

DRFS (Distributed RF System) – JAPANESE SCHEME OF ILC

S. Fukuda[#] and DRFS Working Group
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

Recent development of DRFS in SC ILC is described in this report. SB2009 reassessed the basic configuration design of ILC. One of important change is to introduce a single tunnel design and DRFS is the plan to satisfy this request. Low energy option for construction and operation are also considered for the cost reduction. DRFS team proposed the possible scheme to mate to this option. Tunnel excavation way is another important issue, and DRFS prepared the layout to mate to typical two types of tunnel excavation, TBM and NATM. In this report include technical developments of DRFS components. Especially the results of DRFS demonstration in S1 global test in KEK are described. The evaluation of circulator-less power distribution system was successfully performed.

DRFS (分布型RFシステム) - ILCにおける日本版スキーム

1. はじめに

2004年ITRPの勧告以降、超電導ILCが技術選択されたが、その基本案(BCD = Basic Configuration Design)は2-トンネル案をベースとして検討され、RDR (Reference Design Report)としてまとめられた[1]。その後コスト評価等を経て単一トンネル案、その他コスト削減できる要素が検討され始めた。その結果ILCの設計チーム(ILC-GDE)により、SB2009レポートとして2009年に発表された[2]。その際に日本チームはDRFS(分布型RFシステム)というRFの供給システムを提案した。このシステムの概要は既にいくつか報告がなされている[3][4]。その後も引き続きDRFSの設計検討が進められた。同時にこのスキームを支える技術的な要素の確立も進展した。全体の設計検討で大きいものはトンネル形状に関するものである。日本をILCのサイトとして考えた場合、40kmにわたる敷地は山岳地帯でのみ可能であるが、ここでの大深度トンネル工法の見直し(TBM: Tunnel Boring MethodからNATM: New Austrian Tunneling Methodへの見直し)が行われた。その結果としてトンネル断面積が広く出来る案が提唱され、それに合わせたDRFSの設計が進んでいる(第4章)。技術的進展については、KEKで2010年秋から2011年初めに行われたS1-Global Projectと呼ばれる国際協力による超伝導空洞の評価プロジェクトで、DRFSの基本的な要素が試験されその実証性が証明された(第6章)。本稿ではこの進展経過を中心に、最近のDRFSの検討の現状を報告する。

2. DRFSの概要

ここではBCDのスキームの詳細は省略するが、ILCにおける主ライナック(ML: Main Linac)では超伝導空洞が14560台、ILC全体では約17000台弱が使用

[#]E-mail: shigeki.fukuda@kek.jp

される。現在はこれを9台、8台、9台ずつそれぞれ1台のCryomoduleに装填して繋げた3 Cryomoduleを1 RDR ユニットとして、これを単位にRF系の設計を進めている。以後この単位毎にシステムを説明したい。DRFSは、RDRにおける1台の大きなクライストロン(RF出力10MW)から26台の超伝導空洞(=1 RDRユニット)へ電力を供給する案に代わり、中電力クライストロン(出力850kW)から2台の超伝導空洞へ電力を供給するものである。従ってクライストロンの数は約8000台必要とする。建設費用を考慮し1 RDRユニット毎に共通の電源を設け、13台のクライストロンを並列運転する。現在の計画ではクライストロンはMA(Modulating Anode)型クライストロンとし、それらは共通の直流電源とMA変調器で駆動される。稼働率を上げるために2 RDRユニット毎にバックアップの電源を設け、故障した際には切り替えて運転するようになっている(図1及び図2)。

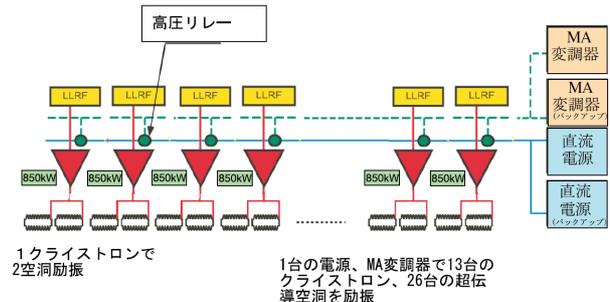


図1: DRFSの概念図(1 RDRユニット当たり)

