FOUNDATION FOR HIGH ENERGY ACCELERATOR SCIENCE

FASだより

2014.11 第9号

公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会

ＦＡＳだより　第９号　目次

平成２６年１１月

1. 第３１回　高エネルギー加速器セミナーOHO‘14 開催報告（加速器研究施設　小林　幸則）…… 1
「リニアコライダーの基礎と先端加速器技術」　（９月９日~１２日）
高エネルギー加速器研究機構　３号館セミナホールに於いて

2. 国際線形加速器会議参加及びモスクワ・INR 訪問（加速器研究施設　内藤　富士雄）…… 2
８月３１日~９月１０日　スイス・ジュネーブ・モスクワ

3. 国際線形加速器会議参加（加速器研究施設　方　志高）…… 5
８月３１日~９月５日　スイス・ジュネーブ

4. 国際線形加速器会議参加（加速器研究施設　丸田　朋史）…… 6
８月３１日~９月５日　スイス・ジュネーブ

5. International Workshop on Future Linear Colliders2014(LCWS-2014) …… 10
（加速器研究施設　仲井　浩孝）１０月４日~１０月１１日　セリビア国・ベオグラード

6. International Workshop on Future Linear Colliders2014(LCWS-2014) …… 13
（放射線科学センター　佐波　俊哉）１０月５日~１０月１３日　セリビア国・ベオグラード

7. リングHiggs Factoryの研究（加速器研究施設　船越　義裕）
１０月８日~１０月１３日　中国 …… 17

8. 高ルミノシティ加速器実験におけるビームバックグラウンドの見積りと検出器保護対策に
関する研究（素粒子原子核研究所　中山　浩幸）１０月８日~１０月１０日　中国・北京 …… 20

9. 超高ルミノシティ衝突型加速器における力学口径研究会参加 …… 23
（加速器研究施設　大西　幸喜）１０月９日~１０月１２日　中国

10. ICFA主催高輝度電子・陽電子衝突型円型加速器でのビッグスファクトリー国際会議参加 …… 30
（加速器研究施設　森田　欣之）１０月９日~１０月１２日　中国

11. ICFA 主催高輝度電子・陽電子衝突型円型加速器でのビッグスファクトリー国際会議参加 …… 35
（加速器研究施設　加古　永治）１０月９日~１０月１２日　中国

12. 国際加速器アラインメント研究会参加（加速器研究施設　増澤　美佳） …… 38
１０月１３日~１０月１７日　中国

13. 国際ワークショップPCaPAC2014参加、及びGSI重イオン研究所訪問 …… 42
（加速器研究施設　上窪田　紀彦）１０月１４日~１０月１７日　ドイツ

14. PCaPAC2014への出席 「Current development status of STARS」の発表 …… 45
（物質構造科学研究所　小菅　隆）１０月１３日~１０月１９日　ドイツ・フランクフルト

15. 第４回　特別講演会報告 …… 49

編集後記

第３１回高エネルギー加速器セミナー(OHO‘14)開催

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

小林　幸則

1984 年に第 1 回が開催されてから第 31 回目となります高エネルギー加速器セミナー(OHO ‘14)を、9 月 9 日から 9 月 12 日の 4 日間に渡り開催いたしました。

今回のセミナーのテーマは「リニアコライダーの基礎と先端加速器技術」でした。「超伝導リニアコライダー」をテーマにしたセミナーは、8 年前の 2006 年にも開催されておりましたが、国際リニアコライダー（ILC）計画に関しましては、特に昨年 2013 年に「技術報告書（TDR：Technical Design Report）」が完成したこともありますので、基礎的な内容はもちろん、この 8 年間の加速器の技術的な進展も含めて、わかりやすい講義をして頂けるよう講師陣にお願いしました。

12 名の講師陣による講義では、まず ILC で展開される物理から始まり、その加速器の概要、ビームダイナミックスについて理論的な解説がなされました。続いて、加速器を構成する各要素技術である、電子・陽電子ビーム源、超伝導空洞とその周辺技術、表面処理、磁気遮蔽、大電力および低電力高周波源、クライオジェニックス、さらに加速器を設置する施設や運転するために必要な設備について、基礎から先端技術までわかりやすく解説されました。セミナーでは伝統的に講義テキストが事前に用意されており、セミナー開始当日に配布されます。講義は基本的にはそのテキストに沿ったスライドで行われますが、中にはテキストには盛り込めなかったホットな最先端のデータも紹介され、その熱のこもった講義に受講者は熱心に聞きいっておられました。それぞれの講義の終わりには大変鋭い質疑応答がなされていました。

