

# High- $\beta$ 加速管の加速について

2001.4.15 KEK T. Kato

## Summary

The acceleration in the high- $\beta$  structures (ACS and SC) has been examined by both estimating the space-charge effects and the rf defocusing force, and performing particle simulations. The results of the particle simulation show that the energy oscillation becomes very large, depending upon the distribution of the random errors in the accelerating field. In the SC structure within errors of 1% in the field amplitude and 1 degree in the phase, the oscillation amplitude becomes so large that the accelerated particles go beyond the longitudinal stable region, which size varies largely due to the large phase slip along the structure. It should be pointed out that there are a few kinds of mismatch sources in the SC structure: a change in rf forces due to a large phase slip, a jump in the focusing period between adjacent beta-cells and a jump in accelerating field between them. The average energy deviation of more than 2 MeV from the design output value is observed in the SC structure with random errors of 1% and 1 degree in the accelerating field. In order to compensate for the energy deviation, the random errors should be suppressed to be sufficiently stable during the pulse width. Judging from the simulation results for the ACS structure, the beam can be accelerated stably over the wide range of errors in the accelerating parameters.

## 1) はじめに

high- $\beta$  加速管の加速は、空間電荷効果、高周波発散力、そして位相スリップなどがからみあい、特に大電流を加速する場合には、難しい問題を多くはらんでいる。そこでさまざまな解析手段を用いて、安定な加速条件を求める事が行われる。ここでは、ACS と SC を対象に二つの観点からの解析をする。第一は、空間電荷効果及び高周波発散力の比較である。同じ電流を加速するのであるが、加速管の構成により空間電荷効果を含む全体の難しさが違う場合がある。第二は粒子シミュレーションである。ここで使う粒子シミュレーションコードは、近似による取り扱う加速過程（空間電荷効果と加速電場分布）を、できる限り正確に取り入れて計算する。

## 2) 空間電荷効果及び高周波発散力

ある電流を加速する時の位相進みと電流ゼロ時の位相進みとの比を tune depression と呼び、空間電荷効果の強さを表すパラメータとなる。ACS と SC の 191 MeV の入射部加速管を想定して、ピーク電流 150 mA の最適なビーム加速の時パラメータを計算した結果を図 1-1 に示す。この図からは、同じ電流を同じ電場で加速する場合には、SC の場合には縦の空間電荷効果が厳しくなる事がわかる。これは、超伝導の場合、加速管以外の占める割合が大きく、収束の周期が長くなる事による。

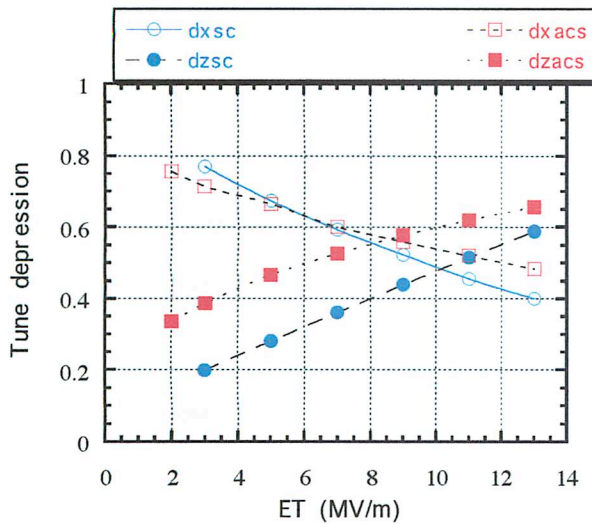


図 1-1 150 mA を最適な条件で加速する時の 横(x)と縦(z) の tune depression。電流ゼロ時の横方向の位相進みは 90°を仮定。ACS としては本稿の表 1 の Type-5、SC としては現在の原研 SC デザインの構造を使った。

ビームエネルギーが高いにもかかわらず、高周波発散力の効果はかなり大きいと言える。それは、収束周期の間に、高い電場を使って多くのセルにより加速する事による。更に、SC の場合には、位相スリップにより、高周波発散力は大きく変化する。収束力は次のように記述される。

外部収束力：

$$k_q^2 = \frac{q}{mc^2} \frac{cB'}{\beta\gamma}$$

高周波発散力：

$$k_{rf}^2 = -\frac{q}{mc^2} \frac{\pi E_0 T \sin\varphi}{\lambda \beta^3 \gamma^3}$$

ベータセルが 3 種類の超伝導リニアック（原研デザイン, 190 –400 MeV）について計算すると、図 1-2 のようになる。ここには二つの周期が示されている。第一は、ひとつのタンクの中で、位相スリップにより高周波発散力の大きさが約 3 倍以上ほぼ線形に変化する周期であり、第二はベータセルの周期である。位相スリップの大きさはビームが持つベータとセルのベータとの差により主として決まる。これは、横収束力がかなりの大きさで変化する事を意味しているので、局所的にはミスマッチを起こしていると考えられる。当然の事ながら、SC の場合には縦の収束力も同様の変調を受けている。

