

第 16 回リニアコライダー計画推進委員会議事要録(案)

日 時: 平成 24 年 6 月 11 日(月)13:30-17:15

場 所: 3 号館 1 階セミナーホール

出席者: 生出、伴、山本(明)、徳宿、春山、野尻、藤井、田内、横谷、赤井、榎本、小林、山口、
浦川、早野、駒宮、山本(均)、相原、川越、栗木、岩下、山下、岡田、峠、山中
(欠席者)山内、山田、清家

配布資料:

1. リニアコライダー計画推進委員会委員名簿(H24.4.1~H26.3.31)
2. 前回議事要録(案)
3. STF 開発の進展と成果
4. 機構内での空洞製造技術の進展
5. ATF を基盤とした開発の進展、成果
6. KEK ロードマップ改定の取り組み
7. ILC 超伝導加速器技術 今後の開発に向けて(案)
8. Comments on Ring Colliders

議 事:

1. はじめに

委員長から、4 月から委員が改選され任期が 2 年であること、8 月に KEK ロードマップ改定のための集中討議があることから、それまでに KEK における ILC の活動のレビューを行う必要があり、7 月 31 日~8 月 2 日にかけて海外の研究者を含むレビューワーによる評価委員会を開催すること、今年度は今後 8/30、10/19、12/21、2/22 に開催予定であること、の説明があった。また、国内候補地の地質調査に関して、東北大学、九州大学との受託研究契約に基づき実施する方向で手続きを進めていること、の説明があった。

2. ILC の国際・国内情勢 (鈴木機構長)

鈴木機構長から、前回の本委員会開催以降の情勢について、以下の報告があった。

2012 年 2 月の ICFA(オックスフォード)の際、ICFA 議長 P. Oddone、ILCSC 議長 J.Bagger と協議し、Pre-ILC Lab.に対するコメント(Higgs の結果を受けてからの方がよい、現時点で LHC/CERN vs ILC/Japan という構図にはならない方がよい)を受けた。ILCSC からは ICFA の下に ILCSC に代わる組織として LCCB (Linear Collider Consortium Board)、その下に ILC、CLIC 及び LC 測定器の R&D グループを設置する案が提案された。CLIC をこれに加えることが GDE の体制と変わるところで、CLIC は国際的なレビューを受けていないことから反対したが、共通の技術開発がある、米国では ILC 単独のプロジェクトより CLIC を加えたほうが進めやすい、といった事情の説明があり、おおむね賛成した。ただし ILC、CLIC をマージするのではなく、それぞれ個々のプロジェクトとして明確に分け、共通する部分のみ協力する体制とすることを提案した。7

月の ICHEP(メルボルン)では、次期の Director が発表される予定である。

2月の AAAS(バンクーバー, 約 5000 人参加)に出席し、Multi-national Laboratory について talk を行った。ITER 関係者から強い関心が寄せられた。

5月 28~30 日のフランスとの Collaboration meeting (TYL/FJPPL together with FKPPL)において、フランス側関係者(Saclay 所長、IN2P3 代表)から日本の ILC の現状について説明を求められた。フランス側からは日本を支持している旨の発言があった。

DESY は放射光科学を中心とした研究所となり、加速器 R&D のアクティビティーが低調になってきている。3月開催の KEK-DESY Collaboration meeting の際に DESY 所長に対し、これまで築いた TESLA 等加速器技術の財産を活かすべきである、との話をしてきた。特に、DESY 所長は高エネルギー実験の測定器開発研究に興味があり、それらを XFEL にも活かしたいとのことであった。

中国高能物理研究所の Yifang Wang 所長からは、LC の技術開発に参加したい旨の意思表示があった。現状としては CSNS、ADS、放射光、宇宙線測定、Daya Bay 等のアクティビティーが進行中であることから、中国での ILC 建設の可能性はない旨発言があった。

KEK は現在 WPI の申請に向けて準備を進めている。International Institute for Future Accelerator (IIFA)の名称で、Multi-national Lab の構想を基にしている。FNAL, SLAC, CERN, DESY, BINP の所長に対して本案を説明し、各研究所からの協力は取り付けている。SLAC の Holtkamp 氏が 6 月下旬に KEK を訪問する予定である。