セミナー2 日目には見学会を行いました。今年は移動手段の都合で 24 名（学生優先）に人数制限をさせて頂きましたが、先端加速器開発施設（ATF 棟）、超伝導空洞開発施設（STF 棟）、コンパクト ERL 開発施設（ERL 開発棟）における、世界最先端加速器開発現場を見学しました。超伝導クライオモジュールや電子銃など、講義で解説された装置を間近に参加者の真剣なまなざしが印象的でした。セミナー3 日目の夜話（講義ではなく先輩方の経験談を伺う）では、超伝導空洞開発に尽力されてこられた講師を企業からお呼びし、「企業における超伝導空洞よもやま話」と題して、講演をして頂きました。世界初の装置製作の苦労話や失敗談をまじえての貴重なお話を聞くことができました。

今年の OHO セミナーも大変意義のあるセミナーとなりました。

集合写真(KEK 3 号館玄関前)

講義の様子(KEK 3 号館セミナーホール)

国際線形加速器会議参加及びモスクワ・INR 訪問

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

内藤富士雄

1. 国際線形加速器会議出席

1.1. 会議概要

たくさんある加速器の国際会議の中で、私が自主的に参加しているのはこの線形加速器の国際会議のみである。参加者が 300~400 名で、プレナリーセッションのみで構成された中規模の会議で、馴染みの研究者が多いのも理由である。

以下に今回の会議で印象に残った（私にとって有益であった）項目をまとめた。

1.2. 超伝導空洞

超伝導空洞の特性改善について、冷やし方と窒素混入を用いることで特性が改善できるという報告があった[1]。私のように仕事では超伝導に全く関与していない立場の者にとって、非常に興味を惹く内容であった。

前者は以前から知られていた話らしいが、後者は最近偶然に発見され空洞の Q 値が急に良くなる事象とのこと。まだ理論的にもはっきりしていないようだ。今後の研究が楽しみである。特に超伝導空洞の利用が各方面で進んでいるので、非常に重要な研究でもある。

1.3. ２次元のクライストロン

最も興味深かったのが、ポスター・オーラルで発表された円盤状のクライストロンである[2]。同様に興味を持った参加者が多数おり、ポスターも盛況でなかなか説明を聞けないくらいの人だかりであった。

電子ビームを平面内で全周に向けて放射し、空洞も全て回転対称に設け、速度変調や電力の取り出しも全て回転対称の空洞で行う。入出力は空洞の全周に接続した同軸管で行う、というこれまでの考え方と全く異なる発想で考案されたクライストロンである。

ビーム収束の原理（磁場形状）や、電磁場の取り出し手法など斬新であった。シミュレーションの段階で、試作は今後だと思うが、非常に楽しみなアイデアである。

1.4. LINAC４見学

施設見学で CERN の LINAC− 4 を訪れた。Cell-Coupled DTL (CCDTL)の実物を見ることが最大の目的であった。J− PARC の Separated DTL と同じく収束磁石をドリフトチューブ内蔵ではなく、空洞間に取り出して設置する形式である。CCDTL では、１空洞は３ギャップで空洞間

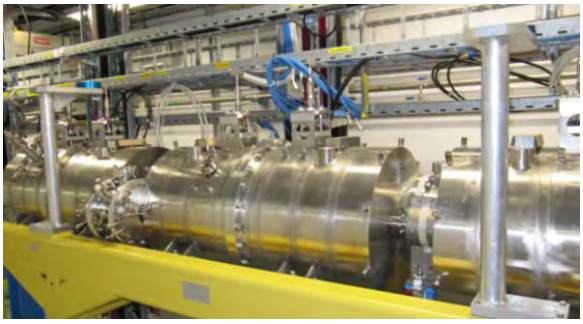


図 1. 架台上に設置された CCDTL。
各タンク中央の加速ギャップで２分割される。
空洞間は傍に出っ張って見える結合セルで高周波的に一体化される。

図 2. CCDTL の中（模式図）

を結合セルでつなぐ形式になっている。３空洞が２つの結合セルで一体化される。図１に架台上にすでに設置されている CCDTL の写真を示す。図２は断面図である。

一方、SDTL は各空洞に５ギャップで、空洞は RF 的に各々独立している。互いに長所・短所はあるが、目的を同じくした別形式の空洞は個人的に非常に興味があった。今後始まるビーム加速試験を楽しみに待ちたい。

