

# SLOWRI後段加速器の概念設計 (2<sup>nd</sup> Version)

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

SLOWRI後段加速器の概念設計が Conceptual design of a post accelerator for SLOWRI<sup>[1]</sup>にまとめられた。この設計結果を見直す中で、1) RFQの加速効率を改善してRFQの全長を短くする、2) IHの最終エネルギーを5MeV/uまで上げる、という2つの課題が設定された。ここでは新たな課題を満足する概念設計の2<sup>nd</sup> versionが作られた。

## 2. 第1段加速器 (RFQ)

### 2.1. 1<sup>st</sup> versionのヴェインパラメータ

加速可能な $A/q$ を小さくすれば、それに応じてRFQのビーム光学上の最適周波数を高くする事ができる。最適周波数は入射エネルギーやエミッタンスにより変わるが、因みに $A/q=7$ イオンの加速に対するビームの安定性は常識的な設計なら200 MHz位まで高くしても十分に得られる<sup>[2]</sup>。しかし、加速空洞の並列共振抵抗 ( $R_p$ ) が周波数の3/2乗に反比例するという特性から電極間電圧を同じにすると高い周波数ほど消費電力は大きくなるので、周波数は空洞特性も考慮して選択する。概念設計の1<sup>st</sup> VersionではTALL<sup>[3]</sup>のヴェインパラメータを参考にして、次の様なヴェインパラメータが選択された。運転周波数は79 MHz、最大 $A/q$ は9、入射エネルギーは5 keV/u、出射エネルギーは500 keV/u、全長719.33 cmである。ヴェイン間電圧は $A/q=9$ イオンの加速に対して65.1 kVで、最大表面電場の値は放電に対して十分に余裕のある $1.58K_L$  ( $K_L$ はKilpatrick<sup>[4]</sup>によって周波数の関数として与えられた放電限界値を示す) である。セル数は290であるが、この内の30セルがラジアルマッチング部に属している。

上記ヴェインパラメータは計算コードGENRFQ<sup>[5]</sup>の出力データを計算コードPARMTEQ-2<sup>[6]</sup>に入れて計算された。GENRFQの入力データは表2.1にPARMTEQ-2の出力結果は表2.2に示されている。表2.2のパラメータ記号の意味は次のとおりである。Nc : セル番号、V : ヴェイン間電圧、Ws :  $A/q=9$  粒子のエネルギー、beta : 速度対光速比、capA : 加速効率、phi : 同期位相、a : 最小開口半径、m : ヴェインの変調、B : 集束力、rfD : 発散力、cl : セル長、tl : セル長の和、rhoL(pi) : ヴェインの軸方向曲率半径。

表2.1 : GENRFQ入力データ (1<sup>st</sup> version)

```
** SRI (79.0 MHZ) **  
LINAC 79.0 0.1111 0.047 0.005 0.5 -90 -30 1.57277  
SHAPER 12.3881  
RMATCH 30  
PREBUNCHER 2 1.042 0.16969  
BUNCHER 3.8 -0.075  
BOOSTER 1.15  
OUTPUT 10 0
```

表2.2 : PARMTEQ-2で計算された1<sup>st</sup> versionのヴェインパラメータ

20140502 11:27:19

TITLE

\*\* SRI (79.0 MHZ) \*\*

Nc	V (MV)	Ws (MeV/q)	beta	capA	phi (deg)	a (cm)	m	B	rfD	cl (cm)	tl (cm)	rhoL(pi) (cm)
1	0.065	0.045	0.003	0.000	-90.0		1.0000	0.00	0.000			
10	0.065	0.045	0.003	0.000	-90.0	0.7649	1.0000	1.90	0.000	0.6194	6.19	0.000
20	0.065	0.045	0.003	0.000	-90.0	0.5813	1.0000	3.29	0.000	0.6194	12.39	0.000
30	0.065	0.045	0.003	0.000	-90.0	0.5409	1.0000	3.80	0.000	0.6194	18.58	0.000
40	0.065	0.045	0.003	0.002	-89.0	0.5390	1.0072	3.80	-0.006	0.6198	24.78	19.830
50	0.065	0.045	0.003	0.004	-88.0	0.5371	1.0143	3.80	-0.013	0.6201	30.98	9.843
60	0.065	0.045	0.003	0.005	-84.0	0.5360	1.0185	3.80	-0.017	0.6232	37.19	7.646
70	0.065	0.046	0.003	0.012	-71.0	0.5294	1.0452	3.80	-0.038	0.6320	43.46	3.127
80	0.065	0.051	0.003	0.028	-58.8	0.5164	1.1024	3.80	-0.075	0.6578	49.90	1.413
90	0.065	0.060	0.004	0.035	-54.7	0.5140	1.1122	3.80	-0.078	0.7122	56.76	1.535
100	0.065	0.073	0.004	0.045	-50.2	0.5114	1.1229	3.80	-0.077	0.7828	64.26	1.727
110	0.065	0.090	0.005	0.058	-45.3	0.5081	1.1364	3.80	-0.074	0.8726	72.56	1.982
120	0.065	0.117	0.005	0.085	-40.1	0.4998	1.1728	3.80	-0.076	0.9931	81.92	2.083
130	0.065	0.160	0.006	0.129	-34.3	0.4862	1.2340	3.80	-0.075	1.1588	92.71	2.192
140	0.065	0.233	0.007	0.211	-30.0	0.4614	1.3519	3.80	-0.075	1.3939	105.54	2.294
150	0.065	0.351	0.009	0.320	-30.0	0.4287	1.5169	3.80	-0.075	1.7088	121.15	2.675
160	0.065	0.528	0.011	0.479	-30.0	0.3756	1.8302	3.80	-0.075	2.0954	140.30	3.094
170	0.065	0.791	0.014	0.679	-30.0	0.2954	2.4718	3.80	-0.071	2.5673	163.78	3.722
180	0.065	1.096	0.016	0.688	-30.0	0.2944	2.4570	3.80	-0.051	3.0309	192.06	5.503
190	0.065	1.402	0.018	0.691	-30.0	0.2947	2.4399	3.80	-0.040	3.4351	224.64	7.318
200	0.065	1.710	0.020	0.692	-30.0	0.2954	2.4253	3.80	-0.033	3.7970	261.01	9.148
210	0.065	2.017	0.022	0.694	-30.0	0.2950	2.4232	3.80	-0.028	4.1280	300.82	10.960
220	0.065	2.326	0.023	0.695	-30.0	0.2948	2.4210	3.80	-0.024	4.4350	343.81	12.781
230	0.065	2.635	0.025	0.696	-30.0	0.2947	2.4185	3.80	-0.021	4.7226	389.75	14.607
240	0.065	2.945	0.026	0.697	-30.0	0.2947	2.4160	3.80	-0.019	4.9939	438.48	16.439
250	0.065	3.254	0.028	0.698	-30.0	0.2948	2.4133	3.80	-0.017	5.2513	489.85	18.275
260	0.065	3.564	0.029	0.698	-30.0	0.2949	2.4105	3.80	-0.016	5.4967	543.72	20.113
270	0.065	3.874	0.030	0.698	-30.0	0.2951	2.4075	3.80	-0.015	5.7317	599.99	21.956
280	0.065	4.184	0.031	0.698	-30.0	0.2953	2.4045	3.80	-0.013	5.9573	658.55	23.801
290	0.065	4.493	0.033	0.698	-30.0	0.2955	2.4013	3.80	-0.013	6.1747	719.33	25.650
291	0.065	4.524	0.033	0.698	-30.0	0.2955	2.4009	3.80	-0.012	6.1960	725.52	25.835

## 2.2. 2<sup>nd</sup> versionのヴェインパラメータ

RFQの全長をより短くする為に、加速可能な $A/q$ を9から8、加速同期位相を $-30^\circ$ から $-25^\circ$ 、ヴェイン間電圧をKilpatrick値の1.573倍から1.657倍（即ち、65.1から81.5 kV）に変更した。更に、90%以上の荷電変換器からのビーム捕獲効率を保障する為に、加速ビームの規格化エミッタンスを $0.047 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ から十分な実績のあるTRIAC<sup>[7]</sup>と同じ値 $0.06 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ に変更した。PARMTEQ-2の出力結果を見ると、セル数は290から244に減り、ヴェイン長は2m短くなり7.2mから5.2mになった。ヴェインの平均開口半径は約1mm増え0.541から0.6415cmになった。伝送効率は93%である。計算コードGENRFQの入力データを表2.3に、PARMTEQ-2のヴェインパラメータの出力結果を表2.4に示す。

表2.3 : GENRFQの入力データ (2<sup>nd</sup> version)

```

** 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
    
```

表2.4 : PARMTEQ-2で計算された2<sup>nd</sup> versionのヴェインパラメータ

20141017 14:06:43

TITLE

\*\* SRI (79.0 MHZ) \*\*

Nc	V (MV)	Ws (MeV/q)	beta	capA	phi (deg)	a (cm)	m	B	rFD	cl (cm)	tl (cm)	rhoL(pi) (cm)
1	0.0815	0.0400	0.003	0.000	-90.0		1.0000	0.00	0.000			
10	0.0815	0.0400	0.003	0.000	-90.0	0.9070	1.0000	1.90	0.000	0.6194	6.1944	0.000
20	0.0815	0.0400	0.003	0.000	-90.0	0.6893	1.0000	3.29	0.000	0.6194	12.3887	0.000
30	0.0815	0.0400	0.003	0.000	-90.0	0.6415	1.0000	3.80	0.000	0.6194	18.5831	0.000
40	0.0815	0.0400	0.003	0.001	-89.0	0.6390	1.0077	3.80	-0.007	0.6198	24.7810	15.300
50	0.0815	0.0401	0.003	0.003	-88.0	0.6366	1.0154	3.80	-0.013	0.6201	30.9802	7.557
60	0.0815	0.0402	0.003	0.003	-84.1	0.6353	1.0198	3.80	-0.017	0.6232	37.1948	5.904
70	0.0815	0.0409	0.003	0.008	-71.4	0.6274	1.0472	3.80	-0.037	0.6318	43.4626	2.433
80	0.0815	0.0453	0.003	0.020	-58.9	0.6122	1.1059	3.80	-0.075	0.6570	49.8920	1.070
90	0.0815	0.0531	0.004	0.025	-54.9	0.6104	1.1118	3.80	-0.077	0.7107	56.7457	1.216
100	0.0815	0.0641	0.004	0.032	-50.4	0.6084	1.1182	3.80	-0.078	0.7806	64.2221	1.427
110	0.0815	0.0798	0.005	0.041	-45.5	0.6062	1.1254	3.80	-0.075	0.8705	72.5044	1.727
120	0.0815	0.1033	0.005	0.060	-40.3	0.5991	1.1513	3.80	-0.076	0.9894	81.8294	1.896
130	0.0815	0.1409	0.006	0.090	-34.6	0.5885	1.1906	3.80	-0.074	1.1543	92.5891	2.129
140	0.0815	0.2064	0.007	0.156	-28.5	0.5645	1.2850	3.80	-0.074	1.3943	105.3738	2.213
150	0.0815	0.3321	0.009	0.287	-25.0	0.5168	1.4889	3.80	-0.076	1.7591	121.2021	2.357
160	0.0815	0.5491	0.012	0.472	-25.0	0.4454	1.8433	3.80	-0.075	2.2620	141.4577	2.887
170	0.0815	0.9038	0.016	0.706	-25.0	0.3336	2.6330	3.80	-0.068	2.9051	167.4966	3.776
180	0.0815	1.3180	0.019	0.715	-25.0	0.3331	2.6018	3.80	-0.047	3.5228	200.0373	6.014
190	0.0815	1.7344	0.021	0.718	-25.0	0.3335	2.5802	3.80	-0.036	4.0498	238.2228	8.283
200	0.0815	2.1526	0.024	0.721	-25.0	0.3329	2.5750	3.80	-0.029	4.5176	281.3343	10.547
210	0.0815	2.5721	0.026	0.723	-25.0	0.3328	2.5693	3.80	-0.024	4.9426	328.8786	12.827
220	0.0815	2.9923	0.028	0.724	-25.0	0.3330	2.5631	3.80	-0.021	5.3343	380.4833	15.117
230	0.0815	3.4128	0.030	0.724	-25.0	0.3333	2.5564	3.80	-0.018	5.6994	435.8543	17.417
240	0.0815	3.8332	0.032	0.724	-25.0	0.3338	2.5493	3.80	-0.016	6.0424	494.7512	19.726
244	0.0815	4.0013	0.033	0.724	-25.0	0.3340	2.5464	3.80	-0.015	6.1742	519.2510	20.651

PARMTEQ-2によるビームシミュレーション結果は表2.5と図2.1、図2.2に示されている。ビームシミュレーションは1000個の粒子から成るエネルギー拡がりの無い直流ビームを使って行われた。表2.5にはRFQ入出射粒子のエミッタンス楕円のパラメータがまとめられている。表中の $W_s$  (MeV/q)、 $\beta_s \cdot \gamma_s$ は入射ビームの値である。楕円パラメータには粒子全てを含む楕円と粒子の90%を含む楕円の2種類 (PCが100と90の2種類) が表記されているが、RFQの入出射ビームの $\alpha$ 、 $\beta$ の設計値としては100%の場合の値が使われる。図2.1には入射粒子と出射粒子の位相空間分布がプロットされている。シミュレーションによると入射粒子数1000個に対し出射粒子数は934個である。軸方向の運動で60個、横方向の運動で6個の粒子がそれぞれ加速途上で失われている。図2.1の出射粒子の位相空間分布上にプロットされた横方向の実線楕円は、表2.5の黄色で塗りつぶした楕円パラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ と設計エミッタンス $0.00183\pi \text{ cm} \cdot \text{rad}$  (規格化エミッタンス:  $0.06\pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ ) の値を使って描かれている。一方、軸方向の実線楕円 ( $1 = (\Delta\phi)^2/a^2 + (\Delta W)^2/b^2$ ) は $a = 12 \text{ deg}$ 、 $b = 0.05 \text{ MeV/q}$  を使って描かれている。図2.2には粒子の横方向の運動によるビーム径の変化と軸方向の運動による位相の拡がりエネルギーの拡がりがセル数に沿って描かれている。エネルギーの拡がりを示す図を見ると、加速途上 (75と130セル付近) で加速位相から外れて加速されずこぼれて行く粒子の様子が分かる。

1<sup>st</sup> versionと2<sup>nd</sup> versionのRFQの性能が表2.6にまとめられている。両者の入出射エネルギーは同じであるが、1<sup>st</sup> versionから2<sup>nd</sup> versionへの主な改良点は1) ビームエミッタンスが $0.047$ から $0.06 \pi \cdot \text{cm mrad}$ に増やされ、2) ヴェインの長さが $7.2$ から $5.2 \text{ m}$ に縮小されたと言う事である。

表2.5 : 入出射粒子の楕円パラメータ (OUTPROC SUBNUM11出力)

Unnormalized emittances & beta-functions

Trans. emitt. :  $\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{mrad}$ , beta : cm, gamma : /cm  
 Long. emitt. :  $\pi \cdot \text{deg} \cdot (\text{MeV/q})$ , beta :  $\text{deg}/(\text{MeV/q})$ , gamma :  $(\text{MeV/q})/\text{deg}$ \*\*

\*\* INJECTION PARAMETERS OF GOOD PARTICLES AT NCELL = 244 \*\* 0+

$W_s$  (MeV/q) = 0.0400000  
 $\beta_s \cdot \gamma_s = 0.00326463$

PC	NPT	ERMS	EMITT	XAV	XPAV	ALPHA	BETA	GAMMA
100	934	2.960917	18.278475	-0.0083	0.0013	0.94004	14.4719	0.130160
90	840	2.491124	13.016493	-0.0081	0.0003	0.96523	14.9260	0.129417
PC	NPT	ERMS	EMITT	YAV	YPAV	ALPHA	BETA	GAMMA
100	934	3.104966	17.554918	-0.0051	0.0010	0.91568	14.3020	0.128547
90	840	2.636429	12.997346	-0.0083	0.0018	0.92678	14.5958	0.127361

\*\* ELLIPSE PARAMETERS OF GOOD PARTICLES AT NCELL = 244 \*\* 0+

PC	NPT	ERMS	EMITT	XAV	XPAV	ALPHA	BETA	GAMMA
100	934	0.320725	2.885102	-0.0018	-0.0022	-1.47668	29.8254	0.106640
90	840	0.259530	1.467499	0.0015	-0.0006	-1.51040	30.6860	0.106932
PC	NPT	ERMS	EMITT	YAV	YPAV	ALPHA	BETA	GAMMA
100	934	0.332317	2.602774	-0.0015	0.0008	1.23849	33.5858	0.075445
90	840	0.274642	1.485172	-0.0016	-0.0024	1.25219	34.4550	0.074532
PC	NPT	ERMS	EMITT	DPHIAV	DEAV	ALPHA	BETA	GAMMA
100	934	0.101071	0.949756	0.7770	-0.0038	0.08916	313.6825	0.003213
90	840	0.082734	0.436289	0.9760	-0.0038	0.09241	335.3054	0.003008

RUN 1 : T0 = 0.040000 MeV/u  
 \*\* SRI (79.0 MHZ) \*\*

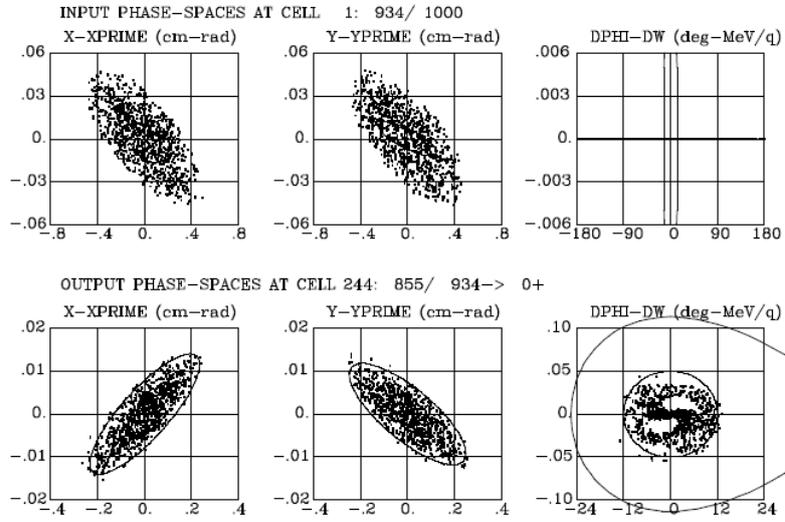


図2.1 : 入射粒子 (上段) と出射粒子 (下段) の位相空間分布。

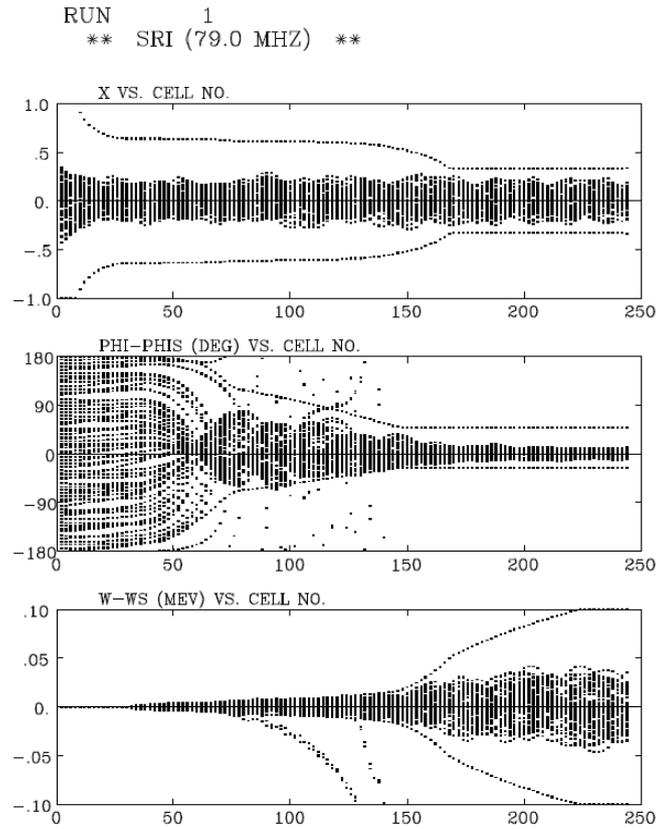


図2.2 : 上から加速セルに沿ったビーム径、位相広がり、エネルギー広がりがそれぞれ示されている。出射ビームのエネルギー広がりは約±1.25%である。

表2.6 : 1<sup>st</sup> versionと2<sup>nd</sup> versionのヴェインパラメータの比較

	Parameter	1 <sup>st</sup> version	2 <sup>nd</sup> version
GENRFQ input data	$f$ (MHz)	79	79
	$A/q$	9	8
	$\varepsilon_n$ ( $\pi \cdot \text{cm mrad}$ )	0.047	0.06
	$T_{\text{in}}$ (MeV/u)	0.005	0.005
	$T_{\text{out}}$ (MeV/u)	0.5	0.5
	$\phi_{s,\text{in}}$ (deg)	-90	-90
	$\phi_{s,\text{out}}$ (deg)	-30	-25
	$F_{\text{KL}}$	1.57277	1.6573
	$l_{\text{shaper}}$ (cm)	12.3881	12.3881
	$N_{\text{RM}}$	30	30
	$\Delta(\beta)$ の関数形	2	2
	$R_\beta = \beta_2/\beta_1$	1.042	1.0423
	$R_\Delta = \Delta_1/\Delta_2$	0.16969	0.17095
	$B$	3.8	3.8
	$\Delta_2$	-0.075	-0.075
$a_{\text{min}}/a_{\text{beam}}$	1.15	1.15	
PARMTEQ output results	Transmission (%)	92.2	93.4
	$N_{\text{cell}}$	290	244
	$T_{\text{out}}$ (MeV)	4.493	4.0013
	$l_{\text{vane}}$ (m)	7.193	5.1925
	$V_{\text{vane}}$ (kV)	65	81.5
	$r_0$ (cm)	0.541	0.6415
	$a_{\text{min}}$ (cm)	0.2944	0.3328
	$\varepsilon_{\text{out},100\%}$ ( $\pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ )		2.744
	Normalized $\varepsilon_{\text{out},100\%}$		0.0899

### 2.3. RFQの空洞構造

空洞タイプが普通の4ヴェイン型だと空洞直径は79 MHzで約73cmとかなり大きくなり、更に共振モードの分離が悪いという欠点を持っている。一方、普通の4-rod型だと空洞径は小さくなり共振モードの分離も良くなるが、RFQ電場に構造的な非対称性が発生する。Split-coaxial型は対称性の良い電場を持つと同時に4-rod型の利点も持っている。そこで、ここではINSで開発した図2.3に示すsplit-coaxial型(SCRFQ)<sup>[8]</sup>とATLASのpseudo split-coaxial型<sup>[9]</sup>を参考にして空洞構造を検討する。SCRFQとpseudo split-coaxial型RFQの構造的な大きな違いは、SCRFQでは細長いヴェイン電極が3角形の背板で構造的に補強され空洞端のステムで支えられているのに対して、pseudo split-coaxial型RFQでは、磁場が4電極の周りを空洞内壁に沿って方位方向に回転する様に大きく切り落された幅広いヴェイン電

極が、4ヴェイン型のように空洞内壁に直接取り付けられている点にある。両者を比較すると、SCRFAQよりpseudo split-coaxial型RFQの方が構造的に大分単純化されている。単純化の結果、空洞径は少し大きくなるが電極間のキャパシタンスが減少し、消費電力の減少が見込まれる。一方、SCRFAQは製造・運転に関して十分実績があるので、ここではPseudo split-coaxial型RFQの利点（電極間キャパシタンスが小さい）が生かされるようにSCRFAQを改造する事にする。図2.4の(a)と(b)の比較から分かるように、ヴェインと背板から成る電極の固定構造がヴェインとステム間に余分な静電容量が発生しないように変更される。