3. STF を基盤とした開発の進展、成果 (早野委員)

早野委員から、STF の現状及び今後の計画について報告があった。

STF ではクライオモジュールの製造性能実証及び超伝導空洞の性能実証を行っている。ILC の超伝導空洞の加速勾配性能は、R&D 段階では 35MV/m 以上で 90%の歩留り、実機の段階では 35MV/m の +/-20%で 90%の歩留り、が求められている。現在は 31.5MV/m で +/-20%で運転できるよう power source をアレンジするという設計になっている。

空洞製造時の溶接及び内面処理の問題で電界性能に影響が出る。空洞の内面研磨のための電解研磨処理設備がある。内面研磨した空洞は温度センサー、X 線センサー、内面検査カメラ(京都カメラ)等を使用して電界性能試験を行い、フィードバックをかけている。日本で開発された内面検査カメラや局所研磨修理機は、DESY、FNAL、J-Lab、CERN 等で使用されている。また表面モニタリング方法により電解研磨パラメーターの最適化を図る。

2010 年から 2011 年の空洞性能は空洞 11 台のうち 35MV/m を超えたものは 5 台、28MV/m を超えたものは 4 台で歩留りは 82%となる。このうち 9 台は ILC 型のクライオモジュールで使用する予定である。これ以外に日立、東芝及び KEK でも試作している。米国では歩留り 94%を達成している。STF で開発した技術は GDE の統計でも歩留りの向上に貢献していることを示している。

S1 グローバルは、国際協力体制により FNAL(2 台)、DESY(2 台)の空洞を INFN のクライオスタットに、KEK(4 台)の空洞を KEK のクライオスタットに組み込み RF の試験を行った。2010 年 6 月~2011 年 2 月の間の加速電界試験で、8 台の単体試験で 27MV/m、7 台の合成試験で 26MV/m

を達成した。また、Plug compatibility を実証できたことも S1 グローバルの大きな成果である。

STF Phase2 では、電子ビーム源、2 空洞のクライオモジュールを STF 加速器とし、量子ビームの課題研究用にビーム運転を行った結果、6 月に 1ms ビームパルス長のビーム加速に成功した。現在はビームパワーが 20%程度なので、2.5mA である。

世界のクライオモジュールの状況としては、DESY では 8 台の空洞を組み込んだクライオモジュール 7 台が FLASH で稼働。XFEL では 800 台の空洞を製造予定であることから、空洞の量産技術が確立されるものと思われる。空洞組込時に性能が 20%下がるものが 20%程度発生することから、更なるクオリティーコントロールが必要となる。

コストに関して、現在空洞量産化の技術等は組み入れていない。機械工学センターを中心に空洞量産化技術について検討が進められている。クライオモジュールについても、まだ、量産を前提としていないことから、コスト高となっている。今後は量産を考慮した部品製造方法等を検討する予定である。

今後の予定としては、GDE 後の新しい枠組みが 2013 年からスタートする。STF では、高輝度 X 線生成のアプリケーションで空洞運転及びビーム調整等で人材育成を目指す。ここで育った人材が次のクライオモジュールの運転等に係ることになる。2014 年には ILC 型クライオモジュール (CM1)を稼働させる予定であり、8 台の空洞と中央にマグネットを配置することもでき、世界初の ILC 型クライオモジュールの運転になる可能性もある。

4. 機構内での空洞製造技術の進展 (山中委員)

山中委員から、機構内での空洞製造技術等について報告があった。

現在、17,000 台の空洞製造を実現するために、歩留りの向上、製造コストの削減、量産技術の開発等をめざしている。

KEK 内でこれらを行うことで、開発スピードを上げるとともに、企業に対してコスト削減のアイデアを提案したりできるようにする。

品質の向上では、歩留り 90%の条件をクリアするために電子ビーム溶接の高度化、内面検査の実施を行っている。0 号機において機構内で実施した溶接部分に生じた穴の機構内補修作業に成功したことは大きな成果であるが、この穴の補修は、コスト、所要時間等の観点から必ずしも望まれることではない為、孔のあかない溶接条件最適化は、重要な課題である。