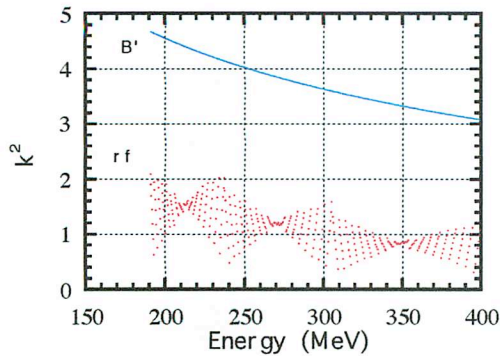


図 1-2 原研 3-ベータセルデザインの外部収束力と高周波発散力。B'は位相進み  $90^\circ$  の値を仮定した。本図の表示では、外部収束力と比較するために、各セルの高周波発散力を、タンク内のセル数倍している。

### 3) particle simulation

DTL 計算用のコード LINSAC を超伝導空洞計算用に修正した cclinsac を使ってシミュレーションを行った。このコードは KEK の並列型のスーパーコンピュータ上で走る。空間電荷効果は、p-p (粒子-粒子) タイプで取り扱っているが、粒子数の制限による過大評価を避ける為の修正を行っている。加速電場は多項式で近似しており、発散力となる r 方向成分は、内部で電磁場の基本式を使って作る。図 2 に SUPERFISH による計算結果と cclinsac の中で使っている電磁場分布の比較を示す。計算では 3200 個の粒子を使用した。計算のチェックのために、9600 個の粒子を使った計算も行ったが、基本的には同じ結果を与える事がわかったので、計算時間節約のために 3200 個のシミュレーションを基本として採用した。ピーク電流 150 mA を仮定する。コードの違いに由来する効果を計算結果から排除するために、同じコードを使って、SC と ACS の 2 種類のタイプの構造中の加速を計算する。この場合、コードの制約から、磁石が入らない隣り合う ACS タンクは 1 セル相当の空間をあけている。従って以下で行っている事は、常伝導と超伝導の比較ではなく、2 種類の加速管の構成に依存するビーム加速の比較であり、そこで大きく違っている点は、横収束周期、使用電場強度、結果としての位相スリップと考えられる。

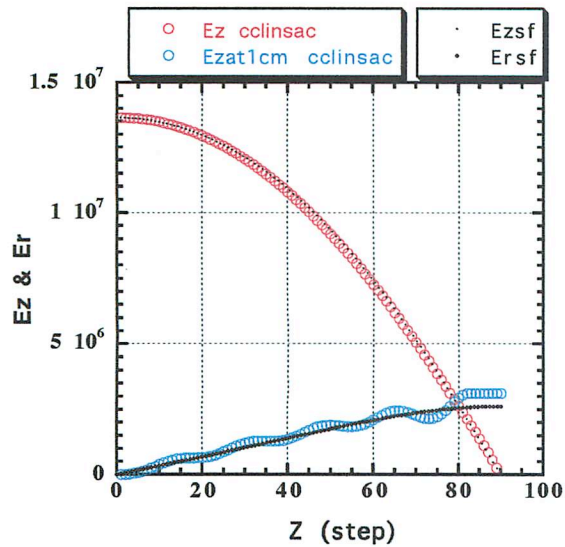


図2 cclinsac 内で計算に使う近似電磁場分布と SUPERFISH の計算結果の比較。

### 3-1) リニアックの概要

計算のために、4 種類の SC リニアックと一つの ACS リニアックをデザインした。その概要を表1にまとめた。Type-3 と Type-5 の計算結果を以下に示す。

表1 計算に使った加速管の概要

	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5
No of $\beta$ -cell	2	3	4	5	ACS type
Number of tank	61	48	34	34	46
Number of cell	6	7	9	9	14
Total length	128.9	104.2	80.1	80.2	109.2
Structure length	35.8	32.9	29.9	30.0	68.2
$E_0$ (MV/m)	9.2, 11.1	9-12	8.9-12.6	8.9-11.9	4.29

位相は  $-66 \sim -13^\circ$  の範囲である。

### 3-2) ACS リニアックの構造

計算結果の比較の為に ACS に似た構造を作った (Type-5)。これは 7 セルの加速管を  $1 \beta\lambda/2$  の空間でつなぐ構造とした。2 タンク毎にセルベータの値を変化させているので、位相スリップは、小さい。収束系は、SC-type と同じであり、その周期の長さが違っている。

### 3-3) 入射粒子エミッタンス

横方向 rms normalized 0.24 pi-mm-mrad

縦方向 rms 0.460 pi-MeV-deg

これらは、DTL 入射用エミッタンスをエネルギー190 MeV まで SDDL により加速した時の値である。



### 3-4) SC の計算結果

Type-3 (4 ベータセル version) の計算結果を示す。入射磁場はゼロ電流位相進みが  $90^\circ$  となるように選び、加速途中で磁場勾配を一定にした。

図3 : x,y,z 方向の rms ビームサイズ。

図4 - 図9 : output emittance

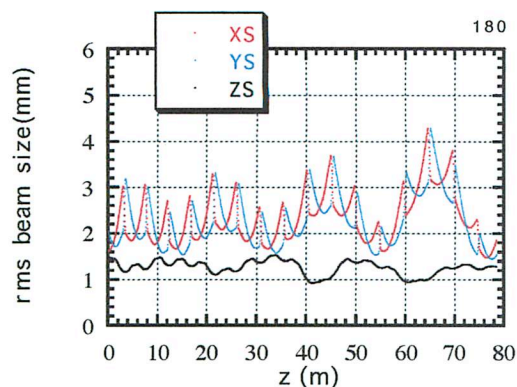


図3 SC (no error): rms beam size along the linac.