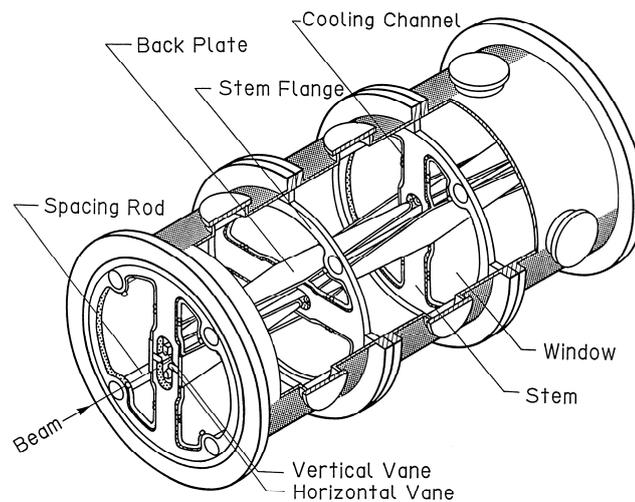


図2.3： 3モジュール空洞から成る1ユニットSCRFAQの構造。

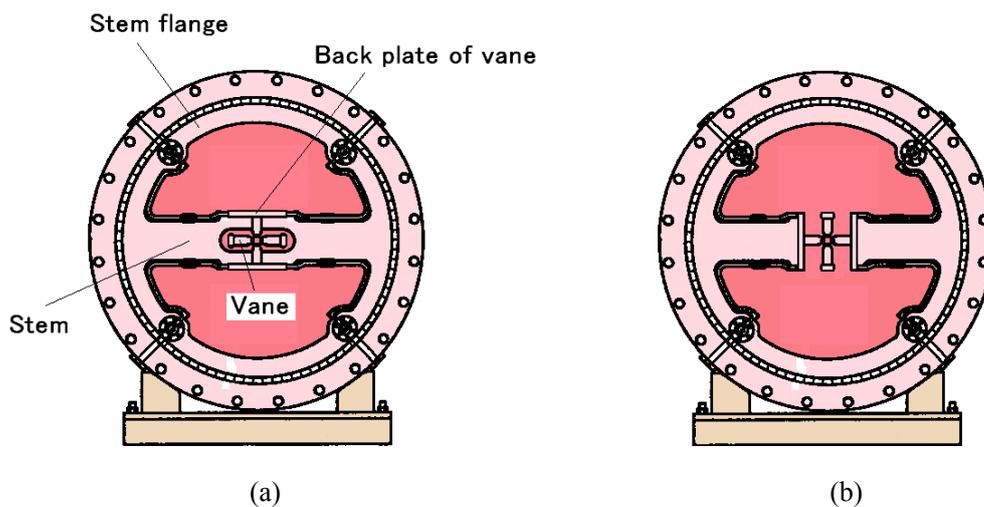


図2.4： (a)はINSで開発したSCRFAQの空洞端面図。(b)はPseudo split-coaxial型RFQを参考に改造された空洞端面図。

図2.4(b)の空洞サイズはTRIACのSCRFAQを設計した時に使用した計算コードCADSCRFAQを少し改良して計算された。計算コードの入力データとして空洞構造の寸法と電極キャパシタンスを与える事によって、空洞の共振周波数が計算できる。TRIACのSCRFAQを設計した時には、電極キャパシタンスに電極とステム間のキャパシタンスも含まれたが、今回は電極とステム間のキャパシタンスはゼロとなる。

### 2.3.1. 電極キャパシタンスの計算

図2.4(b)に装着する電極を図2.5に示すが、これはモジュール空洞端での電極断面形状寸法である。これに対向する空洞端での断面形状は図2.5を90度回転した形状になり、モジュール空洞中央での断面寸法では水平垂直の背板の幅が120 mmと30 mmの平均値の値75 mmに等しくなる。そこで、SCRFAQに装着する単位長当りの電極キャパシタンスはモジュール空洞端と中央の位置での電極断面形状が持つ単位長当りのキャパシタンスの平均値として近似的に求められた。

断面形状がビーム軸に沿って一様な電極を持つ4-vane型空洞の4極モードの共振周波数はSUPERFISH<sup>[10]</sup>を使って計算される。計算では、図2.6に示すように、4-vane型空洞の1/4断面空洞が使われる。空洞断面の磁束密度が一様であると仮定するとインダクタンスは(2.1)式のように近似されるので、1/4断面空洞の電極キャパシタンスは求めた共振周波数と磁束の通る断面積を(2.2)式に代入して求められる。

$$L_0 = \mu_0 S \quad (H \cdot m) \quad (2.1)$$

$$C_0 = \frac{1}{\omega^2 L_0} = \frac{1}{(2\pi \cdot f_0)^2 \mu_0 S} \quad (F/m) \quad (2.2)$$

ここで、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ は真空中の透磁率、 $S$ は磁束の通る空洞断面積、 $f_0$ は共振周波数である。空洞全体の電極キャパシタンスは1/4断面空洞の電極キャパシタンスの4倍となる。

モジュール空洞端の電極断面を持つ1/4断面空洞のキャパシタンスは図2.6に示された共振周波数49.044 MHzと磁束の通る断面積0.1938 m<sup>2</sup>を(2.2)式に代入し、 $C_0=43.242 \times 10^{-12} (F/m)$ と求められる。

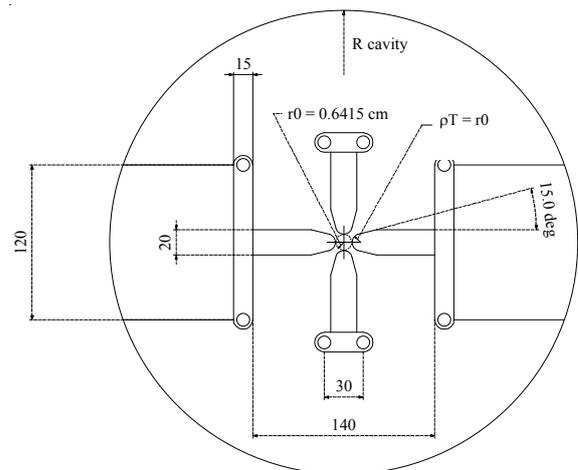


図2.5 : SCRFAQモジュール空洞端での電極断面寸法 (mm)。

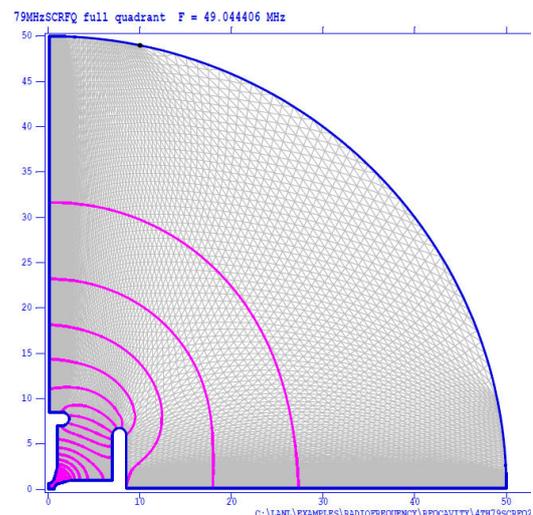


図2.6 : モジュール空洞端の1/4断面でのSPERFISH出力結果。磁束の通る断面積は  $S = \text{空洞断面積} - \text{電極断面積} \approx 0.1963 - 0.0025 = 0.1938 \text{ m}^2$ 。

これから、空洞全体の電極間キャパシタンスは173.0 pF/mとなる。

一方、モジュール空洞中央の電極断面を持つ1/4断面空洞のキャパシタンスは図2.7に示された共振周波数48.963 MHzと磁束の通る断面積0.1938 m<sup>2</sup>を(2.2)式に代入し、 $C_0=43.385 \times 10^{-12}$  (F/m)と求められる。空洞全体の電極間のキャパシタンスは173.5 pF/mとなる。両者の値を比べるとほとんど同じである。故に、2<sup>nd</sup> versionのヴェインパラメータを持つSCRFQ空洞は電極キャパシタンスを173 pF/mとして設計される。

図2.6と図2.7の結果を得るSUPERFISHの入力データがそれぞれ表2.7と表2.8に示されている。

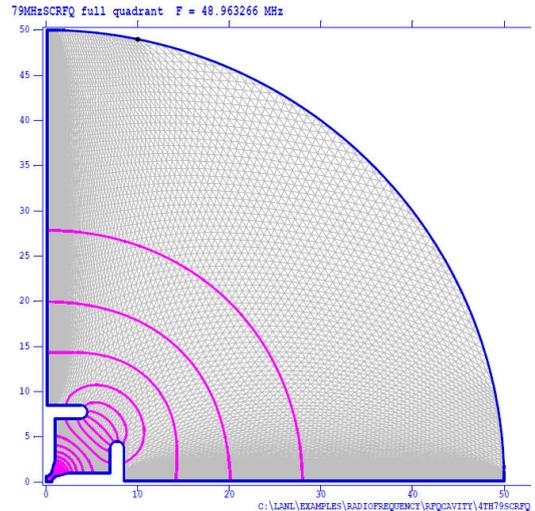


図2.7：モジュール空洞中央の1/4断面でのSPERFISH出力結果。磁束の通る断面積は  $S = \text{空洞断面積} - \text{電極断面積} \approx 0.1963 - 0.0025 = 0.1938 \text{m}^2$ 。

表2.7: 79MHzSCRFQ full quadrant at stem position

```

Lowest dipole-mode frequency = 49.0444 MHz
Bore radius at quadrupole symmetry point r0 = 0.6415 cm
Vane-tip radius of curvature rho = 0.6415 cm

; Copyright 1998, by the University of California.
; Unauthorized commercial use is prohibited.

&reg kprob=1,           ; Superfish problem
; Define X (physical) and K (logical) line regions:
xreg1=1.9, kreg1=90,
xreg2=4.0, kreg2=100,
xreg3=10.0, kreg3=130,
kmax=160,
; Define X (physical) and K (logical) line regions:
yreg1=1.9, lreg1=90,
yreg2=4.0, lreg2=100,
yreg3=10.0, lreg3=130,
lmax=160,
icylin=0,              ; Cartesian coordinates
freq=40.0,             ; Starting frequency
dslope=-1,            ; Allow convergence in one iteration
rfq=1,                ; Cavity type is RFQ
; The following line is for dipole modes; use nbslf=0 for quadrupole
modes
nbslf=0,              ; Neumann boundary condition at left
edge
lines=0 &             ; allow line region points to move in
mesh optimization

&po x=0.,y=0. &
&po x=0.,y=.6415 &
&po nt=2,r=0.6415,theta=345.0,x0=0.0,y0=1.283 &
&po x=1.0,y=2.53649 &
&po x=1.0,y=7.0 &
&po x=1.50,y=7.0 &
&po nt=2,r=0.75,theta=90.0,x0=1.50,y0=7.75 &
&po x=0.1,y=8.5 &
&po x=0.1,y=49.9999 &
&po nt=2,r=50.0,theta=0.1146,x0=0.0,y0=0.0 &
&po x=8.5, y=0.1 &
&po x=8.5, y=6.0 &
&po nt=2,r=0.75,theta=180.0,x0=7.75,y0=6.0 &
&po x=7.0, y=1.0 &
&po x=2.53649, y=1.0 &
&po x=1.11697, y=0.61964 &
&po nt=2,r=0.6415,theta=180.0,x0=1.283,y0=0.0 &
&po x=0.0,y=0.0 &

```

表2.8: 79MHzSCRFQ full quadrant at center position

```

Lowest dipole-mode frequency = 48.9633 MHz
Bore radius at quadrupole symmetry point r0 = 0.6415 cm
Vane-tip radius of curvature rho = 0.6415 cm

; Copyright 1998, by the University of California.
; Unauthorized commercial use is prohibited.

&reg kprob=1,           ; Superfish problem
; Define X (physical) and K (logical) line regions:
xreg1=1.2, kreg1=90,
xreg2=4.0, kreg2=100,
xreg3=10.0, kreg3=120,
kmax=160,
; Define X (physical) and K (logical) line regions:
yreg1=1.2, lreg1=90,
yreg2=4.0, lreg2=100,
yreg3=10.0, lreg3=120,
lmax=160,
icylin=0,              ; Cartesian coordinates
freq=40.0,             ; Starting frequency
dslope=-1,            ; Allow convergence in one iteration
rfq=1,                ; Cavity type is RFQ
; The following line is for dipole modes; use nbslf=0 for quadrupole
modes
nbslf=0,              ; Neumann boundary condition at left
edge
lines=0 &             ; allow line region points to move in
mesh optimization

&po x=0.,y=0. &
&po x=0.,y=.6415 &
&po nt=2,r=0.6415,theta=345.0,x0=0.0,y0=1.283 &
&po x=1.0,y=2.53649 &
&po x=1.0,y=7.0 &
&po x=3.75,y=7.0 &
&po nt=2,r=0.75,theta=90.0,x0=3.75,y0=7.75 &
&po x=0.1,y=8.5 &
&po x=0.1,y=49.9999 &
&po nt=2,r=50.0,theta=0.1146,x0=0.0,y0=0.0 &
&po x=8.5, y=0.1 &
&po x=8.5, y=3.75 &
&po nt=2,r=0.75,theta=180.0,x0=7.75,y0=3.75 &
&po x=7.0, y=1.0 &
&po x=2.53649, y=1.0 &
&po x=1.11697, y=0.61964 &
&po nt=2,r=0.6415,theta=180.0,x0=1.283,y0=0.0 &
&po x=0.0,y=0.0 &

```

### 2.3.2. 空洞パラメータの計算

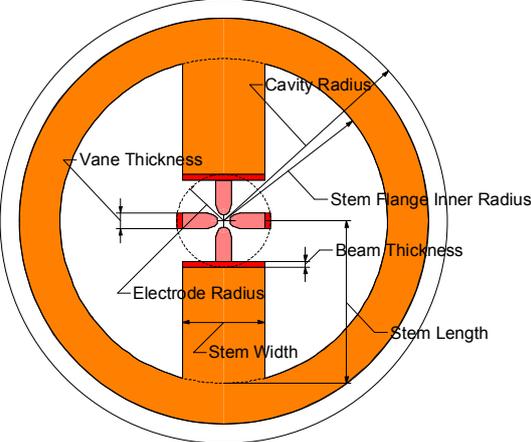
前節で求めた電極キャパシタンス173 pF/mを使って、2<sup>nd</sup> versionのヴェインを装着する空洞特性が計算コードCADSCRFQによって計算された。我々のSCRFQ空洞のモジュール数は3の倍数であるが、これは空洞製作上の都合（コンパクトな空洞、精度の良い電極据え付け、低い消費電力、周波数調整の容易さ等）によって決められる。SCRFQの場合、電極電流によるインダクタンスの他にモジュール空洞端のステムに流れる電流によって余分なインダクタンスが発生するので、ステムフランジの窓の面積を調節しシステムによるインダクタンスを変える事によって、空洞全体の共振周波数を調節する事が可能である。調節可能範囲はステムフランジの窓を全て閉じた場合が上限周波数で、全て開けた場合が下限周波数である。よって空洞直径寸法は、上限・下限周波数のほぼ中間に設計周波数がかかるように決められる。

先ず、適当なモジュール数を決める為に、空洞特性とモジュール数の関係が調べられた。ここでは、製作上の都合から空洞直径が50から30cm位になるモジュール数(18,15,12)で空洞特性が計算された。計算結果が表2.9に示されている。モジュール数が少ないほど空洞径は小さくコンパクトになるが、空洞にとって重要な特性である消費電力はモジュール数が少ないほど大きくなる。更に、モジュール数が少ないほど周波数調節範囲が狭くなるので、目標周波数を得る為の空洞設計の誤差に余裕がなくなる。そこで、消費電力を抑え空洞をコンパクトにしたいという相反する要求の折衷案として、モジュール数を15とした。CADSCRFQで得られた15モジュール空洞の設計パラメータが表2.10にまとめられている。

表2.9：空洞特性とモジュール数

No. of module-cavities	18		15		12	
	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Open
Stem flange windows	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Open
Vane length (mm)	5192.5	—	5192.5		5192.5	
Cavity total length (mm)	5196	—	5190		5190	
Cavity diameter (mm)	520	—	400		302	
Vane thickness (mm)	20	—	20		20	
Back-plate thickness (mm)	15	—	15		15	
Stem length (mm)	230	—	170		121	
Stem width (mm)	120	—	120		120	
Stem thickness (mm)	30	—	30		30	
Total capacitance (pF)	898.3	898.3	898.3	898.3	898.3	898.3
Total inductance (nH)	3.425	5.974	3.919	5.091	4.383	4.618
Frequency (MHz)	90.74	68.70	84.83	74.43	80.21	78.14
Resonant resistance (kΩm)	104.2	145.7	89.7	103.9	66.8	67.7
Unloaded Q-value	10340	10880	8320	8410	5860	5750
Peak power loss (kW)	165	118	191	166	257	255

表2.10 : 79.0-MHZ 15-MODULE SCRFQ空洞に対するCADSCRFQの出力結果

79.0 MHZ CAVITY DESIGN OF 15-MODULE SCRFQ * DATE : 2014/12/05 16:02:45	
<b>INPUT DATA</b>	
Goal Frequency (MHz)	= 79.00000
RF Voltage (kV)	= 81.50000
Cavity Material	= 3 (Copper)
No. of Cavity Modules	= 15
Module Length (mm)	= 344.00000
Cavity Total Length (mm)	= 5190.00000
Vane Length (mm)	= 5192.50000
Cavity Diameter (mm)	= 400.00000
Stem Length (mm)	= 170.00000
Stem Thickness (mm)	= 30.00000
Stem Width (mm)	= 120.00000
Stem Minimum-Width (mm)	= 120.00000
Beam Thickness (mm)	= 15.00000
Beam Max Width (mm)	= 120.00000
Beam Min Width (mm)	= 30.00000
Electrode Radius (mm)	= 85.00000
Vane Thickness (mm)	= 20.00000
Electrode Capacitance (pF/m)	= 173.00000
	
図2.8 : INPUT DATA中の主なパラメータの定義図。	
<b>OUTPUT DATA</b>	
1) RESULTS OF 15-MODULE CAVITY WITH CLOSED WINDOWS	
Frequency (Hz)	= 0.8482845E+08
Total Inductance (H)	= 0.3918635E-08
Total Capacitance (F)	= 0.8983026E-09
Rp: Resonant Res. (k.ohm.m)	= 0.8966875E+05
Q0: Unloaded Q	= 8320.2304688
Vane Voltage (V)	= 81500.0000000
Total Power Loss (W)	= 191114.5781250
In Electrodes (W)	= 8499.8984375
In End Plates (W)	= 2211.8715820
In Cylinder (W)	= 2029.2017822
2) RESULTS OF 15-MODULE CAVITY WITH OPEN WINDOWS EXEPT CAVITY ENDS	
Frequency (Hz)	= 0.7442603E+08
Total Inductance (H)	= 0.5090590E-08
Tank Inductance (H)	= 0.5877952E-07
Stem Inductance (H)	= 0.4748899E-08
Total Capacitance (F)	= 0.8983025E-09
Rp: Resonant Res. (k.ohm.m)	= 0.1039305E+06
Q0: Unloaded Q	= 8408.0195312
Vane Voltage (V)	= 81500.0000000
Total Power Loss (W)	= 165927.6562500
In Electrodes (W)	= 91931.2734375
In Cylinder (W)	= 21946.9804688
In End Plates (W)	= 1783.6149902
In Stems (W)	= 50265.7773438

### 3. 第2段加速器 (IH-Linac)

SLOWRI後段加速器の概念設計1<sup>st</sup> versionではIH-Linacの出射エネルギーは1.5 MeV/uであったが、2<sup>nd</sup> versionでは物理の要請から5 MeV/uとする。IHの運転周波数はRFQの2倍の158 MHz、入射エネルギーは500 keV/uである。500 keV/uから5 MeV/uまで加速するIHリニアックは1<sup>st</sup> versionと同じで、加速と集束の機能分離型 (SDTL: Separated Function Drift-Tube Linac)である。タンクの台数とタンク内に入る加速ギャップ数は軸方向と横方向のビームの安定性、エネルギーの連続可変性を考慮して決められる。ギャップ電圧は電子の電場放出によって発生するX線を低めに抑え、加速器に近い実験エリアに簡単な放射線シールドを設ける事によって立ち入る事が出来るように、140-250 kVと低めに設定する。各タンクの加速ギャップの長さは、一般的には、加速効率 (トランジットタイムファクター) と電場の放電限界値を考慮して、入射エネルギーで決まる周期長 ( $\beta\lambda$ ) の1/4位に決められる。周波数158 MHz、エネルギー500 keV/uの場合には、 $\beta\lambda/4$ は約16 mmになる。ここでは、ギャップ電場がキルパトリックの放電限界値の約0.75倍となるようにギャップ長が決められた。ギャップ電圧が140-250kVと低めに設定されたので、結果として $\beta\lambda/4$ より短い長さになった。ドリフトチューブの最大表面電場はギャップ電場の1.3から1.4倍と言われているので、0.75は適当な値であると言える。

5 MeV/u IHリニアックのドリフトチューブパラメータは表3.1に示されている。空洞タンク数は18台である。ギャップ数は第1から第8タンクまで16、8、12、12、13、14、15、15と変わっている。タンク長はエネルギーの増大と共にギャップ数に対応して変化するが、第8タンクで約100 cm位になる。第9から第18タンクまでのタンク長はギャップ数を14から10まで徐々に減らして約 100cmに保たれた。18台のタンクの全長は約15 mである。IHタンクの径は第1近似では周波数に反比例するので、周波数51 MHz のTRIAC-IH (図3.1) のタンク直径1.49 mを参考にすると、周波数158 MHzのIH空洞のタンク直径は約50 cm位になると予想できる。厳密には空洞内構造の違いによる静電容量やインダクタンスの差が予想直径と実際の直径との間の誤差を生む。

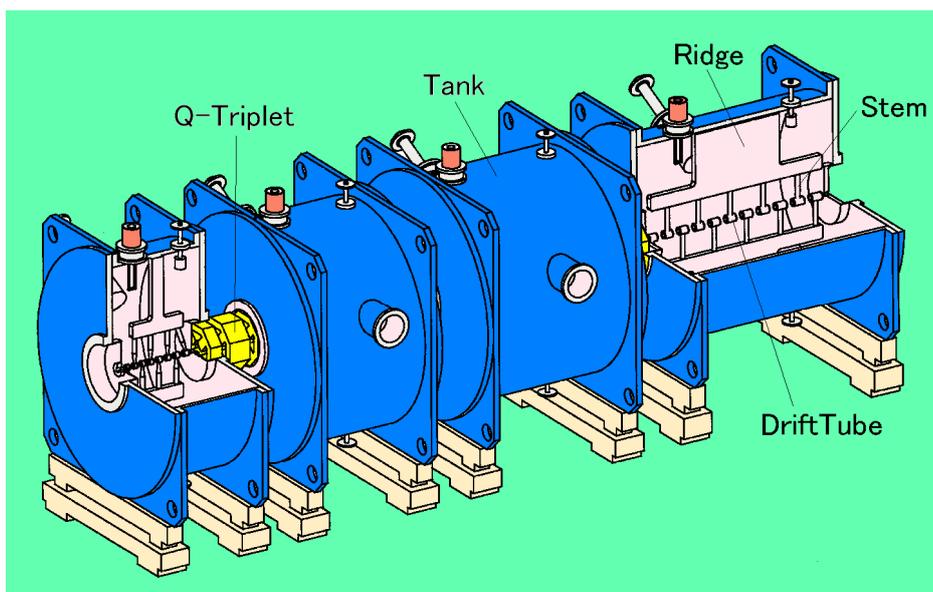


図3.1 : TRIAC-IHの構造。

### 3.1. IH-Linacのビーム光学

軸方向、横方向のビーム光学はIHリアックの構成、即ち、空洞タンクと空洞タンク間に置かれる四極電磁石によって決められる。そこで先ず、空洞タンク間に設置する横方向のビーム集束要素として、2連4極電磁石と3連4極電磁石のどちらを採用するか検討した。2連4極電磁石は3連4極電磁石と比較すると次のようになる。1) 3連4極電磁石ほど軸対称の良いビームは得られない、2) 4極電磁石を配置する空洞間の距離が短くなり軸方向の集束には有利である、3) 4極電磁石の使用台数が少なく製作、維持コストが抑えられる。2連4極電磁石は、1) の短所を持つが、横方向の十分なビーム集束が得られるので、ビーム光学上著しく不利な問題は無い。そこで、長所である2) と3) を重視して、2連4極電磁石を採用する事にした。2連4極電磁石（各磁石の磁極長はそれぞれ12 cm）

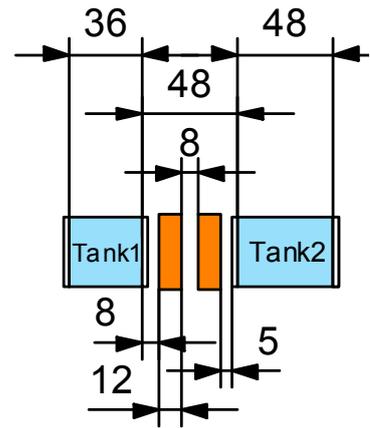


図3.2：2連4極電磁石の配置

は図3.2のように配置される。磁石の間隔を長くすると必要磁場は下げられるが、軸方向のビームの集束力は弱くなるので、両者の兼ね合いから8 cmと決められた。前述の様な考え方でギャップ電圧が指定された各空洞タンクのギャップ数は軸方向の集束が十分に得られるように第1タンクから順番に決められた。これによって加速ギャップや2連4極電磁石の配列が決められたので、粒子の横方向の運動を計算できる計算コードMAGIC<sup>[11]</sup>によって横方向の集束パラメータが求められた。これらのパラメータを使って最終的なビームシミュレーションが計算コードTRACEP<sup>[12]</sup>で行われた。

