

DTL の収束電磁石の配管のコスト減案について

2003.5.18 リニアック全体設計 加藤隆夫

2003 年 4 月 18 日のリニアック打ち合わせにおいて、DTL の収束電磁石の配管のコスト減のために、高いエネルギー部分の収束力を equipartitioning から決まる値からあまり大きく変化させないようにする案についての説明があり、この場合、電流が低く押さえられるので、収束磁石電源の DC 運転も考えられるとの説明があった。

結論：

本案はリニアックの基本的な性能を制約して、リニアックに求められている加速管仕様及びビーム仕様の達成を難しくするので、採用しない事が適切である。

詳細：

問題点は次の 4 項目にわけられる。

- 1) ビームダイナミクスの観点
- 2) 運転時のハードの変化と安定性の観点
- 3) コストの差
- 4) 加速器建設の基本方針

(1) と (2) は関連する部分はあるが、以下項目別に述べる。

- 1) ビームダイナミクスの観点

横収束力を変える効果について定性的に述べる。

1. 横収束力の変化により、空間電荷効果及び縦収束力の兼ね合いで、横のエミッタンス増加が変化する。図 1、2 参照。
2. 横収束力と縦収束力の比が変わる事により、縦のエミッタンス増加をコントロールできる。図 1、2 参照。
3. SDTL 入射時の縦マッチングのノブは、設定されていないが、DTL 横収束力を変化させると、エミッタンス増加の変化があり、少しのノブとなる。
4. DTL 部分の横収束力範囲を狭めると、後段の加速における自由度も、相応に狭まる事になる。

RCS から要求されているビームパラメータは、縦横とも、相当厳しいものと理解している。その範囲内で、リニアックの縦と横のエミッタンス増加をコントロールできる事も考慮に入れて、L3BT には

縦のコリメータを設置しない事にした。リング側でも、リニアック側でも、現在想定しているビームパラメータが最善であるという事は保証されていない。そうした条件からスタートして、最大ビーム強度を得るためには、縦と横のエミッタンス比を変える自由度を充分確保しておく事が必要と考える。

横の収束力だけに注目すれば、DTL 内で位相進み 60 度を保つ収束方法は、エミッタンス増加を押さえる傾向が強く、一般的に推奨できる方法と思われる。位相進みを弱める事は、収束力の低下を意味しているので、注意を怠ると大きなエミッタンス増加につながる可能性を持っている（図 1、2 参照）。

2) 運転時のハードの安定性の観点

パルス電磁石を採用した結果、DC 励磁に比べると DTQ の熱負荷は約 1/3 になっている。これは、運転時のドリフトチューブの変形に起因する電場分布の変化を押さえる為に採用した。DTL 第 3 タンクの収束磁石のパルス運転時の発熱は～800W と見積もられている。DC 励磁の場合には、熱負荷が 3 倍程度増加する。これにより、電場分布の変形と共振周波数の変化とが増大する。共振周波数の変化を補償する為に周波数チューナを動かすが、この動きは局所的なので、電場分布を乱す結果となる。第 2、第 3 タンクでは、これらの影響の大きさが第一タンク以上になる事は予想されなかったので、発熱による DT 変形の 3 次元シミュレーションによる評価は、DTL の第一タンクだけしか行っていない。従って、基礎資料がない為に、DC 励磁により熱負荷が 3 倍になる場合には、電場の乱れ等は現時点では推定ができない。計算による評価とは別に、実際問題としては、以下のような事が予想される。ドリフトチューブの製作過程で、DTQ からドリフトチューブへの熱流入を下げる事が大きな問題であった。高エネルギー部分の DT では、パルス磁石の発熱量は 800W、3% duty の高周波発熱は 400W 程度である。DT の変形量を押さえる為に、DT 外部構造とその内側の冷却水溝とのギャップ長さを当初設計に比べわずかに短くして、その部分の熱伝達効率の向上をはかっている。こうした構造は、DTQ の熱膨張に対しては、敏感であると予想されるので、熱負荷の影響は、熱に比例する以上となる可能性がある。

更に、熱に起因する DT ステムの変位量は、当初考慮した問題であった。図 3 に示すのは、四極磁石の励磁電流のデューティを変化させた時の、DTQ 冷却水の温度上昇である。これは 1998 年 6 月のテストタンクの真空中で低エネルギー用ドリフトチューブの中の DTQ をパルス励磁した時の測定結果である (by 吉野)。デューティが 100% になれば、水温上昇は 20 度以上となる。パルス運転時に 7 度、直流運転時に 20 度の温度上昇とすれば、単純計算では、ステムの伸びは、27 ミクロンと 92 ミクロンとなる。DTQ 整列精度は 50 ミクロンを目指しているなので、デューティ 100% の伸びは看過できない量である。この場合、細かな調整ノブとしては、水の流量が考えられる。今回の DTQ の製法の短所のひとつは、その内部を水により冷却するコイルの肉厚が十分に厚いわけではないという問題である。水の流れにより、内面の銅は削られていくが、削られる割合は、流速に大きく依存する。長期運転を

