

High- β 加速管の加速電場安定度に対する要求仕様

KEK 2001. 5. 21 T. Kato

まとめ

超伝導陽子リニアックの出力エネルギー偏移は、ランダムタンクエラーが $\pm 0.2\%$, 0.2 度の時に、 ± 700 keV 以上となり、デバンチャーの位相が 25 度もずれて、デバンチャーの適切な動作を期待できない。この観点からの超伝導陽子リニアックに要請される電場安定度は、 $\pm 0.1\%$ 以下と思われる。

1. はじめに

常伝導加速管の電場の安定性に対する要求仕様は 1 度 1% である。この仕様は、安定なビーム加速をする為に、絶対値としてこの精度で決める必要があるという意味を持つ。この値の背景には、加速電場の相対的な安定度は、更に優れているという事が仮定されている。超伝導リニアックでは、その空洞の特性を生かす為に、かなり高い加速電場を想定する（表面ピーク電場 40 MV/m）。一般に、高電場を使う場合には、電場エラーに対する感度は増大する。従って、リングからのリニアックエネルギーに対する要求仕様は一定なので、SC の電場安定度に対する要求精度はきつくなる事が予想される。リニアックの出力ビームの縦方向の性質は、デバンチャーにより最終的に決まる。本ノートでは、デバンチャーの運転まで含めて考察して、High- β 加速管の加速電場安定性に対する要求仕様について述べる。

2. 加速電場のエラーについて

加速管の構造と運転法により、ここでは以下の加速電場強度と位相のエラーを考える。

Type-A) セルエラーとタンクエラーを独立に決める。

Type-B) セルエラーをある一定の分布に保ち、タンクエラー分布を変化させる。

超伝導空洞の場合には、冷却後の電場分布の測定はなされていない。冷却とチューニングにより電場分布は変化すると思われるので、セルエラーをゼロと仮定する事は現実的でない。DTL の場合にも、セル電場分布を 1% 以内にチューニングする事は、その測定の精度の問題もあり、容易ではないとされている。

3. High- β 加速管の出力ビーム

ランダムエラーを与えた時の、出力エネルギーの偏移と加速管中の最大エネルギー偏移を示す。計算の方法は参考文献（1）と同じである。

3-1. 超伝導リニアックの場合

高電場を用いた最新の 9 セルデザインの場合の、出力ビームの様子を図 1 に示す（参考資料 PA01-013-R）。図中には次の三種類のエラー分布についての、計算結果が示してある。

1) 赤塗り丸 Type-A: セル電場は $\pm 1\%$ 、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ 、タンク電場は $\pm 1\%$ 、タンク位相は $\pm 1\text{deg}$ を全て独立に指定。

2) 黒中抜き丸 Type-B: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.1\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.1\text{deg}$ で変化。

3) 青ひし形 Type-B: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.2\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ で変化。ここでセル電場分布は 2 種類を使っている。

ここで、セルエラーを与える分布は、無作為に選んでいる。その結果、図 1 で示すように、出力ビームエネルギーのデザインエネルギーからのずれは、 0.1% の場合は、 0.2% の場合よりも小さい結果となっているが、エネルギー振動の最大振幅は 0.1% の方が大きくなっている。図から、タンクエラーが 0.1% の時の出力エネルギーの分布は $\pm 0.5\text{ MeV}$ であり、タンクエラーが 0.2% の時には $\pm 0.7\text{ MeV}$ 程度であるが、データ数を増やすとこれらの値は増加すると思われる。例えば、エラー 0.2% の場合には $\pm 1\text{ MeV}$ 以上まで大きくなる事が予想される。

3-2) ACS の場合

図 2 に ACS の場合を示す。比較の為に SC の結果も示す。次の三種類の計算結果を図示した。

1) 赤抜き丸 Type-B, ACS-1: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.2\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ で変化。ここでセル電場分布は 2 種類を使っている。

2) ひし形 Type-A, ACS-2: セル電場は $\pm 1\%$ 、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ 、タンク電場は $\pm 0.2\%$ 、タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ を全て独立に指定。これは ACS-1 にて用いたセルエラー分布が、どのような分布であるか（偏っていないかどうか）を調べる目的で追加した。

3) 青塗り丸 : Type-B, SC: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.2\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ で変化。ここでセル電場分布は 2 種類を使っている。SC のデータは、図 1 に示したものと同一である。

ACS の場合、ランダムタンクエラーが 0.2 deg 、 0.2% の時の出力平均エネルギーのデザインからの偏移は、 $\pm 0.25\text{ MeV}$ 程度である。