#### 3.1.1. 軸方向の集束

ビームの伝送効率を良くするには、空洞から出たバンチが2連4極電磁石を通過し次の空洞に入る時その空洞のセパトリックスの中にうまく納まるようにしなければならない。今の場合、空洞間に軸方向のエミッタンスを調整出来るリバンチャーは無いので、前の空洞のギャップ数を変えて次の空洞に入る軸方向エミッタンスを調整しなければならない。この作業を通して低エネルギー領域の各空洞のギャップ数が決められた。具体的には次の空洞での位相振幅が安定位相 $=-25^\circ$  から $\pm 25^\circ$  以内で出来るだけ小さくなるように前の空洞のギャップ数が決められた。この計算では計算コードTRACEPが使われた。計算で使われた軸方向の入射エミッタンスの大きさは図2.1で示されたRFQの射出ビームエミッタンスに合わせた正立楕円（横半径12 deg、縦半径0.05 MeV/q）から、IHの周波数がRFQの2倍、 $\text{MeV/q}=(1/8)\text{MeV/u}$ である事を考慮して $24 \times 0.00625 \pi \text{ deg} \cdot \text{MeV/u}$ であると換算された。入射エミッタンスの形状は、位相半径 $12^\circ$ 、エネルギー半径0.0125 MeV/uの正立楕円である。更に、軸方向の運動を集束用2連4極電磁石の設定誤差に影響されず簡単に計算するため、横方向のエミッタンスは設計値（規格化で $0.6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ）より十分小さい値（1/1000の値）が使われた。入口側の空洞のギャップ数ほど次の空洞の位相広がり大きな影響を与え、エネルギーが高くなるにつれその影響は小さくなる。ここでは、第1空洞から第6空洞までのギャップ数が最適化された。それ以降の空洞のギャップ数は位相広がり大きな影響を与えないので、最大ギャップ数15、最大空洞長1 mという制約の基で決められた。第1空洞のギャップ数による第2空洞（13ギャップ）での位相広がり様子（図3.3a）から、第1空洞の最適ギャップ数は16であるときめられた。次に、第2空洞のギャップ数による第3空洞

(13ギャップ)での位相広がり様子(図3.3b)から、第2空洞の最適ギャップ数は8と決められた。同様の作業(図3.3cから図3.3f)を繰り返し、第3空洞から第6空洞までの最適ギャップ数は12、12、13、14と決められた。ここでは、求める空洞の下流の空洞のギャップ数は全て13と仮置きされた。

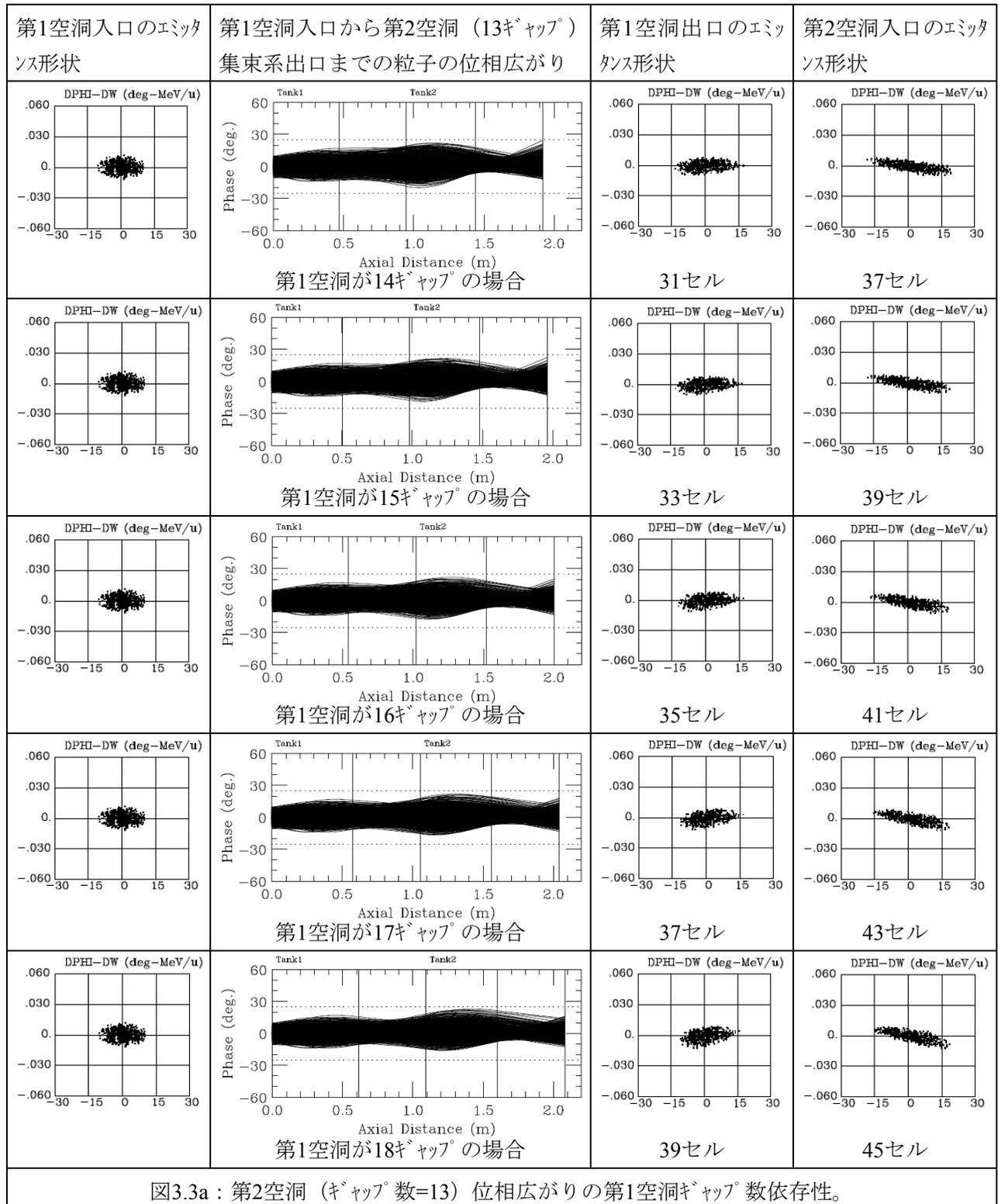
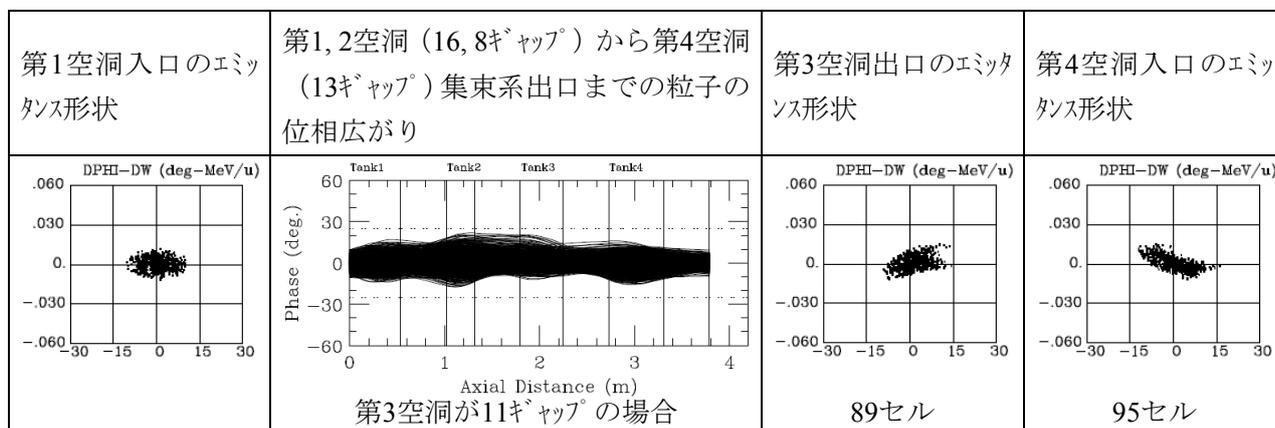
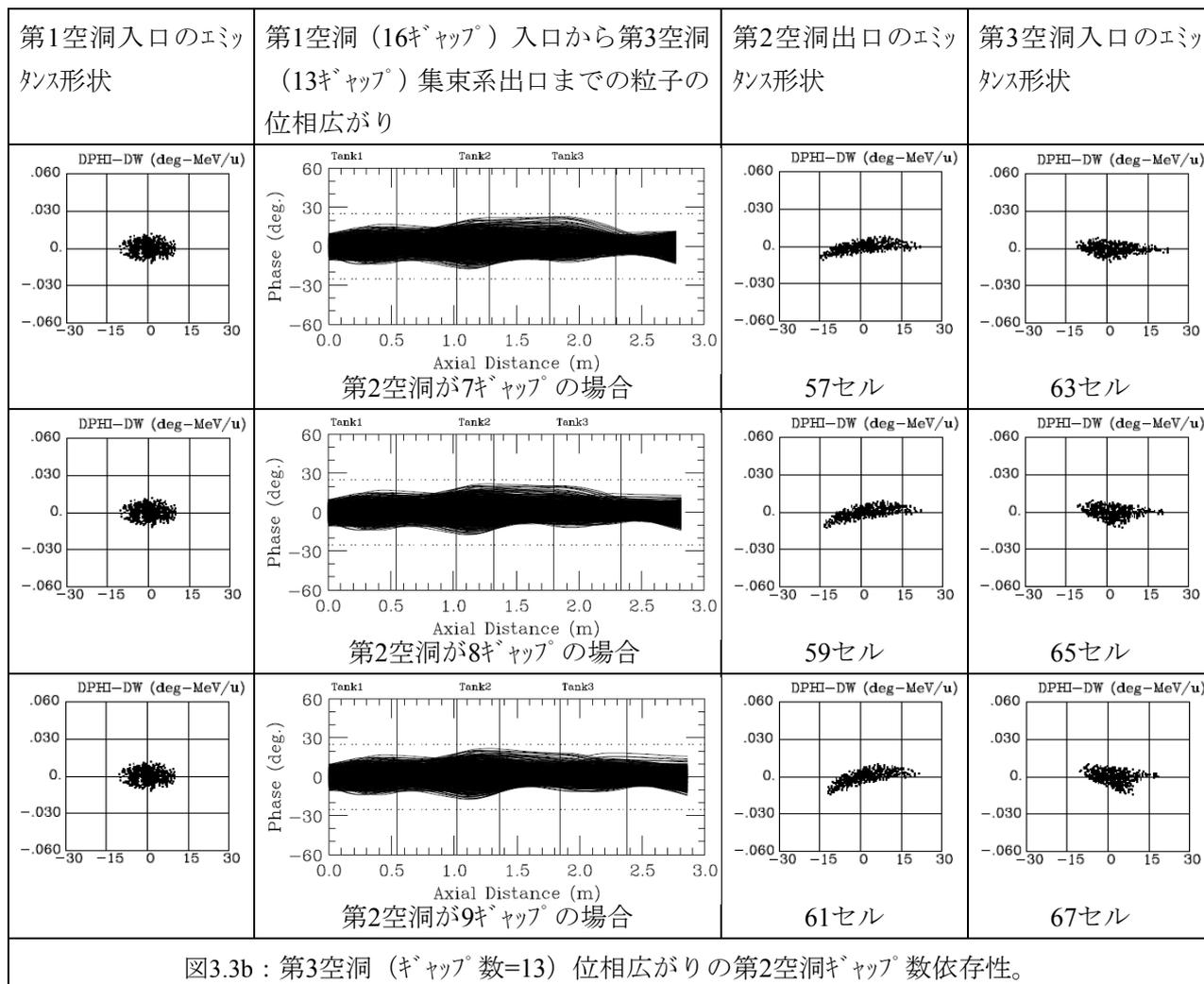


図3.3a : 第2空洞(ギャップ数=13)位相広がり第1空洞ギャップ数依存性。



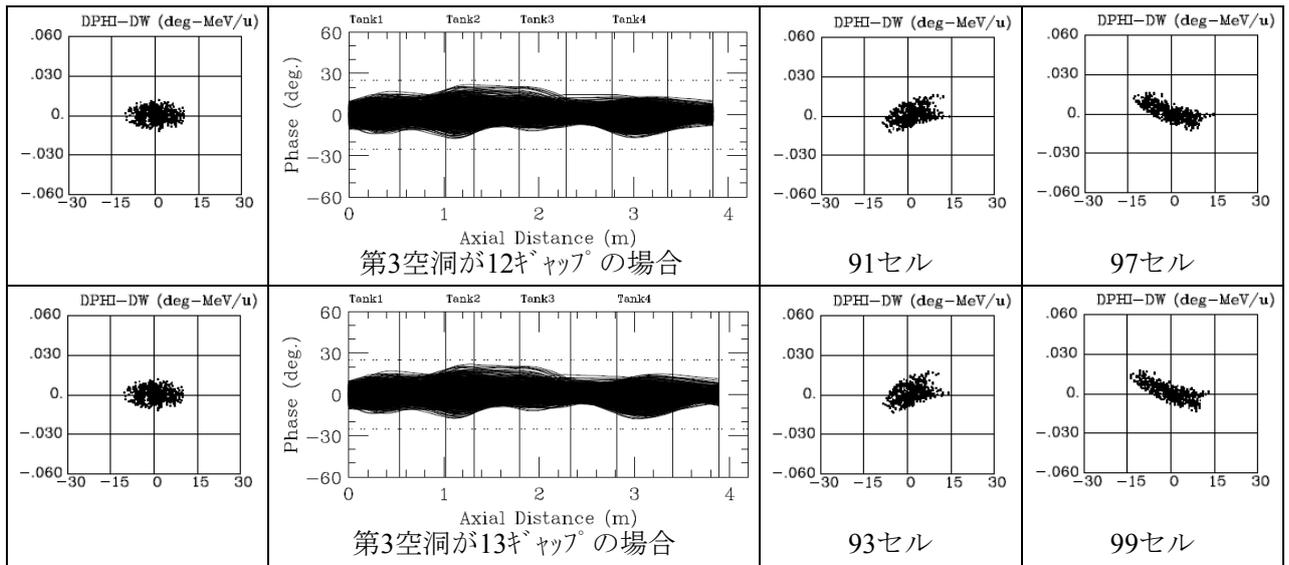


図3.3c : 第4空洞 (キギャップ数=13) 位相広がりの第3空洞キギャップ数依存性。

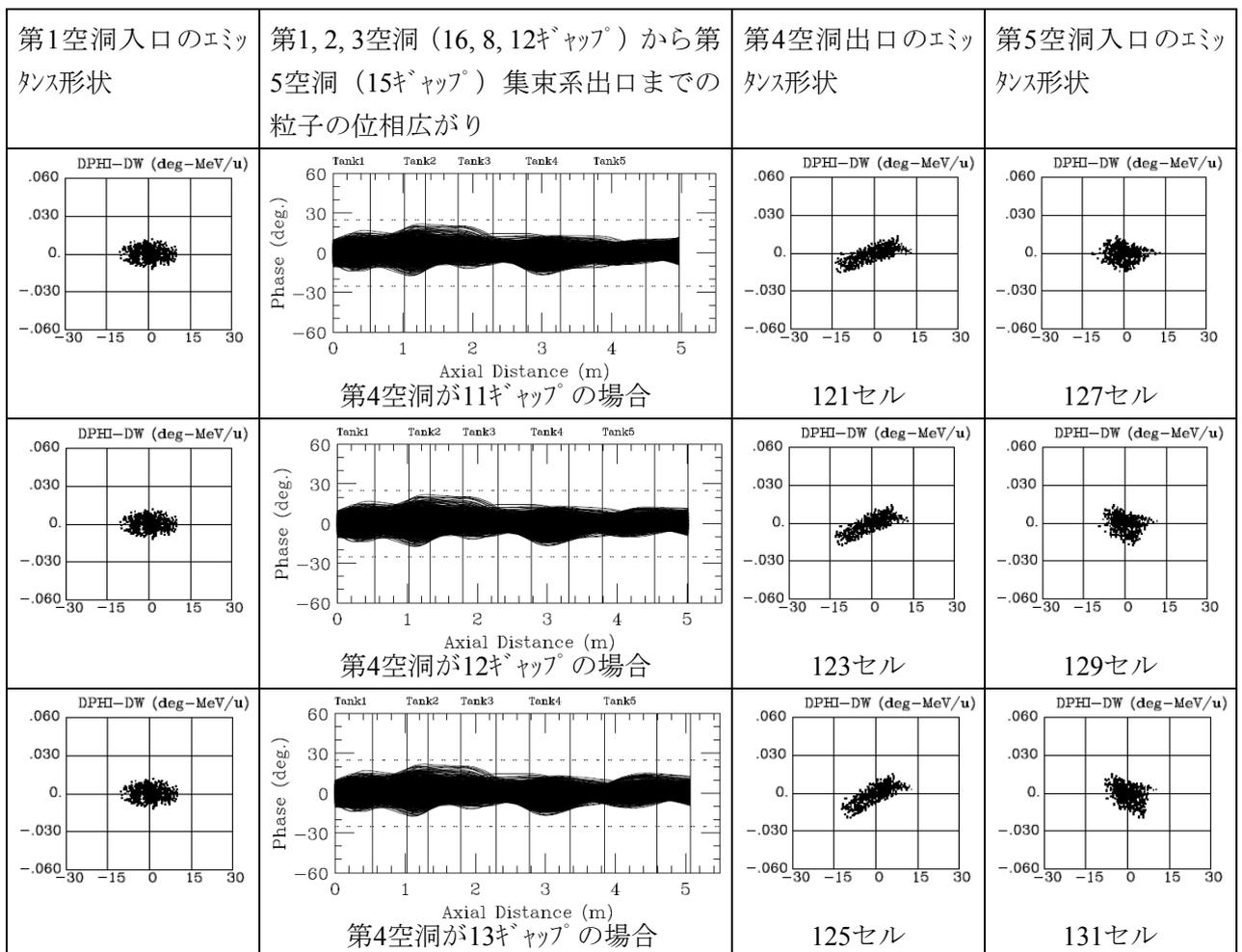
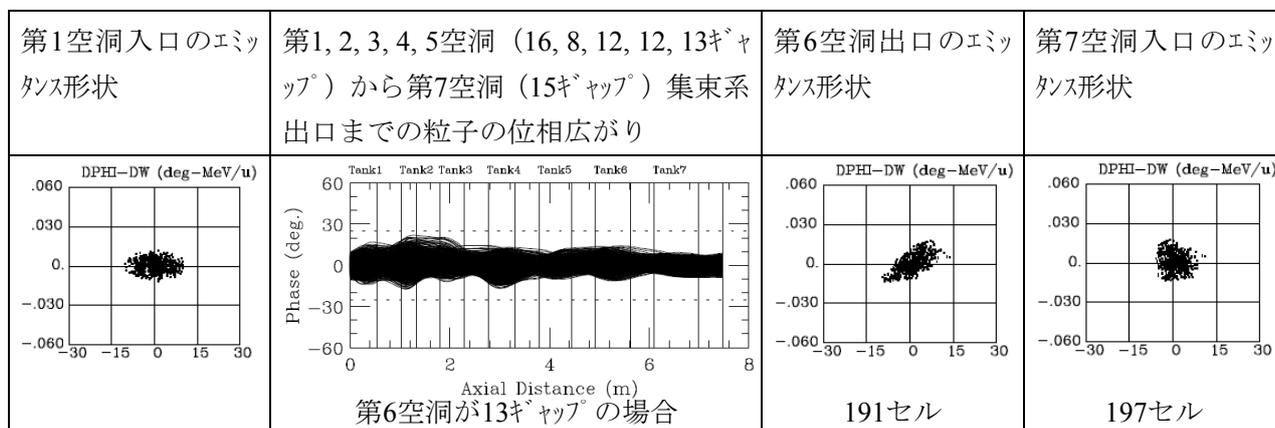
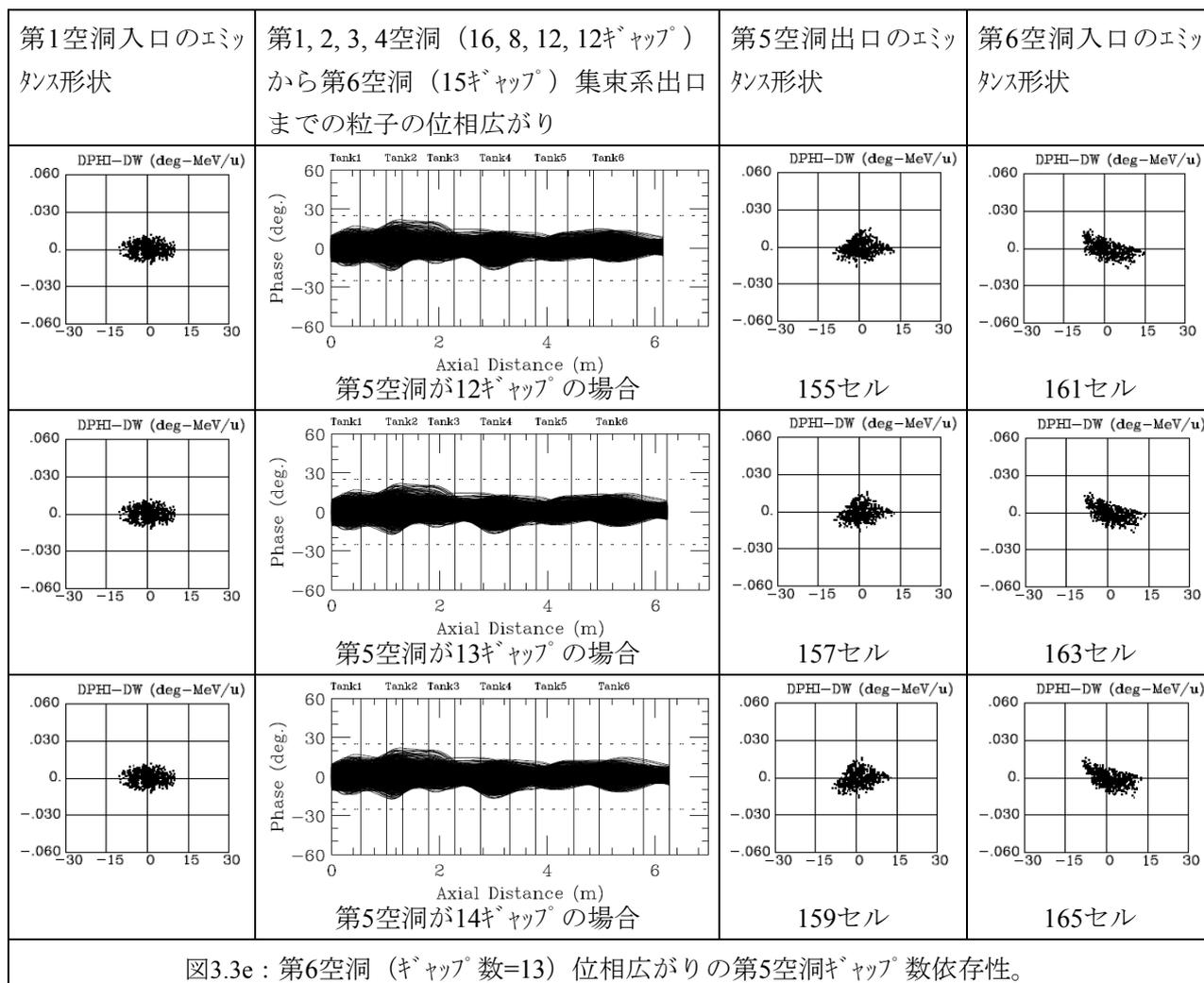
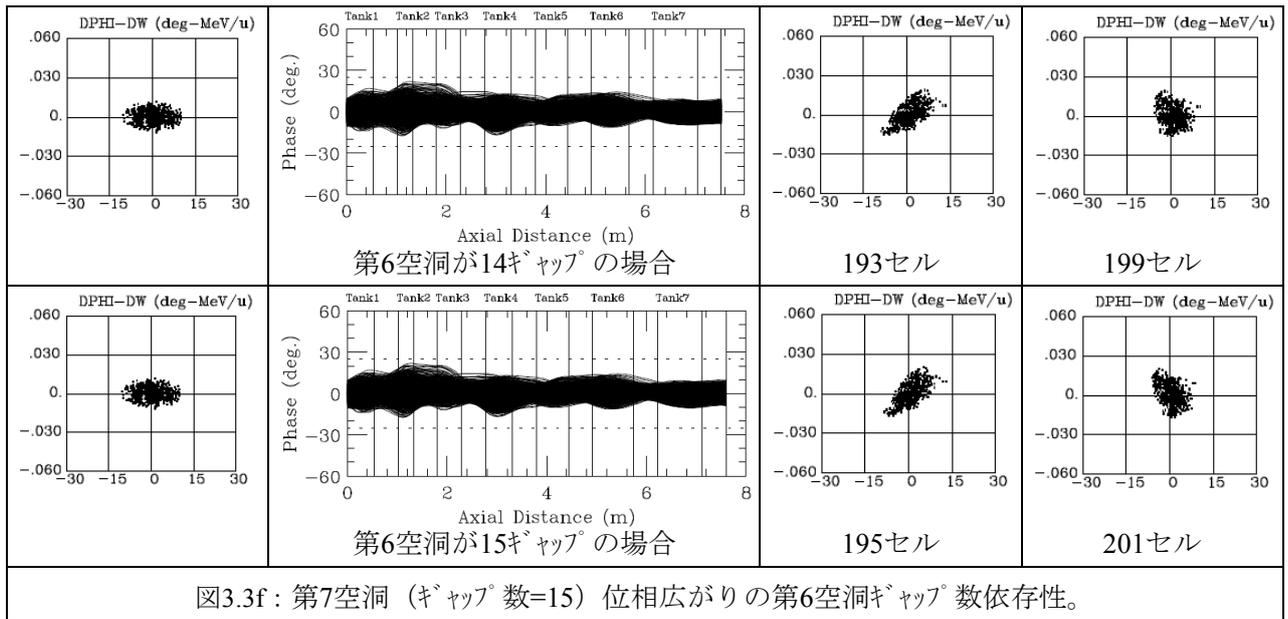
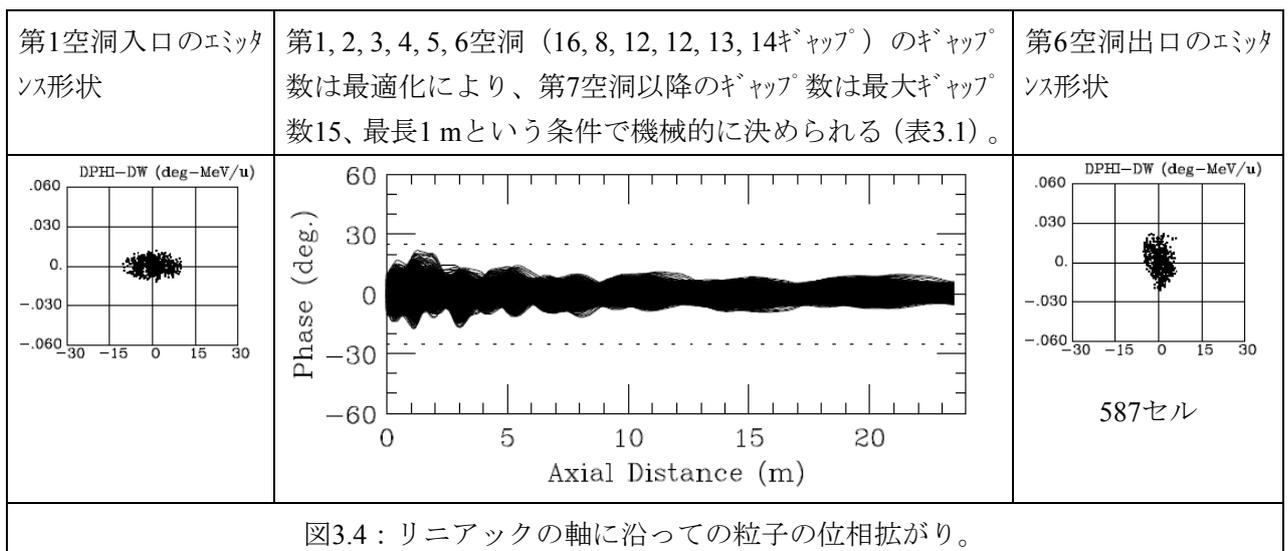