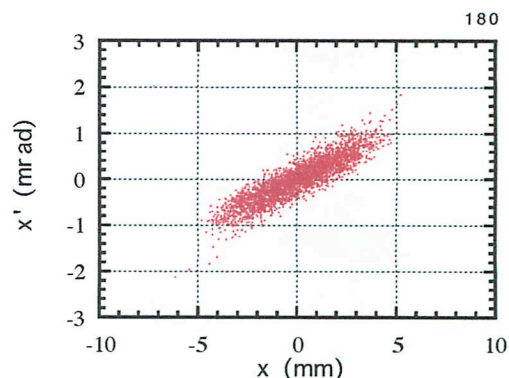


図4 SC(no error): x-x'

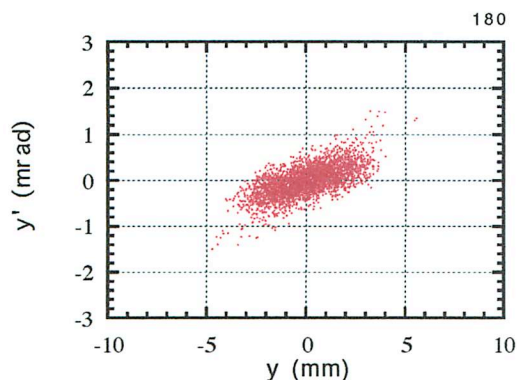


図5 SC(no error): y-y'

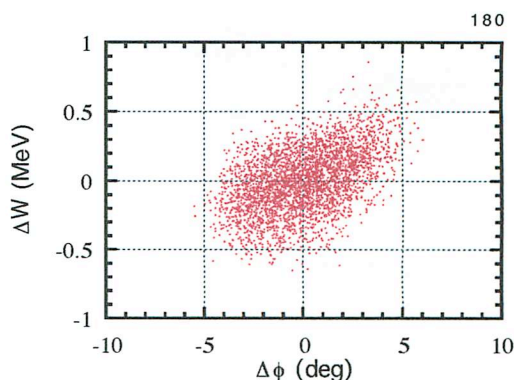


図6 SC(no error): dp-dw

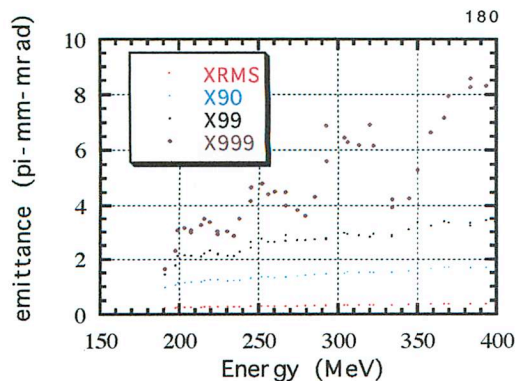


図7 SC(no error): x-x emittances

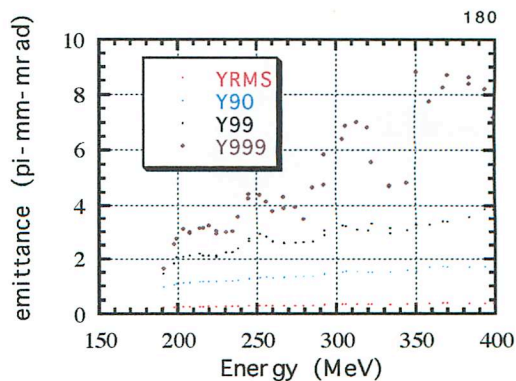


図8 SC(no error): y-y emittances

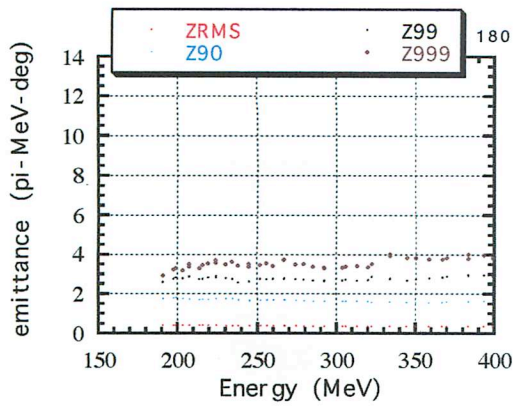


図9 SC(no error): dpdw emittances

以上より、エラーの無い場合には、SC では安定な加速が出来る事がわかる。セルベータが変わるエネルギーは、224, 267, 320MeV 付近であるが、それらのトランジションによる mismatches の影響が特に横エミッタンスに表れている。この部分には入射時の mismatches が少しあり、それがエミッタンスの振幅を増加させている可能性もある。セルベータが変化する所では、効率をあげるため又は安定な加速を目指して、電場の値が大きく変化する。その結果、縦のトランジション及び横のトランジションを起こす事になる。加速管の長さが変わるので、収束周期もここでジャンプする。