1.5. 全体の感想

陽子線系加速器を擁する大型施設は、SNS が完成し、今後は ESS の設計、建設が続く。そのため、多くの線系加速器の関係者が SNS や CERN から ESS に異動していることが確認できた。

中国は前回の会議（2012 年、於：エルサレム）では C-ADS の若いメンバーが大挙して参加して勢いを示していたが、今回は皆落ち着いていて着実な進展を感じさせていた。ただ、CSNS については知り合いの中国の研究者から加速器トンネル内の漏水がひどくて工事が遅れている事を教えてもらったのだが、発表にその話は出て来なかった。発表内容を種々の事情で限定したのであろうが、自分ならば話していると思った。良し悪しの判断は立場で大きく変わるが。

韓国の陽子リニアック（KOMAC）は着実に進展しており、昨年からビーム供給が始まったことが報告された。ここは製作初期段階から J- PARC と連絡を取り合い、情報交換をしていたので、運転が順調に進んでいるのは我々にとっても非常に喜ばしいことである。

次回の会議は 2016 年にアメリカのミシガン州立大学の FRIB である。（定年後に J- PARC から FRIB に移った）山崎良成氏が次回の開催を宣言して会議は終了した。

2. ロシア科学アカデミー・Institute for Nuclear Research （INR）訪問

2.1. 共同研究の経緯と目的

1990 年代の後半、KEK で次期陽子線形加速器の開発[3]が行われていた時から INR との共同研究が開始された。最初は SDTL の共同開発の検討（ロシアで製作する）であった。結果的には試作のみで、量産をロシアでやることにはならなかったが、INR の研究者を KEK に招聘し、空洞の RF 設計を共同で行った。更に 2000 年代になってから、昨年度 J-PARC に設置された Annular-ring Coupled Structure（ACS）の設計に加わってもらい、非常に大きな寄与をしてもらった。

今回の訪問の目的は、共同開発した ACS 空洞でビーム加速に成功した事を報告することであった。次に INR にある Disk and Washer (DAW) 型 600MeV 陽子線形加速器を視察することであった。これは世界で唯一の DAW 型陽子線系加速器の営業マシーンである。

2.2. 陽子加速器

DAW 構造は複数ある結合空洞型線形加速器の中で最大の結合度を持つ構造であり、ソ連で発明された。INR の DAW 型線形加速器は発明者とその弟子達によって、米国のロスアラモス国立研究所のサイド・カップル型構造の線形加速器に対抗すべく製作された 600MeV の加速器である。図 3 に 300~600MeV の部分の DAW 線形加速器の写真を示す。

導波管型の橋絡結合器を用いており、当時の西側諸国とは全く異なるアプローチで設計・製作されている。文献では知っていても実際に間近でみると、よくぞこれだけのリニアックを 1980 年代に製作したと驚くばかりである。RF 源はマルチビーム・クライストロンを使っており、機械式の導波管切り替え器、位相調整器を備えている。

最近は予算不足で、年間で 1～3 ヶ月間のみの運転（しかもエネルギーは 300MeV）で実験をしているとのことであった。

図 3. DAW 型線形加速器
（表示されている日時は日本時間）

2.3. ACS の結果報告

JAEA の青さんが、ACS 空洞の設置と立ち上げ及び運転の状況を９月８日に報告した。聴衆は加速器部門の職員１０数名であり、加速器部門長であるアレクサンダー・フェッシェンコ氏の居室で行われ、専門的な議論があった。

最後に価格を聞かれたが、正直に答えた。意外なことに納得していたようであった。（値が高い、と驚かれることが多かったのであるが、さすがに性能の良さから、価格が安くないことを予想したらしい。）

2.4. J-PARC の状況報告

私は J-PARC 加速器全体の報告を翌９月９日に行った。講堂を用いて開催され、出席者は加速器部門だけでなく素粒子・原子核部門の研究者も参加し、総勢 40 名程度であった。そこには INR 所属の T2K グループメンバーも含まれていた。講義は質疑も含めて 50 分程度であった。