DRFSが小さいRF源多数から成り立っていることは、運転上メリットが多い。クライストロンや空洞が一部故障しても、切り離しが楽である。又個々のクライストロンや空洞に合わせてきめ細かに制御することが可能である。一方でRF源は一般的に高価であるために、建設コストを下げるためには大量

生産によるコスト減や、設計段階からの低コスト化の工夫が必要である。

3. SB2009によるILCの運転案とDRFS

ILCのRDR設計では衝突時の中心エネルギーが500 GeV、加速電流9 mA、繰り返し5 Hz、ビームパルス幅約1 msとなっている。しかしながらコスト増からいろいろな見直しがSB2009で行われた。その結果、一挙に上記の最終設計値まで進めず、高エネルギー物理側の要求に合わせながら、ルミノシティが極端に下がらないように工夫して低い中心エネルギーから建設し、実験をし、その後次のステップに進めるという案が検討され始めた(Low Power Option:表1参照)。主なスキームは以下の2つである。(1)低エネルギー10 Hz案(衝突後の中心エネルギー250 GeV、加速電流は4.5 mA、但し陽電子生成のための一次電子ビームは150 GeVで陽電子生成標的に当たるため、電子ライナックは繰り返し5 Hz分が125 GeV加速、他の5 Hz分は150 GeV加速となり、電子ライナックのみ10 Hz運転をする)。(2) Reduced Bunch Operation (衝突後の中心エネルギー500 GeV、加速電流は4.5 mA、繰り返し5 Hz)。(1)の案ではRF電力は概略1/4、(2)の場合でRF電力は1/2となり、HLRFの建設コストはその分の減少が期待される。

表1: ILCの運転案と加速パラメータ

Step	Status	Mode	Center of Mass Energy		Electron		Positron		Rel. Beam Power
			(GeV)	(mA)	Energy (GeV)	Rep (Hz)	Energy (GeV)	Rep (Hz)	
0?	Operation	Low Energy Option	250	4.5	125	5	125	5	0.25
0-0	Upgrade								
0-1	Operation	Low Energy Option 10 Hz	250	4.5	150	5	125	5	<0.5
Revised from 10 Hz Operation Mode to SB2009									
0-2	Operation	300GeV Operation	300	4.5	150	5	150	5	0.3
0-3	Upgrade								
1-0	Upgrade								
1-1	Operation	Low Energy Option SB2009	500	4.5	250	5	250	5	0.5
2-0	Upgrade								
4000 RF Source are installed									
2-1	Operation	RDR	500	9	250	5	250	5	1

このILCの運転案に対してDRFSがどのように対応するかは、そう簡単ではない。上に挙げたRF電力が少なくなる案のうち(2)に対応する場合は、クライストロンの総数を半分に減らし、その代わりに1クライストロンで2空洞励振の代わりに4空洞励振することで対応する。(1)の案に対してはいくつかの対処法があるが結局(2)のスキームに大きな変更なしで接続することを考慮し、(2)のレイアウトのままで、約半分のクライストロンユニットを休ませるという方法が提案された。これらを考慮したILCにおける運転プランとそれに沿った増強計画を考慮したDRFSの構成図式を図2に示した。

Low Power Optionは初期コストを削減するために導入されたものであるが、空洞のQI値は電界と電流値で決まるために、Low Power OptionではQI値が下がり、その分RFのFilling時間が長くなる。これはク