### 3-5) ACS の計算結果

ACS の場合を示す。入射磁場はゼロ電流位相進みが  $90^\circ$  となるように選び、加速途中で磁場勾配を一定にした。

図10: x,y,z 方向の rms ビームサイズ。

図11-図16: output emittance

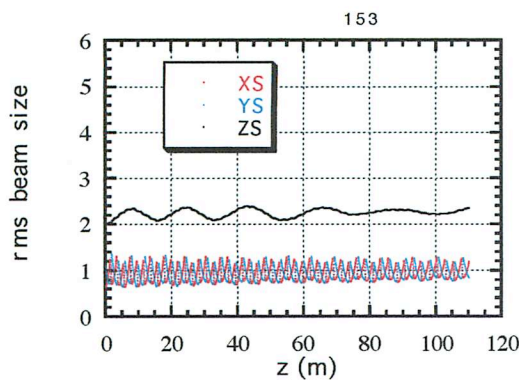


図10 ACS(no error): rms beam sizes along the ACS.

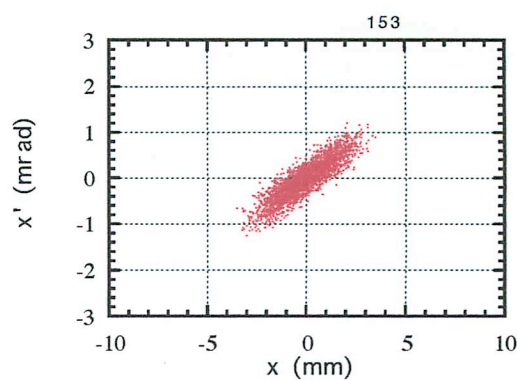


図11 ACS(no error): x-x'

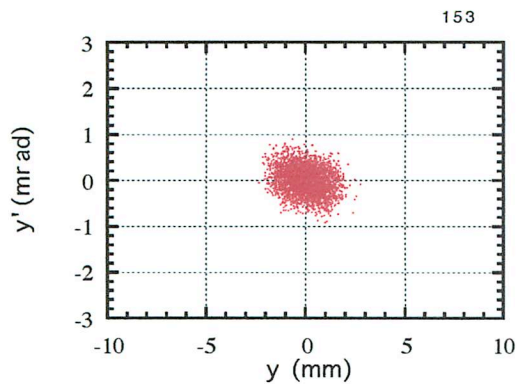


図 12 ACS(no error):  $y-y'$

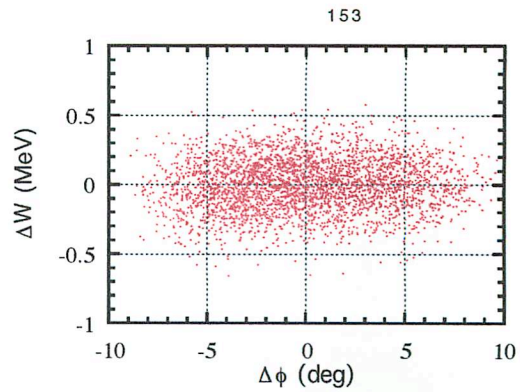


図 13 ACS(no error):  $\Delta p-\Delta w$

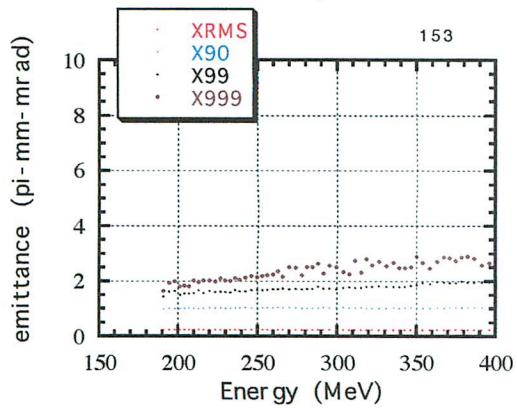


図 14 ACS(no error):

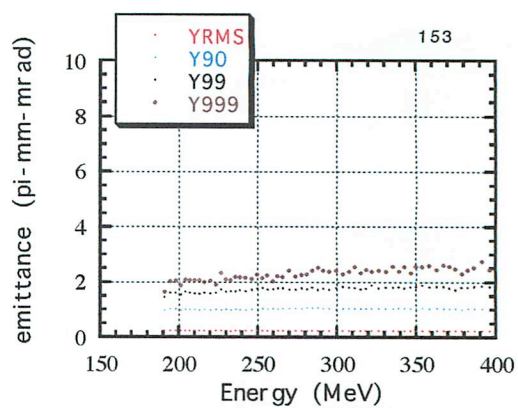


図 15 ACS(no error):

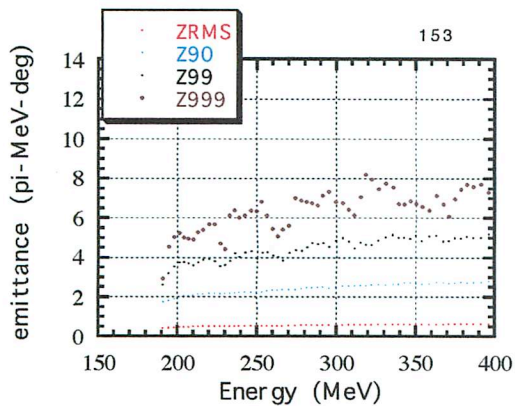


図 16 ACS(no error):

