

ERL評価専門委員会レポート

2010年4月27日

(経緯)

今回のERL評価専門委員会は、今年9月に設置の依頼が寄せられた。その時点のERL推進室長からの要請文には、その設置の目的として、

KEKでは予算が非常に厳しい中、ERLのプロジェクトの第1段階であるコンパクトERL建設のフェジビリティに関して、予算とマンパワーの議論の場（評価委員会）を持つように機構長から要請がございました。機構長の判断として、「この評価委員会の状況（判断）を見てERLの予算配分を行う」との打診を高崎理事から受けております。(以下略)

と書かれていた。本委員会は、この要請に一定の回答を与えることを目指し、以下のレポートを提出するものである。

元々、ERLやコンパクトERL(cERL)計画は、PF-ISACやその光源分科会で定期的な外部レビューを受けて来た。最近では本年2月25・26日に光源分科会が開催されている。本委員会に対する上記の設置目的は、既存の外部レビューにおいて十分かなえられているのかもしれない。今回の評価専門委員会は、決してそれらの外部評価の意義を減じるものではなく、KEK内部の他の加速器プロジェクトのメンバーも参加することにより、ある程度補完的な評価を行うものである。もちろん本委員会は、ERLとKEKの他のプロジェクトの相対的な優先度を評価するものではない。あくまでもERL/cERL自身の技術的なフェジビリティと、予算・人員の計画の妥当性を評価するものである。

(cERLの目標の妥当性)

本委員会の理解では、cERLは将来の数GeVのERL(以下「大ERL」と呼ぶ)のための技術的諸問題を解決・実証することを第一目標とするものである。もちろん、その過程で可能な限り、X線イメージングなど各種の利用実験を行うべきではあるが、本質は大ERLのための加速器技術の開発にある。機構の現ロードマップ(2008)にはcERLは記載されており、大ERLは言及されていない。それは大ERLについては、まだその実現性に十分な確信が持てていなかったことが大きな理由である。cERLは大ERL実現のため、どうしても通過せざるをえない関門である。さらに、cERLも35 MeV/125 MeV単周/200 MeV複周と段階的に進める計画であり、当面の目標である35 MeVはその第一関門

である。この第一関門を如何に通過するかで、その後の第二・第三関門のあり方や、大ERLへの道筋は大きく左右されるであろう。

(cERLの全体計画)

・これまで進められてきた、cERLの設計・開発・建設の努力は、与えられた人員・予算等の制約条件のもとではきわめて順調であると思われる。関係者の努力に敬意を表する。

・KEKBやJ-PARCは間違いなく世界最先端の加速器である。一方Photon Factoryは1980年代には最先端放射光加速器であったが、第3世代放射光源の建設が始まった1990年代中頃には世界最先端の座を追われ、既に15年以上が経過している。国内においても、光源性能においてSPring-8の後塵を拝している。世界的にも、欧米は言うまでもなくアジアを見渡しても、中国・台湾・韓国の建設済みあるいは建設中の装置と比べて、光源性能は大きく見劣りする。KEKにふさわしい最先端の光源加速器の建設を急ぐべきである。ERLは技術的に難しい点が多く、尻込みする国や機関も多いが、それだからこそKEKの総力を挙げて取り組むのに相応しいのではないか。また、KEKで長年蓄積されてきた超電導加速空洞技術を活用できる大きなチャンスでもある。

・本日の各担当者からの発表からは、世界に先駆けてこの最先端の加速器を実現しようとする意気込み、cERLの開発への強い意欲が十分に感じられた。特に比較的若手の研究者が中核となって研究開発に取り組んでいる点が強く印象に残った。その意欲と技術的水準はプロジェクトの推進に必要なcritical massに達していると思われる。

・当面の目標設定として「35 MeV, 10 mA, 入射部エミッタンス $1 \mu\text{m}$ 」は妥当なマイルストーンである。2012年度末までに35 MeV, 10 mA, 入射部エミッタンス $1 \mu\text{m}$ 、という目標を達成する上で、コスト・人員・技術上の致命的な問題点は見つからない。上記目標の達成期限を2012年度とするのは、必要な予算が手当されれば、技術的には妥当である。