電子ビームの溶接条件の最適化では、表面から溶接し裏面に貫通ビードを得るのが基本であり、ビーム電圧・電流等の溶接条件を変えて試験を行い、安定したビードが得られる条件を決定することである。例えば、溶接部の Nb, Ti で融解温度が違うため simulation で最適化して実証することなど、きめ細かい R&D を進めている。

製造コストの低減をめざし、深絞りによる HOM 外導体の成形、ウォータジェットによる切り出しとプレス加工による HOM アンテナの製造など、新しい工法の開発を行っている。

量産化技術としては、溶接作業についてマルチダンベル溶接などいくつかの案を検討している。

今後の予定としては、今年度、1 号機、2 号機を製造し、2013 年度には、3 号機を高圧ガス保

安法に対応できるような形で製造する。また量産化技術のデモンストレーションを実施する予定である。加えて、性能のばらつきを抑え歩留りの向上を計る。これまでの空洞製造では経済性より高性能を追及していることからコスト高になっている。今後は性能の向上、維持とともに、コストの削減を目指す。

5. ATF を基盤とした開発の進展、成果（照沼准教授）

照沼准教授から、ATF の状況について以下のとおり説明があった。

ATF は、リニアコライダーに必要な低エミッタンスビームを実現し、それを利用した研究開発を行うことが目的である。世界の主要な研究機関・大学との間で MoU を結んだ国際協力体制で実施している。これまで、多くの国内外の学生が ATF での研究成果を博士論文(合計 42)としてまとめ、若手研究者として育てている。

震災後の復旧の過程としては、被害状況の確認及び応急的処理を行い、昨年 6 月にテストビームを周回させることができた。夏の間ダンピングリング(DR)のアライメントを実施、10 月からビーム運転を開始、11 月から垂直エミッタンスが 80pm から 10pm に復旧することができた。全てのアライメント作業には、2011 年 4 月から 2012 年 3 月までほぼ 1 年間かかった。

研究開発状況について、低エミッタンスビームの実現には、ILC の 5GeV DR の実垂直エミッタンスの 2pm の実現を目指す。ただし、現在 ATF2 実験のための 37nm の極小ビームの実現を優先していることから、エミッタンス 2pm 実現のための研究開発は先延ばししている現状である。

次に、マルチバンチビーム入射・取り出しのためのナノ秒高速キッカーを実現し、多くのビームを周回させ、効率よくダンピング、ロングパルスを作るために必要である。キッカーの安定度も 3.5×10^{-4} が確認されている。偏極陽電子源の開発研究では、広島大学・KEK 及び LAL の二つの 4 ミラー共振器をダンピングリング内に設置して試験を行っている。

非破壊型ビームサイズモニターのレーザーワイヤーは、目標であるビームサイズ分解能の 1.2 ~ 1.4 ミクロンを 2012 年 5 月にほぼ達成した。ナノメートルレベルの分解能を目的とし IP に設置されるビーム位置モニターの開発は、プロトタイプを利用して研究開発を行っている。ビームラインにすでに設置されている空洞型ビーム位置モニター(約 40 台)システムは、ILC で想定されている分解能(100 nm)をほぼ達成している。

Final focus system の実証試験について、垂直方向のビームサイズ 37nm の極小ビームの実現を今年度末までに達成し、次に、極小ビームを nm レベルで位置安定させることが目標である。それらのビームサイズはレーザー干渉縞を利用したビームモニター、いわゆる新竹モニターで測定している。目標のビームサイズの測定のために、干渉縞生成用の二つのレーザービームの交差角度を 2~8 度、30 度、そして 174 度と調整して行っている。現在、30 度モードまで、すなわちビームサイズで約 200nm までのビーム調整が行われている。

ILC ビームバンチ間隔でのフィードバックシステム(FONT5、オックスフォード大学)の開発・実証試験では、最初のバンチの通過位置を検出した後、ストリップラインキッカーで補正をするようにしている。ILC で必要な性能を前回のマシンタイムに達成した。現在この位置補正・フィードバックを衝突点で行うことが次の目標である。衝突点にビーム位置測定用の IPBPM を KNU(韓