目指す立場からは、できる限り水量を絞って運転する事が望ましい。従って、単に水量を増加させるという事では、問題を解決した事にはならない。定常状態で水量にマージンがある事は、constant phase advance に近い磁場設定をする場合に、DTQ の発熱変化に対応する事により、空洞の変位を押さえ、ビームを安定に加速する為のノブにもなっている。

添付資料に記載されているように、デザインと試作の段階では、さまざまな事を考えて、メカニカルデザインとビーム仕様とが、全体として整合性がとれるように考えられている。部分的に仕様を変える場合には、注意深く対処する事が必要である。

3) コストの差

コストの話は具体的でなければ、議論の基礎となりにくい。JPL の中エネルギーデザインでは、SDTL を 50 MeV 以上のエネルギー領域に採用した事により、ドリフトチューブの中に組み込む磁石の数は、150 個程度削減された。その替りに DC 励磁の磁石が 60 台程度必要となった。これは、加速器構成コンセプトの大幅な変更であり、ビームの性質にも影響がある事が計算され、その時点では許容範囲内と考えた。今回の問題提起は、DTL の四極磁石の励磁電流を equipartitioning 法の値からは大幅には増大させないようにすれば、磁石電流の配管コストを削減できるという考え方に由来している。この場合、DC 励磁とすれば、配管コストの削減が見込まれるという事であるが、全数を変える事は到底無理と考えられるので、部分的な電源数に対するグレードの低い配管仕様の適用が考えられる。素材のコストが変わる事がどの程度のコストの差となるのかを見積もる事が必要と考える。その後、そのコスト差が、加速器全体のコンセプト変更及び達成仕様の変更に値するものかを考察する事が必要であろう。

4) 加速器（リニアック）設計建設の基本方針

以下の考え方を基本方針としている。

1. 大強度高エネルギーの RCS の入射器としての陽子リニアックの問題点に対処するために、収束力及びマッチングの自由度を持つ事を、JPL 基本デザインの柱の一つとした。この必要性がないと判断する場合には、永久磁石による収束法を採用するデザインが考えられる。
2. 求められる requirements をどのようにして満たすかという問題認識より、建設後にも改善努力が可能な方式を採用。現時点で確定できない事に対処する自由度を持つ事が重要と考える。
3. リング側からの縦のエミッタンスの要求を満たすため、既存のリニアックの経験を活かして、縦のエミッタンス増加のコントロールが可能な構成とする。
4. 運転時の空洞の変化を含むリニアック構成要素のパラメータの変化を押さえるような工夫をして、unknown パラメータが少ないようにする。(職人芸の運転を排除するためには、マシンとビームのパラメータが既知である事が肝要。リングでは、ある場所の perturbation は比較的簡単な測定と計算で特定できる。周期(回)条件のないリニアックではむずかしい)

5. リニアックはカスケードなマシンなので、途中までの性能を、以後の部分で回復する事は不可能であるとの認識から、低エネルギー部分から仕様を満たすように順次製作する。この場合、あとで、改良等が難しい部分に関しては、十分な配慮を行う。