ACS でも安定な加速は可能である。S Cと比較すると縦のエミッタンス増加が目立つが、これは収束力が弱いためか、又は、入射直後の振幅の変化から推定すれば、SC よりも平均的なミスマッチが大きい事が効いている可能性がある。



### 3-6) エラーシミュレーション

#### 3-6-1) ACS で入力に大きなミスマッチがある場合

SC の横方向の振動 (図 3) が、入力のミスマッチによるものだとして、同じ現象が ACS で起こるかどうかを調べる。x 方向の twiss parameter ベータの値を 250% 増やして入射させた結果を図 17 に示す。

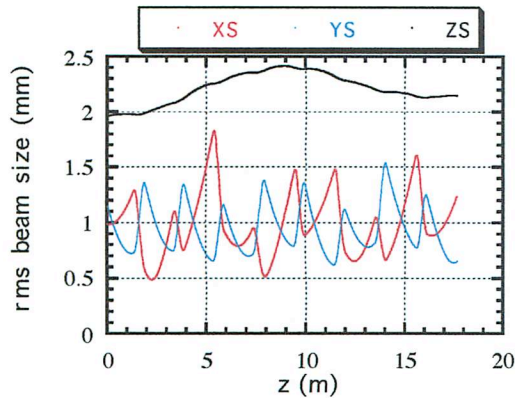


図 17 ACS の x-beta twiss を 250% 増加させたミスマッチ入射時のビームサイズ。

図 17 中では、x-ビームサイズのうねりは見えるが、sc の場合とは全く異なる振る舞いである。計算コードの中で rf defocus の項をゼロにすれば、SC で見える振動は消えるので、位相スリップと rf defocus による効果であると思われる。時間をかけて、さらに入射と加速の適切な条件をさがせば、この振動は減らせる可能性はある。しかしながら、横と縦のカップリングはそんなに大きくないので、縦横はある程度独立しているとして、考える事にする。

#### 3-6-2) ACS 及び SC で、加速電場と位相にエラーがある場合

各セル、及び各タンクに対してランダムなエラーを仮定してシミュレーションを行う。

エラーの表式は、例えば次のごとくである。

E31: セル電場エラー3%、タンク電場エラー1%。

P21: セル位相エラー2度、タンク位相エラー1度。

これらのエラー分布は一様である。次節においてエラーの分布依存性について述べる。ここでは SC の feasibility を検討するという立場から、ランダムエラーの効果が大きい計算結果について、E21P11 を基本のエラーとして、その結果について述べる。

表 2 に ACS 出力エミッタンス計算結果を示す。表 3 に SC 出力エミッタンス計算結果を示す。

(表中の run 番号と図の右上の番号は対応している)



表2 Summary of ACS emittance (X,Y,Z 順に夫々rms, 90%, 100% を示す, cm-mrad, MeV-deg)

	X			Y			Z			
INPUT	.0229	0.0976	.1759	.0232	.0979	.1764	.4508	1.9205	3.5074	
Noerror	.0231	.1021	.3257	.0230	.1031	.2690	.7069	3.0574	9.4072	run153
E11P11	.0230	.1003	.5710	.0228	.1043	.4996	.7469	3.2031	11.6066	
E21P11	.0231	.1053	.3642	.0234	.1081	.3414	.7927	3.5371	11.6941	run215
E21P11	.0230	.1050	.3431	.0225	.101	.4190	.7613	3.2340	10.5549	run193
E11P33	.0229	.1038	.3921	.0230	.1030	.4541	.7479	3.1803	11.7686	
E31P33	.0230	.1014	.5343	.0234	.1041	.3016	.7346	3.1950	10.0480	

表3 Summary of SC emittance (X,Y,Z 順に夫々rms, 90%, 100% を示す, cm-mrad, MeV-deg)

	X			Y			Z			
INPUT	.0229	0.0976	.1759	.0232	.0979	.1764	.4508	1.9205	3.5074	
No error	.0386	.1684	.9896	.0386	.1685	.8604	.4099	1.7937	6.1957	
E11P11	.0504	.2368	1.4192	.0534	.2518	1.5171	.9320	4.2028	20.7486	run182
E21P11	.0557	.2618	2.6282	.0596	.2902	1.6869	1.1855	5.1756	31.0072	run181
E11P11	.0361	.1665	.6098	.0376	.1754	.6341	.5102	2.2818	10.4172	run203

ACS の場合、ここで使用したエラーの範囲では、大きなエミッタンス増加はない事がわかる。

SC の場合、シミュレーション結果からは、縦方向のエラーに対する許容値が非常に小さい事が推定される。従来いわれていた  $1^\circ$  1% のエラーの範囲でも、ビームは重大な影響を受ける事がありうる。

図 18-31 にエラー E21P11 がある場合の SC (左側) と ACS (右側) の結果を示す。両者ともに一番悪いと思われる結果を、60 回の計算結果から選んで示す。

