

Proposal of RF New Scheme in ILC – Distributed RF System (DRFS)

S. Fukuda¹,

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

Basic configuration design (BCD) in SC ILC has been studied assuming to employ 2 tunnel and the reference design report (RDR) was released. However due to the high cost of construction, single tunnel plan has been discussed recently. Two typical plan, the klystron cluster scheme (KCS) and the distributed RF scheme (DRFS) are intensively studied in the team of global design effort (GDE). In this report, detailed configuration of DRFS and cost estimation compared with BCD are presented. Discussion about the availability and maintenance plan are also presented. Critical items are also listed up and feasibility plan of DRFS is described.

ILCの新提案-分布型RFシステム (DRFS)

1. はじめに

2004年ITRPの勧告以降、選択された超電導ILCの基本案(BCD=Basic Configuration Design)は2-トンネル案を基本として来た。技術的検討、保守やAvailability、コスト評価等検討が重ねられ、比較的まとまった案としてRDRに記載された[1]。一方で全体のコストが高くなりすぎたために、BCDとは別のスキームがRDR出版後から検討され始めた。コスト低減のために1-トンネル(DESY-XFELは1トンネル)が浮上してきた。1トンネル案は DUBNA(露)会議(2008年6月)から種々提案された。提案されたプランは①DESY-XFEL型1トンネル案②浅い深度の1トンネル案③クライストロンクラスター案: Klystron Cluster Scheme [KCS] 等である。後に筆者により④分布型RFシステム: Distributed RF Scheme [DRFS] (2008年11月のLCWS08)が提案された。現在は主にKCSとDRFSが検討項目として残り議論されている。本報告ではこのDRFSについて紹介する。今まで提案された1トンネル案の比較は図1

にまとめて示した。

KCSはRF源を全て地上に電源ごと移動し、地上で35台のクライストロン電力をまとめ、低損失円筒導波管で地下トンネルに運び、順次35台のRFユニット単位(3クライオモジュール、26空洞)へ電力を分配し直すという案である。最大長2.5kmに渡る真空中で直径50cmの円筒導波管に350MWの大電力を透過させる野心的な案である。地上部で1つのRFに纏め上げるために、機器のメンテ上は有利であるが、LLRF的には超電導空洞700台余りのベクターサム制御を行わねばならず、空洞のクエンチ等にもどのように対応させるかといったシステムの柔軟性に難がある。

このようなことがあるので、KCSと対極的な位置にあるが、非常に単純で空洞制御が簡単なDRFSを提案した訳である。構成コンポーネント、特に大電力コンポーネントの個数が増えるとコストが逆に高くなる気がするが、マスマプロダクションと製造の工夫によるコスト低減、適切なスキームの提言でコスト低減が期待できる。本件ではケーススタディでその可能性を追求する。現在ILCの国際設計チームで議論がなされている段階である。

2. DRFSの概要

BCDでは1台のクライストロンから26台の空洞へ電力供給し、全長でRF源は650台(主ライナックは550台)必要とする。1台のクライストロンから1台の空洞へ電力を供給すると総計16900台のクライストロンと電源が必要となる。もしクライストロン1台から2台の空洞へ電力を供給すると空洞からの反射を相殺することが可能でサーキュレータが省略でき、総計8000台のクライストロンと電源が必要となる。そのままでは量産を考えてもコスト競争力は無い。コスト競争力を持たせるためにク

	BCD	DESY	Shallow Tunnel	RF Cluster	DRFS
Scheme					
Deep/Shallow	Deep	Middle	Shallow	Middle	Deep
Civil Cost	High	Middle	Shallow tunnel cost	?	Deep
Cooling Cost	○	○	○	○	○
Heat source	Heat source of RF in the tunnel	Modulator on the surface	Heat source of RF on the surface	Heat source of RF on the surface	Heat source of RF in the tunnel
Site Dependence	OK	Japan Mountain Site	Dubna OK Japan ?	-> longer WG	OK
LLRF handling	○	○	○	△	○
Vector Sum	26 cav. Vector Sum	26 cav. Vector Sum	26 cav. Vector Sum	780 cav. Vector Sum	1 to 1
Redundancy	○	○	○	△	○
Kly Failure Impact	26 Cavity Stop	26 Cavity Stop	26 Cavity Stop Easy Klystron Replace	Easy Klystron Replace	Scattered failure section
Other Issues		Long HV Cable		Long Vacuum WG System	Very Simple Configuration
R&D Cost	○	○	○	△	○
Test Facility	3 Cryomodule/26 Cavity= 1 RF unit	3 Cryomodule/26 Cavity= 1 RF unit	3 Cryomodule/26 Cavity= 1 RF unit	Difficult to evaluate one minimum unit	Very small system
Total Cost					