図3.3d : 第4空洞 (キギャップ数=13) 位相広がりの第3空洞キギャップ数依存性。





最終的なドリフトチューブパラメータは上記シミュレーションで使われた安定位相、ギャップ電圧、ギャップ長、開口半径、それに、シミュレーションで求められた最適ギャップ数を使って表3.1のように計算された。表3.1のドリフトチューブパラメータを使って計算したりニアック全体の位相広がり様子が図3.4に示されている。これを見ると、入口側の空洞部分で位相広がりが大きくなっているが、エネルギーの増大と共に位相広がりが減衰し滑らかになっていくのが分かる。



このように決められたギャップ数を持つIHドリフトチューブパラメータ (2<sup>nd</sup> version) が表3.1に示されている。表3.1のパラメータ記号の意味は次のとおりである。F: 周波数、Tin: 入射エネルギー、Q/A: 電荷質量数比、PHIs: 同期位相、NC: セル番号、T: エネルギー、VG: ギャップ電圧、EG: ギャップ電場、FK: キルパトリックファクター、TTF: トランジットタイムファクター、LG: ギャップ長、LD1: ギャップ前ドリフトチューブの半分の長さ、LD2: ギャップ後ドリフトチューブの半分の長さ、LC: セル長、TL: セル長の和、A: 開口半径、SDEL: 発散係数。セル長はLC=LD1+LG+LD2で表される。ドリフトチューブの外半径はA+肉厚 (5~8 mm) で与えられる。(ISACは最大表面電場14 MV/mで肉厚5 mm<sup>[13]</sup>)

表3.1: 2<sup>nd</sup> versionでの IHドリフトチューブパラメータ

DATE : 2015:06:10 TIME : 11:21:06  
LG=BETA\*LAMDA/4= 16. (mm)

IH-LINAC (PI-PI MODE)

F (MHz) = 158.000 Tin (MeV/u) = 0.500 Q/A = 0.125 PHIs (deg.) = -25.000

	NC	T (MEV/U)	VG (KV)	EG (MV/M)	FK	TTF	LG (M)	LD1 (M)	LD2 (M)	LC (M)	TL (M)	A (M)	SDEL
TANK 1													
1	0.50573	70.000	5.0000	0.37147	0.72226	0.01400	0.00855	0.00864	0.03118	0.03118	0.01000	-0.13489	
2	0.51722	140.000	10.0000	0.74293	0.72483	0.01400	0.00864	0.00881	0.03145	0.06263	0.01000	-0.26616	
3	0.52880	140.000	10.0000	0.74293	0.72985	0.01400	0.00881	0.00899	0.03180	0.09443	0.01000	-0.25911	
4	0.54045	140.000	10.0000	0.74293	0.73472	0.01400	0.00899	0.00916	0.03215	0.12658	0.01000	-0.25233	
5	0.55218	140.000	10.0000	0.74293	0.73945	0.01400	0.00916	0.00934	0.03250	0.15908	0.01000	-0.24578	
6	0.56398	140.000	10.0000	0.74293	0.74404	0.01400	0.00934	0.00951	0.03285	0.19193	0.01000	-0.23947	
7	0.57585	140.000	10.0000	0.74293	0.74850	0.01400	0.00951	0.00968	0.03319	0.22512	0.01000	-0.23339	
8	0.58779	140.000	10.0000	0.74293	0.75284	0.01400	0.00968	0.00986	0.03354	0.25866	0.01000	-0.22752	
9	0.59980	140.000	10.0000	0.74293	0.75705	0.01400	0.00986	0.01003	0.03388	0.29254	0.01000	-0.22186	
10	0.61187	140.000	10.0000	0.74293	0.76115	0.01400	0.01003	0.01020	0.03422	0.32676	0.01000	-0.21639	
11	0.62401	140.000	10.0000	0.74293	0.76513	0.01400	0.01020	0.01037	0.03456	0.36133	0.01000	-0.21112	
12	0.63620	140.000	10.0000	0.74293	0.76900	0.01400	0.01037	0.01053	0.03490	0.39623	0.01000	-0.20603	
13	0.64846	140.000	10.0000	0.74293	0.77276	0.01400	0.01053	0.01070	0.03524	0.43147	0.01000	-0.20111	
14	0.66077	140.000	10.0000	0.74293	0.77642	0.01400	0.01070	0.01087	0.03557	0.46704	0.01000	-0.19637	
15	0.67315	140.000	10.0000	0.74293	0.77998	0.01400	0.01087	0.01104	0.03591	0.50295	0.01000	-0.19178	
16	0.67936	70.000	5.0000	0.37147	0.78345	0.01400	0.01104	0.01112	0.03616	0.53910	0.01000	-0.09367	
TANK 2													
1	0.68649	90.000	5.0000	0.37147	0.69922	0.01800	0.00912	0.00921	0.03633	0.03633	0.01200	-0.10602	
2	0.70080	180.000	10.0000	0.74293	0.70173	0.01800	0.00921	0.00940	0.03662	0.07295	0.01200	-0.20949	
3	0.71521	180.000	10.0000	0.74293	0.70664	0.01800	0.00940	0.00959	0.03699	0.10994	0.01200	-0.20453	
4	0.72971	180.000	10.0000	0.74293	0.71143	0.01800	0.00959	0.00978	0.03737	0.14731	0.01200	-0.19972	
5	0.74432	180.000	10.0000	0.74293	0.71610	0.01800	0.00978	0.00996	0.03774	0.18505	0.01200	-0.19507	
6	0.75901	180.000	10.0000	0.74293	0.72065	0.01800	0.00996	0.01015	0.03812	0.22317	0.01200	-0.19056	
7	0.77380	180.000	10.0000	0.74293	0.72508	0.01800	0.01015	0.01034	0.03849	0.26166	0.01200	-0.18619	
8	0.78123	90.000	5.0000	0.37147	0.72940	0.01800	0.01034	0.01043	0.03876	0.30042	0.01200	-0.09098	
TANK 3													
1	0.78876	100.000	5.0000	0.37147	0.66418	0.02000	0.00943	0.00952	0.03895	0.03895	0.01400	-0.09074	
2	0.80386	200.000	10.0000	0.74293	0.66667	0.02000	0.00952	0.00971	0.03923	0.07818	0.01400	-0.17956	
3	0.81908	200.000	10.0000	0.74293	0.67155	0.02000	0.00971	0.00989	0.03960	0.11778	0.01400	-0.17580	
4	0.83440	200.000	10.0000	0.74293	0.67633	0.02000	0.00989	0.01008	0.03997	0.15775	0.01400	-0.17214	
5	0.84983	200.000	10.0000	0.74293	0.68100	0.02000	0.01008	0.01026	0.04034	0.19809	0.01400	-0.16858	
6	0.86537	200.000	10.0000	0.74293	0.68557	0.02000	0.01026	0.01045	0.04071	0.23880	0.01400	-0.16511	
7	0.88100	200.000	10.0000	0.74293	0.69004	0.02000	0.01045	0.01063	0.04108	0.27988	0.01400	-0.16173	
8	0.89674	200.000	10.0000	0.74293	0.69442	0.02000	0.01063	0.01081	0.04144	0.32132	0.01400	-0.15845	
9	0.91257	200.000	10.0000	0.74293	0.69870	0.02000	0.01081	0.01100	0.04181	0.36313	0.01400	-0.15525	
10	0.92849	200.000	10.0000	0.74293	0.70289	0.02000	0.01100	0.01118	0.04217	0.40531	0.01400	-0.15213	
11	0.94451	200.000	10.0000	0.74293	0.70699	0.02000	0.01118	0.01136	0.04254	0.44785	0.01400	-0.14910	
12	0.95257	100.000	5.0000	0.37147	0.71101	0.02000	0.01136	0.01145	0.04281	0.49066	0.01400	-0.07307	
TANK 4													
1	0.96099	110.000	5.0000	0.37147	0.67563	0.02200	0.01045	0.01055	0.04300	0.04300	0.01500	-0.07542	
2	0.97788	220.000	10.0000	0.74293	0.67786	0.02200	0.01055	0.01073	0.04328	0.08627	0.01500	-0.14934	
3	0.99489	220.000	10.0000	0.74293	0.68225	0.02200	0.01073	0.01092	0.04365	0.12993	0.01500	-0.14643	
4	1.01200	220.000	10.0000	0.74293	0.68655	0.02200	0.01092	0.01111	0.04403	0.17396	0.01500	-0.14359	
5	1.02921	220.000	10.0000	0.74293	0.69076	0.02200	0.01111	0.01130	0.04440	0.21836	0.01500	-0.14083	
6	1.04653	220.000	10.0000	0.74293	0.69488	0.02200	0.01130	0.01148	0.04478	0.26314	0.01500	-0.13813	
7	1.06395	220.000	10.0000	0.74293	0.69892	0.02200	0.01148	0.01167	0.04515	0.30829	0.01500	-0.13550	
8	1.08147	220.000	10.0000	0.74293	0.70288	0.02200	0.01167	0.01185	0.04552	0.35381	0.01500	-0.13293	
9	1.09908	220.000	10.0000	0.74293	0.70675	0.02200	0.01185	0.01204	0.04589	0.39971	0.01500	-0.13043	
10	1.11679	220.000	10.0000	0.74293	0.71055	0.02200	0.01204	0.01222	0.04626	0.44597	0.01500	-0.12799	
11	1.13460	220.000	10.0000	0.74293	0.71427	0.02200	0.01222	0.01241	0.04663	0.49260	0.01500	-0.12562	
12	1.14354	110.000	5.0000	0.37147	0.71792	0.02200	0.01241	0.01250	0.04691	0.53951	0.01500	-0.06165	

TANK 5												
1	1.15375	125.000	5.0000	0.37147	0.72094	0.02500	0.01100	0.01110	0.04710	0.04710	0.01400	-0.06953
2	1.17423	250.000	10.0000	0.74293	0.72298	0.02500	0.01110	0.01131	0.04742	0.09452	0.01400	-0.13760
3	1.19482	250.000	10.0000	0.74293	0.72699	0.02500	0.01131	0.01152	0.04783	0.14235	0.01400	-0.13476
4	1.21552	250.000	10.0000	0.74293	0.73090	0.02500	0.01152	0.01173	0.04825	0.19060	0.01400	-0.13200
5	1.23633	250.000	10.0000	0.74293	0.73473	0.02500	0.01173	0.01193	0.04866	0.23925	0.01400	-0.12932
6	1.25724	250.000	10.0000	0.74293	0.73847	0.02500	0.01193	0.01214	0.04907	0.28832	0.01400	-0.12671
7	1.27826	250.000	10.0000	0.74293	0.74212	0.02500	0.01214	0.01234	0.04948	0.33780	0.01400	-0.12417
8	1.29938	250.000	10.0000	0.74293	0.74569	0.02500	0.01234	0.01255	0.04989	0.38769	0.01400	-0.12170
9	1.32060	250.000	10.0000	0.74293	0.74918	0.02500	0.01255	0.01275	0.05030	0.43799	0.01400	-0.11931
10	1.34191	250.000	10.0000	0.74293	0.75259	0.02500	0.01275	0.01295	0.05070	0.48869	0.01400	-0.11697
11	1.36332	250.000	10.0000	0.74293	0.75592	0.02500	0.01295	0.01315	0.05111	0.53979	0.01400	-0.11470
12	1.38482	250.000	10.0000	0.74293	0.75918	0.02500	0.01315	0.01335	0.05151	0.59130	0.01400	-0.11250
13	1.39562	125.000	5.0000	0.37147	0.76237	0.02500	0.01335	0.01346	0.05181	0.64311	0.01400	-0.05517
TANK 6												
1	1.40644	125.000	5.0000	0.37147	0.76393	0.02500	0.01346	0.01356	0.05201	0.05201	0.01400	-0.05465
2	1.42812	250.000	10.0000	0.74293	0.76549	0.02500	0.01356	0.01375	0.05231	0.10432	0.01400	-0.10826
3	1.44988	250.000	10.0000	0.74293	0.76853	0.02500	0.01375	0.01395	0.05271	0.15703	0.01400	-0.10622
4	1.47174	250.000	10.0000	0.74293	0.77152	0.02500	0.01395	0.01415	0.05311	0.21014	0.01400	-0.10424
5	1.49367	250.000	10.0000	0.74293	0.77443	0.02500	0.01415	0.01435	0.05350	0.26364	0.01400	-0.10232
6	1.51568	250.000	10.0000	0.74293	0.77729	0.02500	0.01435	0.01455	0.05390	0.31753	0.01400	-0.10044
7	1.53778	250.000	10.0000	0.74293	0.78008	0.02500	0.01455	0.01474	0.05429	0.37182	0.01400	-0.09861
8	1.55995	250.000	10.0000	0.74293	0.78282	0.02500	0.01474	0.01494	0.05468	0.42650	0.01400	-0.09683
9	1.58220	250.000	10.0000	0.74293	0.78549	0.02500	0.01494	0.01513	0.05507	0.48157	0.01400	-0.09510
10	1.60452	250.000	10.0000	0.74293	0.78811	0.02500	0.01513	0.01533	0.05546	0.53702	0.01400	-0.09341
11	1.62691	250.000	10.0000	0.74293	0.79068	0.02500	0.01533	0.01552	0.05584	0.59287	0.01400	-0.09177
12	1.64937	250.000	10.0000	0.74293	0.79319	0.02500	0.01552	0.01571	0.05623	0.64910	0.01400	-0.09017
13	1.67191	250.000	10.0000	0.74293	0.79565	0.02500	0.01571	0.01590	0.05661	0.70571	0.01400	-0.08861
14	1.68321	125.000	5.0000	0.37147	0.79806	0.02500	0.01590	0.01600	0.05690	0.76261	0.01400	-0.04354
TANK 7												
1	1.69453	125.000	5.0000	0.37147	0.79925	0.02500	0.01600	0.01609	0.05709	0.05709	0.01400	-0.04317
2	1.71720	250.000	10.0000	0.74293	0.80042	0.02500	0.01609	0.01628	0.05738	0.11447	0.01400	-0.08560
3	1.73993	250.000	10.0000	0.74293	0.80274	0.02500	0.01628	0.01647	0.05776	0.17222	0.01400	-0.08415
4	1.76273	250.000	10.0000	0.74293	0.80500	0.02500	0.01647	0.01666	0.05813	0.23036	0.01400	-0.08274
5	1.78560	250.000	10.0000	0.74293	0.80722	0.02500	0.01666	0.01685	0.05851	0.28887	0.01400	-0.08137
6	1.80852	250.000	10.0000	0.74293	0.80940	0.02500	0.01685	0.01704	0.05889	0.34775	0.01400	-0.08002
7	1.83150	250.000	10.0000	0.74293	0.81153	0.02500	0.01704	0.01722	0.05926	0.40701	0.01400	-0.07872
8	1.85455	250.000	10.0000	0.74293	0.81362	0.02500	0.01722	0.01741	0.05963	0.46664	0.01400	-0.07744
9	1.87765	250.000	10.0000	0.74293	0.81568	0.02500	0.01741	0.01759	0.06000	0.52665	0.01400	-0.07619
10	1.90081	250.000	10.0000	0.74293	0.81769	0.02500	0.01759	0.01778	0.06037	0.58702	0.01400	-0.07497
11	1.92402	250.000	10.0000	0.74293	0.81966	0.02500	0.01778	0.01796	0.06074	0.64776	0.01400	-0.07379
12	1.94729	250.000	10.0000	0.74293	0.82160	0.02500	0.01796	0.01815	0.06111	0.70887	0.01400	-0.07263
13	1.97061	250.000	10.0000	0.74293	0.82349	0.02500	0.01815	0.01833	0.06147	0.77034	0.01400	-0.07149
14	1.99399	250.000	10.0000	0.74293	0.82536	0.02500	0.01833	0.01851	0.06184	0.83218	0.01400	-0.07039
15	2.00570	125.000	5.0000	0.37147	0.82718	0.02500	0.01851	0.01860	0.06211	0.89429	0.01400	-0.03465
TANK 8												
1	2.01743	125.000	5.0000	0.37147	0.82809	0.02500	0.01860	0.01869	0.06229	0.06229	0.01400	-0.03439
2	2.04091	250.000	10.0000	0.74293	0.82898	0.02500	0.01869	0.01887	0.06256	0.12485	0.01400	-0.06825
3	2.06444	250.000	10.0000	0.74293	0.83074	0.02500	0.01887	0.01905	0.06292	0.18777	0.01400	-0.06722
4	2.08801	250.000	10.0000	0.74293	0.83247	0.02500	0.01905	0.01923	0.06328	0.25105	0.01400	-0.06621
5	2.11164	250.000	10.0000	0.74293	0.83417	0.02500	0.01923	0.01941	0.06364	0.31469	0.01400	-0.06523
6	2.13531	250.000	10.0000	0.74293	0.83583	0.02500	0.01941	0.01959	0.06399	0.37869	0.01400	-0.06426
7	2.15903	250.000	10.0000	0.74293	0.83747	0.02500	0.01959	0.01976	0.06435	0.44303	0.01400	-0.06332
8	2.18280	250.000	10.0000	0.74293	0.83907	0.02500	0.01976	0.01994	0.06470	0.50774	0.01400	-0.06240
9	2.20660	250.000	10.0000	0.74293	0.84065	0.02500	0.01994	0.02012	0.06505	0.57279	0.01400	-0.06150
10	2.23046	250.000	10.0000	0.74293	0.84220	0.02500	0.02012	0.02029	0.06541	0.63820	0.01400	-0.06062
11	2.25435	250.000	10.0000	0.74293	0.84373	0.02500	0.02029	0.02046	0.06576	0.70395	0.01400	-0.05976
12	2.27829	250.000	10.0000	0.74293	0.84522	0.02500	0.02046	0.02064	0.06610	0.77006	0.01400	-0.05892
13	2.30227	250.000	10.0000	0.74293	0.84670	0.02500	0.02064	0.02081	0.06645	0.83651	0.01400	-0.05809
14	2.32629	250.000	10.0000	0.74293	0.84814	0.02500	0.02081	0.02098	0.06680	0.90330	0.01400	-0.05728
15	2.33832	125.000	5.0000	0.37147	0.84956	0.02500	0.02098	0.02107	0.06706	0.97036	0.01400	-0.02825
TANK 9												
1	2.35037	125.000	5.0000	0.37147	0.85026	0.02500	0.02107	0.02116	0.06723	0.06723	0.01400	-0.02805
2	2.37447	250.000	10.0000	0.74293	0.85096	0.02500	0.02116	0.02133	0.06749	0.13471	0.01400	-0.05572
3	2.39861	250.000	10.0000	0.74293	0.85233	0.02500	0.02133	0.02150	0.06783	0.20254	0.01400	-0.05496
4	2.42278	250.000	10.0000	0.74293	0.85368	0.02500	0.02150	0.02167	0.06817	0.27071	0.01400	-0.05422
5	2.44700	250.000	10.0000	0.74293	0.85501	0.02500	0.02167	0.02184	0.06851	0.33922	0.01400	-0.05349
6	2.47125	250.000	10.0000	0.74293	0.85632	0.02500	0.02184	0.02201	0.06885	0.40807	0.01400	-0.05278
7	2.49554	250.000	10.0000	0.74293	0.85760	0.02500	0.02201	0.02218	0.06919	0.47725	0.01400	-0.05209
8	2.51987	250.000	10.0000	0.74293	0.85887	0.02500	0.02218	0.02234	0.06952	0.54677	0.01400	-0.05140
9	2.54423	250.000	10.0000	0.74293	0.86011	0.02500	0.02234	0.02251	0.06986	0.61663	0.01400	-0.05074
10	2.56862	250.000	10.0000	0.74293	0.86133	0.02500	0.02251	0.02268	0.07019	0.68682	0.01400	-0.05008
11	2.59305	250.000	10.0000	0.74293	0.86254	0.02500	0.02268	0.02284	0.07052	0.75734	0.01400	-0.04944
12	2.61751	250.000	10.0000	0.74293	0.86372	0.02500	0.02284	0.02301	0.07086	0.82820	0.01400	-0.04881
13	2.64201	250.000	10.0000	0.74293	0.86489	0.02500	0.02301	0.02318	0.07119	0.89939	0.01400	-0.04819
14	2.65427	125.000	5.0000	0.37147	0.86603	0.02500	0.02318	0.02326	0.07143	0.97082	0.01400	-0.02379
TANK 10												
1	2.66654	125.000	5.0000	0.37147	0.86660	0.02500	0.02326	0.02334	0.07160	0.07160	0.01400	-0.02364
2	2.69110	250.000	10.0000	0.74293	0.86716	0.02500	0.02334	0.02350	0.07184	0.14344	0.01400	-0.04699
3	2.71570	250.000	10.0000	0.74293	0.86827	0.02500	0.02350	0.02367	0.07217	0.21561	0.01400	-0.04641
4	2.74032	250.000	10.0000	0.74293	0.86937	0.02500	0.02367	0.02383	0.07250	0.28811	0.01400	-0.04584
5	2.76497	250.000	10.0000	0.74293	0.87045	0.02500	0.02383	0.02399	0.07282	0.36094	0.01400	-0.04528
6	2.78965	250.000	10.0000	0.74293	0.87151	0.02500	0.02399	0.02415	0.07315	0.43408	0.01400	-0.04473
7	2.81437	250.000	10.0000	0.74293	0.87256	0.02500	0.02415	0.02432	0.07347	0.50755	0.01400	-0.04419
8	2.83911	250.000	10.0000	0.74293	0.87358	0.02500	0.02432	0.02448	0.07379	0.58135	0	