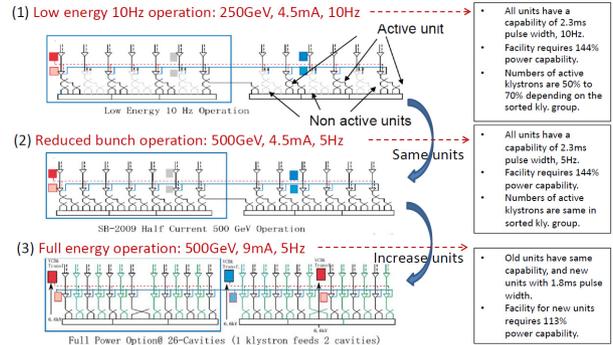


図2: Low Power OptionでのDRFSとそこからFull Planへの増強プラン

ライストロンを駆動する電源の要求容量が増加することになる。RF源にとってさらに別の電力増加要因がこれらを検討する過程で出てきた。ILCで一番コストがかかるのは超伝導空洞である。その定格は31.5 MV/mであり、RDRではそれらが達成できるものと暗黙の裡に仮定していた。超伝導空洞の製造過程で明らかになったのは、歩留まりが悪く、達成できる電界にかなりのばらつきが生ずることである。ある仕様値に達しないものはねると製造コストが非常に高くなる。そこで31.5 MV/m±20%のばらつきの空洞を受け入れることにした。RF源から見た場合、質のそろった空洞でない電界の弱いほうの性能で運転することになり全体としての効率を下がる。そこで製造後ソーティングを行い、例えば5つの電界のグループに分類し、ほぼ同じ性能を持つものを纏めて1台のクライオモジュールに組込む方針とした。

一番高い電界グループでは平均36.5 MV/mの電界

表2: 見直しされたDRFSのRFパラメータ

Klystron	Frequency	1.3	GHz
	Peak Power	850	kW
	Average Power Output	9.78	kW
	RF pulse width	2.3	ms
	Repetition Rate	5	Hz
	Efficiency	60	%
	Saturated Gain		
	Cathode voltage	67.4	kV
	Cathode current	21	A
	Perveance(Beam@6 Gun@54.4 kV)	1.2	μPerv
		1.56	μPerv
	Life Time	120,000	hours
	# in 3 cryomodule	13	
	Focusing		Permanent magnet
	Type of Klystron		Modulated Anode Typ
DC Power supply per 3 cryomodules			
	# of klystron (3 cryomodule)	13	
	Max Voltage	71.5	kV
	Peak Pulse Current	273.1	A
	Average Current	3.41	A
	Output Power	258	kW
	Pulse width	2.8	ms
	Repetition Rate	5	Hz
	Voltage Sag	<1	%
	Capacitor	26	mF
Bouncer Circuit			
	Capacitance	260	mF
	Inductance	4.9	mH
M. Anode Modulator			
	Anode Voltage	54.4	kV
	Anode Bias Voltage	-2	kV

に達し、その空洞に供給する電力は850 kW必要となる(当初は750 kWであった)。又これとLow Power Optionの条件を加味すると最大RFパルス幅は2.3 msとなり、全体として電源の平均容量は大きく増加する。これらをすべて加味してDRFSのRF源に要求される性能を見直すと表2ようになる。

4. DRFSにおけるトンネルレイアウト

DRFSはSB2009におけるSingle Tunnel案の受け入れが契機で完全なSingle Tunnel案として提案されたものである。DRFS地上部に大きな施設を持たないので、Heat Dissipationの問題、Linacから発生するRadiationから機器をどう保護するかという解決すべき問題、運転中は当然人がトンネル内に入れないためにAvailability (信頼性、運転効率向上性)、維持管理といった検討課題が存在する。現在DRFSに於けるトンネル内でのレイアウト案は2つある。当初はTBM工法によるトンネル掘削を考えていたため、トンネル直径5.7mの単一トンネルに CryomoduleとRF源を放射線シールドを介して配置するレイアウトであった。このバージョンのレイアウトについては図3にその概略を示した。この配置案ではCryomoduleは床面に置きRF源からの電力供給は床下を通る導波管を経由して供給される。中央部に機器のインストールのための空間と人間の避難経路空間を取っている。天井部には万が一の事故時にHeを逃がす排気口と換気口の空間を設けている。クライストロンは6乃至7本分まとめて設置してあるがその分導波管配置は当初案に比べ複雑になっている。

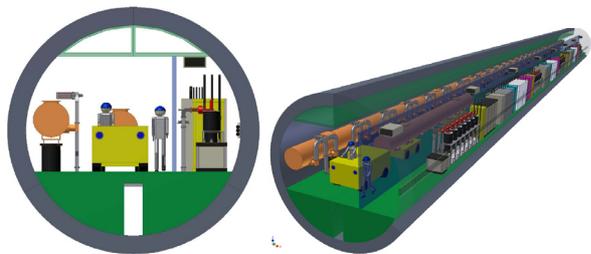


図3：TBM工法案でのDRFS トンネル内レイアウト。左図は断面図でCryomoduleの搬送台車、人間の避難空間等を示している。右図は長手方向への機器の配置を示す。