図1: 提案されている各種Schemeと評価。BCD案を左端コラム、DRFSを右端コラムに示した。

¹ E-mail: shigeki.fukuda@kek.jp

DRFS Scheme

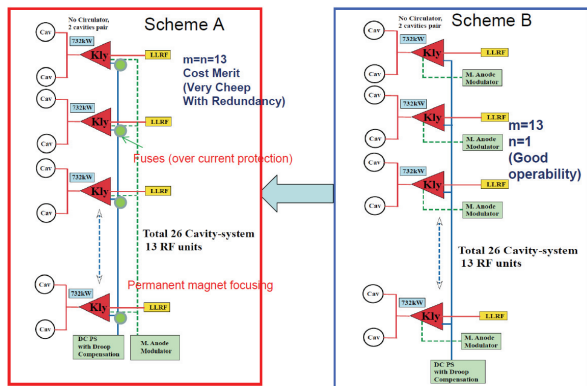


図2: 最初に提示されたDRFSの2つの案。

ライストロンはパルス変調アノード(MA)付きとし、DC電源、MA変調器等を複数台のクライストロン(13~26台)に共通化するとコストが下がる。この方式はJ-ParcライナックのRF源で採用されている。始めに提案した2種類のDRFS案を図2に示した。図中のScheme B(右図)ではDC電源は13台のクライストロン共通、変調器は個別であるが、Scheme AではDC電源、変調器とも13台のRF源共通としている。後者はコスト競争力があるのでこれをベースに検討を重ね、2009年6月のWebex会議で提案した。更にクライストロンはイオンポンプ無し、永久磁石集束、共通ヒーター電源とし、製作時にもコスト低減の工夫を行うと安くなる可能性が見出せた。一方でKCSに比べると地下にあるRF源の機器の数が多く、個々の機器の故障率が小さくてもその故障総数が運転に与える影響が無視できないという指摘があった。いわゆるHigher Availabilityを達成するためにコスト的には高くなる要素があるがDC電源やMA変調器にバックアップを設け、故障による運転への影響を最小化する案に変更した(第5節参照)。コスト増に対してはDC電源とMA変調器が分担するクライストロンの数を増やすことにより相殺することが可能である。以上のような提案内容をよりリファインした結果のコスト評価したものを表1に示した。この表1においてはBCD案と比較するためにDRFSについては1RF源当たりのRF原価を13倍して空洞26台単位のシステムに規格化したコストを算出した。且つ絶対額を公表するのは差しさわりがあるためにBCDの26空洞当たりのRF原価を100とした時の相対的な数値でまとめた。

表1 BCD案のRF源コストを100とした時のコスト比較表

Scheme	Klystron	Modulator	PDS	Total
BCD	26	45	29	100
DRFS-B	50	68	9	127
DRFS-A	73	21	9	102

このコスト評価は量産した場合の価格であるが、一般に用いられるLearning Curveも用いて算出すると価格が安くなりすぎるために参考程度にしかしていない。この辺の評価には不確定性が多少あると思われる。この表1から分かることはDRFS-A案ではほぼBCDの場合のRFコストと同じくらいであることが分かる。RF源が高くなったのは集束磁石に永久磁石を用いたが、この量産効果が評価しきれず高めにしたためである。BCDとDRFS-Aのコストがほぼ同じということは対コスト効果が無いのではないかと指摘する声もあろうかと思われるが、これは完全な1トンネル案であるのでサービストンネルが無くなる分コストが大幅に削減できることになる。

4. LLRF制御から見たDRFSの利点

BCD案は1本の10MWクライストロンから26台の空洞へ電力を供給するが、電力分配系に電力分配の可変機構や負荷Qを調整する機構が無い場合、ベクターサムの結果としてのRF波形はフラットでも、個々の空洞の性能のばらつきにより、あるものはパルス内で振幅が増し、あるものは振幅が下がる。一つの空洞でもクエンチレベルを超えると、クライストロンはインターロックで止まるので26台の空洞が全て停止する。KCSではこれが700台の空洞に及ぶためにより事態が深刻になる。DRFSの場合は1台のクライストロンが高々2台の空洞をドライブするだけなので、ほぼ使用している空洞の最大性能に近い動作が期待できる。その他LLRFの制御の色々な項目においてDRFSは有利である。欠点は点数が増えて対コスト効果が下がることであるが、HLRFのコストに比べると非常に小さい。表2に主要な項目についてLLRFからKCSとDRFSを比較したものを示した。