・本日説明のあった予算額は、cERLの当面の目標を達成するうえで、必要最小限度の予算計画となっていると思われる。ただし、開発的な要素も多くあり、可能であれば予算の上積みが望まれる。例えば、ビーム診断系、特にビーム品質の診断は本質的に重要な事項であり、一定の予算的措置が必要になる可能性がある。一方、研究者自身による外部資金の獲得などの努力も必要である。科研費の獲得なども個人任せにせず、ERL推進室が中心となり、組織的に対応することも考慮すべきである。

・なお、本来の建設コストと、建屋の流用・移管された機器の流用・必要性の低いものの除外・外部資金の活用などでどの程度の縮減がなされ、またそれらがマシン性能への制約となっているかを整理・認識すべきである。

・提示された金額に含まれていないものもかなりあるのではないか。各機器の見積もりの精度を上げてほしい。また、一方で、予算不足が原因で目標達成を遅らせたのでは建設の意義が薄れる場合があるので、情勢をみながら予算の配分を判断してほしい。

・人員は、約10FTE/年の追加が必要と報告されているが、以下の努力(すでにある程度行われている)により、必ずしも解決不能とは思えない:

- 1) 開発に本質的に必要な技術と頭脳を担う人員はすでにかなり揃っていると見受けられる。
- 2) KEK内で系・プロジェクト横断的に業務の共通化・合理化を進める。特に加速器第7系については、一定数のcERLへの専門化とPF/PF-ARの負担軽減が望ましい。後者については、物構研はもとより、光源利用者コミュニティの理解と協力が不可欠である。
- 3) KEK外の研究者の参加をさらに拡大する。また、KEK内部のメンバーはもとより、外部の方にも、たとえ専門外の作業であっても協力をお願いする。
- 4) 開発的要素の多い事項については大学院生を積極的に招き入れることも検討すべきである。総研大、受託学生など様々な形があるはずである。人材育成という観点からも重要と思われる。

・cERLも小規模とはいえ、システムとしての加速器である。失敗は必ずしもそのハイテク部分で発生するわけではない。往々にしてだれも注意しなかったローテク部分のミスが全体の性能を制約する。各メンバーはそれぞれの専門部分を仕上げるのはもちろん、たえずcERL加速器全体に気を配り、必要に応じて専門外の部分にも努力を払う必要がある。2012年度までのcERLで試されるのは単に装置の性能や個人の能力だけではなく、このチームの総合的な問題解決能力である。このチームが、その後のcERLの増強や数百億円の大ERLプロジェクトを託すに足るものかどうか試されているのである。

・重点的な開発要素は、まず電子銃とレーザーである。もちろん空洞は重要であるが、KEKでの技術的蓄積が大きく、すでにその成熟度は電子銃・レーザーを大きく上回っている。

・目標設定において、エネルギーと電流は明確であるが、エミッタンスについては、メンバー間で認識が必ずしも一致しているかどうか、やや不明である。超低エミッタンス

ビームの生成と輸送は、cERL加速器のシステムとしての動作とともに、目指すべき目標である。例えば、リング周回時に空間電荷効果による増大があるのは当然であるが、その評価は可能であり、評価の上、入射部・リング各部での目標を持つべきである。また、それが世界最先端に立つものであることを強調してほしい。

(電子銃)

報告内容:

- ・直流10 mAで0.1 μm (当面の目標0.5 μm 以下) の規格化エミッタンスを実現するために500 kVの高電圧電子銃を開発している。現在実用化されている最先端の直流電子銃はJLABの350 kV、5 mA、ビームエミッタンスは数 μm であり、KEKとJAEAにおける直流電子銃の開発は世界最先端を目指すものである。

- ・JAEAの1号機により、直流500 kVの印加に成功した。KEKではPF-AR南実験棟に名古屋大学で開発してきた200 kV電子銃を移設してカソードに関する評価を行っており、目標とするカソード寿命 (30時間) を達成するため、真空度、ビームハローなどの問題点と課題を明らかにしている。また、この200 kV電子銃に併設して、これらの問題点を改善した500 kV電子銃2号機を開発中である。

- ・KEKにおける電子銃開発スケジュールは、200 kV電子銃でカソードの開発を続けながら、500 kV電子銃の本体と準備系を2010年度中に製造し、2011年度に要素試験を経て組み立てを完了する予定である。

評価と勧告:

- ・ERL用電子銃が別々に開発されてきた歴史的事情もあり、JAEAとKEKでそれぞれ、1号機、2号機が開発されている。開発拠点については、分担が明確であれば良いが、効率的な開発の観点からは統合されることが望ましい。当面は、一致した方針をもって開発を行なおうとしている点や、2012年度には片方がcERL運転用実機、片方が電子銃開発用に用いられることになっており、大きな無駄は生じないと判断する。

- ・KEKでの開発状況に関しては、名古屋大学時代からの研究開発を基礎に、その資産を引き継いで、綿密な設計、要素試験と分析に基づいて新たな開発する姿勢が見られる。カソード材料や超高真空の開発において外部との研究協力をすると報告があったが、強く推奨する。

- ・カソードマテリアルについても外部との協力は勿論のこと、内部にも自前でその基本事項を開発できる体制と開発装置の設置も検討すべきである。ERLの成否は偏にカソー

ドの性能にかかっており、どのような努力を傾注してもしすぎることは無い。

- ・チタン容器は長期的な真空性能の測定が必要かもしれない。
- ・例えば電子ビーム冷却装置などに、大電流電子ビーム下での超高真空の実例はないだろうか。他研究機関との協力を促したい。
- ・ビーム透過のロスや圧力上昇への寄与が大きいので、根絶をめざしてほしい。また、カソード自身からの暗電流はどうだろうか。
- ・下流空洞や加速器全体からのガス・イオン・暗電流による電子流入を評価せよ。カップラは常温であり、ガスや電子の放出源になる恐れはないか。
- ・カソードの高圧の安定度はどの程度必要か。また、大電流時の負荷はどうか。
- ・電子銃、レーザーなどの根幹にかかわる技術については外部に任せることなくKEKに開発チームの中心を置いた方がよい。電子銃に関しては名古屋大学旧中西研究室からの技術の継承が行なわれたようであるが、カソード素材そのものに関しては中西研究室よりも工学部竹田研究室の役割が大きいと理解している。竹田教授の定年が近いことも考慮して、技術の継承を検討してほしい。

(入射部)

評価と勧告:

- ・今回の委員会では入射部の設計やビームダイナミクスに関する発表はなかったが、重要な課題である。
- ・試作電子銃ではすでにビームエミッタンス $0.5 \mu\text{m}$ が確認されているかどうか、そのビームのバンチング過程において、エミッタンス増加をどれだけ抑えられているかが問題である。過去の検討会では、ビームパラメータや機器設置許容誤差等のシミュレーション結果は報告されているが、スライスド・エミッタンスやRF変動許容値についての結果は見当たらなかった。もし計算がまだであるなら、今後速やかな評価を行うべきであろう。
- ・ $80 \text{ pC}/1 \text{ ps}$ あるいは $8 \text{ pC}/0.1 \text{ ps}$ の低エネルギーバンチの空間電荷効果は、十分に大きいであろうから、シミュレーション結果が正しいかどうか、使用しているコードが適正かどうかなど、十分なチェックが必要である。できれば複数のコードによる独立な検証が望ましい。

(レーザー)

評価と勧告:

- ・安定性、信頼性面での優位が予想されるファイバーレーザーの開発には多いに期待する。
- ・今後は安定性が課題との報告であったが、レーザー源の安定化にあたっては、安易にフィードバックを導入せず、まずはレーザー機器個々、場合によっては部品レベルでの温度安定性を高めるようお勧めしたい。その上で最小限のフィードバックを採用すれば、システム全体の解析も容易となる。これは、RF系においても同様であり、フィードバックは必要最小限が望ましい。
- ・強度・方向のジッター、安定度が必要性能を満たすかどうか、要検討。
- ・RFシステムとの同期性能はどうか、要検討。

(前段空洞)

報告内容:

- ・2台のプロトタイプ空洞の高電界試験を行なった。2台とも、HOMピックアッププローブ無しでは40 MV/mを超える電界強度を達成した。しかし、HOMピックアッププローブ付きでは、1号機（アンテナタイプ2本およびループタイプ2本付き）では16 MV/mでプローブでの発熱によるクエンチが、2号機（ループタイプ5本付き）では14 MV/mでヘリウムリークがそれぞれ発生したため、これまでにまだ要求性能を十分に超える電界の実証には至っていない。再測定を計画中である。
- ・入力カップラーへの投入電力は、目標の170 kW(100 mA)、18 kW(10 mA)に対し、平均26 kW、パルスでピーク130kW（パルス幅1秒、繰り返し0.2Hz）まで達成した。コンディショニング継続中。
- ・クライオモジュールは設計の最終段階である。特定設備ではなく、一般設備として対応可能。
- ・スケジュール：2011年12月に冷却試験を開始する予定で進行中。