国)で3台作成、衝突点(新規真空チェンバー内)に、来年早々に設置する予定である。キッカーはすでに組み込み済みで今期その試運転を行う予定である。新規真空チェンバーはLALが製造中である。このIPフィードバック実験は2013年春に開始予定である。

(委員長) 夏期シャットダウン中にAlignmentはDRでよくなった。震災前後でのビームサイズはどうか。

(照沼) 震災前は300nmで、震災後の2012年2月に165nmを達成した。

(委員長) STFを含めて、今後、(限られたマンパワーと予算で)どのように進めるか、7/31~8/2の評価委員会等で議論して行きたい。

6. KEK ロードマップ改定の取り組み (岡田委員)

岡田委員より、KEKで現在進めている次期ロードマップ策定について、以下の説明があった。

KEKの大学共同利用機関であることを踏まえ、コミュニティの意見を反映したロードマップを目指す。本ロードマップはKEKで実施する大規模プロジェクトの概算要求の指針となるような内容を目指す。本ロードマップに記載されたプロジェクトが全て概算要求の対象となるわけではない。

2010年度にロードマップ改定についての議論を開始したが、震災により作業が一時停止した状態であった。2011年度は1年間かけていくつかの研究分野の意見交換会を開催し、それらの意見を集約する作業を行った。

前回ロードマップ策定に当たっては、ワーキンググループを設置したが、今回は常設の研究推進会議でロードマップを策定することとした。研究推進会議はKEK首脳部及び主要なプロジェクトの代表等により構成されている。

今後のスケジュールとしては、7月までにコミュニティ等からのinputを受け、8月にロードマップに関する集中討議を行い、8月中に中間まとめを書面で公表する。その後、コミュニティから再度意見を聴取し12月をめどに研究推進会議案を取りまとめ、国際評価委員会の評価を経て、最終的には2013年3月に完成することを目指す。

岡田委員からの説明に対し、以下の質疑応答があった。

(山本均) inputの具体的な方法はどのようなものか。書面等の提出を求めるのか。

(岡田) コミュニティーの意見反映は所長・施設長に取りまとめを依頼しており、それ以外のプロジェクトグループについては、代表者からinputを求める。書面の提出は特に求めず、推進会議での発表及び発表資料をもとに議論することになる。

(駒宮) プロジェクトのプライオリティー順位をつけるのか。

(岡田) どの程度プライオリティー付けを行うかも含めて議論している段階である。プロジェクトの規模が違うことから全てを一様に取り扱うことはしないが、どのようにまとめていくかは議論していく。

(駒宮) 中間まとめは、文書を作成するのか。欧州戦略に披露してもよいものか

(岡田) 中間まとめは書面として取りまとめる予定で、欧州戦略会合(9月)に間に合わせることを考えている。欧州戦略は高エネルギー分野のみであるが、中間まとめはKEKのすべての分野

を含んだものとなる。

(機構長) プライオリティー付けをするのは難しい。研究プロジェクトを多く用意し、その時々戦略、情勢等を判断して対応することが有効と思われる。

(藤井) 前回、高エネルギー委員会からの意見を取り入れたが、今回も同様の方針か。

(岡田) 同様にする予定である。

7. STF/ATF の今後の技術開発方針策定にむけて (委員長)

委員長から、今後の方針策定等に向けて以下の説明があった。

KEK ロードマップ作成に関する8月の集中討議に向けて、本委員会での意見を元に今後LCグループ内部及びLC定例打合せ等を活用して方針を検討、また外部委員も加えた7月末にLC R&D 活動評価委員会で議論してもらい、最終的にLC計画推進室長が研究推進会議にLCコミュニティーとしての方針をinputする。7月末の評価委員会の結果、研究推進会議への報告内容については、8月30日の本委員会において報告する予定である。

これまではSTFとcERL/ERLが独立でR&D等が進められてきた印象があるが、今後は双方で協力する体制を築き、限られた資源を有効に活用することが必要であると考えます。

今後5年間の活動としては、加速勾配を上げることが今後も重要である。2セル空洞で50 MV/m(CWモード)がERLの開発の成果として出たことから、45MV/mを目指すことも現実味を帯びてきており、これが実現すれば、原理的には、LINACの長さを2/3に短縮することができ、コスト削減につながる。