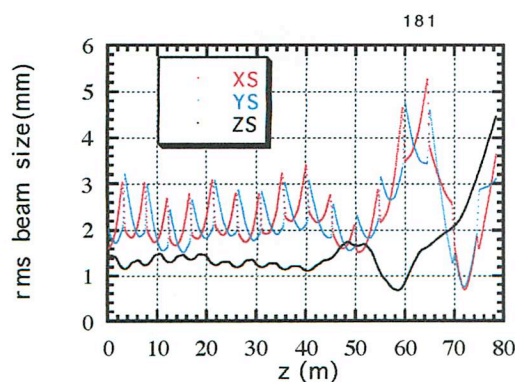


図 18 SC-Error E21P11

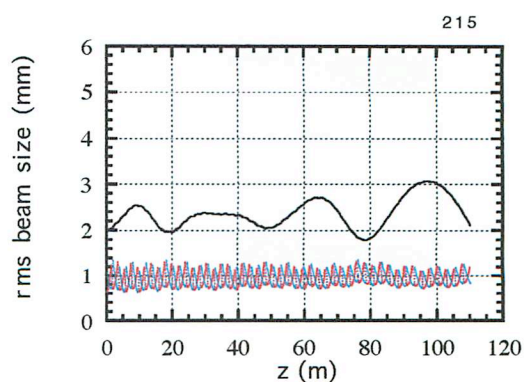
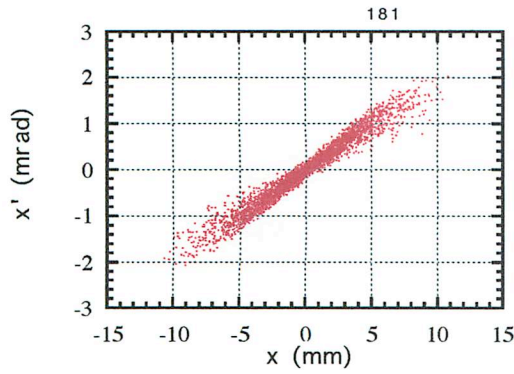
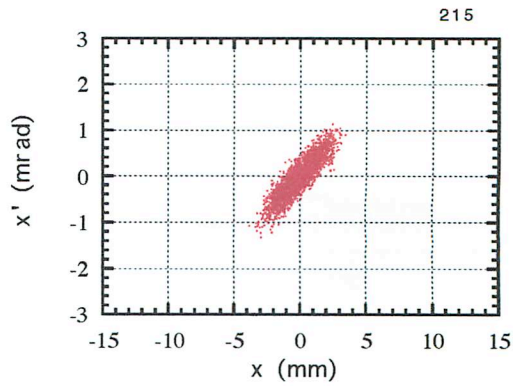


