIME 600 FORMAT (/1H , 6HDATE : , 2X, A10, 2X, 6HTIME : , 2X, A8, /) c c SELECTION OF B AND DELB (Delta-b) c READ (5, 500) A1 c WRITE (6, 610) A1 READ (5, 500) A2 500 FORMAT (A70) c WRITE (6, 610) A2 610 FORMAT (A70) READ (5, *) B, DEL2 DELB=(B-2.2)/20. IF (DEL2.EQ.0.) DEL2=- (DELB-0.005) WRITE (6, 611) B, DEL2 611 FORMAT (' INPUT B=' , F7.3, 2X, ' DEL2 (DELB)=' , F7.3, /) c PI=3.141593 DPSAI=PI/180. FAI (88)=-88.*PI/180. FAI (60)=-60*PI/180. c DO 110 N=1, 360 PSAI=FLOAT (N)*DPSAI DFP=TAN (FAI (88))- (SIN (PSAI)-PSAI)/(1.-COS (PSAI)) ADFP=ABS (DFP) IF (N.EQ.1) DFPMIN=ADFP IF (ADFP.LE.DFPMIN) DFPMIN=ADFP IF (ADFP.LE.DFPMIN) PSAI=PSAI 110 CONTINUE c G (88)=PSAIC*SQRT (1.-FAI (88)/TAN (FAI (88))) PSAIC=0.0 DO 111 NN=1, 360 PSAI=FLOAT (NN)*DPSAI DFP=TAN (FAI (60))- (SIN (PSAI)-PSAI)/(1.-COS (PSAI)) ADFP=ABS (DFP) IF (NN.EQ.1) DFPMIN=ADFP IF (ADFP.LE.DFPMIN) DFPMIN=ADFP IF (ADFP.LE.DFPMIN) PSAI=PSAI 111 CONTINUE c G (60)=PSAIC*SQRT (1.-FAI (60)/TAN (FAI (60))) WRITE (6, *) ' G (60)=' , G (60)*180./PI, ' deg. ' ¥, ' G (88)=' , G (88)*180./PI, ' deg. ' c ----- RBETA=1.036 DRBETA=0.002 CALL SEARCH (RBETA, DRBETA, G, DEL2, RBETA0, NPO0, RBETAINO) </pre>	<pre> WRITE (6, *) ' ' RBETA=RBETAINO DRBETA=0.0001 CALL SEARCH (RBETA, DRBETA, G, DEL2, RBETA0, NPO0, RBETAINO) RDEL=(G (60)/G (88))*2*RBETA0**4 c WRITE (6, 621) RBETA0, RDEL, NPO0 621 FORMAT (/ , ' RBETA=' , F10.7, 2X, ' RDEL=' , F10.7, 2X, ' NPO=' ¥, F10.7, /) STOP END c c c ----- c SUBROUTINE SEARCH (RBETA, DRBETA, G, DEL2, RBETA0, NPO0 ¥, RBETAINO) REAL NPO, NPO0, FAI DIMENSION FAI (100), G (100) PI=3.141593 M=0 K=0 c DO 120 II=0, 11 K=K+1 c c ----- c (1) Set RBETA c ----- RBETA=RBETAINO+DRBETA*FLOAT (II) DZI=(RBETA-1.)/1000. NPO=0.0 c DO 130 I=1, 1000 ZI=FLOAT (I)*DZI+1. IF (ZI.GT.RBETA) GO TO 130 c c ----- c (2) Determine DEL by substituting RBETA and ZI. c ----- DEL=((RBETA**4*(G (60)/G (88))*2-1.)*(ZI-RBETA)**2 ¥/(1.-RBETA)**2+1.)*DEL2 c c ----- c (3) Determine GFAI by substituting ZI and DEL. c ----- GFAI=RBETA**2*G (60)/SQRT (DEL/DEL2)/ZI**2 c DO 140 J=1, 90 DFAI=PI/180. FAI (J)=FLOAT (J)*DFAI c c ----- c (4) Determine PSAI at FAI (J). c ----- DFP=TAN (FAI (J))- (SIN (PSAI)-PSAI)/(1.-COS (PSAI)) </pre>
1 ページ	2 ページ

<pre> C ADFP=ABS(DFP) IF (J.J. EQ. 1) DFPMIN=ADFP IF (ADFP. LE. DFPMIN) DFPMIN=ADFP IF (ADFP. LE. DFPMIN) PSAIC=PSAI 150 CONTINUE c c ----- c (5) Find FAIS for GFAI obtained in (3) c ----- DGP=GFAI-PSAIC*SQRT(1.-FAI (J)/TAN (FAI (J))) c ADGP=ABS(DGP) IF (J. EQ. 1) DGPMIN=ADGP IF (ADGP. LE. DGPMIN) DGPMIN=ADGP IF (ADGP. LE. DGPMIN) FAIS=FAI (J) 140 CONTINUE c c ----- c (6) Integrate NPO by substituting RBETA, ZI, DEL (ZI), c FAIS (ZI), DZI </pre> <p style="text-align: center;">3 ページ</p>	<pre> c ----- NPO=NPO+1./SQRT(2.*ABS(DEL))*ABS(TAN(FAIS))/ZI*DZI 130 CONTINUE c RDEL=(G(60)/G(88))*2*RBETA**4 WRITE(6,*) 'II=', II, ' RBETA=', RBETA, ' RDEL=', RDEL *, ' NPO=', NPO c ----- c (6) Find RBETA0 for NPO=0.5 c ----- DNP=NPO-0.5 DNPO=ABS(NPO-0.5) IF (K. EQ. 1) DNPOMIN=DNPO IF (DNPO. LE. DNPOMIN) DNPOMIN=DNPO IF (DNPO. LE. DNPOMIN) RBETA0=RBETA IF (DNPO. LE. DNPOMIN) NPO0=NPO IF (DNPO. LE. DNPOMIN. AND. DNP. LE. 0.) RBETAINO=RBETA IF (DNPO. LE. DNPOMIN. AND. DNP. GE. 0.) RBETAINO=RBETA-0.001 120 CONTINUE END </pre> <p style="text-align: center;">4 ページ</p>
--	--