その後トンネル掘削法としてNATM工法という発破と機械による日本では一般的な工法が検討された。日本のような山岳地帯の下を掘る場合、岩盤が固いこともありコスト的に有利であることが分かった。この工法の場合は断面積形状に任意性がありまた断面積とコストが強く連動しないのでTBM工法に比べて大きな断面が使用可能である。現在KEKではこの工法によるDRFSのレイアウトを主に検討して

いる。この工法によるレイアウトを図4に示す。断面積が大きく取れるために機器の配置にゆとりができるだけでなく、CryomoduleとRF源の間に厚い放射線シールドが設置可能となる。もしこのシールドが十分厚くできてILCが運転中でも運転維持のために作業員が入室できるならば、大きなメリットが期待できる。図3の場合は機器を放射線による損傷から防御するという要求が懸案事項であり、また維持管理ができないので重要な機器はバックアップを設置して冗長性を上げることでAvailabilityを考えたが、図4の場合はそれらが省略できる可能性があり、コスト的なメリットが期待できる。RF源の配置に関しては当初の案に近い、DRFS用クライストロンを一樣に分布配置したものとなっている。放射線防壁などの最適化は今後進める。



図4：NATM工法によるDRFS トンネル内レイアウト。左図はトンネル断面図。中央に放射線シールド壁(この場合は2.5m)、右図は俯瞰図。クライストロンは一樣に配置されている。機器は遮蔽壁を挟んで中央側に配置され、インストールなどの空間はトンネルの側面側に設けられている。

5. DRFS関連の機器開発 - HLRF

DRFSはILCのRFスキームとして新たに提唱されたものであるが、ILC-GDEチームとして独自の予算を有しているわけではない。従って必要な機器の開発はKEKでのSTF試験装置の中で開発し、評価する必要がある。S1Global計画[5]を実践するのに合わせてDRFSのHLRF (High Level RF)の要素開発を行った。中心となるDRFS用850 kW(当初は800 kW)のクライストロンは2010年に2台開発し、2011年初めのDRFS評価試験で運転をし、その性能を検証した。またこのクライストロン用の直流電源及びMA変調器も1台試作しS1 Global試験で評価を行った[6][7]。予算の関係で、パルスサグを補正するバウンサー回路や、コスト効果の大きいクローバ回路などは最終モデルまで至っていない。図1から分かる通り、13台のクライストロンが並列になって1台の直流電源とMA変調器に接続されているので、各クライストロンが故障したりFaultした場合に切り離す70 kV耐圧の高圧リレーなどの開発が必要である。導波管系では、図1から分かる通り、1クライストロンから2空洞へ電力を供給するのが基本案である。超伝導空洞のような定在波型空洞では、パルスRF電力を供給した場合、

必ずパルスの立ち上がり部分、立下り部分で電力が反射し、それがRF源に戻った時に、不安定動作や発振、大電力窓の破損等につながる。従って多くの超伝導加速器ではクライストロンの下流又は空洞の直前にサーキュレータを挿入するのが普通である。DRFSの場合2空洞の反射波をお互いに相殺する移相関係になるように電力分配器（マジックTか3 dBハイブリッド）を配するとクライストロンへ大きな電力が戻らない可能性がある。但しこれは性能のそろった空洞2台へ電力を供給した場合であり、空洞の劣化などでバランスが崩れた場合の影響を評価する必要がある。特にLLRF (Low Level RF)でのフィードバックで制御が所定通りに行われるかどうかのポイントである。この評価試験はS1グローバル試験で行われた[8](次節参照)。

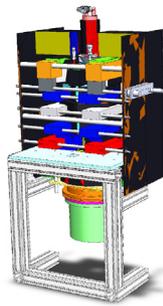


図5：現在設計中の永久磁石。フェライトを用い、コストの低減化を狙った設計。

Availabilityと関係して、少しでも機器のFault率を下げるように設計を行っている。その中で重要な要素は8000台に及ぶクライストロンの収束コイルを電磁石から永久磁石にすることである。これにより磁石自身、コイル電源、水漏れ等のFaultが低減される。この永久磁石化の試みを現在進めている[9]。コストを考えてフェライトを用いた永久磁石化である。図5に現在設計中の概念図を示す。