	9	2. 86388	250.000	10.0000	0. 74293	0. 87460	0. 02500	0. 02448	0. 02464	0. 07411	0. 65546	0. 01400	-0. 04314
	10	2. 88868	250.000	10.0000	0. 74293	0. 87560	0. 02500	0. 02464	0. 02480	0. 07443	0. 72989	0. 01400	-0. 04263
	11	2. 91351	250.000	10.0000	0. 74293	0. 87658	0. 02500	0. 02480	0. 02496	0. 07475	0. 80465	0. 01400	-0. 04213
	12	2. 93836	250.000	10.0000	0. 74293	0. 87755	0. 02500	0. 02496	0. 02511	0. 07507	0. 87972	0. 01400	-0. 04164
	13	2. 95080	125.000	5.0000	0. 37147	0. 87851	0. 02500	0. 02511	0. 02519	0. 07531	0. 95502	0. 01400	-0. 02058
TANK 11	1	2. 96325	125.000	5.0000	0. 37147	0. 87898	0. 02500	0. 02519	0. 02527	0. 07547	0. 07547	0. 01400	-0. 02046
	2	2. 98816	250.000	10.0000	0. 74293	0. 87945	0. 02500	0. 02527	0. 02543	0. 07570	0. 15117	0. 01400	-0. 04068
	3	3. 01309	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88038	0. 02500	0. 02543	0. 02559	0. 07602	0. 22719	0. 01400	-0. 04022
	4	3. 03805	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88130	0. 02500	0. 02559	0. 02574	0. 07633	0. 30352	0. 01400	-0. 03976
	5	3. 06304	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88220	0. 02500	0. 02574	0. 02590	0. 07664	0. 38016	0. 01400	-0. 03931
	6	3. 08805	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88309	0. 02500	0. 02590	0. 02606	0. 07696	0. 45712	0. 01400	-0. 03887
	7	3. 11308	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88397	0. 02500	0. 02606	0. 02621	0. 07727	0. 53439	0. 01400	-0. 03844
	8	3. 13814	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88483	0. 02500	0. 02621	0. 02637	0. 07758	0. 61196	0. 01400	-0. 03802
	9	3. 16323	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88568	0. 02500	0. 02637	0. 02652	0. 07789	0. 68985	0. 01400	-0. 03760
	10	3. 18834	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88652	0. 02500	0. 02652	0. 02667	0. 07819	0. 76804	0. 01400	-0. 03719
	11	3. 21347	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88735	0. 02500	0. 02667	0. 02683	0. 07850	0. 84654	0. 01400	-0. 03678
	12	3. 23862	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88817	0. 02500	0. 02683	0. 02698	0. 07881	0. 92535	0. 01400	-0. 03639
	13	3. 25121	125.000	5.0000	0. 37147	0. 88898	0. 02500	0. 02698	0. 02706	0. 07904	1. 00439	0. 01400	-0. 01800
TANK 12	1	3. 26381	125.000	5.0000	0. 37147	0. 88938	0. 02500	0. 02706	0. 02713	0. 07919	0. 07919	0. 01400	-0. 01790
	2	3. 28901	250.000	10.0000	0. 74293	0. 88977	0. 02500	0. 02713	0. 02728	0. 07942	0. 15861	0. 01400	-0. 03561
	3	3. 31423	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89056	0. 02500	0. 02728	0. 02744	0. 07972	0. 23833	0. 01400	-0. 03524
	4	3. 33947	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89133	0. 02500	0. 02744	0. 02759	0. 08002	0. 31835	0. 01400	-0. 03486
	5	3. 36474	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89210	0. 02500	0. 02759	0. 02774	0. 08032	0. 39867	0. 01400	-0. 03450
	6	3. 39003	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89285	0. 02500	0. 02774	0. 02789	0. 08062	0. 47930	0. 01400	-0. 03414
	7	3. 41533	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89360	0. 02500	0. 02789	0. 02804	0. 08092	0. 56022	0. 01400	-0. 03379
	8	3. 44066	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89433	0. 02500	0. 02804	0. 02819	0. 08122	0. 64145	0. 01400	-0. 03344
	9	3. 46601	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89506	0. 02500	0. 02819	0. 02834	0. 08152	0. 72297	0. 01400	-0. 03310
	10	3. 49138	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89577	0. 02500	0. 02834	0. 02848	0. 08182	0. 80479	0. 01400	-0. 03276
	11	3. 51677	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89648	0. 02500	0. 02848	0. 02863	0. 08211	0. 88690	0. 01400	-0. 03243
	12	3. 52948	125.000	5.0000	0. 37147	0. 89718	0. 02500	0. 02863	0. 02871	0. 08234	0. 96924	0. 01400	-0. 01605
TANK 13	1	3. 54219	125.000	5.0000	0. 37147	0. 89752	0. 02500	0. 02871	0. 02878	0. 08248	0. 08248	0. 01400	-0. 01597
	2	3. 56762	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89787	0. 02500	0. 02878	0. 02893	0. 08270	0. 16519	0. 01400	-0. 03179
	3	3. 59307	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89855	0. 02500	0. 02893	0. 02907	0. 08300	0. 24819	0. 01400	-0. 03147
	4	3. 61854	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89922	0. 02500	0. 02907	0. 02922	0. 08329	0. 33148	0. 01400	-0. 03116
	5	3. 64402	250.000	10.0000	0. 74293	0. 89988	0. 02500	0. 02922	0. 02936	0. 08358	0. 41506	0. 01400	-0. 03086
	6	3. 66953	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90054	0. 02500	0. 02936	0. 02951	0. 08387	0. 49894	0. 01400	-0. 03056
	7	3. 69505	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90118	0. 02500	0. 02951	0. 02965	0. 08416	0. 58310	0. 01400	-0. 03026
	8	3. 72059	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90182	0. 02500	0. 02965	0. 02980	0. 08445	0. 66756	0. 01400	-0. 02997
	9	3. 74615	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90246	0. 02500	0. 02980	0. 02994	0. 08474	0. 75230	0. 01400	-0. 02968
	10	3. 77173	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90308	0. 02500	0. 02994	0. 03009	0. 08503	0. 83733	0. 01400	-0. 02940
	11	3. 79732	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90369	0. 02500	0. 03009	0. 03023	0. 08532	0. 92265	0. 01400	-0. 02912
	12	3. 81013	125.000	5.0000	0. 37147	0. 90430	0. 02500	0. 03023	0. 03030	0. 08553	1. 00818	0. 01400	-0. 01442
TANK 14	1	3. 82294	125.000	5.0000	0. 37147	0. 90460	0. 02500	0. 03030	0. 03037	0. 08568	0. 08568	0. 01400	-0. 01435
	2	3. 84857	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90490	0. 02500	0. 03037	0. 03052	0. 08589	0. 17157	0. 01400	-0. 02857
	3	3. 87421	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90550	0. 02500	0. 03052	0. 03066	0. 08618	0. 25774	0. 01400	-0. 02831
	4	3. 89988	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90609	0. 02500	0. 03066	0. 03080	0. 08646	0. 34420	0. 01400	-0. 02805
	5	3. 92556	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90667	0. 02500	0. 03080	0. 03094	0. 08674	0. 43094	0. 01400	-0. 02779
	6	3. 95125	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90724	0. 02500	0. 03094	0. 03108	0. 08702	0. 51797	0. 01400	-0. 02753
	7	3. 97696	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90781	0. 02500	0. 03108	0. 03122	0. 08731	0. 60527	0. 01400	-0. 02728
	8	4. 00269	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90837	0. 02500	0. 03122	0. 03136	0. 08759	0. 69286	0. 01400	-0. 02703
	9	4. 02843	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90892	0. 02500	0. 03136	0. 03150	0. 08787	0. 78073	0. 01400	-0. 02679
	10	4. 05419	250.000	10.0000	0. 74293	0. 90947	0. 02500	0. 03150	0. 03164	0. 08815	0. 86888	0. 01400	-0. 02655
	11	4. 06708	125.000	5.0000	0. 37147	0. 91001	0. 02500	0. 03164	0. 03171	0. 08836	0. 95723	0. 01400	-0. 01316
TANK 15	1	4. 07997	125.000	5.0000	0. 37147	0. 91028	0. 02500	0. 03171	0. 03178	0. 08850	0. 08850	0. 01400	-0. 01310
	2	4. 10575	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91054	0. 02500	0. 03178	0. 03192	0. 08870	0. 17720	0. 01400	-0. 02608
	3	4. 13156	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91107	0. 02500	0. 03192	0. 03206	0. 08898	0. 26618	0. 01400	-0. 02585
	4	4. 15738	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91159	0. 02500	0. 03206	0. 03220	0. 08926	0. 35544	0. 01400	-0. 02562
	5	4. 18321	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91211	0. 02500	0. 03220	0. 03234	0. 08953	0. 44497	0. 01400	-0. 02540
	6	4. 20906	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91262	0. 02500	0. 03234	0. 03247	0. 08981	0. 53478	0. 01400	-0. 02518
	7	4. 23492	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91313	0. 02500	0. 03247	0. 03261	0. 09008	0. 62486	0. 01400	-0. 02496
	8	4. 26079	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91363	0. 02500	0. 03261	0. 03275	0. 09036	0. 71522	0. 01400	-0. 02475
	9	4. 28668	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91412	0. 02500	0. 03275	0. 03288	0. 09063	0. 80585	0. 01400	-0. 02454
	10	4. 31259	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91461	0. 02500	0. 03288	0. 03302	0. 09090	0. 89675	0. 01400	-0. 02433
	11	4. 32555	125.000	5.0000	0. 37147	0. 91509	0. 02500	0. 03302	0. 03309	0. 09111	0. 98786	0. 01400	-0. 01206
TANK 16	1	4. 33851	125.000	5.0000	0. 37147	0. 91533	0. 02500	0. 03309	0. 03315	0. 09124	0. 09124	0. 01400	-0. 01201
	2	4. 36444	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91557	0. 02500	0. 03315	0. 03329	0. 09144	0. 18269	0. 01400	-0. 02392
	3	4. 39038	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91605	0. 02500	0. 03329	0. 03342	0. 09171	0. 27440	0. 01400	-0. 02372
	4	4. 41634	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91652	0. 02500	0. 03342	0. 03356	0. 09198	0. 36639	0. 01400	-0. 02352
	5	4. 44231	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91698	0. 02500	0. 03356	0. 03369	0. 09225	0. 45864	0. 01400	-0. 02332
	6	4. 46830	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91744	0. 02500	0. 03369	0. 03383	0. 09252	0. 55116	0. 01400	-0. 02313
	7	4. 49429	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91789	0. 02500	0. 03383	0. 03396	0. 09279	0. 64395	0. 01400	-0. 02294
	8	4. 52030	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91834	0. 02500	0. 03396	0. 03409	0. 09306	0. 73700	0. 01400	-0. 02275
	9	4. 54632	250.000	10.0000	0. 74293	0. 91878	0. 02500	0. 03409	0. 03423	0. 09332	0. 83033		

5	4.67662	250.000	10.0000	0.74293	0.92094	0.02500	0.03476	0.03489	0.09464	0.47065	0.01400	-0.02168
6	4.70272	250.000	10.0000	0.74293	0.92135	0.02500	0.03489	0.03502	0.09491	0.56555	0.01400	-0.02151
7	4.72882	250.000	10.0000	0.74293	0.92177	0.02500	0.03502	0.03515	0.09517	0.66072	0.01400	-0.02134
8	4.75494	250.000	10.0000	0.74293	0.92217	0.02500	0.03515	0.03528	0.09543	0.75615	0.01400	-0.02117
9	4.78107	250.000	10.0000	0.74293	0.92258	0.02500	0.03528	0.03541	0.09569	0.85184	0.01400	-0.02101
10	4.79414	125.000	5.0000	0.37147	0.92298	0.02500	0.03541	0.03547	0.09588	0.94772	0.01400	-0.01042
TANK 18												
1	4.80721	125.000	5.0000	0.37147	0.92318	0.02500	0.03547	0.03554	0.09601	0.09601	0.01400	-0.01038
2	4.83336	250.000	10.0000	0.74293	0.92338	0.02500	0.03554	0.03567	0.09621	0.19222	0.01400	-0.02068
3	4.85953	250.000	10.0000	0.74293	0.92377	0.02500	0.03567	0.03580	0.09647	0.28869	0.01400	-0.02052
4	4.88570	250.000	10.0000	0.74293	0.92416	0.02500	0.03580	0.03593	0.09673	0.38542	0.01400	-0.02037
5	4.91189	250.000	10.0000	0.74293	0.92454	0.02500	0.03593	0.03606	0.09698	0.48240	0.01400	-0.02021
6	4.93808	250.000	10.0000	0.74293	0.92493	0.02500	0.03606	0.03618	0.09724	0.57964	0.01400	-0.02006
7	4.96429	250.000	10.0000	0.74293	0.92530	0.02500	0.03618	0.03631	0.09750	0.67713	0.01400	-0.01991
8	4.99051	250.000	10.0000	0.74293	0.92568	0.02500	0.03631	0.03644	0.09775	0.77488	0.01400	-0.01976
9	5.01673	250.000	10.0000	0.74293	0.92605	0.02500	0.03644	0.03657	0.09801	0.87289	0.01400	-0.01961
10	5.02985	125.000	5.0000	0.37147	0.92641	0.02500	0.03657	0.03663	0.09820	0.97109	0.01400	-0.00973

TOTAL TANK-LENGTH (M) = 14.83546

### 3.1.2. 横方向の集束

横方向の光学パラメータは計算コードMAGICを使って求められる。各2連4極電磁石の磁場強度は、空洞タンクと2連4極電磁石から成る1集束周期（図3.5）の $x$ 、 $y$ 方向のベータトロン振動の位相前進を決める事によって求まる。2連4極電磁石の磁場強度は粒子のエネルギーが最も高い第18空洞下流の電磁石で最大となる。そこで、第18空洞タンクと2連4極電磁石から成る集束周期の $x$ 、 $y$ 方向のベータトロン振動の位相前進と磁場強度の関係を調べた。その結果、約5 kG/cmという余裕のある磁場強度で位相前進 $54^\circ$ （ $270^\circ$ の1/5）が得られた。この結果に基づき、第3空洞から第18空洞までの位相前進は $54^\circ$ に固定して各2連4極電磁石の磁場強度が求められた。第1、第2、第3空洞の間ではギャップ数が16、8、12と極端に変化しているため、第1空洞と第2空洞に於ける集束周期の位相前進は(3.1)式のように第3空洞とのギャップ数と加速電圧の比を目安にして、おおざっぱに $54^\circ$ 、 $36^\circ$ にした。

$$\Psi_{\text{phase adv.}} \approx \frac{N_{\text{gap}}}{N_{3^{\text{rd}} \text{ cavity gap}}} \cdot \frac{V_{\text{gap}}}{V_{3^{\text{rd}} \text{ cavity gap}}} \times 54 \text{ deg.} \quad (3.1)$$

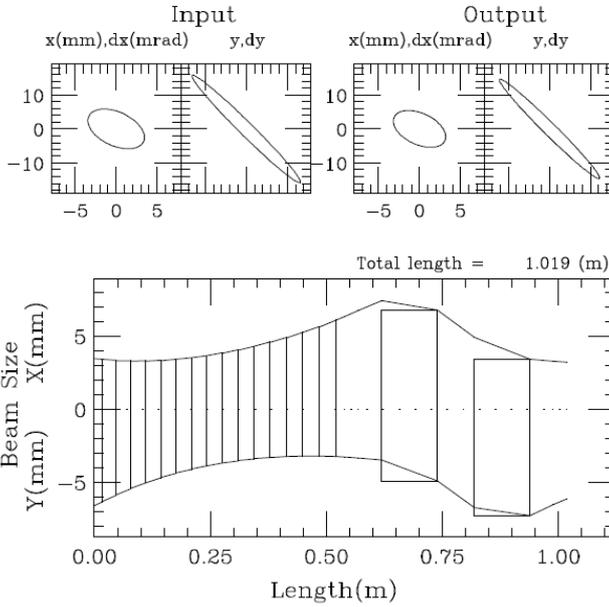
各集束周期の入口出口で等しくなる $\alpha$ 、 $\beta$ は、ドリフト空間、RFギャップ、Qマグネットのマトリックスの積から成る各集束周期の変換マトリックス(3.2)式とTwissパラメータ（ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ）を使って表された1集束周期に対する変換マトリックス(3.3)式を比較する事によって求められる。

$$M = M_0 M_{RF} \cdots M_0 M_{RF} M_0 M_F M_0 M_D M_0 \quad (3.2)$$

$$M = \begin{pmatrix} \cos \mu + \alpha \sin \mu & \beta \sin \mu \\ -\gamma \sin \mu & \cos \mu - \alpha \sin \mu \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

ここで、 $\mu$ は一集束周期の位相前進である。図3.5a、図3.5bには入口出口で $\alpha$ 、 $\beta$ が等しくなり、位相前進が $54^\circ$ になる第1集束周期と第18集束周期のビームエンベロープが図示されている。これらの図の右側に示されたパラメータ記号の意味は次の通りである。Q:k：4極電磁石の集束係数、dB：磁場勾配、EXinとEXout： $x$ 方向の入出射エミッタンス、BXinとBXout： $x$ 方向の入口出口の $\beta$ 、AXinとAXout： $x$ 方向の入口出口の $\alpha$ 、PSIXout： $x$ 方向の入口から出口までのベータトロン振動の位相前進。

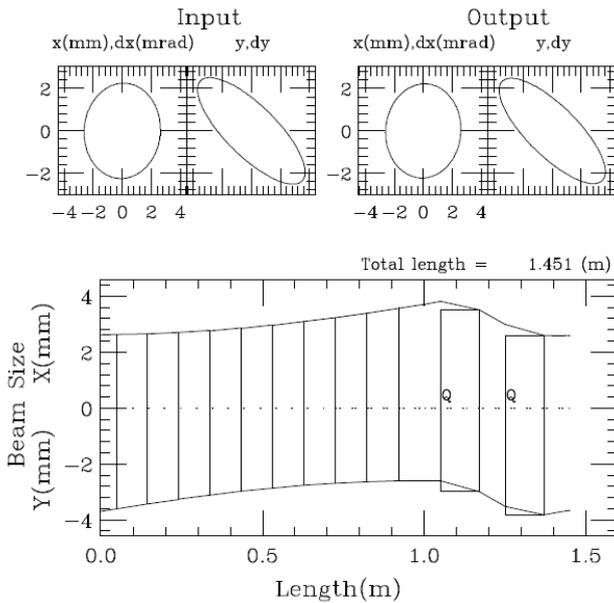
SRILAC TANK1



$Q_k(1/m^2) = 41.3937$ ;  $dB(kG/cm) = 3.9277$   
 $Q_k(1/m^2) = -42.2587$ ;  $dB(kG/cm) = -4.0098$   
 $EXin(pimmmrad) = 18.3098$   
 $EYin(pimmmrad) = 18.3098$   
 $BXin(m) = 0.6487$   
 $BYin(m) = 2.3779$   
 $AXin = 0.4667$   
 $AYin = 5.6017$   
 $EXout(pimmmrad) = 15.7072$   
 $EYout(pimmmrad) = 15.7072$   
 $BXout(m) = 0.6487$   
 $BYout(m) = 2.3779$   
 $AXout = 0.4667$   
 $AYout = 5.6017$   
 $PSIXout = 54.001$   
 $PSIYout = 54.000$

図3.5a : 下図はタンク1と2連4極電磁石から成る集束周期のビームエンベロップ（位相前進  $54^\circ$ 、規格化エミッタンス  $0.6\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ）。上図は入口出口のエミッタンス形状。

SRILAC TANK18



$Q_k(1/m^2) = 19.4353$ ;  $dB(kG/cm) = 5.0238$   
 $Q_k(1/m^2) = -19.4422$ ;  $dB(kG/cm) = -5.0255$   
 $EXin(pimmmrad) = 5.9063$   
 $EYin(pimmmrad) = 5.9063$   
 $BXin(m) = 1.1673$   
 $BYin(m) = 2.3208$   
 $AXin = -0.0334$   
 $AYin = 1.2219$   
 $EXout(pimmmrad) = 5.7659$   
 $EYout(pimmmrad) = 5.7659$   
 $BXout(m) = 1.1673$   
 $BYout(m) = 2.3208$   
 $AXout = -0.0334$   
 $AYout = 1.2219$   
 $PSIXout = 54.000$   
 $PSIYout = 54.000$

図3.5b : タンク18と2連4極電磁石から成る集束周期での計算結果。

図3.5aと図3.5bのように個別に得られた18台の2連4極電磁石の磁場強度をそのままMAGICに代入して、リニアック全体のビームエンベロップが計算された。結果は図3.6に示されている。この計算で使われた入射ビームの $\alpha, \beta$ の値は図3.5aで計算した第1集束周期の値である。

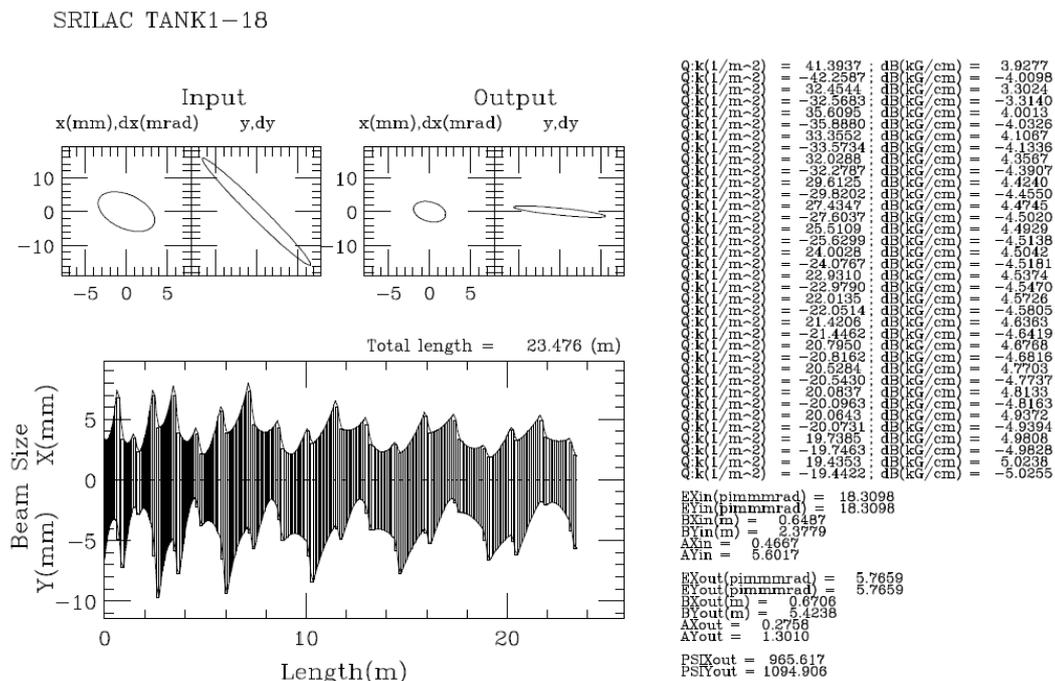
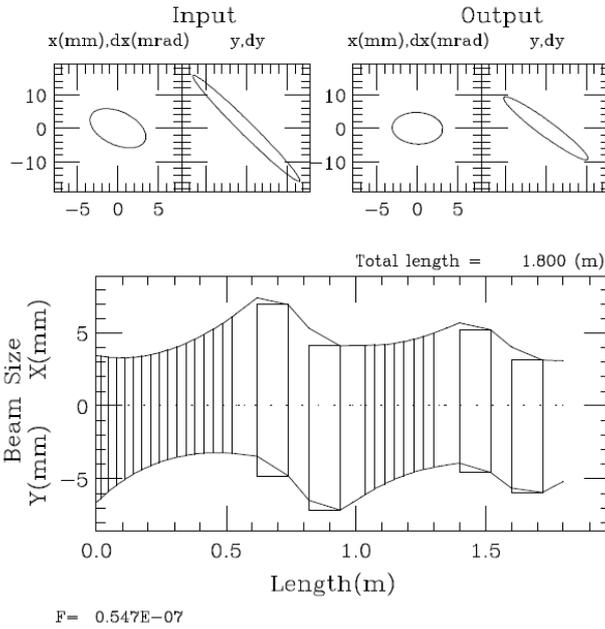


図3.6：個別に得られた各集束周期の磁場強度をそのまま使用して計算したリニアック全体のビームエンベロップ。

図3.6のビームエンベロップを見ると、1集束周期毎の基本振動の他に第3空洞以降に3集束周期毎の振動が励起されている。この原因は、各集束周期の連結部での $\alpha, \beta$ の変化量が大きい為と考えられる。そこで、リニアックに沿って各集束周期の $\alpha, \beta$ を滑らかにつなぐ操作を次のように行った。パラメータ( $\alpha, \beta$ )の数は水平垂直方向を合わせると4個になる。4個のパラメータを決めるには4台の4極電磁石が必要である。このことから、第1、第2集束周期の2連4極電磁石を使って第2集束周期出口の値を第3集束周期入口の値に整合出来る。同様に第4、第6、第8・・・集束周期出口の値を第5、第7・・・集束周期入口の値に整合させれば、リニアック全体に渡って $\alpha, \beta$ を滑らかにつなぐ事が出来る。第3集束周期の入口の $\alpha, \beta$ に整合した時の第1、第2集束周期のビームエンベロップと、第5集束周期の入口の $\alpha, \beta$ に整合した時の第3、第4集束周期のビームエンベロップが図3.7、図3.8にそれぞれ示されている。図3.9に示されたリニアック全体のビームエンベロップは、リニアック全体に渡って $\alpha, \beta$ を滑らかにつないだ際に得られた4極電磁石の磁場強度をそのままMAGICに代入して計算された結果である。図3.6に比べ、軸対称で非常にきれいなビームエンベロップが得られた。