表 3 : 制御ファイル : genpara.sh

```

#!/bin/csh
date

#
# Input files : << E01 <--> read(5) <== inline
# fort. 2 <--> read(2) <== cadIH
#

set ofile=genpara.out
setenv uf02 fort. 2

#/usr/bin/rm -f $uf02
rm -f $uf02
cat /dev/null >! $ofile
f77 genpara.f -O0 -o genpara.load
#time /home/sarai/insuty/cal/genpara.load << 'E01'
time /home/sarai/insuty/cal/genpara.load << E01 >> &! $ofile
CALCULATION OF THE INPUT PARAMETERS FOR GENRFQ
B DEL2
3.8 -0.075
E01
#
cat genpara.out
#
exit

```

表 4 : 出力ファイル : genpara.out

```

DATE : 2016:05:18 TIME : 14:08:34

INPUT B= 3.800 DEL2(DELb)= -0.075

G(60)= 118.844841deg. G(88)= 312.273071deg.
II= 0 RBETA= 1.03600001 RDEL= 0.166851699 NPO= 0.423810512
II= 1 RBETA= 1.03799999 RDEL= 0.168143854 NPO= 0.447373509
II= 2 RBETA= 1.03999996 RDEL= 0.169443488 NPO= 0.471471637
II= 3 RBETA= 1.04200006 RDEL= 0.170750722 NPO= 0.496412396
II= 4 RBETA= 1.04400003 RDEL= 0.172065437 NPO= 0.521006465
II= 5 RBETA= 1.046 RDEL= 0.173387721 NPO= 0.544685245
II= 6 RBETA= 1.04799998 RDEL= 0.17471762 NPO= 0.56925267
II= 7 RBETA= 1.05000007 RDEL= 0.176055223 NPO= 0.59297204
II= 8 RBETA= 1.05200005 RDEL= 0.17740041 NPO= 0.616834223
II= 9 RBETA= 1.05400002 RDEL= 0.178753302 NPO= 0.641912639
II= 10 RBETA= 1.05599999 RDEL= 0.180113912 NPO=
0.666252553
II= 11 RBETA= 1.05799997 RDEL= 0.18148227 NPO= 0.690333486

II= 0 RBETA= 1.04200006 RDEL= 0.170750722 NPO= 0.496412396
II= 1 RBETA= 1.04210007 RDEL= 0.170816302 NPO= 0.49761641
II= 2 RBETA= 1.04220009 RDEL= 0.170881882 NPO= 0.498866916
II= 3 RBETA= 1.04230011 RDEL= 0.170947492 NPO= 0.500007927
II= 4 RBETA= 1.0424 RDEL= 0.171013027 NPO= 0.501136243
II= 5 RBETA= 1.04250002 RDEL= 0.171078682 NPO= 0.50236243
II= 6 RBETA= 1.04260004 RDEL= 0.171144336 NPO= 0.503516436
II= 7 RBETA= 1.04270005 RDEL= 0.171210021 NPO= 0.50551784
II= 8 RBETA= 1.04280007 RDEL= 0.17127572 NPO= 0.50675416
II= 9 RBETA= 1.04290009 RDEL= 0.171341434 NPO= 0.507984996
II= 10 RBETA= 1.0430001 RDEL= 0.171407178 NPO= 0.509150028
II= 11 RBETA= 1.0431 RDEL= 0.171472847 NPO= 0.510337889

RBETA= 1.0423001 RDEL= 0.1709475 NPO= 0.5000079

```

謝辞

本報告書作成に対する和田道治氏のご支援に対し、著者は深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Yamada, “BUNCHER SECTION OPTIMIZATION OF HEAVY ION RFQ LINACS”, Proc. of the 1981 Linear Accelerator Conference, Santa Fe, New Mexico, USA, P. 316.
- [2] K. R. Crandall, R. H. Stokes, and T. P. Wangler, “RF Quadrupole Beam Dynamics Design Studies”, Proc. 1979 Linear Accelerator Conf., Montauk, N.Y., September 9-14, 1979 (Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y., 1980), BNL-51134, p. 205.
- [3] 中西哲也、“中重イオン用四ヴェイン型 RFQ 線型加速器の研究”、日本大学工学博士論文。