質疑は J-PARC の今後のビームパワーについてや、設計費が付いた ADS の事などについて行われた。私に取ってはおまけのような形で説明した ADS であったが、ADS に詳しい方が複数名参加して下さり、施設の環境問題、使用するリニアックのエネルギーの妥当性等、（私自身の知識不足から回答出来ない）質問を多数出していただいたことが、うれしい誤算であった。今後の私の課題とさせていただいた。

講演後に（半分はリップサービスとしても）日本がキチンとやっているのが分かったと言ってもらえたので、J-PARC が堅実に進捗している事が理解されたと思う。

2.5. モスクワのこと

INR はトロイツクというつくば市に良く似た学園都市の中にある。（ただし広さは何倍もあるようだが。）モスクワの中心から南方にあり、地下鉄で 20 分位、さらにバスで 20 分位かかる。現在はここもモスクワに含まれている。研究所の職員用官舎と小さなマーケットがあるだけの場所であったが、最近はモスクワに通う人達の大型アパートが多数作られつつある。

最後の日にモスクワ市内を半日ほど案内してもらった。クレムリンの周囲は人で溢れており、赤の広場も催し物でいっぱいであった。その中にレーニン廟は埋もれたようにあった。

3. 参考文献

[1] D. Gonnella, M. Liepe,
“Cool Down and Flux Trapping Studies on SRF Cavities”
LINAC 2014, to be publicsed.

[2] Massimo Dal Formo,
“Design of Novel RF source to Reduce the Beam Space-Charge”
LINAC 2014, to be publicsed.

[3] JHF Project Office,
“JHF ACCELERATOR DESIGN STUDY REPORT”

KEK Report 97-16, (1998)

国際線形加速器会議参加

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

方　志高

1.1. 国際線形加速器会議参加

2014 年 8 月 31 日出発、9 月 1~5 日国際線形加速器会議に出席、9 月 6 日帰国（9 月 7 日日本着)。

1.2. 申請理由

今年の 9 月上旬にジュネーブで開催される国際線形加速器会議（LINAC2014）でポスター発表をする機会が得られました。

私が所属している大強度陽子加速器施設(J-PARC)の線形加速器（LINAC）において，ビームのエネルギー400MeV 及び電流 50mA の増強計画で重要な役目を果たす高周波制御システムに関する最新成果と現状を発表予定しています。具体的内容として、RF timing system、hardware of feedback system、と auto－tuning system などの研究開発と改善を発表します。

しかし、今年度は複数の加速器の国際学会が重なったため、外国出張旅費が不足しています。与えられた機会を活かし、KEK の活動を国際会議の場で世界に周知し、更に研究交流を今後も続けていくために、是非、支援をお願いします。

ご検討よろしくお願いします。

1.3. 助成金

研究助成額 280,000 円をいただきました。

1.4. 用務の概要(研究課題との関連、成果)

The 27th Linear Accelerator Conference (LINAC14)に参加し、論文「PRESENT STATUS OF J-PARC LINAC LLRF SYSTEMS」を発表した。また、LINAC 加速器研究、特に RF system に関して、他の研究施設と研究成果と研究情報を議論、交流した。

1.5. 参考資料 (論文の概要)

Abstract

The low-level RF (LLRF) control systems have been successfully developed and improved for the J-PARC LINAC. In January 2014 the output proton energy of the J-PARC LINAC was upgraded to 400 MeV. In the past 8 years of the J-PARC LINAC operation, no heavy troubles occurred in the RF control systems. Every year we made improvements on the RF control systems, according to the operation experiences. In this paper, the present status of the J-PARC 400-MeV LINAC RF control systems will be described in details.

CONCLUSION

The improvements of the timing distribution system, the hardware of the feedback control system, and the auto-tuning system, have been successfully carried out for the J-PARC LINAC. Owing to these improvements, the operation of the 972-MHz ACS cavities has been successfully and smoothly carried out, and a very good stability of the RF system and the accelerating fields for beam operation has been successfully achieved for the J-PARC LINAC 400MeV upgrade.