評価と勧告:

- ・基本的な設計、製作上の致命的な問題はこれまでのところ見受けられない。

- ・HOMピックアッププローブ付きで十分に高い電界を早期に実証すること、そして結果によっては、プローブ構造の設計の見直しを含めた検討も必要であろう。

- ・入力カップラーは、当面の10 mAのビーム電流に対しては要求を満たしているが、100 mAに対しては、発熱対策等、克服すべき問題が残されている。

- ・常温入力カップラー部からの放出ガス、空洞でのフィールドエミッション、あるいはカップラーでの放電や空洞クエンチの発生時に放出されるガス等は、超高真空を要求される電子銃に対する電子・ガス放出源になる恐れがある。逆に、電子銃から空洞へのガス流入も要注意である。

(リング空洞)

報告内容:

- ・空洞、入力カップラー、HOMダンパー、クライオモジュールの設計・製作が精力的に進められている。

- ・加速勾配は、15-17 MV/mで、field emission により制限されている。仕様(15-20 MV/m)までもう少しのところまできている。

- ・入力カップラーは仕様である20 kWを満足した。

- ・HOMダンパーはフェライト付きを採用する。フェライト無しについては冷却試験が進行中。フェライト付きは試作機を製作中。

評価と勧告:

- ・field emission の原因追及と対策を急いでほしい。

- ・表面処理・縦測定等におけるリニアコライダー(STF)グループとの連携はかなり機能している。電解研磨電圧(電流密度)の選択、温度マッピング等の診断系の整備などに関しては両方で独自に進めているものもある。今後、議論・情報交換を一層進めて最適化・共通化・共有化を進めてほしい。

- ・空洞全体のコストは35 MeV-cERLの建設費用の約40%を占めており(注、2007年度以降の積算)、空洞コストが10%安くなれば、1億円は節約できたはずである。しかしながらこれまでのコスト削減に対する努力は全く不十分であったといわざるをえない。既

に契約されているのでその部分のコスト削減はできないが、追加費用の発生を極力抑えるためにもコスト削減（コストアップ抑止）に努力すべきである。特に主加速器用空洞については量産を始める前に大幅なコスト削減をはかることが必要である。

- ・ 空洞の性能は、コストダウンされたもの・言い換えればスペックダウンされたものに対して達成する必要があるということを念頭に開発を進めてほしい。いずれcERLの増強や大ERLに向かうためにはコスト削減は決定的に重要になるであろう。

- ・ HOMおよび加速モードパスバンド内の各モードの定量的評価、ビームへの影響をより詳細に検討すべきである。また、モノポールHOMの revolution harmonics との周波数関係による、バンチを間引いた運転での共鳴による発熱はどうか。また、偏心フルートによる加速モードのフィールドのゆがみはビームにどの程度の影響をおよぼすか、評価が必要である。

(冷凍機)

評価と勧告:

- ・ 概ね順調であり、問題点は感じられない。
- ・ 今後の運転状況によっては、加速器や機構の各冷凍機との運転体制の連携・合理化が必要になるであろう。

(RF)

報告内容:

- ・ R F 源は入射部バンチャ用IOT（20 kW）、入射部2セル加速空洞用クライストロン（30 kW）、同（300 kW）、主加速器用IOT（35 kW）及びこれらを駆動する低電力システム、大電力電源等である。

- ・ 低電力R Fシステム、大電力R Fシステムともに主要なハードウェアのR&Dはこれまで順調に終了している。

- ・ 低電力系ではソフトウェア、ケーブル、バーストモードへの対応などが今後要検討。

- ・ 大電力電源はJAEAからの移管品を有効活用した。

- ・ 今後のスケジュールとして、2011年度に入射部用RF源1式を完成させると同時に、全数のコンポーネントを購入。2012年度に全数設置の予定である。

・ERL用RF源は電子陽電子入射器のRFグループが、KEKB入射器、JPARC、ILCのRF源とともに、横断的に担当している。

評価と勧告:

・RF系の設計に先立って行わなければならないのは、RF系に要求される振幅および位相の安定度を見積もることである。これら安定度によって、システム設計方針および建設コストは大きく異なる。この必要とされる安定度は、委員会でのプレゼンでは入射部および主加速部ともに、振幅0.1%、位相0.1度（p-p値と判断する）とされていた。しかしながら、なぜこの値になるのかは、今回の報告あるいはCDRを見直しても、明解には記述されていない。この問題をビーム軌道設計から導かれる要請として明確にし、cERL建設のためのRF系最適化、および大ERLにつなげるための開発項目を明解にしておく事が、非常に重要である。（尚、許容値を議論する場合は、rms値で議論するのが適当である。）

・電流蓄積の手順はRFとしては十分追随するとは思いますが、それでも通常の蓄積リングよりは圧倒的に高速であり、周回部も含めたシステムとしての応答特性には注意が必要ではないか。

・LLRFモニター用RFケーブルの位相安定度は仕様を満たしていないが、将来的には恒温化をはかるとしても、当面は予想制御等により許容範囲に押さえられるかどうか検討してほしい。

・これまで行なってきたプロジェクト横断的活動は高く評価できる。

(周回部)

評価と勧告:

・ビーム光学系の設計について十分な説明をされなかったため、判断はできないが、以下の点に関し疑問を感じた。すでに検討が行われていることとは思うが、一応書いておく:

- ビーム光学系の基本設計、必要な性能、可変性。
- 想定するビーム電流、およびビーム診断装置との整合性。
- 各電磁石の磁場の必要精度、設置・設定精度。再利用電磁石の使用による制約・性能劣化。
- 軌道・光学系の測定と補正法。診断装置の必要精度。
- strip line BPMのインピーダンス、発熱。
- イオン不安定性の評価、対策。

- リング各部でのエミッタンス測定法と精度。

・ビーム立ち上げ時に、予想される各種マシンエラーのもとで、どのように補正を行い定常運転に持ち込むか、そのためのビーム診断装置に求められる性能などをシミュレーションなどにより求めて欲しい(すでに行われているとは思いますが)。

・1 μm 以下の超低エミッタンス、1 ps以下の短バンチを有する高品質電子ビームの実現が目標とされている。その場合、単に全投影エミッタンスだけでなく、スライスド・エミッタンスも重視しなければならない。このビームの品質を評価するためには、報告されたバンチ長モニタばかりでなく、スライスド・エミッタンスの測定も行うべきである。

・周回部はcERLの第一段階の中心課題ではないかもしれないが、その欠陥がエミッタンス増大などの原因になるようなことは避けなければならない。一層の自覚と注意を促したい。

(施設)

報告内容:

・cERLを建設する予定の東カウンターホール (ECH) の改修工事が平成21年度補正予算で実施され、平成22年3月竣工した。

・建物は、側壁の断熱化と屋根の耐熱塗装、床平滑化と塗装、側室の耐震補強・改修が行われた。また、設備関係では冷却設備の更新、電力設備の新設・省エネ化が行われた。

・ただし、冷却設備については、cERL4系統中当面35 MeV、10 mAに必要な2系統のみが整備された。

・また、電気設備については、変電設備の整備完了したが、cERLに必要な電力の調査はこれからである。

・放射線遮蔽については、主ビームダンプ (5 MeV-100 mA, 10 MeV-50 mA)、エネルギー分離バンド (100 MeV-1 μA , 200 MeV-1 μA)、最終バンド (200 MeV-1 μA)、合流部 (10 MeV-1 μA)、ビーム調整用ダンプ (10 MeV-10 μA)、全集ばらまき (200 MeV-0.1 μA)、取り出しライン (10 MeV-1 μA) について評価を行った。

- ・シールドは素核研から30個程度譲渡される予定であり、ビームダンプも旧動燃からの譲渡品を有効利用する。

- ・放射線管理区域の水については独自の排水系を整備する。

- ・計上している施設関係の予算は35 MeV、10 mAを実現するものである。

評価と勧告:

- ・200 MeVを仮定したシールド設計は妥当である。

- ・ビームロスの入射部・リングの分布をより詳細に評価して欲しい。

- ・いずれRF経路の温度安定化は必要になるかもしれない。

- ・熱負荷と温度の安定度を評価すべきである。リング各所の温度センサーの設置を考慮すること。