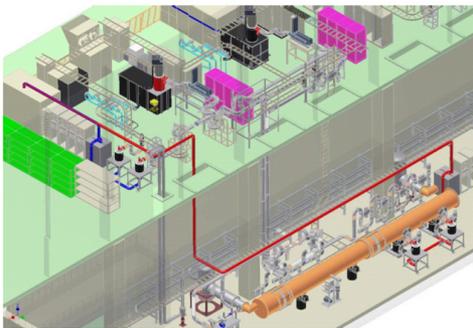


図6：S1 Global 試験におけるDRFSの試験のレイアウト

6. S1 GlobalにおけるDRFSの試験 [8]

S1 Global 試験は日米欧3極で製造された超伝導空洞を試験し、なるべく高い電界を達成することを目的としたものである。最初のStageでは5 MWクライストロンから電力を分配して各空洞に電力を供給するRDR的なHLRFの構成で試験を行った。成果については文献[5] [8]を参照されたい。ついで次のStageでDRFSの実証試験を行った。この時のレイアウトを図6に示す。DRFSの最小単位、即ち2台の800 kWクライストロン、直流電源、MA変調器からなる構成である。図5からわかる通り、1階部分に直流電源を設置し、直流電圧約70 kVを地下部まで引っ張り、空洞のすぐ近くにクライストロンとMA変調器を配置した。導波管系ではサーキュレータを使用しない電力供給系にして、デジタルFBによるLLRFにおけるベクターサム制御をかけて実施し、正常に目標の安定度などが実現できるかどうかを試験した。

HLRF 的な観点からは最小単位としての2台のDRFSクライストロンの駆動に成功した。電力分配系に関してはサーキュレータを使用しない系でちゃんとクライストロンが動作することが実証出来たのが成果である。

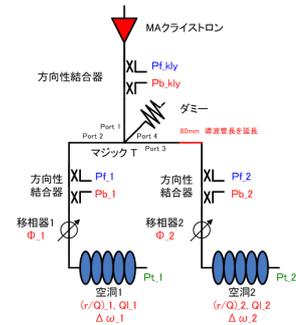


図7：S1 GlobalにおけるDRFSの電力分配系

S1 Global 計画のDRFS試験におけるサーキュレータレス導波管系は、図7のように、各クライストロンからマジックTで電力を2分割して空洞へ供給する。空洞からの反射RFがマジックTで相殺されてクライストロンへの反射にならないように、片側に導波管の位相長が90°長くなる80 mm直管を挿入している。試験では線路長の評価のために移相器を挿入した。移相器による空洞間の相対位相とチューナを用いた空洞離調量を変化させて以下の項目を調べた。(1)：反射RFによるクライストロン動作の変化、(2)：FF運転での導波管の位相差や空洞間の離調差による反射RF、VSWRの相関、(3)：FB運転での反射RFやVSWRと空洞の振幅・位相安定度への影響、である。

まず(1)については、それぞれのポートに短絡板をおき、各ポートに挿入した移相器を変化させて、移相量とRF電力の関係を調べた。±20度の範囲内ではクライストロン直後の方向性結合器(DC)で見てVSWR 2以下となり、クライストロンは正常に動作した。次に(2)について試験した。空洞を離調した

時には、空洞からの反射波の位相には、空洞離調による位相が重畳されるので、各空洞の離調量に差がある場合、その差がクライストロンへの反射 RF として戻ってくる。一般的に空洞が離調された時には、Pf、Pt (空洞ピックアップ信号)から計算して離調量を出す。DRFS での空洞の離調計算ではサーキュレータが無いので、Pf に Pb が混じりこむ。このため Pt を用いて DC の Pf ポートに寄与する Pb の影響 (DC の方向性に依存する)を計算し、空洞離調量を算出する。これが計算値と測定値で一致すれば首尾一貫した結果を与え、サーキュレータレスでも OK と評価できる。VSWR と離調量の関係の測定から、VSWR 2 以下、離調差 100 Hz 以内であれば OK であるという結果を得たが、これは実際の ILC での要求値より広く充分であると評価できる。次に(3)のサーキュレータレス導波管系での FB 制御による運転時の平坦部での振幅・位相安定性の測定について述べる。FB は 2 つの空洞のベクターサムによる比例制御で行う。サーキュレータが無い場合に生じ得る拙いことは以下のことである。即ち、各空洞の離調量の違い等により生じた反射波が相殺されずクライストロンに戻り、クライストロン出力空洞で反射された後で、再度自分自身または別のポートに混じり込み、結果としてベクターサムの波形を歪める。すると、ベクターサムをフラットに制御しようとする FB が正常に動作しなくなる可能性が生ずる。これについて空洞離調量や移相器を変えて FB が正常に動作する範囲を評価した。その試験結果では、平坦部での離調差が 200 Hz 程度に広がった場合でも振幅安定度 1.3×10^{-4} 及び位相安定度 0.04 deg. の FB 制御が出来、また離調差が広がっても安定度は変わらないことを確認した。以上のように、DRFS で重要なサーキュレータレスの電力分配系はきちんと動作するということが始めて示された。