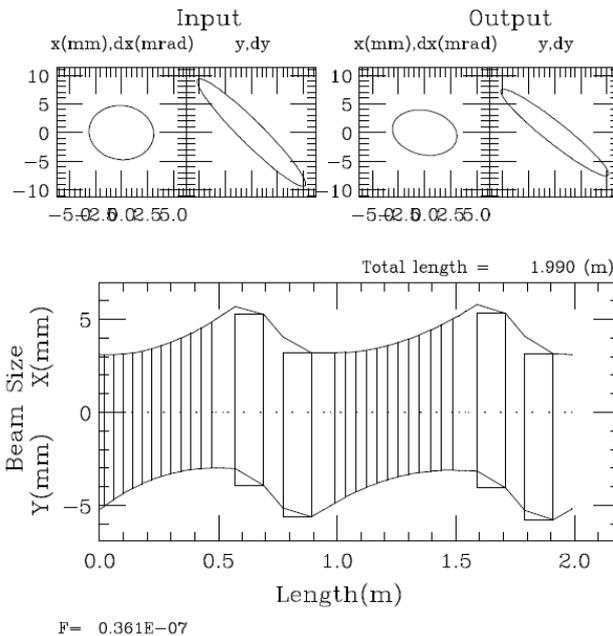
SRILAC TANK1-2



$Q:k(1/m^2) = 37.8818 ; dB(kG/cm) = 3.5945$   
 $Q:k(1/m^2) = -37.2766 ; dB(kG/cm) = -3.5370$   
 $Q:k(1/m^2) = 32.4254 ; dB(kG/cm) = 3.2994$   
 $Q:k(1/m^2) = -31.6834 ; dB(kG/cm) = -3.2239$   
 $EXin(pimmmrad) = 18.3098$   
 $EYin(pimmmrad) = 18.3098$   
 $BXin(m) = 0.6487$   
 $BYin(m) = 2.3779$   
 $AXin = 0.4667$   
 $AYin = 5.6017$   
 $EXout(pimmmrad) = 14.6470$   
 $EYout(pimmmrad) = 14.6470$   
 $BXout(m) = 0.6588$   
 $BYout(m) = 1.8486$   
 $AXout = 0.0510$   
 $AYout = 3.1808$   
 $PSIXout = 86.933$   
 $PSIYout = 83.064$

図3.7 : 第3集束周期の入口の $\alpha, \beta$ に整合した時の第1、第2集束周期のビームエンベロープ。

SRILAC TANK3-4



$Q:k(1/m^2) = 34.2317 ; dB(kG/cm) = 3.8465$   
 $Q:k(1/m^2) = -33.6125 ; dB(kG/cm) = -3.7769$   
 $Q:k(1/m^2) = 32.9283 ; dB(kG/cm) = 4.0542$   
 $Q:k(1/m^2) = -32.5508 ; dB(kG/cm) = -4.0077$   
 $EXin(pimmmrad) = 14.6470$   
 $EYin(pimmmrad) = 14.6470$   
 $BXin(m) = 0.6590$   
 $BYin(m) = 1.8486$   
 $AXin = 0.0511$   
 $AYin = 3.1809$   
 $EXout(pimmmrad) = 12.1051$   
 $EYout(pimmmrad) = 12.1051$   
 $BXout(m) = 0.7928$   
 $BYout(m) = 2.2149$   
 $AXout = 0.1619$   
 $AYout = 3.0720$   
 $PSIXout = 99.994$   
 $PSIYout = 104.190$

図3.8 : 第5集束周期の入口の $\alpha, \beta$ に整合した時の第3、第4集束周期のビームエンベロープ。

SRILAC TANK1-18

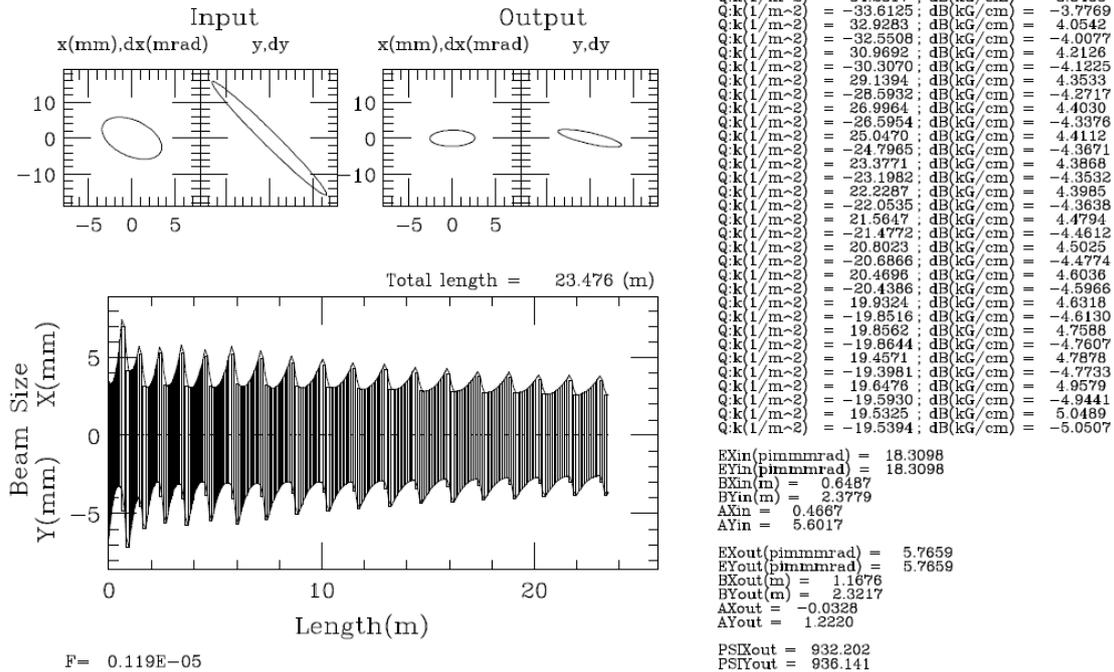


図3.9：第1から第18集束周期までの $\alpha, \beta$ を滑らかに繋いだ時に得られたリニアック全体のビームエンベロープ。

図3.9のベータatron振動の位相前進(PSIXout=932°, PSIIYout=936°)から各集束周期の平均的な位相前進はx, y方向共に約52°になった。ここで使われる開口半径20 mm・磁極長12 cmの2連4極電磁石の最大磁場勾配は約5.05 kG/cmであるが、これは十分実現可能な値である。TRIACのIHでは、開口半径20 mm・磁極長9 cmと14 cmで最大磁場勾配が約5.2 kG/cmの3連4極電磁石が使用されている<sup>[14]</sup>。

### 3.1.3. ビームシミュレーション

MAGICで得られた光学パラメータ(図3.9の右表)を使いTRACEPで粒子数1000個のビームシミュレーションを行った。ここで使われる入射エミッタンスの横方向の大きさはRFQの出射ビームと同じ値(規格化すると $0.6\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ )で、軸方向の大きさはRFQの出射エミッタンスから周波数換算した値である。それぞれの楕円パラメータ( $\alpha, \beta$ )は表3.2にまとめられている。横方向の楕円パラメータは第1集束周期の位相前進54°での最適値で、軸方向の楕円パラメータは軸方向の集束条件を決めた時に使われた正立楕円(横半径12°、縦半径0.0125 Mev/u)の値である。TRACEPの入力データは表3.3に、計算結果が図3.10に示されている。

表3.2 : IH入射ビームエミッタンスの楕円パラメータ

	エミッタンス	楕円パラメータ	
		$\alpha$	$\beta$
x	0.001831 $\pi$ cm·rad	0.4667	64.87 cm
y	0.001831 $\pi$ cm·rad	5.6017	237.79 cm
z	0.15 $\pi$ deg·(MeV/u)	0.0	960.0 deg/(MeV/u)

表3.3 : TRACEPの入力データ

```

RUN 1
TITLE
C 158 MHz IH-Linac (q/A=1/8,  $\Phi_s=-25$ deg.)
BEAM 0.500 0.125 0. : input energy (MeV/u), q/A, 基準同期位相(deg.)
      4. 8. 158.0 : Z (atomic number), A (mass), f (MHz)
INPUT 2 1000 0.4667 64.87 0.001831 : *1, 入射粒子数,  $\alpha_x, \beta_x$  (cm),  $\epsilon_x$  ( $\pi$ cm.rad), *2
      5.6017 237.79 0.001831 :  $\alpha_y, \beta_y$  (cm),  $\epsilon_y$  ( $\pi$ cm.rad)
      12.0 0.0125 : half phase spread (deg.), half energy spread (MeV/u)
0. 0. 0. 0. 0. 0. : x, x'; y, y'; phase, energy軸上のoff set
    
```

\*1 : 入射ビームのエミッタンス生成タイプ、タイプ2は6次元位相楕円の中でランダムに生成される。

\*2 :  $\epsilon_x=\epsilon_y=0.001831 \pi$  cm.radは規格化エミッタンスで $0.6 \pi$  mm·mradに相当する。

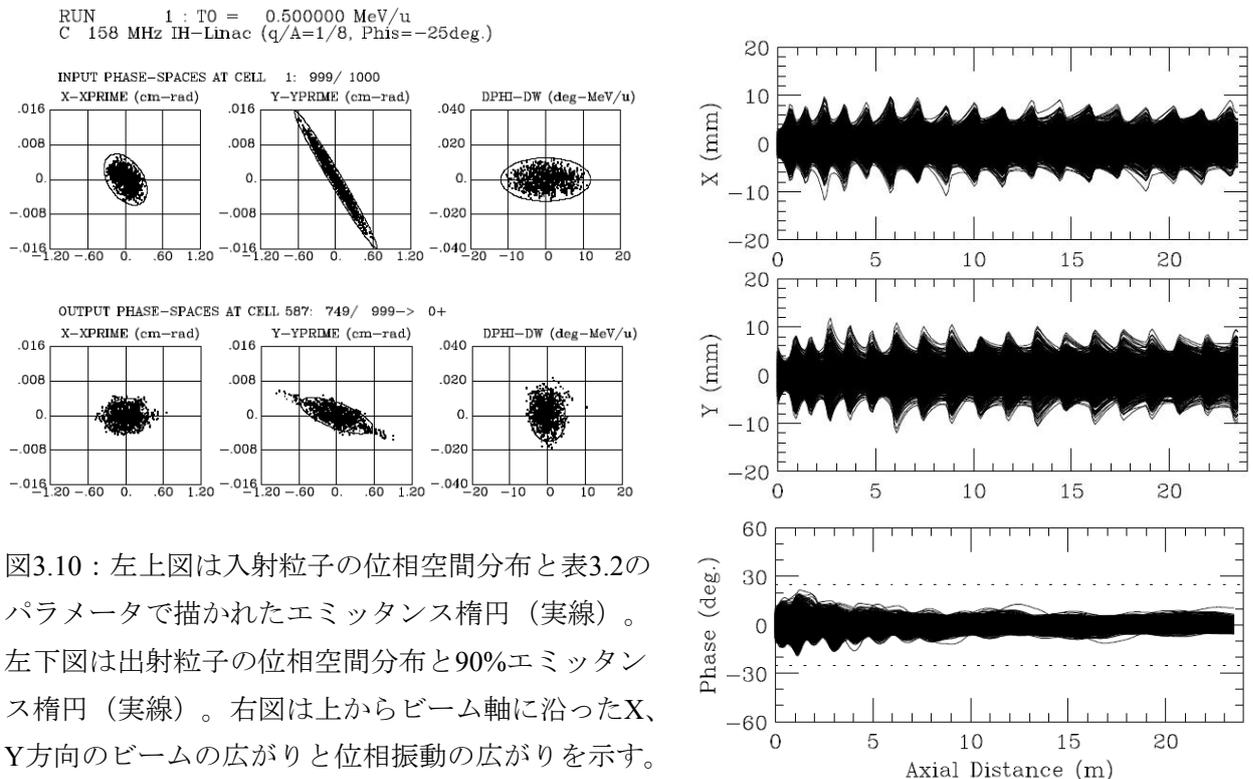


図3.10 : 左上図は入射粒子の位相空間分布と表3.2のパラメータで描かれたエミッタンス楕円(実線)。左下図は出射粒子の位相空間分布と90%エミッタンス楕円(実線)。右図は上からビーム軸に沿ったX、Y方向のビームの広がり位相振動の広がりを示す。

図3.10に示すように、このシミュレーションによってほぼ期待通りの性能が示された。RFQからのビームの透過効率はほぼ100%になるが、透過効率の性能をより詳しく見るために、横方向エミッタンスと透過効率の関係が調べられた。ここでは、軸方向エミッタンスは横半径 $12^\circ$ 、縦半径 $0.0125 \text{ MeV/u}$ に一定に保たれている。得られた結果が表3.4と図3.11に示されている。

表3.4 : 1000個の入射粒子で計算した横方向エミッタンスと透過効率の関係

横方向(x, y)エミッタンス	透過効率(%)
0.0001	100
0.0005	100
0.001	100
0.0014	100
0.0018	100
0.0020	99.9
0.0022	99.8
0.0023	99.2
0.0024	98.5
0.0025	97.5
0.0030	93.6
0.0035	88.5
0.0040	83.3

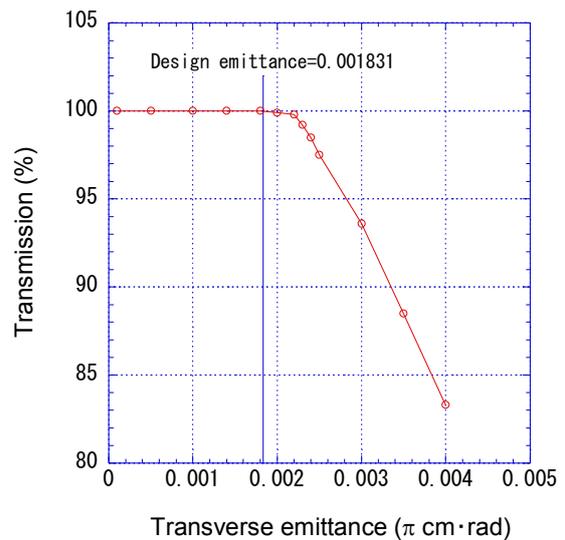


図3.11 : 横方向エミッタンスと透過効率の関係。

図3.11からIHのアクセプタンスは設計エミッタンスの約1.2倍有る事が分かる。出射ビームのエミッタンスは図3.10の位相空間に分布している粒子の90%が入る楕円として求められた。999個の出射粒子の位相空間分布と求めた90%楕円が図3.10に示されている。90%楕円のパラメータは表3.5にまとめられている。

表3.5 : IH出射ビームエミッタンスの楕円パラメータ

	90% エミッタンス	楕円パラメータ	
		$\alpha$	$\beta$
$x$	0.001442801 $\pi \text{ cm}\cdot\text{rad}$	-0.06486	89.4894 cm
$y$	0.001778120 $\pi \text{ cm}\cdot\text{rad}$	0.92285	186.9694 cm
$z$	0.072261 $\pi \text{ deg}\cdot(\text{MeV/u})$	0.07299	319.2731 $\text{deg}/(\text{MeV/u})$

### 3.2. IH-Linacの空洞構造

TE<sub>111</sub>共振空洞の横方向に発生する電場で効率良くイオンを加速する為に、IH空洞はTE<sub>110</sub>に近いモードで共振するように考案された加速空洞である。図3.12に示すように、TEモードを安定に励振するためリッジと呼ばれる隔壁が空洞上下側面にビーム軸に平行に立てられている。リッジ先端間に発生する電場を加速電場に変換するために、リッジ先端にステムを介してドリフトチューブが取り付けられている。更に、リッジ上に在るドリフトチューブ間の電圧が一様になるように、即ち空洞がTE<sub>110</sub>に近いモードで励振するように、空洞両端部に磁場反転用のスペースが作られ、そのため空洞側面から見たリッジの形状はT字形をしている。空洞端壁に在るドリフトチューブとリッジ上のドリフトチューブの間の電圧（最初と最後の加速ギャップ電圧）はリッジ上に在るドリフトチューブ間の電圧の1/2になる。

ドリフトチューブ表（表3.1）に基づいて、各タンクの構造寸法やRF特性が電磁気学の解析的な基本式で作られた計算コードCADIHで計算された。タンク半径 $R_T$ は、セル（セル長= $Z_C$ ）当りの空洞インダクタンスと電極静電容量から計算される共振周波数がIHリニアックの運転周波数になるように、決められる。タンク長 $Z_{TANK}$ は、トータルセル長 $Z_{TC}$ の範囲で空洞両端部の磁場反転用スペースを十分に確保出来る（リッジ付根長 $Z_{RB}$ を構造的強度要請値より長く出来る）場合には、トータルセル長と等しくなるが、そうで無い場合には余分の長さ $Z_{ET}$ がトータルセル長に付け加えられた長さになる。磁場反転用スペースは、空洞の共振状態がTE<sub>110</sub>に近い状態、即ち、最初と最後のギャップを除いたギャップ間の電圧分布が平らな状態になるように決められる。この時の共振周波数をリニアックの運転周波数に一致させる為の主な調整パラメータは空洞端壁とリッジエンド間のギャップ長 $Z_{EG}$ とリッジカット長 $Z_{RC}$ である。

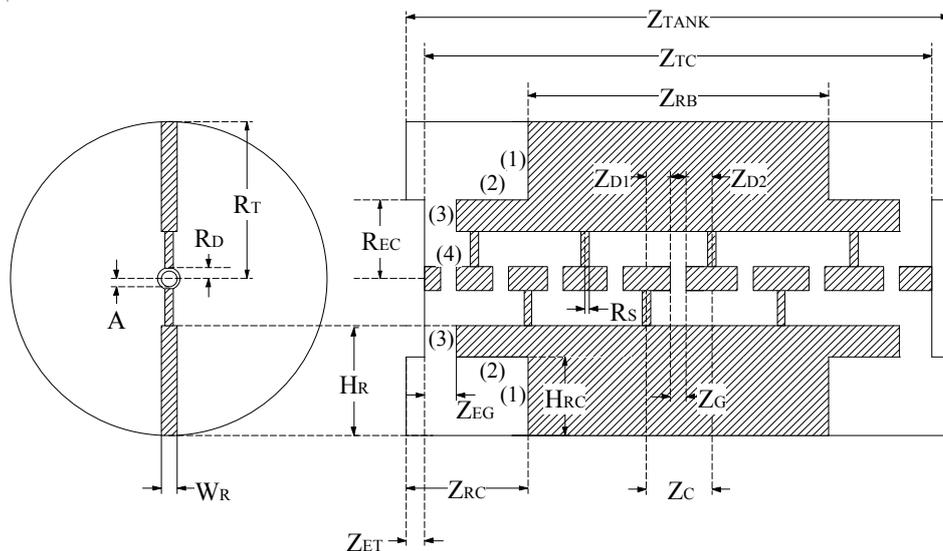


図3.12：IH空洞の断面図。ここで、 $A$ ：開口半径、 $R_D$ ：ドリフトチューブ半径、 $W_R$ ：リッジ幅、 $H_R$ ：リッジ高さ、 $H_{RC}$ ：リッジカット高さ、 $R_{EC}$ ：エンドキャップ半径、 $Z_{D1}$ 、 $Z_{D2}$ ：ドリフトチューブ1,2の長さ、 $Z_G$ ：ギャップ長、 $R_S$ ：ステム半径。

空洞内のギャップ間の電圧分布は図3.13cに示される等価回路を使って計算される。IHリニアックの等価回路は図3.13cに示すように二種類の伝送線回路から構成されている。一つは、空洞中央部の加速電極を線路とする回路で、各加速セルの集中定数共振回路が結合インダクタンス $2L_i$ を介して連結した伝送線である。もう一つは、空洞端部にある磁場が反転する空間を囲む回路、即ち、アース電位である空洞端面とリッチ端面を線路とする伝送線である。図3.12に示すように、この線路はセル(1)から(4)の分布静電容量と分布インダクタンスからなる伝送線である。

空洞内での電力損失は、等価回路解析で使われた電流経路での表面抵抗から空洞中央部、空洞端部の並列共振抵抗 $R_p$ を求め、それぞれの $R_p$ による電力損失の合計として求められる。 $R_p$ と電極電圧 $V$ 、電力損失 $P$ の関係は次式で与えられる。

$$P = \frac{V^2}{2R_p} \quad (\text{Watt}) \quad (3.4)$$

リッチ上のドリフトチューブのギャップ電圧を $V_G$ とすると、空洞端のギャップ電圧は $V_G/2$ となる。空洞の実効シャントインピーダンスは全加速電圧、空洞内での電力損失、空洞タンク長から次式を使って求められる

$$Z_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{accel}}^2}{P \cdot Z_{\text{TANK}}} \quad (\Omega/\text{m}) \quad (3.5)$$

空洞の無負荷の $Q$ 値は次の近似式を使って求められる。

$$Q_0 = \frac{\omega W}{P} \approx \frac{\omega \frac{1}{2} [C_e (V_G/4)^2 + C_G (V_G)^2 + C_e (V_G/4)^2]}{P} \quad (3.6)$$

ここで、 $\omega$ は空洞の共振角周波数、 $W$ は空洞に蓄えられるエネルギー（IHの場合、空洞端に蓄えられるエネルギーとリッチ上のギャップに蓄えられるエネルギーの和）、 $P$ は空洞内での電力損失である。 $C_e$ 、 $C_G$ はそれぞれ空洞端とギャップの全静電容量である。

運転周波数に等しい共振周波数でギャップ電圧分布が平になるように最適化された各タンクの構

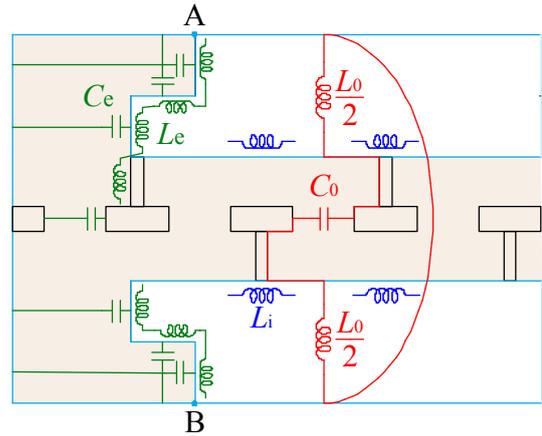


図3.13a：IH空洞と回路定数の関係。

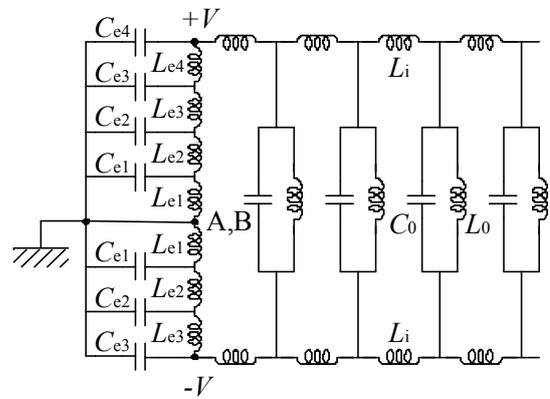


図3.13b：回路定数を繋いだ等価回路。

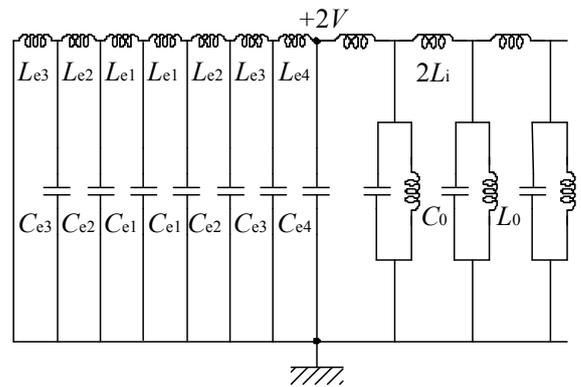
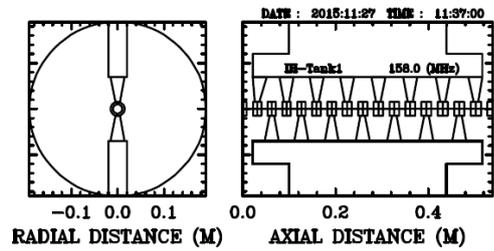
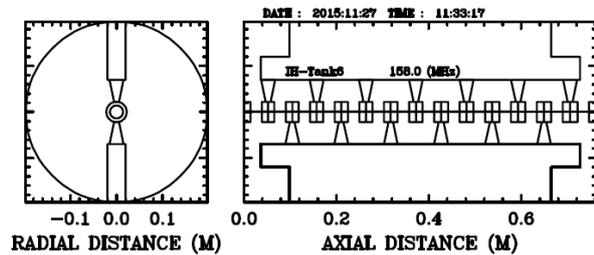


図3.13c：2つの伝送線回路で表した等価回路。

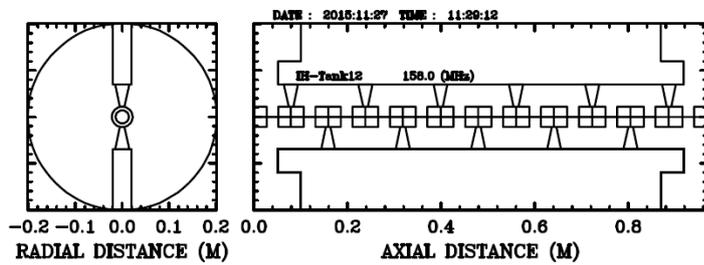
造が図3.14に示されている。図3.15には、最適化されたタンクで得られたギャップ電圧分布がプロットされている。上記計算で決められた各タンクの主要パラメータが表3.6にまとめられている。