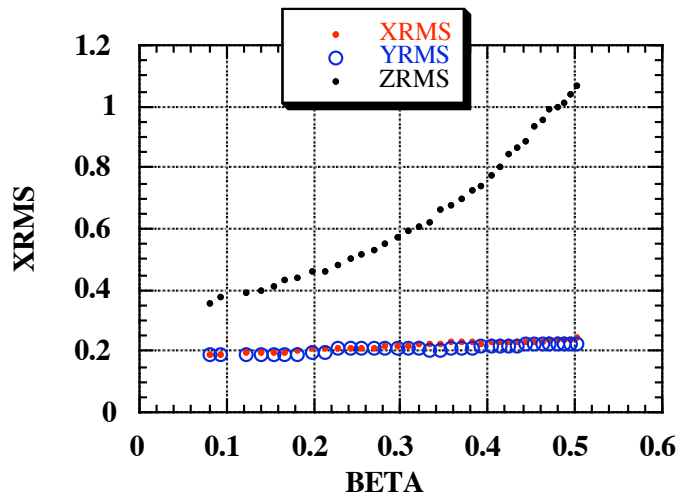


図1 Constant phase advance focus の場合の rms エミッタンスの変化例。

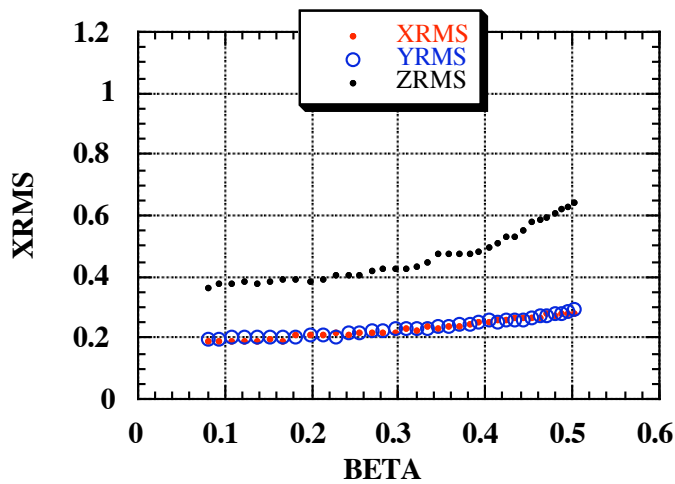


図2 Equipartitioning focus の場合の rms エミッタンス増加例。

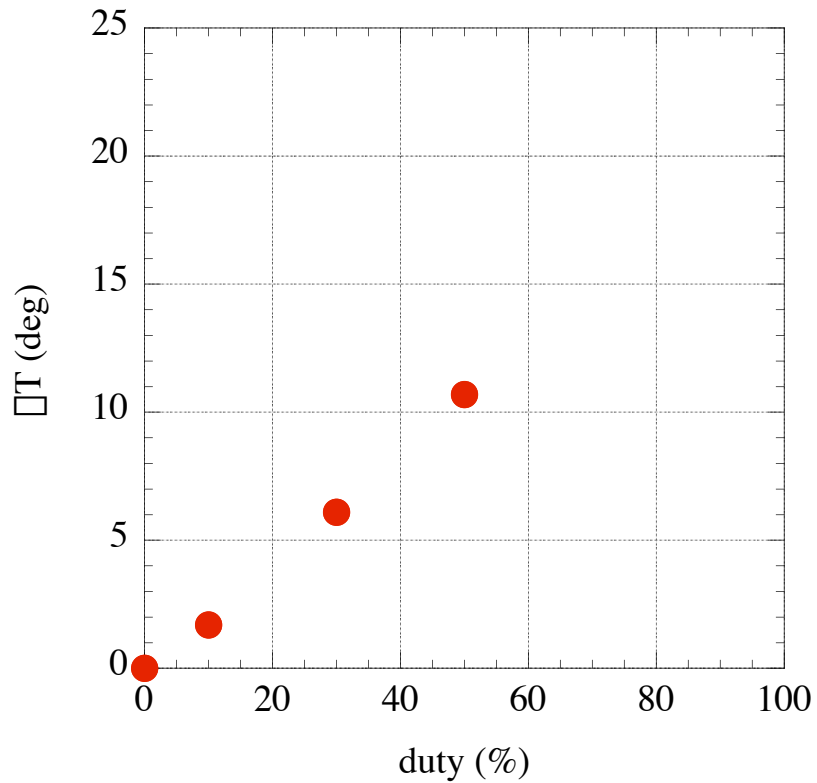


図3 DTQ の励磁デューティと DTQ 冷却水の温度上昇との関係。ピーク電流 750 A。パルス励磁。3-MeV 用 DT。真空タンク中で励磁。冷却水量は 1.5 – 2 L/min.

参考資料：関連するパラメータ

ドリフトチューブに関連する諸量

ドリフトチューブ	入射部	出射部	
エネルギー	3	50	MeV
ベータ	0.08	0.31	
RF 発熱	86	420	W, duty 3%
DTQ 電流 / 発熱	680 / 800	350 / 820(*)	A/W, equi, 40% pulse-Q
	680 / 800	750 / 3800(*)	A/W, const, 40% pulse-Q

(*) 参考値

参考資料：98年7月10日付のメモ“DTL TANK distribution”より

3) rf 発熱とQ-mag発熱について

3-1) first DT

rf: 43 W

DT-Q: 2000 W

ホロコン使用の昨年度の作り方によるドリフトチューブの熱測定

First DT, 750 A

*DTQのみ通水 水温上昇 22.5度, 流量 1.0 liter/min $Pc1=1570$ W

*DT&DTともに通水

DTQ水温上昇 23度, 流量 1.1 liter/min $Pc2=1765$ W

DT 水温上昇 1 度, 流量2.2 liter/min $Pc3=153$ W

* $Pc3/(Pc2+Pc3)=0.08$: この作り方では8%の熱が磁石からDTへ流れている。

* $Pc1/(Pc2+Pc3)=0.82$: DTへ水を流さないと、DT表面が熱くなり、全体の発熱の18%が放射されている？(空气中へ)