現在の計画では、クライオモジュールCM1を2013年末までに完成し、2014年からビームを通す予定であり、こういったビーム試験を行うかを検討する必要がある。いわゆる高周波試験だけではなく超伝導加速器試験施設として稼働させることが重要と思われ、FLASH等と相補的な役割に位置付けることもできる。

現在のSTF施設の搬入口が狭いということもあり、8連空洞を地下に降下させるのは、技術的困難が伴う。将来、2台目以降になると、作業スペース的にも困難が予想される。空洞製作・試験の作業サイクルの観点から4連空洞も選択肢として考えられる。またERLとの協力関係からも4連空洞という選択肢がある。現在、KEKとの契約に基づく空洞の製造は、三菱重工業社が請け負っているが、今後ILCを実現していく上では複数社による適切な競争は必要である。KEKが工業的製造技術を牽引しつつ性能、効率化の提案ができるようにするには、KEK自身が空洞製作技術を先導できるようになることが重要である。4連空洞の製作を選択することで、R&Dサイクルを短時間で高めることができる。今後KEKでの空洞開発も加えると、4台から6台の空洞製作が可能となる。

将来的には、cERLがエネルギー増強する際に4連空洞を組み込むことも選択肢の一つとなる。ERLはパルスではなくCWビームが求められていることから、技術的困難はあるが、STFで開発したものをcERLでビーム加速に長時間利用することで、相補的協力を実現することもできる。

(山口) ERLとの人的交流は定期的な打合せ会合を持つなど着実に進んでいる。

(委員長) その通りで、以前はexpertsが独立してR&Dをしていたが、STFでは交流してR&Dが

進んでいる。

(生出) STF, ATF がカバーしない ILC 用の開発項目について、GDE が終了後、誰がどういった方法で進めるのか。

(委員長) 7 月末の評価委員会の際にそれらの事項についても議論してもらうこととする。

(山下) International Collaboration として、例えば EURO FEL (XFEL) の計画の動き等も見つつ進めるべきである。ILC 加速運転実証試験装置として DESY の施設を利用することも視野に入れるべきではないか。

(委員長) KEK に FLASH のような施設を作るのは現実的ではない。DESY 等、他研究所が特色をもってできることは任せ、人員を派遣するなどの選択肢もある。KEK で特色をもって取り組める部分として、企業等と協力しつつ工業化技術の R&D 等、KEK が優れているところを進め、そこに集中することも努力したい。

(山下) クライオモジュール 1 は国際協力として見えたが、クライオモジュール 2 は国際協力としては見えない。特に、工業化との関連は何か。

(委員長) 空洞の開発は重要であるが、システムとしてクライオモジュールに空洞を入れて degradation がないことを実証していく作業のサイクルが効率よく実施できるようにすることも重要である。縦測定での性能が横にすると性能が落ちる、という原因を検討する意味でも、これらの作業が一連のシステムとして実施できるようにすることが必要となる。4 連空洞の利点としては、地下への搬入が容易なことから、地上部と地下の作業に対し空洞を交互に短時間で入れ替え、R&D を効率よく、進めることができる。

今後高圧ガス規制をクリアするように手続きをする予定である。企業製作の空洞のみならず、KEK、さらには外国の空洞も導入、試験できるようしたいと考えている。

(峠) クライオスタートのスケジュールについて、何をどこまでいつまでに行うのか、といった定量的なスケジュール、具体的なプランが必要である。FLASH/XFEL との integration、operation、空洞製作など重要な検討項目である。ERL との integration が提案されているが、現状は ERL Pre-Design Report に ILC 関連が触れられておらず、ERL のみが記載されている。どのようなものをいつまでするのか、の具体案が必要である。

(委員長) 指摘のとおりである。我々としては、さらに具体的な計画を立案中である。

(加古) クライオモジュールを組立、搬入、冷却の作業が 2014 年まで続くことから、2015 年初頭まで、スケジュールはほぼユニークで、変更の余地はない状況である。むしろ 2016 年以降 STFII がどうあるべきか、何をすべきか、を考えることが重要である。