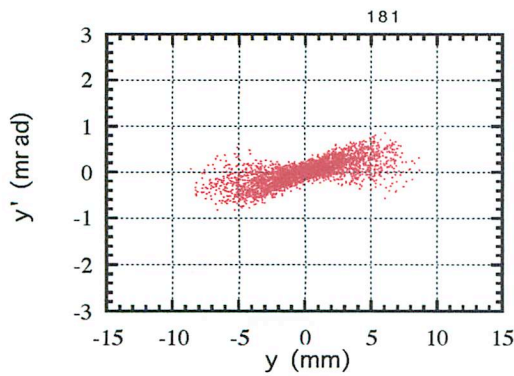
図 19 ACS-Error E21P11



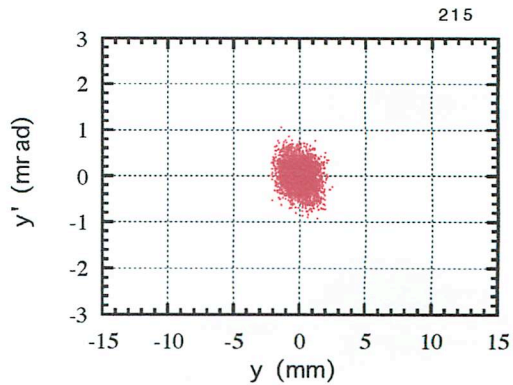
☒ 20 SC-Error E21P11



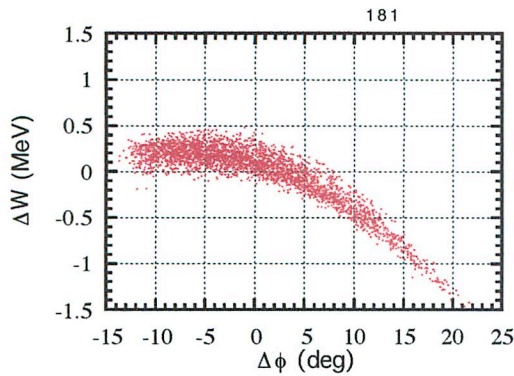
☒ 21 ACS-Error E21P11



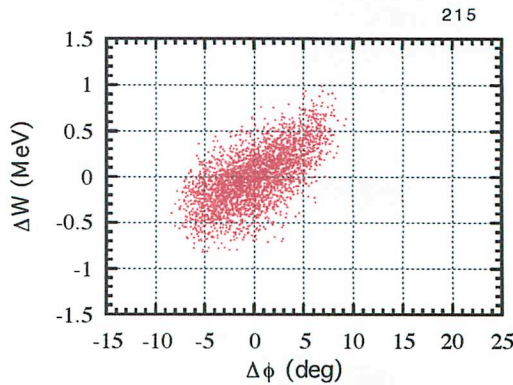
☒ 22 SC-Error E21P11



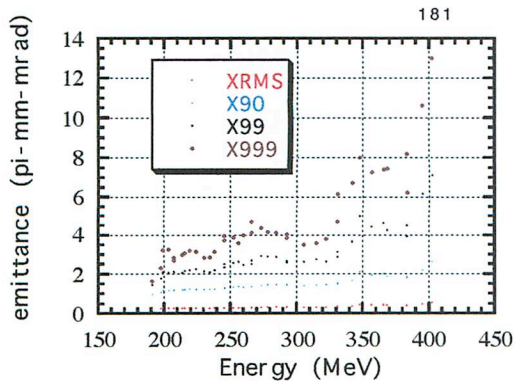
☒ 23 ACS-Error E21P11



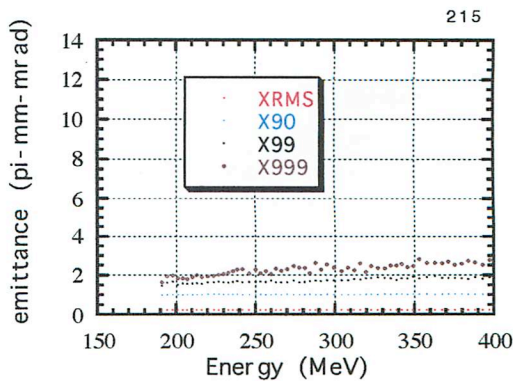
☒ 24 SC-Error E21P11



☒ 25 ACS-Error E21P11



☒ 26 SC-Error E21P11



☒ 27 ACS-Error E21P11

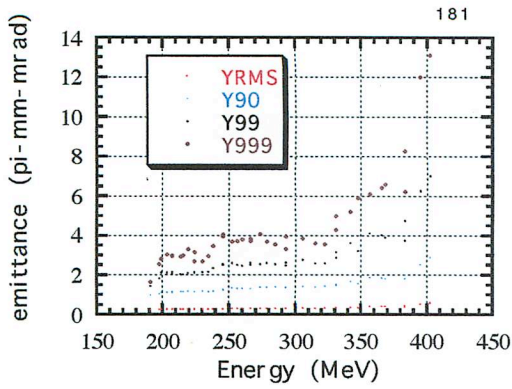


図 28 SC-Error E21P11

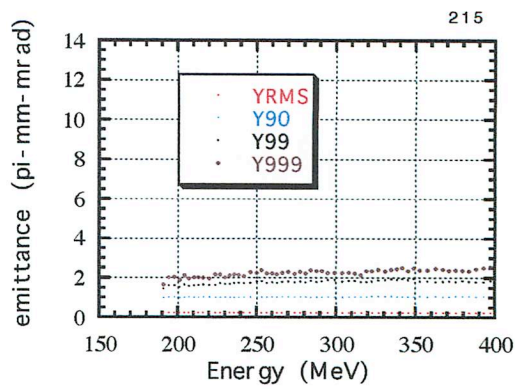


図 29 ACS-Error E21P11

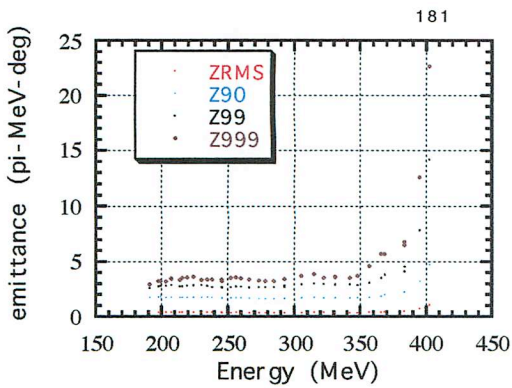


図 30 SC-Error E21P11

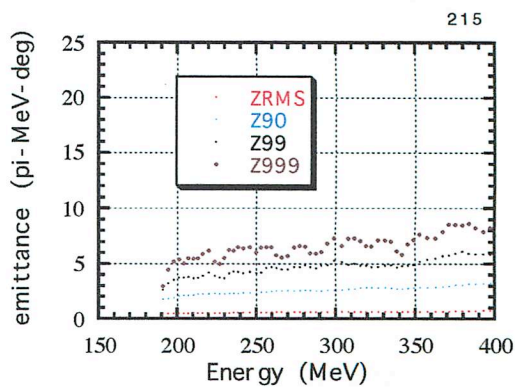


図 31 ACS-Error E21P11

### 3-6-3) エラー分布依存性

エラーの分布状態により、結果が違ふ事が予想される。そこで、E11P11 のエラーについて、ランダムに 60 回にエラー分布を作り、ACS と SC のシミュレーションを行った。リニアック中のエネルギー振動の最大振幅と、出力平均エネルギーのデザイン値からのずれを図 32 に示す。エラーが無い時とある時のエネルギー振動を図 33-36 に示す。SC の 60 回のシミュレーションの中で、4 例は不安定な加速と判断される。