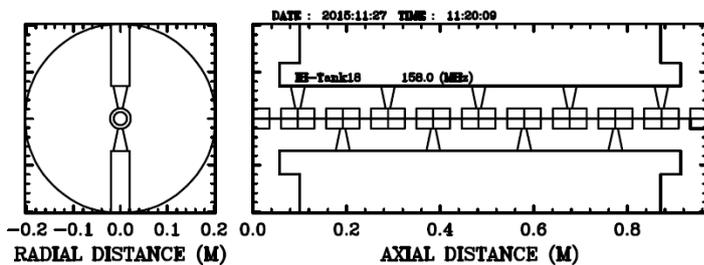
Tank1 ; 長さ539mm、半径190mm。



Tank6 ; 長さ763mm、半径196.1mm。

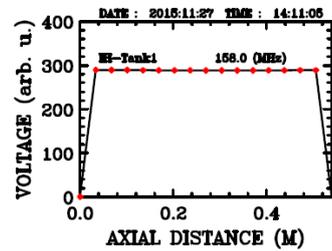


Tank12 ; 長さ969mm、半径201.3mm。

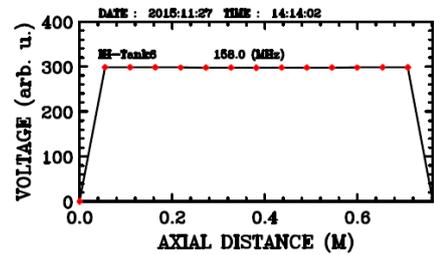


Tank18 ; 長さ971mm、半径203mm。

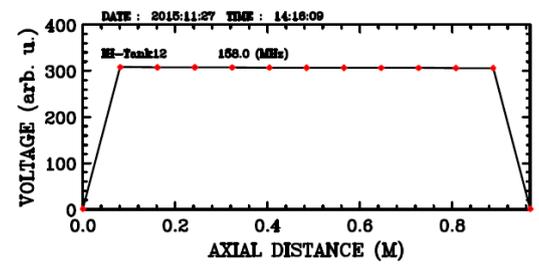
図3.14 : CADIHで計算されたTank1、Tank6、Tank12、Tank18の断面図。



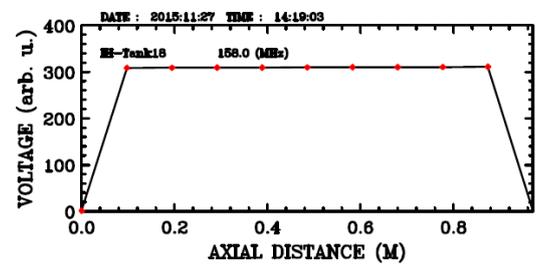
Tank1



Tank6



Tank12



Tank18

図3.15 : Tank1、Tank6、Tank12、Tank18のギャップ電圧分布。

表3.6 :  $A/q=8$ イオンを加速する158-MHz IHリニアックの主なパラメータ

Tank No.	$T_{in}-T_{out}$ (MeV/u)	$V_G$ (kV)	$Z_G$ (mm)	$N_G$	$R_T$ (mm)	$Z_{TANK}$ (mm)	$R_D$ (mm)	$A$ (mm)	$Q_0$	$P$ (kW)
1	0.5-0.679	140	14	16	190	539	15	10	9870	23.4
2	0.679-0.781	180	18	8	191	300	17	12	7700	23.6
3	0.781-0.953	200	20	12	191	491	19	14	9670	41.8
4	0.953-1.144	220	22	12	191	540	21	15	9950	54.6
5	1.144-1.396	250	25	13	195	643	22	14	10630	76.1
6	1.396-1.683	250	25	14	196.1	763	22	14	11240	83.5
7	1.683-2.006	250	25	15	197.6	894	22	14	11770	91.5
8	2.006-2.338	250	25	15	198.8	970	22	14	12130	93.7
9	2.338-2.654	250	25	14	199.6	971	22	14	12290	89.4
10	2.654-2.951	250	25	13	200.2	955	22	14	12400	84.4
11	2.951-3.251	250	25	13	200.5	1004	22	14	12650	85.5
12	3.251-3.530	250	25	12	201.3	969	22	14	12670	80.0
13	3.530-3.810	250	25	12	201.5	1008	22	14	12870	80.8
14	3.810-4.067	250	25	11	202.2	957	22	14	12830	74.8
15	4.067-4.326	250	25	11	202.2	988	22	14	13000	75.3
16	4.326-4.559	250	25	10	202.9	924	22	14	12890	69.0
17	4.559-4.794	250	25	10	202.9	948	22	14	13040	69.4
18	4.794-5.030	250	25	10	203	971	22	14	13170	69.7

IHリニアックの全損失電力は、設計通りに  $A/q=8$ のイオンを加速する場合、1266.5 kWになる。電極静電容量が大きくなると、一般的に電力損失が増える。空洞径は電極静電容量を一定に保った場合に共振周波数の逆数にほぼ比例する。そこで、本設計で得られたタンク径と周波数の関係が世界の代表的なIHの結果と図3.16で比較された。図の赤い曲線はプロットされた赤いデータ点に対する  $D = c/f$  の関数 ( $c$ は定数) のベストフィット曲線である。データ点が赤い曲線より小さい場合、電極静電容量が曲線上のIHより大きい可能性がある。SLOWRIのIHタンク径は曲線上の値より小さいが、GSIやNIRSとほぼ同程度なので、空洞構造は常識的な設計範囲にあると思われる。

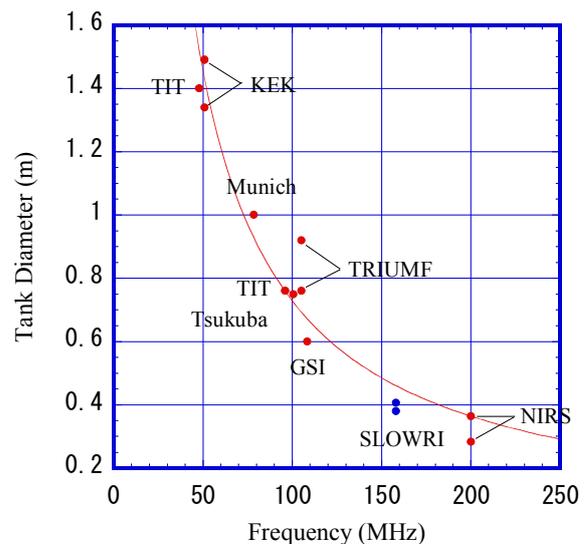


図3.16 : 代表的なIH (TIT<sup>[15]</sup>, Munich<sup>[15]</sup>, Tsukuba<sup>[15]</sup>, GSI<sup>[16]</sup>, KEK<sup>[17]</sup>, TRIUMF<sup>[13]</sup>, NIRS<sup>[18]</sup>) のタンク径と周波数の関係。

#### 4. ビーム輸送系

##### 4.1. SLOWRI, RFQ間の低エネルギービーム輸送系 (LEBT)

SLOWRIからの低電荷イオン ( $A/q > 8$ ) は電荷増幅器 (Charge Breeder)によって  $2 \leq A/q \leq 8$  の範囲に入るように電荷変換され、SLOWRIと電荷増幅器を乗せた最大電圧40 kV高圧プラットホームによって5 keV/uに加速され、第1段加速器RFQに入射される。我々の場合、連続なビーム入射に対して90%以上の高伝送効率が得られる様に、バンチャー部を内蔵したRFQを採用している。バンチャー内蔵型RFQに外部バンチャーを更に付け加えると、外でバンチしたビームがRFQのセパトリックスの中心部分に主に詰め込まれるようになるので、高伝送効に加え、出射ビームの軸方向エミッタンスの改善が達成される。図2.1と表2.5にPARMTEQで計算された、通常運転 (外部バンチャー無し) の時のRFQの入射ビームのエミッタンス形状が示されている。

ここでは、RFQへのバンチビーム入射を可能にするLEBTを導入し、RFQのバンチビーム入射による出射ビームエミッタンスの改善効果が調べられる。この為の計算は、TRACEPで計算されたLEBTでのビーム飛跡の出力データを、PARMTEQの入力データとして引き継ぐ事によって行われた。ここで使用するLEBTは電荷増幅器 (イオン源と見なせる) からのエネルギー5 keV/u、規格化エミッタンス  $0.6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  の直流ビームをバンチするバンチャーと、RFQの設計入射エミッタンスに整合する集束系から成る最も単純なものである。電荷増幅器から出るビームは、位相空間で半径2mmの正立楕円で与えられると仮定されている。集束要素として、静電又は電磁4重極、アインツェル、ソレノイド等が考えられるが、ここでは比較的小さなビーム直径 ( $\sim 40 \text{ mm}$ ) を維持できるソレノイドコイルが使用された。RFQの出射ビームエミッタンスの改善効果は基本波 (79 MHz) と2倍の高調波 (158 MHz) から成る2重バンチャーと基本波と2倍と3倍の高調波 (237 MHz) から成る3重バンチャーを使って調べられた。バンチャーはイオンの進行方向に沿って3倍、2倍の高調波、基本波の順でソレノイドの集束点にそれぞれ配置される。基本波バンチャーからRFQまでの距離によって入射エネルギーの幅も位相幅も左右されるので、その影響も60と100 cmの距離に対して調べられた。

2重バンチャー使用の場合、それらをソレノイドの集束点に1台ずつ置く為に、3台のソレノイドが電荷増幅器とRFQの間に置かれた。上流から1番目・2番目のソレノイドの長さはそれぞれ30と40 cmである。3番目のソレノイドに関しては、基本波のバンチャーとRFQの間の距離を60と100 cmにする為に、それぞれ25と60 cmの長さが選ばれた。3重バンチャーの場合には4台のソレノイドが使用され、1番目・2番目・3番目のソレノイドの長さはそれぞれ30、40、40 cmである。4番目のソレノイドの長さは、基本波のバンチャーとRFQの間の距離を60と100 cmにする為に、それぞれ20と50 cmの長さが選ばれた。これら4種類のLEBTのソレノイド、バンチャー等の要素の長さや配列、それにRFQの軸方向出射エミッタンスを出来るだけ小さくするように選ばれたソレノイド磁場やバンチャー加速電圧等の要素パラメータが表4.1にまとめられている。表4.1のパラメータを持つ4種類のLEBTで得られたLEBTからRFQまでのビームシミュレーション結果は図4.1から図4.4に示されている。表4.1で使われている要素表記とパラメータ記号の意味は次のとおりである。DRIFTは飛行空間、SOLはソレノイド、BUNCHはバンチャー、 $L_z$  は要素の長さ、 $B_z$  はソレノイドの軸方向の磁場強度、 $V_{\text{eff}}$  はバンチャーの実効加速電圧 (ギャップ電圧とトランジットタイムファクターの積)、 $N_h$  はハーモニック数、 $R_{\text{bore}}$  は開口半径である。表4.1のパラメータで基本波バンチャーからRFQ入口までの距離 (60又は100 cm) によって値が異なる場合には、それぞれ2つの値 (括弧つきが100 cmの場合) が記されている。

表4.1 : 4種のLEBTの要素配列と図4.1から図4.4が得られる要素パラメータ

Element	Two Double Bunchers					Two Triple Bunchers				
	$L_z$ (cm)	$B_z$ (kG)	$V_{\text{eff}}$ (kV)	$N_h$	$R_{\text{bore}}$ (cm)	$L_z$ (cm)	$B_z$ (kG)	$V_{\text{eff}}$ (kV)	$N_h$	$R_{\text{bore}}$ (cm)
DRIFT	15					15				
SOL	30	8.8			3	30	8.8			3
DRIFT	20					20				
BUNCH	0		0.0717 (0.0554)	2	0.5	0		0.0152 (0.0183)	3	0.5
DRIFT	20					20				
SOL	40	7.0			3	40	7.0			3
DRIFT	20					20				
BUNCH	0		0.3154 (0.2122)	1	0.5	0		0.0546 (0.0380)	2	0.5
DRIFT	15					20				
SOL	25 (60)	9.2 (5.1)			3	40	7.0			3
DRIFT	20 (25)					20				
BUNCH						0		0.3125 (0.2236)	1	0.5
DRIFT						15				
SOL						20 (50)	10.1 (5.5)			3
DRIFT						25 (35)				

注) 表の括弧内の値は基本波バンチャーからRFQ入口までの距離が100cmの時の値。

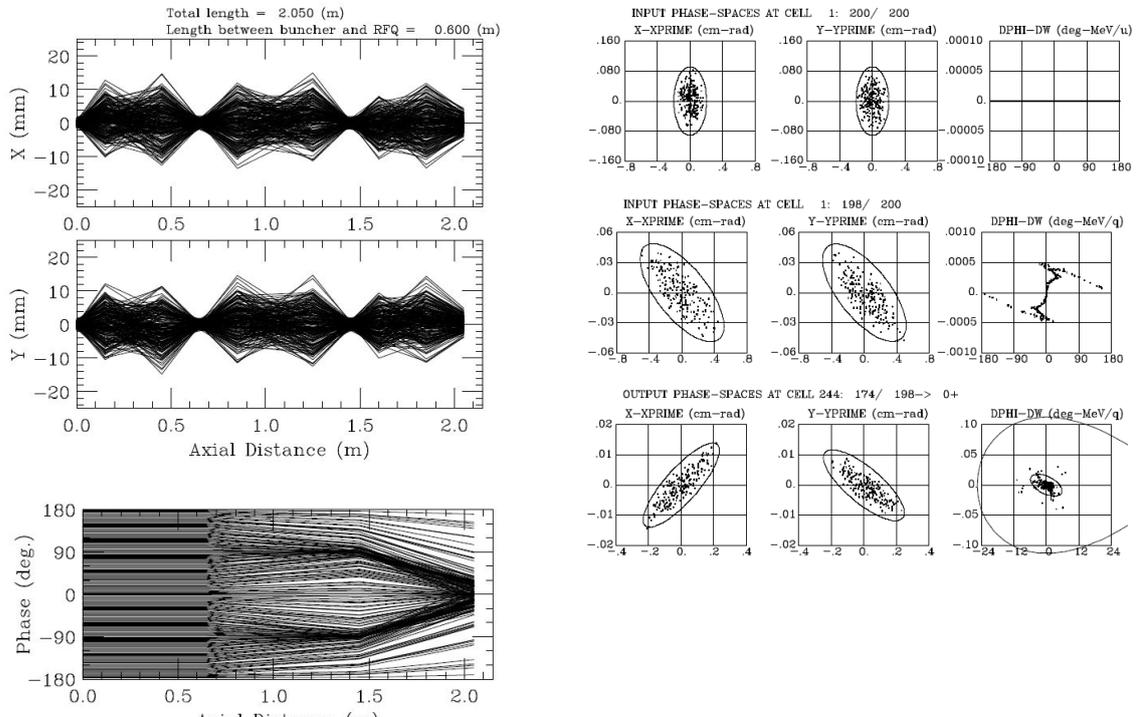


図4.1 : 2重バンチャー系で、基本波バンチャーとRFQ入口間の距離が0.6 mの時のシミュレーション結果。左図は上から、LEBTでの横方向と軸方向の運動を示す。右図は上から、電荷増幅器出口、RFQ入口、RFQ出口の各エミッタンスを示す。RFQ入口・出口のX, Y方向楕円は通常運転での100%エミッタンス、Z方向楕円は計算結果の90%エミッタンス ( $0.0906 \pi \cdot \text{deg} \cdot \text{MeV}/q$ ) を示す。

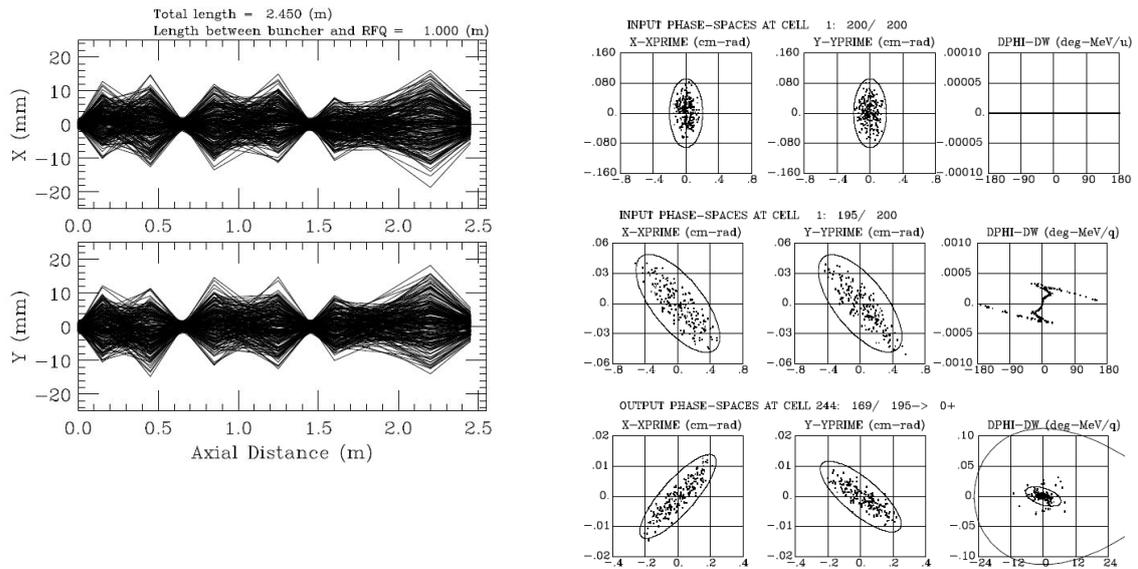


図4.2：2重バンチャー系で、基本波バンチャーとRFQ入口間の距離が1.0 mの時のシミュレーション結果。左図は、LEBTでの横方向の運動を示す。右図は上から、電荷増幅器出口、RFQ入口、RFQ出口の各エミッタンスを示す。RFQ入口・出口の $X, Y$ 方向楕円は通常運転での100%エミッタンス、 $Z$ 方向楕円は計算結果の90%エミッタンス ( $0.0935 \pi \cdot \text{deg} \cdot \text{MeV/q}$ ) を示す。

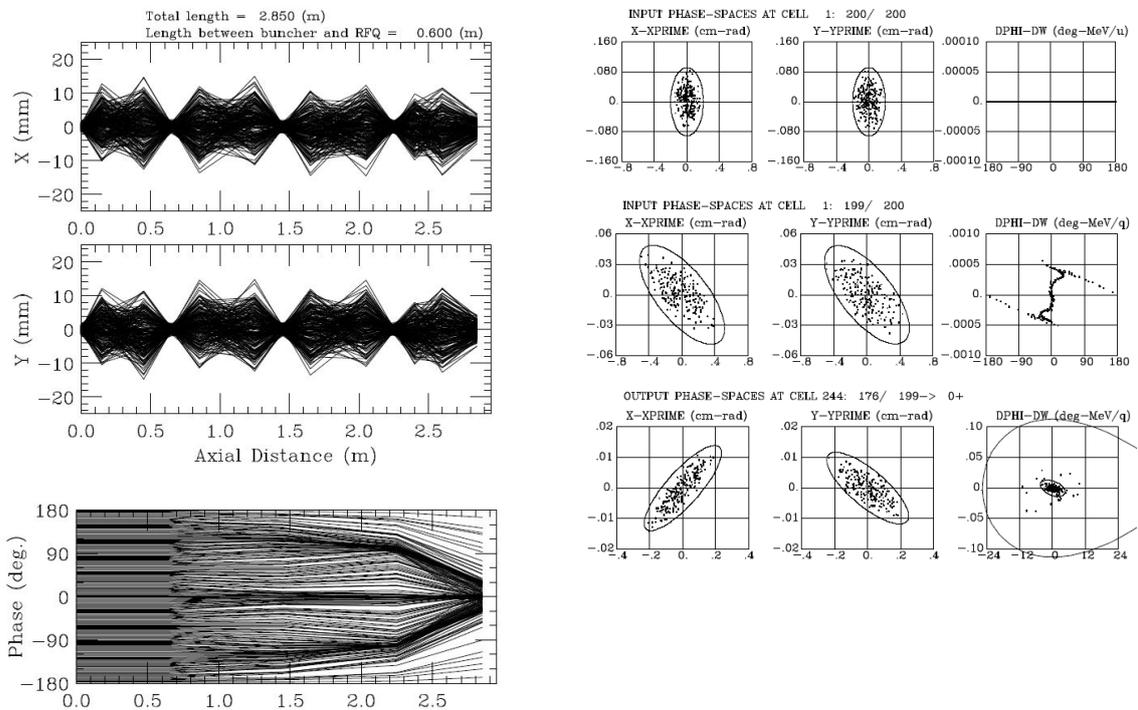


図4.3：3重バンチャー系で、基本波バンチャーとRFQ入口間の距離が0.6 mの時のシミュレーション結果。左図は上から、LEBTでの横方向と軸方向の運動を示す。右図は上から、電荷増幅器出口、RFQ入口、RFQ出口の各エミッタンスを示す。RFQ入口・出口の $X, Y$ 方向楕円は通常運転での100%エミッタンス、 $Z$ 方向楕円は計算結果の90%エミッタンス ( $0.0551 \pi \cdot \text{deg} \cdot \text{MeV/q}$ ) を示す。

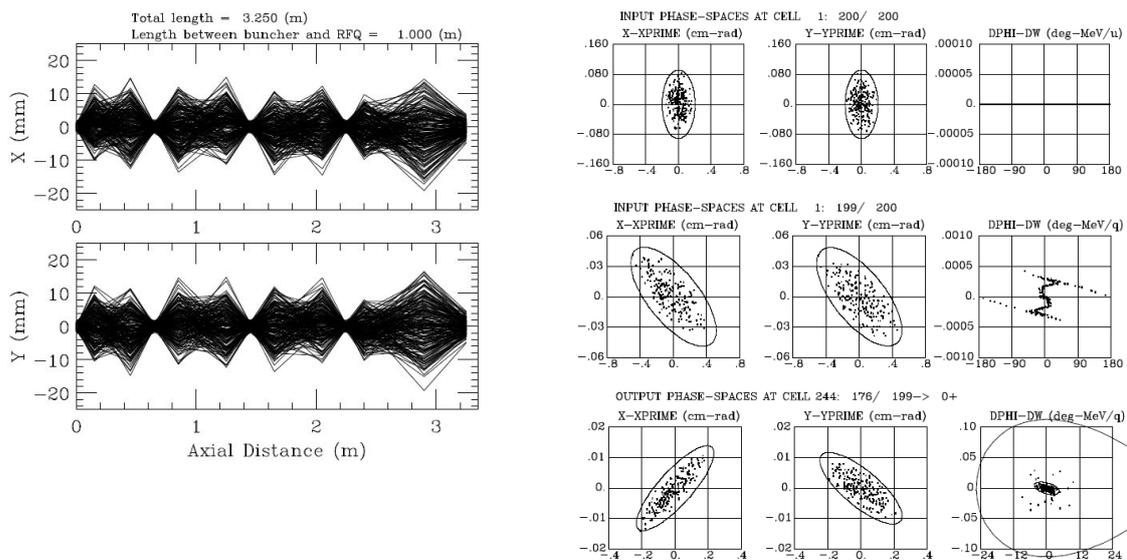


図4.4 : 3重バンチャー系で、基本波バンチャーとRFQ入口間の距離が1.0 mの時のシミュレーション結果。左図は、LEBTでの横方向の運動を示す。右図は上から、電荷増幅器出口、RFQ入口、RFQ出口の各エミッタンスを示す。RFQ入口・出口のX, Y方向楕円は通常運転での100%エミッタンス、Z方向楕円は計算結果の90%エミッタンス ( $0.0409 \pi \cdot \text{deg} \cdot \text{MeV/q}$ ) を示す。

図4.1から図4.4のシミュレーションで得られた、外部バンチャーによるRFQの軸方向の出射エミッタンスの改善効果が表4.2にまとめられている。この計算結果を見ると、予想通り3重バンチャーを使った方がRFQの軸方向の出射エミッタンスの改善効果が高くなる。一方、改善効果に対する基本波バンチャーからRFQまでの距離の影響に関しては、2重バンチャーの場合には60でも100 cmでも大差ないが、3重バンチャーの場合には60より100 cmの方が良くなっている。理想的な鋸歯状波を持つバンチャーの場合、出射粒子を長い距離飛ばした方が位相幅を大きく変えずにエネルギー幅を小さくすることができる。この場合にはRFQの入射エミッタンスが小さくなるのでRFQの軸方向の出射エミッタンスも小さくなる。この議論とシミュレーション結果から、2重バンチャーは3重バンチャーよりも鋸歯状波バンチャーに比べて性能がより大きく落ちると解釈される。結論として3重バンチャーを使えば、RFQの軸方向の出射エミッタンスは外部バンチャー無しの時の1/10に改善される。

表4.2 : RFQの軸方向の出射エミッタンスの改善効果

External bunchers	Distance from fundamental buncher to RFQ entrance (m)	Output 90% emittance ( $\pi \cdot \text{deg} \cdot \text{MeV/q}$ )
Not used	—	0.4363
fundamental and 2 <sup>nd</sup> harmonic bunchers	0.6	0.0906
fundamental and 2 <sup>nd</sup> harmonic bunchers	1.0	0.0935
Fundamental, 2 <sup>nd</sup> and 3 <sup>rd</sup> harmonic bunchers	0.6	0.0551
Fundamental, 2 <sup>nd</sup> and 3 <sup>rd</sup> harmonic bunchers	1.0	0.0409