表2: LLRFに関するKCSとDRFSの比較

	Klystron cluster	DRFS
FB performance	Not good	Better
QI and power distribution control	Difficult	No need
Each cavity field flatness	Worse	Best or better
Exception handling	Quite complicated	Easy
LLRF cost	Similar to baseline	13% expensive than baseline

- In klystron cluster, rf stability requirements should be relaxed.
- Although the performance of llrf system will be better at DRFS, 13% more

4. Low Power OptionとDRFS

ILCを実現する上で高いコストは大きな障害となるために、最近Low Power Optionという案が検討されている。最初の建設の時にLow Power Option(例えばビーム電流を半分;バンチ数半分、空洞へのフィル時間は倍等:1台当たりのクライストロンから倍の空洞へ電力フィード)で製作する。RF源のコストはほぼ半減できる。建設後適切な時期にFull

Schemeにするという段階的な建設案である。これに関してもDRFSで対応するプランを作った。このスキームを図3に示した。図3の上はLow Power Option で1台のクライストロンから4台の空洞へフィードするので導波管系が少し追加になる。DC電源とMA変調器はバックアップつきで13台の空洞へ電力とパルスを送る。下の図はFull Schemeへの拡張であるがDC電源とMA変調器の数は増加させず26台の空洞へ電力とパルスを供給する。こうするとFull Schemeでは表1の場合よりコストは下げられる。Low Power Optionの場合のコストは半分にならないが40%程度RF源の費用が削減できる。

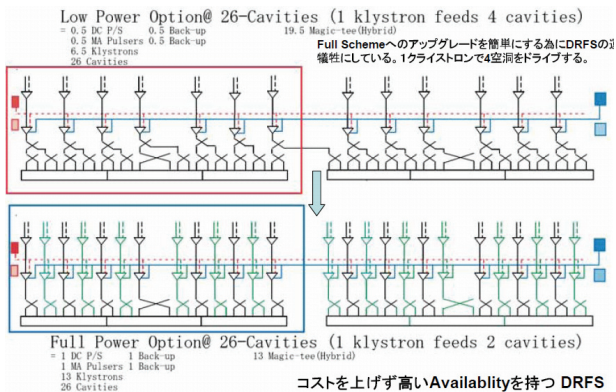


図3: : Low Power OptionでのDRFSとそこからFull Planへの復帰プラン

5. High Availabilityとメンテナンス

現在ILCの設計チーム(GDE)ではILCの運転性能(Operability)と、故障などを含めた機器の有効利用率(Availability)について検討を加えている。DRFSで1トンネルの場合故障してもすぐに修理は出来ないので、機器の故障確率、どのように修理するかなどを検討中である。まず必要な機器の台数を明らかにし、各機器の故障に対するMTBFや故障修理時間などのリストを作る。DRFSの構成機器で重要影響の大きい機器はDC電源、MA変調器及びクライストロンである。それぞれの機器で仮定した故障に対するMTBFは、50,000時間、70,000時間、110,000時間とした。それでも年間5,000時間運転するとして、各々54台、40台、330台が故障する(Low Power Optionでは半分)。DC電源、MA変調器の故障では複数台の空洞(13~26台)が停止し影響力が大きいのでバックアップ電源を用意する。これにより実質1年間の間ではこの機器の故障による運転停止は無視できるようになる。クライストロンの故障MTBFは最近のKEKライナックの運転実績値から出しているがそれでも相当数に上る。故障数は4-5%となるが、ライナックではある程度の故障に対し余裕(Overhead)を持っているのでこれを超えない限り故障を無視しても運転に支障は無い。つまり

ある程度のHigh Availability が実現されている。

一方でこれらの故障した危機は1年間に一定期間設けられる定期メンテナンス期間に交換する必要がある。これについてもどれくらいの時間と人員が必要か算出する必要がある。ある交換シナリオを作りそので上記3つの機器に関する交換に必要な時間・人を計算した。ILCでは搬入のための縦坑(Shaft)が8本ある。1 Shaft当たりで算出すると330台のクライストロン交換で200時間・人、54台のDC電源交換で163時間・人(故障診断時間を含む)、40台のMA変調器交換で28時間・人となる。尚Low Power Optionではそれぞれの数値は半分となる。これは十分無理なく交換できる数値である。