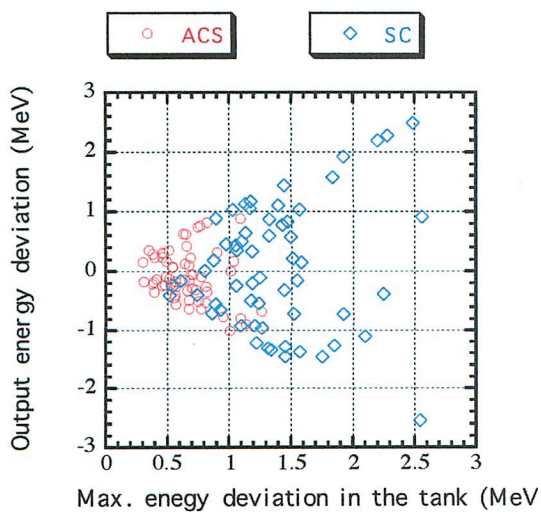


図 32 エネルギー振動と出力平均エネルギーのエラー分布依存性。エラーE11P11 (1° 1%) を仮定。



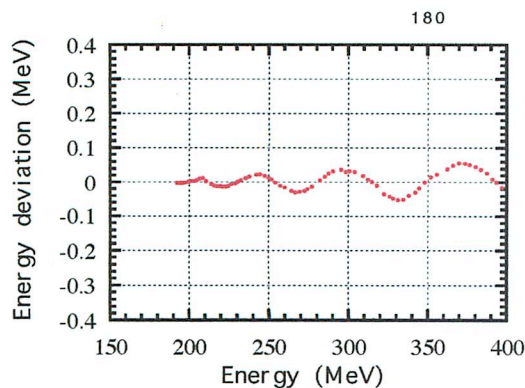


図 33 SC:エネルギー振動 (no error)

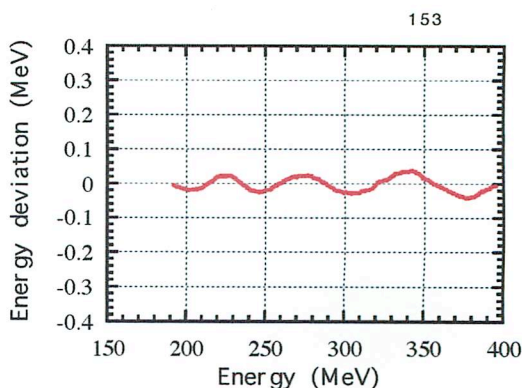


図 34 ACS:エネルギー振動 (no error)

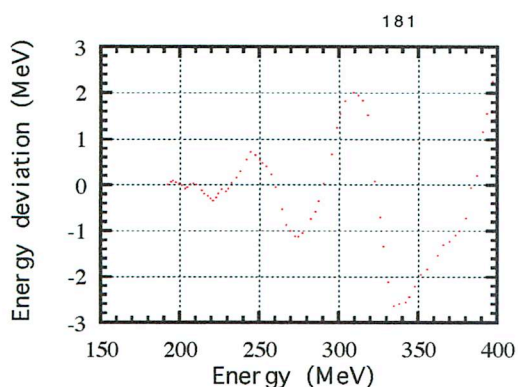


図 35 SC:エネルギー振動 (error E21P11)

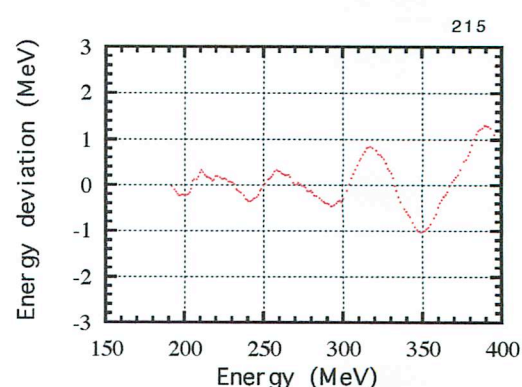


図 36 ACS:エネルギー振動(error E21P11)

#### 4) 考察

超伝導陽子リニアックでは、セルベータの数を減らすことにより、全体のコストの低減化を行っているが、その結果、位相スリップの量は増えるので、ビームに与える悪い効果が増大する。セルベータの境界においては、トランジションが存在すると考えられる。ここでは、電場、位相、周期等が普通は大きく変化する。リニアックでは、何種類かのミスマッチにより励起される縦方向の位相振動がエラーの分布によっては大きく増幅されることがあり、加速途中のある地点で、位相スリップによって減少した安定領域からはずれてしまう事が、SCに見られる縦方向のビームの劣化の主な原因と思われる。1度1%以内という加速管パラメータのエラーの範囲でも、ここで行った60回のランダムな分布中の4例において、こうした現象が見られた。超伝導パルスリニアックでは、加速パラメータのランダムエラーの分布の仕方に影響を与える原因が複数あり、ビームパルスのかかりの部分が空洞励振系時定数により決まる過渡的状态において加速されるものもあって、多くのエラー分布が起こると推定される。エネルギー振動の振幅は加速電場の平方根に比例するので、高い加速電場を使うほど出力平均エネルギーのデザイン値からのずれは大きくなる。1度1%以内という加速管パラメータのエラーの範囲でも、ビームパルス幅の中でエラー分布が変動する場合には、出力ビームの平均エネルギーの変動が大きくなり、補償が出来なくなるなど問題となる。