* rf : Q = 43 : 2000=1:46.5

* rf : from Q = 43 : 153=1:3.6 (次の作り方では153Wを減らす)

* rf 43 Wによる水温上昇は0.3度

3-2) EQUI vs CONST phase

第一タンクの後ろでは、電流比 $I_{const}/I_{equi}=1.7$ 発熱の比は2.8 倍に及ぶ。

4) DTのQ-magnet による熱変形

ホロコンタイプのDTはエポキシによりQとDTがつながっているため、熱と歪みの両方がDTに伝わる。

ホロコン磁石の端面の全変形量(B一面変形量+A一面変形量)を図に示す。丸印は磁石のみに通水の時。この場合には、DT全体の温度上昇が起り、変形は大きい。×印はDTにも通水した場合。DT表面の温度測定の結果より、DTの円周面の温度上昇は小さいが、端面の温度上昇は大きく、また4回対称の構造を持っている事から、磁石との接触が熱源及び歪み源である事がわかる。

従って、熱と同時に磁石の歪みが、外側のDTに与える影響を小さくする事が重要であるが、これは、磁石の収納法とも関連している。

結論としては

1) 熱源の減少

2) 歪み伝達の減少

3) 熱伝達の減少

が重要。

rf 発熱の効果よりも桁が大きい量について、それら諸量の変化が一様である事を仮定する運転法の場合には、その根拠となるデータを常時取得する事が重要となる。

問題点

- 1) 高周波発熱によるDTの変形による電場の乱れ
- 2) 高周波発熱による共振周波数のチューナー補正による電場の乱れ
- 3) ドリフトチューブの中の四極磁石の発熱の効果
 - A) ドリフトチューブの温度上昇が大きくなる。
 - B) 四極磁石の変形がドリフトチューブの変形を起こす。

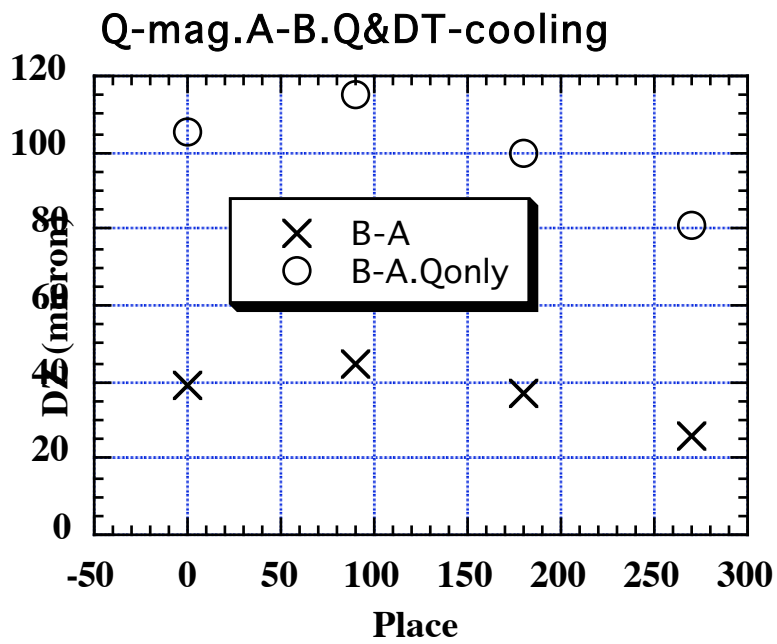
以下の厳しい条件を付ける。

- 1) 高周波発熱とチューナー補正による電場の乱れを0.5% 以下にする。
- 2) この時ポストによる改善率を考慮しない。
- 3) タンク外壁の温度変化は取り込まない。

対策

- 1) タンクとドリフトチューブの温度上昇による変化が相殺する設計 (?)。
- 2) 四極磁石の発熱がドリフトチューブに与える変形を小さくする設計。
- 3) ドリフトチューブには大量の水を流せるようにしておく。
- 4) パルス磁石電源の可能性も検討する。
- 5) ホロコン水温上昇によるステム変形。

(本資料は<http://jhfla.kek.jp/~kato/DTLframe.html>のDTの冷却メモの一部です)



参考図：横軸＝端面の周方向の角度、縦軸＝変形量（ミクロン）