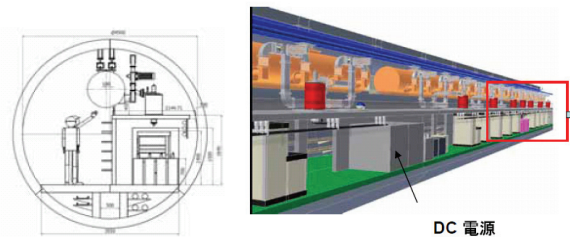


図4: DRFSにおけるトンネルのレイアウト。左図はトンネル断面図。右図は横から見た図。RF関係機器はDC電源と赤枠内の橙色-MA変調器と関連機器、及び赤(クライストロン)。

6. DRFSのレイアウト

DRFSに関する3次元的なレイアウトも作りながら機器の配置、交換シナリオなどを策定している。

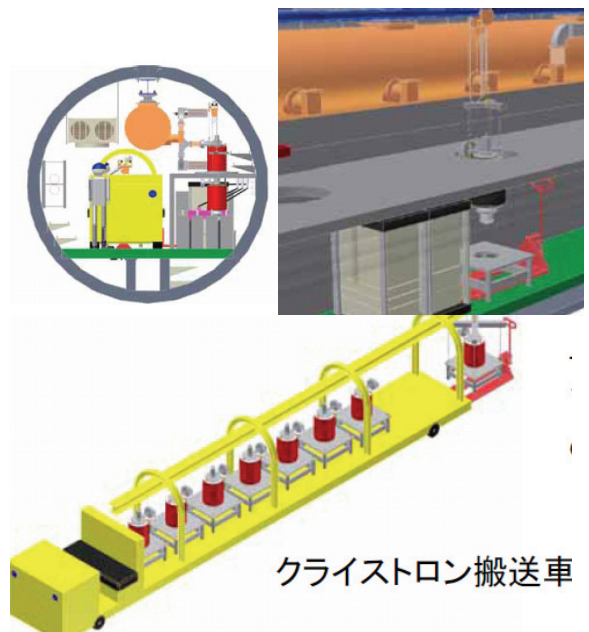


図5: DRFSにおけるクライストロン交換プラン

図4及び図5にその1例を示す。

7. 批判・検討事項と今後の進め方

GDEにおける検討がLC Workshopや各技術エリアのWebex会議等で進められている。1トンネル案については主にKCSとDRFSが主たるスキームとして残って色々議論されている。この議論の過程で種々の批判と検討課題が提示されているのでこれを以下に示す。①クライオモジュールを天井から吊り下げる構造の是非：この構造は1トンネルの空間有効利用するためにDESY-XFELでも採用されているが、ビームの振動に対する影響が懸念されている。これに対する回答を用意しなければならない。②それと関連してトンネルの大きさは妥当か？現在想定しているトンネル径はBCDと同じく4.5mとしているが狭くは無いか？①と関連してクライオモジュールを床に置いた場合も考慮すべきである。③電源、MA変調器の共通化により、負荷が放電した際の影響はどうか？-クローバの効果、速断SWの開発等の検討が必要である。④インフラ特に冷却系に対する評価（コスト的に冷却系が高いためDRFSではどうか）⑤RFコンポーネントの増加（特にクライストロン）による故障率、故障が運転に与える影響：これは5節で述べた通りであるが故障率の更にリファインした研究とメンテナンスの具体的な描象が必要である。

KEKではこのDRFSの実証性を示すために2009年度からRFユニットを試作始める。幸いDRFSは小さいシステムの集合体であるので比較的小規模システムで実証が出来る。これはKCSとは大きく違う

点である。具体的には1RFユニットを2009年度に作り来年度製作のものと合わせて、2010年に予定されているS1グローバル計画での8台の空洞評価の際にデモンストレーションを行う。同時に上に述べた批判点に対する説得力のある回答または実機モデルを提示するつもりである。

8. まとめ

超電導ILC計画においてコスト削減のために2トンネルのBCD案から1トンネル案が検討されているが、今回、新提案であるDRFSを紹介した。高いAvailableを持ち、コスト効果のあるFull DRFSを提言した。DC電源とMA変調器はバックアップを有し、故障しても運転に影響を与えない案を作った。現在検討されているLow power optionに対するDRFS案も提案を行った。それぞれのDRFSのスキームにおいてコストに関する評価を行った。工夫により機器の点数が多くなることによりコストが高くなりそうだと思われたがRDRとほぼ同等の価格にまで近づけた提案が出来た。Low Power Optionでは更に40%削減できた。又故障に関する考察、メンテナンスに関する現実的なシナリオ案を提示した。今年度からDRFSのユニットを製作し実証試験を行う予定である。

参考文献

- [1] RDR: International Linear Collider Reference Design Report(2007)