その他の LLRF の技術要素についても、試験され動作確認が行われた[10][11]。

7. 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SB2009の提案で検討され、その一つとしてDRFSが提唱された。DRFSは山岳地帯にトンネルを掘削するさいに適しており、また運転上の利点も大きい。このDRFSのプランの最近の進展を紹介した。

ILC計画の現実的な建設と運転スケジュールから、Low Power Optionという衝突エネルギーが低いところからの運転を数ステップ検討しているが、DRFSにおいてこのLow Power Optionへの対応方法が検討され、その内容を紹介した。又、トンネル工法により、DRFSの機器の配置や、克服すべき問題の内容が変わるが、今回、昨年まで検討していたTBM工法による直径5.7 mの単一トンネルでのDRFS案と、今年新たに検討始めた、NATM工法での新DRFS配置案を紹介した。後者

は空間的なゆとりが出来るだけでなく、運転中発生する放射線から、インストールされた機器をどう守るかといった点でも、厚い防御壁が導入可能なことから大きな利点があると評価できる。

DRFSにおける個々の技術的な取り組みと現状、開発しなければならない点なども紹介した。DRFSの基本ユニットに関する運転実証は、KEKで行われているS1 Global試験で運転され検証された。DRFSの重要な要素である、電力分配系におけるサーキュレータレス・システムの評価も行われ、十分機能し実用に使えることが確認された。次のステップはビームを含めた評価で、量子ビーム計画、STF-II計画でその評価を行う。

ILC-GDEとしては、2012年にリリースすることを目標としているTDRのために、技術的な詰め、コスト評価等を積極的に進める必要があり、現在作業中である。

参考文献

- [1] ILC Reference Design Report- Accelerator, 2007, <http://www.linearcollider.org/cns/?pid=1000437>.
- [2] SB2009 Proposal Document, Rel. 1.1, 2009, <http://lcdev.kek.jp/SB2009/>.
- [3] S. Fukuda, "Proposal of RF New Scheme in ILC-Distributed RF System (DRFS)", 2009年加速器学会年会, TOACC01, pp.765-768, 2009.
- [4] S. Fukuda, "Distributed RF Scheme (DRFS)-Newly Proposed HIRF Scheme for ILC", Linac10, MOP027, pp.112-114, 2010.
- [5] H. Hayano, "STFの開発状況", 2011年加速器学会年会, TUPS023, 2011.
- [6] M. Akemoto, et. al., "ILC計画における分布型RF源用電源開発の現状", 2011年加速器学会年会, MOMH01, 2011.
- [7] H. Nakajima et. al., "クローバ回路用スパークギャップスイッチの検討と試験", 2011年加速器学会年会, TUPS152, 2011
- [8] T. Matsumoto, et. al., "KEK超伝導RF試験装置(STF)におけるS1Global計画でのRF源", 2011年加速器学会年会, TUPS153, 2011.
- [9] Y. Iwashita, et. al., "永久磁石によるクライストロン用収束磁石", 2011年加速器学会年会, MOPS036, 2011.
- [10] T. Miura, et. al., "DRFSでの μ TCAを使ったデジタルフィードバック系", 2011年加速器学会年会, MOPS110, 2011.
- [11] H. Katagiri, et. al., "STFでのS1グローバルのための低電力高周波系の構成", 2011年加速器学会年会, MOPS108, 2011.