(生出) 現状の予算と人員をベースに計画が立てられているが、仮にある特定の年に ILC の建設開始を設定し、これを実現するにはいつまでに何をすべきか、それをするには何が必要で何が不足しているか、といったことを明らかにしてはどうか。

(峠) そういう意味では、先端加速器推進部としての中期計画のようなものが必要なのでは。ただし、年間予算を仮定して提案すべきである。

(山下) 国際的な協力体制の中で、何が足りないか、KEK は、日本は何をすべきか、を明らかにすべき。欧米の技術等も導入、活用すべきではないか。各要素の技術開発も重要であるが、

工業化、量産化のシステムを検討することも重要ではないか。

(委員長) まさにそのようなことをしようとしている。その意味で空洞生産の工業化をしている。マルチベンダーの育成も。そのために、ERL の協力が必要だ。review までに 1.5 ヶ月あるので、もっと提案をつめて行きたい。

(藤井) 4 連空洞、8 連空洞で差はないのか。4 連空洞で成功すれば、8 連空洞でも問題ないといえるのか。

(委員長) 問題ないと思うが、最適化していく作業が必要である。

(山下) 8 月のロードマップ集中審議の前に、工業化等に関する案を本委員会に提案、意見を聞いてはどうか。

(委員長) LC 定例会合等を利用して検討を進め、事前に案を提示できるようにしたい。

(山口) クライオモジュール 2 を Repeatability の実証だけに使用するのでは不十分ではないか。人的、予算的資源を投入するのであれば、目的を明確化し、例えば user facility にするといった選択肢もあるのではないか。31.5MV/m で長時間運転できるのは世界で STF のみなので、この特性を生かして何かできないか。

(委員長) 今後の宿題としたい。

8. リングコライダーについてのコメント (横谷委員)

横谷委員から、リングコライダーの状況について以下の説明があった。

LEP3 のような電子リングコライダーについて、Zimmerman をはじめいくつかの提案がある。リングコライダーの問題点は、Beamstrahlung のエネルギーロスである。Beamstrahlung が limit されると、ルミノシティーはエネルギーの 4 乗から 4.5 乗分の 1 で、それ以上になるとルミノシティーは下がってくる。エネルギー分布を測るとガウス分布からはずれ、これらを元に計算した結果もとの LEP3 のパラメーターでビームライフを 200 秒とすると momentum aperture は 5% (シンクロトロン振動の振幅) 必要となる。IPAC12 で発表された LEP3 の新しいパラメーターでは、ルミノシティーとエミッタンスが下がっており、これによって quantum life を 1,000 秒として再計算すると、必要な aperture は 3.4% となった。

これらの結果、240GeV のリングコライダーは、容易ではないが時間をかけた study をすれば不可能ではないこと、300GeV を超える場合は現実的ではない、と考えられる。

よって現在作業が進んでいる欧州戦略において、240GeV に限定したリングコライダー、それ以上は LHC、CLIC がカバーする、というオプションも十分想定される。LEP3 については、LHC と併設、新たなリングの建設等いくつかのプランが検討されている。

来週の LEP3 Day において、それらの計画について発表があるものと思われる。

(生出) LEP3 の可能性は CERN で議論されている。

(横谷) Higgs ファクトリーはピンポイントで LEP3 で行う。

(佐伯) LHC トンネル内で LHC 加速器と共存できるのか。

(生出) eLHC の案で検討されている。

(委員長) eP collision 用には 3km くらいのリングを 1 つ建設する案も提案されている。

9. まとめ（委員長）

委員長から、次回に向けての宿題として以下の事項が確認された。

- ①現在の研究開発が5～10年後のILC実現につながるようなプランを示す。
- ②今後、何を、どこまで、いつまでに実施するか、を定量的な計画として示す。
- ③KEKが注力すべき焦点、世界戦略の中でKEKの役割、貢献できる部分を検討する。
- ④STFが研究開発の繰り返しではなく、Scienceとしての目的が分かるようにすべき。

10. その他

今回は議論を深める意味でも1日の会議としてはどうかとの提案があり、8月30日の午前中から開催する方向で準備することとした。

次回開催予定：8月30日（木）