#### 4.2. RFQ, IH-Linac間の中間エネルギービーム輸送系 (MEBT)

MEBTはRFQからのビームをIHのアクセプタンスにうまく整合させるために必要な装置である<sup>[19]</sup>。図2.1の下段に示されているように、RFQ出口のビームの直径はx,y方向共に同じであるが、ビームの傾きに関しては一方は集束する向き、他方は発散する向きと互いに異なっている。このビームをIHにうまく入射する為には、MEBTでRFQからのビームのエミッタンス形状をIHのアクセプタンス形状（図3.10に示す）に合わせる必要がある。エミッタンス形状を変換する為に、2組の2連4極電磁石がMEBTに設置される。ビームの整合は横方向だけでなく、軸方向についても必要である。RFQ出口ではビームはバンチしているが、MEBTを通してIH入口まで単純に飛行するとバンチが解けて時間的に広がりIHのセパトリックスに十分入らなくなる。そこで、広がったバンチをIHのセパトリックスの中に十分納まるように再バンチさせる為に、MEBTの中央付近にバンチャーが設置される。表4.3にMEBTの入口出口に於けるビーム光学の境界条件を示す。この境界条件を満たすようにMEBTのビーム光学が決められた時、RFQとIH間のビーム整合が取られたと言う。z方向のIH入射パラメータ $\beta$ は158MHzで表した時の表3.2の値の1/2である。

表4.3：バンチ周波数が79 MHzであるMEBTの入口出口の境界条件  
(RFQ出口とIH入口の楕円パラメータ)

	Beam Emittance	RFQ Output Parameters		IH Input Parameters	
		$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
x	0.001831 $\pi$ cm·rad	-1.4767	29.825 cm	0.4667	64.87 cm
y	0.001831 $\pi$ cm·rad	1.2385	33.586 cm	5.6017	237.79 cm
z	0.075 $\pi$ deg·MeV/u	0	1920 deg/(MeV/u)	0.0	480.0 deg/(MeV/u)

表4.3のRFQの出射パラメータ $\alpha$ ,  $\beta$ は図2.1のRFQの出射粒子の位相空間分布をカバーする実線楕円から求められた。最初に、MEBTの軸方向のビーム光学が決められた。軸方向整合システムはドリフトスペースとRFQと同じ周波数を持つリバンチャーから成り、リバンチャーのギャップ電圧とRFQとIHの間に設置されるリバンチャー位置の最適な組み合わせで、RFQとIH間の軸方向整合が達成される。粒子の軸方向の運動は同期粒子に対するエネルギー差 $\Delta T$ と位相差 $\Delta\phi$ によって表される。ドリフトスペースとリバンチャー通過前後の $(\Delta\phi, \Delta T)$ の値はそれらの変換マトリックス $M_0$ ,  $M_{RF}$ によって次のように表される。

$$\begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta T_1 \end{pmatrix} = M_{RF} M_0 \begin{pmatrix} \Delta\phi_0 \\ \Delta T_0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

ここで、 $\Delta T$ ,  $\Delta\phi$ の添え字0は入射の値、1は出射の値を表す。ドリフトスペースでの変換マトリックスは(4.2)式のようになり、薄肉近似したリバンチャーの変換マトリックスは(4.3)式のようになる。

$$M_0 = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\pi l}{\beta \lambda T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

$$M_{\text{RF}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ e \frac{q}{A} V_g T_f & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

ここで、 $T$ は同期粒子のエネルギー、 $\beta$ は同期粒子の速度対光速比、 $\lambda$ はRFQの周波数での自由空間波長、 $l$ はドリフトスペースの長さを表し、 $e$ は電子単位、 $q/A$ はイオンの電荷質量数比、 $V_g$ はギャップ電圧、 $T_f$ はトランジットタイムファクターを表す。トランジットタイムファクターは次の近似式によって与えられる。

$$T_f = \frac{\sin(\pi l_g / \beta \lambda)}{\pi l_g / \beta \lambda} \frac{1}{I_0(2\pi a / \beta \lambda)} \quad ; \quad \text{where } I_0(\chi) \cong 1 + \chi^2/4 + \chi^4/64 + \chi^6/2304 \quad (4.4)$$

ここで、 $l_g$ はギャップ長で $l_g(\beta\lambda/4)=3.109$  cm、 $a$ はドリフトチューブの開口半径で、MEBTでのビーム半径より十分大きい $a=1.5$  cmとする。この時、トランジットタイムファクターは $T_f=0.7837$ となる。式(4.2)、(4.3)のマトリックスの形は横方向のビームパラメータ $x, x'$ 又は $y, y'$ の変換マトリックスの形と同じである。そこで、通常横方向のビーム光学の計算に用いられる計算コードMAGICが、表4.3の軸方向の入口出口の境界条件を満足するパラメータ(リバンチャーのギャップ電圧とRFQとIHからの設置距離)を探すために使われた<sup>[20]</sup>。MAGICを使った計算では、入力データであるドリフトスペースの長さ $l$ は $\pi l / \beta \lambda T$ で置き換えられ、エネルギー $T$ はMeV/u、位相はラジアン、距離はメートルの単位で与えられる。長さ $l$ の係数として次の値が使われる。

$$\pi / \beta \lambda T = 50.51846 (\text{m} \cdot \text{MeV/u})^{-1}$$

MAGICで得られた軸方向の整合解が図4.5に示される。図4.5の右側に書かれたパラメータの意味は次の通りである。 $k(1/f)$ はリバンチャーを薄肉レンズで近似した時の集束係数で $eV_g T_f (q/A)$ で与えられ、単位はMeV/uである。Ezは軸方向のエミッタンス、Bin, Ainは入口の楕円パラメータ $\beta, \alpha$ 、Bout, Aoutは出口の楕円パラメータ $\beta, \alpha$ 、Length coefficientは長さ $l$ の係数( $\pi / \beta \lambda T$ )の値である。図4.5を得るギャップ電圧は $V_g=0.3287$  MVである。

SRILAC 79-MHz BUNCHER

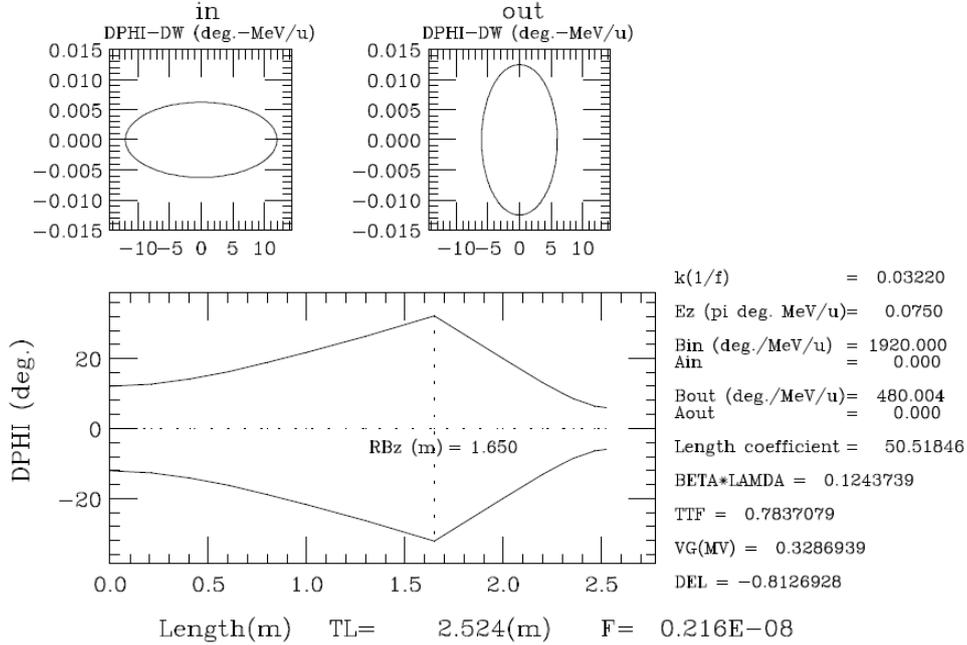


図4.5 : 入口出口の境界条件を満たすように計算コードMAGICで求めたMEBTの軸方向のビーム光学。

次に、MEBTの横方向のビーム光学が決められた。横方向の整合システムはドリフトスペース、リバンチャーの加速ギャップ、2組の2連4極電磁石から成り、2連4極電磁石の磁場強度と置く位置を最適化する事によって、RFQとIH間の整合が取れる。先ず、リバンチャーの加速ギャップでの発散係数は次式を使って求める。

$$\delta = \frac{q}{A} \cdot \frac{e\pi}{m_0c^2\beta^2\gamma^3\beta_w\lambda} V_g T_f \sin\phi \quad (4.5)$$

上式では、 $m_0c^2$ は核子の静止エネルギーで $1\text{amu}=931.5\text{MeV}/c^2$ が使用される。 $\beta$ はイオンの速度光速比、 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ である。 $\beta_w$ は最適イオン速度の値に等しく、 $\beta_w\lambda$ は加速電極のセル長の2倍に相当する。 $V_g$ はギャップ電圧、 $\phi$ は加速位相である。(4.5)式に、軸方向の集束係数 $k(1/f)$ から得られた $eV_g T_f (q/A)=0.03220$ 、リバンチャーの同期位相 $\phi=90^\circ$ 等を代入する事によって、発散係数は $\delta=-0.81269$ のように求められる。MAGICの入力ファイルの要素配列の中にこの発散係数を入れ、入口出口の境界条件を満たすようにMEBTの2連4極電磁石の位置と磁場強度の最適解が計算された。得られた結果が図4.6と表4.4に示されている。

表4.4 : MAGICで得られた要素配列表

LEAST SQUARE F= 0.2753776E-07

ITEM	IVAR	CHAR.	VALUE	LENGTH
DRFT	0	0	0.3000000E+00	0.3000
QUAD	2	0	0.4926975E+02	0.1000
DRFT	0	0	0.1000000E+00	0.1000
QUAD	2	1	-0.3932193E+02	0.1000
DRFT	0	0	0.3000000E+00	0.3000
DRFT	0	0	0.1000000E+00	0.1000
DRFT	0	0	0.6000000E+00	0.6000
DRFT	0	0	0.5000000E-01	0.0500
SPCL	9	0	0.8126900E+00	0.0000
DRFT	0	0	0.8400000E-01	0.0840
DRFT	0	0	0.1005000E+00	0.1005
DRFT	0	0	0.7500000E-01	0.0750
DRFT	0	0	0.4000000E-01	0.0400
QUAD	2	0	0.3924180E+02	0.1000
DRFT	0	0	0.1000000E+00	0.1000
QUAD	2	0	-0.4055970E+02	0.1000
DRFT	0	0	0.7000000E-01	0.0700
DRFT	0	0	0.2045000E+00	0.2045
TOTAL LENGTH=				2.5240
TOTAL ITEMS=				18

SRILAC MEBT

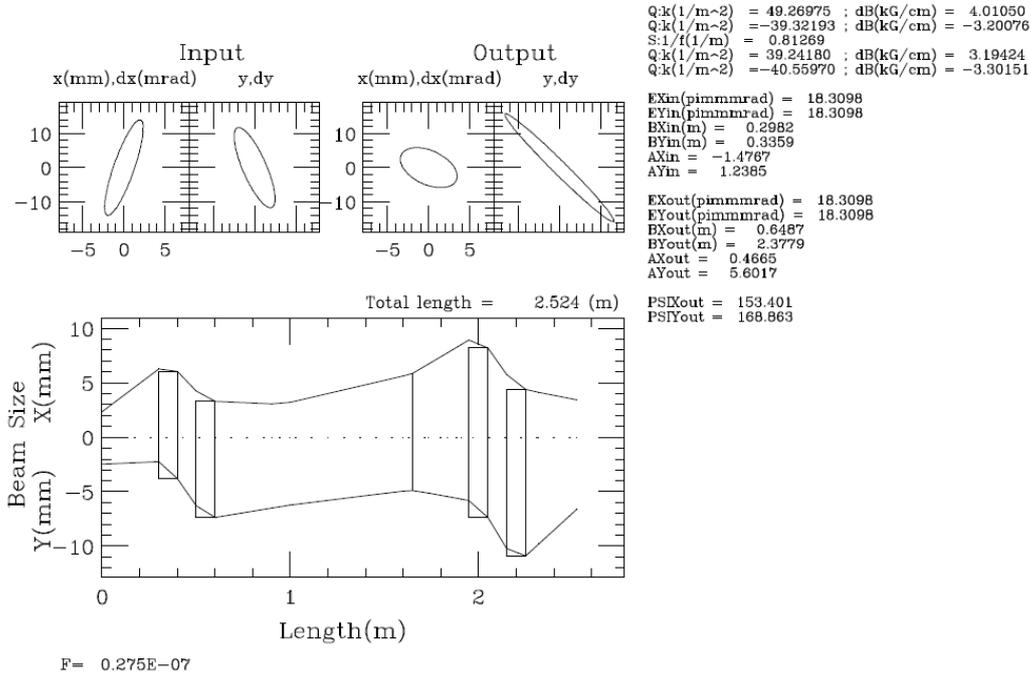


図4.6 : RFQとIH間の整合が取れたMEBTのビーム光学図。

図4.6の右側に計算で得られた磁場の強さ、MEBT入口出口のTwissパラメータ $\beta, \alpha$ が表示されている。MGICでは計算後の出口のTwissパラメータ $\beta, \alpha$ が目標値である $\beta, \alpha$  (表4.3のIH Input Parameters) に近づくように計算され、それらの合致度が次式で表される。

$$F = \sum (f_i - \bar{f}_i)^2 \quad (2.10)$$

ここで、 $f_i$ は計算値、 $\bar{f}_i$ は目標値で、 $i=1, 3, \dots$ がx方向の運動、 $i=2, 4, \dots$ がy方向の運動に相当する。表4.4には最小二乗値が $F=0.2753776E-07$ である時のMEBTの配列表が示されている。表のCHAR. VALUEはDRIFTでは長さ (単位 : m)、QUADでは4極電磁石の集束係数 (単位 :  $1/m^2$ )、SPCLではリバンチャーのRFによる発散係数 (単位 :  $1/m$ ) を表している。

以上のように得られたビーム光学パラメータを使って、1000個の粒子の軸方向と横方向の運動がビームシミュレーションコードTRACEPによって計算された。図4.7にはMEBTに入射した粒子の位相空間プロットとMEBTから出射した粒子の位相空間プロットが描かれている。MEBTでの整合がうまく取れて、入口出口での目標楕円に粒子が納まっているのが分かる。図4.8にはビームの横方向の集束状況とリバンチャーによるバンチングの様子が示されている。

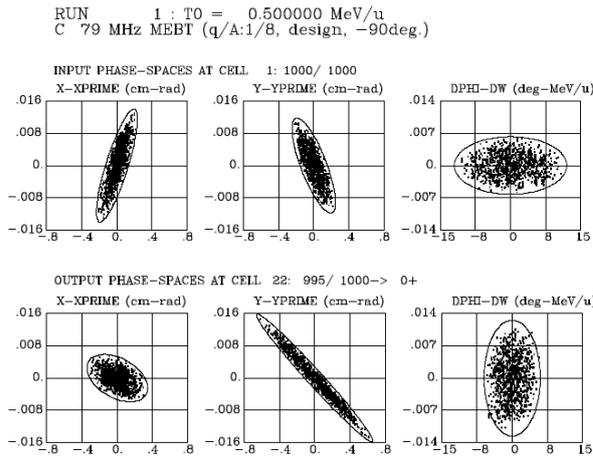


図4.7 : MEBTの入口出口の位相空間プロット。  
実線楕円は目標楕円である。

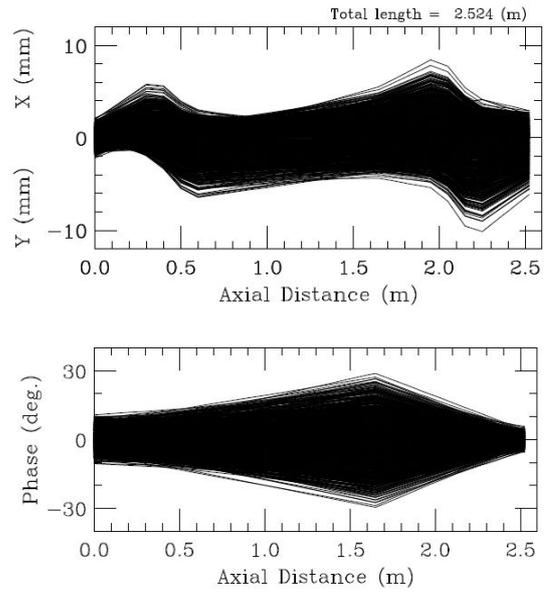


図4.8 : MEBTの軸に沿ったビームの横方向広がり (上) とバンチの位相広がり (下)。

MEBTに置かれるリバンチャーの加速電圧は図4.5を得るギャップ電圧から330kV必要である。空洞の電極電圧を100kV以下にするために、ここでは4ギャップの $\lambda/4$ 共振空洞を考える。基本パラメータが表4.5にまとめられている。ここでは、ギャップ長を一般的な目安の値である $\beta\lambda/4$ としたが、表4.5に示すようにギャップ電場の値がキルパトリック値の約25%と小さく、トランジットタイムファクターを考えるともっとギャップ長を短くした方が良い。よって、空洞の詳細設計に於いては、ギャップ長の最適化が必要である。ビーム診断装置としては、LEBTと同様にエミッタンスモニターや電流モニター等が必要である。

表4.5 : 4-gap QWR の基本パラメータ

Parameter	value	unit
Frequency	79	MHz
Synchronous ion energy	500	keV/u
Optimum velocity ( $\beta$ )	0.0327	
Gap voltage (kV)	82.5	kV
Gap field	2.6536 (0.2545 $K_L$ )	MV/m
Kilpatrick limit ( $K_L$ )	10.425	MV/m
Number of gaps	4	
Gap length ( $\beta\lambda/4$ )	3.109	cm
Drift-tube length :		
$L_{d1}$ ( $\beta\lambda/8$ )	1.555	cm
$L_{d2}, L_{d3}, L_{d4}$ ( $\beta\lambda/4$ )	3.109	cm
$L_{d5}$ ( $\beta\lambda/8$ )	1.555	cm
Cell length ( $\beta\lambda/2$ )	6.219	cm
Cavity inner-diameter	24.876	cm

## 5. 概念設計のまとめと今後の作業

加速器は、周波数79.0 MHz、入射エネルギー5 keV/u、出射エネルギー500 keV/uのRFQと、周波数158.0 MHz、入射エネルギー500 keV/u、出射エネルギー5.03 MeV/uの常電導IHリニアックから構成されていて、質量電荷数比が8までのイオンを加速できる。加速器の概略図が図5.1に示されている。

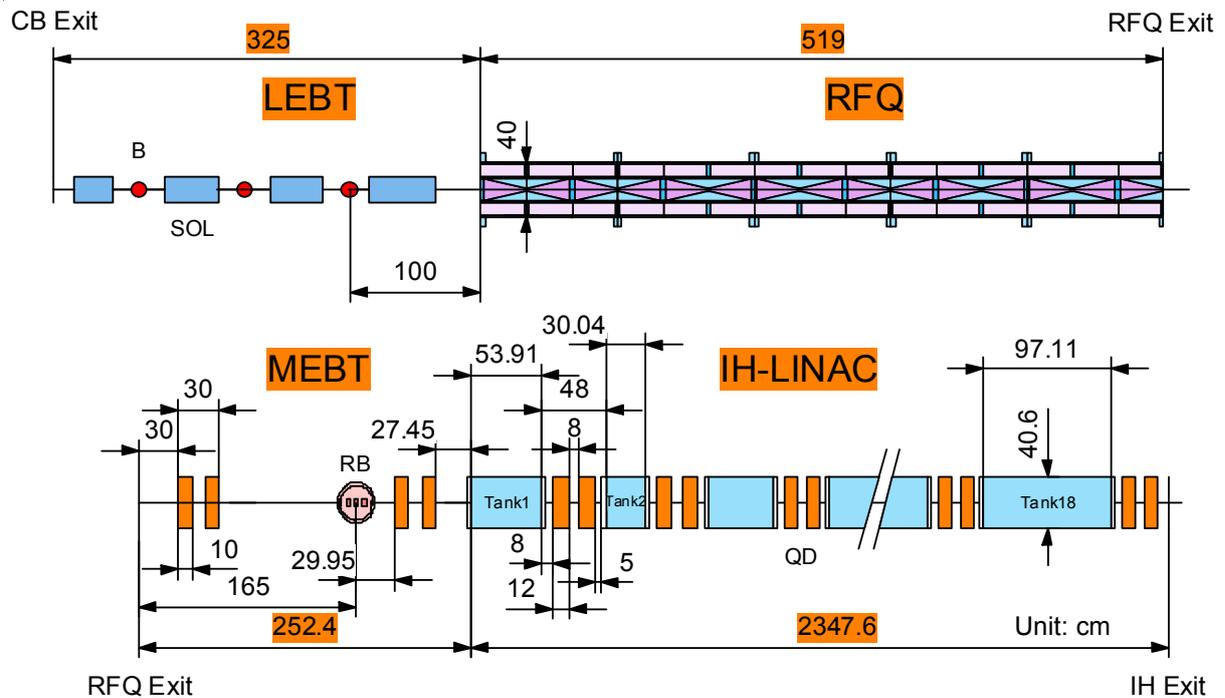


図5.1 : LEBT、RFQ、MEBT、IHから成る、全長34.44 mの加速器システムの概略図。図中のBはバンチャー、SOLはソレノイド、RBはリバンチャー、QDはQダブレットを表す。

RFQはSplit coaxial型で、内径40cm・長さ34.4cmのモジュール空洞15台から成り、全長は5.19mである。IHリニアックは内径約40cmの18台のタンクと各タンク下流に置かれた18組の2連4極電磁石から成る機能分離型リニアック (SDTL) で、全長は約23.5mである。RFQの上流 (LEBT) にRFQの基本波、2倍、3倍の高調波を持つ3台のバンチャーを置く事によって、RFQの出射ビームの軸方向エミッタンスは約1/10に改善される。RFQとIH間のビーム整合は、2連4極電磁石2組と4ギャップのリバンチャー空洞1台から成る全長約2.5mのMEBTで行われる。

今後の作業としては、SLOWRIの後段加速器である事を念頭に置いて、概念設計で得られた加速器システムの評価と修正を行い、次のステップである加速器の詳細設計をする事である。具体的な検討項目としては、RFQ空洞の最適な構造設計、IH空洞と集束用2連4極電磁石の最適な構造設計、LEBTの多重バンチャーの構造設計、MEBTのリバンチャー空洞の構造設計、SLOWRIから電荷増幅器、加速器、実験室までの具体的配置図の作成、等が有る。

## 謝辞

本設計作業と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. Arai and M. Wada, “Conceptual design of a post accelerator for SLOWRI”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 47 (2014) 206.
- [2] 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。
- [3] N. Ueda *et al.*, “CONSTRUCTION OF THE RFQ “TALL””, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32 (1985) 3178.
- [4] W. D. Kilpatrick, “Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both RF and DC”, Rev. Sci. Instr., Vol. 28, No. 10 (1957) 824.
- [5] S. Yamada, “BUNCHER SECTION OPTIMIZATION OF HEAVY ION RFQ LINACS”, Proc. of the 1981 Linear Accelerator Conference, Santa Fe, New Mexico, USA, P. 316.
- [6] 徳田 登、“PARMTEQ-2 (Sun-4/1000 (inssrv)版)”、1995年11月17日、unpublished。
- [7] Sun-Chan JEONG *et al.*, “TRIAC Progress Report”, KEK Progress Report, 2011.
- [8] S. Arai *et al.*, “Construction and Beam Tests of a 25.5-MHz Split Coaxial RFQ for Radioactive Nuclei”, Nucl. Instr. and Meth., **A390**(1997)9.
- [9] P.N. Ostroumov *et al.*, “ATLAS UPGRADE”, Proc. Particle Accelerator Conference, New York, 2011, p. 2110.
- [10] “Los Alamos Accelerator Code Group, User's Guide for the Poisson/Superfish Group of Codes”, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-87-115, 1987.
- [11] M. J. Lee *et al.*, “MAGNET INSERTION CODE”, NAL TM-447, Oct. 1973.
- [12] 山田 聡、“TRACEP”, NIRS HIMAC Program manual No.1, May 1990, unpublished.
- [13] R.E. Laxdal *et al.*, “A SEPARATED FUNCTION DRIFT-TUBE LINAC FOR THE ISAC PROJECT AT TRIUMF”, Proc. Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, 1997, p. 1194.
- [14] M. Tomizawa *et al.*, “MODEL MEASUREMENT AND PRESENT STATUS OF INTERDIGITAL-H LINAC AT INS”, Proc. of the 1994 International Linac Conference, Tsukuba, Japan, p. 765.
- [15] U. Ratzinger. “INTERDIGITAL RF STRUCTURES”, Proc. of the Linear Accelerator Conference 1990, Albuquerque, New Mexico, USA, p. 525.
- [16] J. Clendenin *et al.*, “Compendium of Scientific Linacs”, LINAC96, p. 133.
- [17] M. Tomizawa *et al.*, “PROGRESS REPORT OF THE INTERDIGITAL-H LINAC FOR RADIOACTIVE NUCLEI AT INS”, Proc. of the EPAC'96, p. 780.
- [18] Y. Iwata *et al.*, “IH-DTL AS A COMPACT INJECTOR FOR A HEAVY-ION MEDICAL SYNCHROTRON”, Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, P. 715.
- [19] K. Niki *et al.*, “Beam Matching Section in the INS Heavy Ion Linac Complex”, INS-Rep.-979, May 1993
- [20] S. Arai *et al.*, “Optical Design of the Beam Transport Line from TRIAC to Tandem SC-Linac”, KEK Report 2008-1, Apr 2008, Japanese.