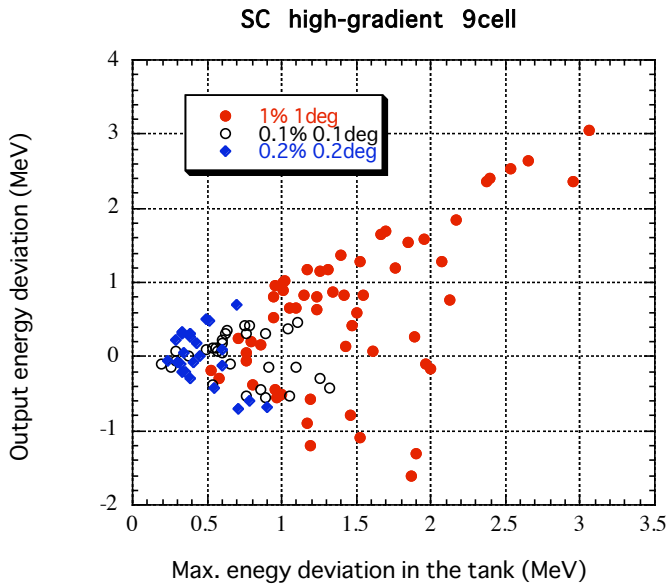
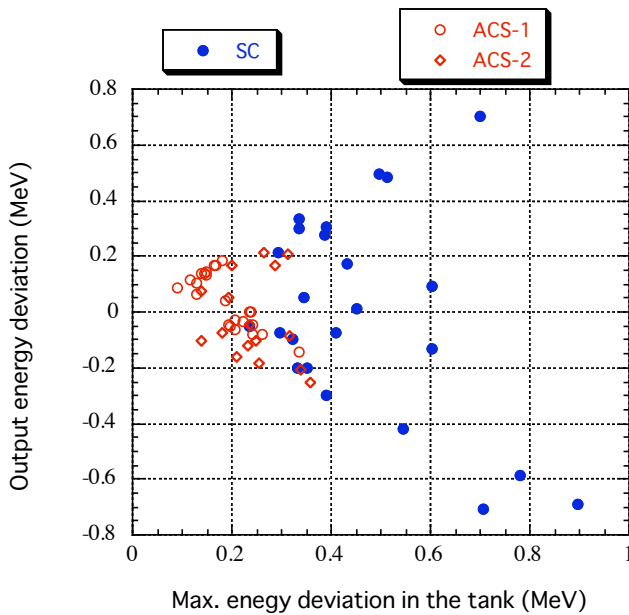


図1 SC の出力エネルギー偏差 vs. 最大エネルギー振幅。

- 1) 赤塗り丸 Type-A: セル電場は $\pm 1\%$, セル位相は $\pm 1\text{deg}$, タンク電場は $\pm 1\%$, タンク位相は $\pm 1\text{deg}$ を全て独立に指定。
- 2) 黒中抜き丸 Type-B: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.1\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.1\text{deg}$ で変化。
- 3) 青ひし形 Type-B: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.2\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ で変化。ここでセル電場分布は 2 種類を使っている。

図2 ACS の出力エネルギー偏差 vs. 最大エネルギー振幅。



- 1) 赤抜き丸 Type-B, ACS-1: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.2\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ で変化。ここでセル電場分布は 2 種類を使っている。
- 2) ひし形 Type-A, ACS-2: セル電場は $\pm 1\%$, セル位相は $\pm 1\text{deg}$, タンク電場は $\pm 0.2\%$, タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ を全て独立に指定。これは ACS-1 にて用いたセルエラー分布が、どのような分布であるか (偏っていないかどうか) を調べる目的で追加した。
- 3) 青塗り丸: Type-B, SC: セル電場は $\pm 1\%$ である一定の分布に固定、セル位相は $\pm 1\text{deg}$ である一定の分布に固定、タンク電場は $\pm 0.2\%$ で変化、タンク位相は $\pm 0.2\text{deg}$ で変化。ここでセル電場分布は 2 種類を使っている。このデータは、図1に示したものと同一である。

3-3) 計算結果のまとめ

出力エネルギーの偏移を表1にまとめた。ここでセル位相エラーをゼロにすると、逆に出力偏移が大きくなる場合がある事を指摘しておく。例えば、SCのタンクエラー0.2%で688 keVの偏移の場合には、セル位相エラーをゼロにすると741 keVに増加する。更に、SCの場合には、ビームの過渡状態では、予想されるエラーは、計算上(コントロール)でも大きくなる事に注意する。

表1 エネルギー偏移のまとめ

	セルエラー	タンクエラー	最大出力エネルギー偏移
SC	1%, 1deg	1%, 1deg	+3.1, -1.6 MeV
SC	1%, 1deg	0.2%, 0.2deg	+/- 0.7 MeV
ACS	1%, 1deg	0.2%, 0.2deg	+/- 0.25 MeV

4. デバンチャーの動作

下流30mの位置に2.5MVの加速電圧を持つ972MHzデバンチャーを仮定する。デザインバンチの位相をゼロとして、加速管にエラーがある場合のデバンチャーの動作を表2にまとめた。

表2 エラーバンチに対するデバンチャーの動作

	タンクエラー	最大出力エネルギー偏移	Debuncher phase	Acceleration by debuncher
SC	1%, 1deg	3.1 MeV	-109 deg	-2.35 MV
SC	0.2%, 0.2 deg	+0.7	-24.8	-1.05
SC	0.2%, 0.2 deg	+1.0	-35.4	-1.45
SC	0.1%, 0.1 deg	+0.5	-17.7	-0.76
ACS	0.2%, 0.2 deg	+0.25	-8.9	-0.39

この結果より、SCでタンクエラーが0.2%, 0.2 degであれば、デバンチャーの位相が大きすぎてしまい、デバンチャーはうまく機能しない事がわかる。+/-0.1%のエラーの時でも、要求エネルギー半幅と同等のエネルギー偏移が、デバンチャーで起こる場合がある。SCでは、実際のエラーは、これより大きくなると予想される。ACSでは、タンクエラーの安定度はほとんど高周波電源で決まり、それらは0.1%程度と予想される(参考文献2)。

なお、デバンチャーの動作には、こまかな注文をつける可能性があり、時定数の小さい常伝導タイプを選ぶべきである。

参考文献

1. High- β 加速管の加速について T.Kato (T.Kato の Web 参照、KEK Report 出版予定)
2. Private communication, S. Yamaguchi.