国際線形加速器会議参加

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

丸田朋史

国際線形加速器会議（LINAC14）がスイスのジュネーブにある Centre International de Conferences Geneve （CICG）にて、2014 年 8 月 31 日から 9 月 5 日の 6 日間にわたり開催された。私はこの会議に出席するための旅費を助成していただいた。本報告書では、第１章でこの会議の概要、第２章でこの会議の発表のうち、特に私が興味を持ったもの、第３章で私の発表内容について、そして第４章でまとめる。

1. 会議の概要

この会議は 2 年に 1 度開催されており、今回は 27 回目にあたる。主催は CERN である。この国際会議は名前のとおり線形加速器に関連した分野に特化している。線形加速器の分野では最大規模の国際会議であり、線形加速器に関連するすべての分野を網羅している。そのため世界中の線形加速器施設から研究者が一同に集まり、加速器の運転現状、R&D の進捗状況、新規プロジェクトの概要等について発表されるとともに、その発表内容について積極的な議論が行われた。会議の出席者は 476 名と、前回・前々回と比較して約 80 名多かった。また地域別の参加者の割合は、ヨーロッパ 44%、北アメリカ 28%、アジア 27%、中東 2%である。ヨーロッパで開催ということもあり、ヨーロッパからの出席者が半数近くを占めた。会議の構成は８時半から１５時までが口頭発表、それ以降の１５時から１８時までがポスターセッションである。ポスターセッションのうち、最初の１時間はポスタープレゼンテーションに割り当てられており、プログラム委員会が特に優秀だと認めたポスターについて、５分間自分のポスターを口頭でアピールする時間に割り当てられた。また３日目の午後はアウティング、最終日の午後は CERN のツアーがあった。

私が会議に出席中に感じたのは、特に超伝導空洞に関連したトピックスが多いとの印象である。陽子加速器においても、従来よりも低エネルギーから超伝導空洞を採用するために、QWR・HWR、スポーク空洞等の R&D が精力的に進められている。また超伝導材質についても、Q 値向上には真空高温炉で窒素をドープさせたり、Nb_3Sn が有望であるとの発表があり、高い電場勾配達成・低い電力損失のための研究も活発に行われていると印象をもった。

2. 発表された内容

主催研究所が CERN ということもあり、オープニングセッションでは、主に CERN で進行中の２つのプロジェクトに関する発表があった。ここではその２つの内容について主に報告する。1 つ目の発表は S. Stapnes 氏による線形衝突型加速器についての発表である。この発表では、ILC と CLIC プロジェクトの概要と進捗について報告された。CERN における CLIC の位置づけは、ILC の次世代器の候補という扱いのようである。そのため重心系における衝突エネルギーは、ILC が 0.5 – 1 TeV であるのに対し、CLIC は 0.5 – 3 TeV を目指している。興味深いのは加速空洞の選択で、ILC が L バンド（1.3 GHz）の超伝導空洞であるのに対し、CLIC は X バンド（12 GHz）の常伝導空洞で 100 MeV/m を目指しており、２つのプロジェクトで採用する空洞が対照的である。発表では、試作した６台のＸバンド空洞についての性能評価の結果が示されており、いずれも良好な結果を示していた。一方 ILC の空洞については、現在ヨーロッパで建設中の European XFEL に採用され、現在マスプロダクションの最中であり、統計的な性能評価等の結果が報告されている等、かなり技術的としてこなれて来た印象を受けた。

もうひとつのオープニングセッションの発表では LINAC4 の状況について、A. Lombardi 氏に

よる報告であった。LINAC4 は LHC のルミノシティアップグレード計画の一部として建設されている。現在使用中の LINAC2 と比べ、ビームエネルギーを 50 MeV から 160 MeV に高めることで次段加速器のブースター加速器における空間電荷効果の影響によるチューンシフトを低減し、さらに加速粒子を負電荷水素イオン（H− ）に変え、荷電変換入射時にペインティング入射することで、ビーム強度の向上を図っている。運転開始は 2015 年を予定しており、それまでは建設とビーム調整を平行して実施する予定となっている。LINAC4 はイオン源から取り出された 45 keV の H− を 3 MeV RFQ、50 MeV DTL、100 MeV CCDTL、160 MeVπモードストラクチャーで加速する。Lombardi 氏の発表では、DTL 途中の 12 MeV までについてビーム調整試験の状況について報告された。縦・横方向のビームプロファイルの測定結果とシミュレーションがよく一致していることを示し、ビームの振舞いを良く理解しているとの主張していた。ただピーク電流が 10mA と、設計の４分の１程度なので、今後ピーク電流が増加した場合にどの程度シミュレーションで再現できるか注意する必要があると感じた。また現在の問題点として RFQ のビーム透過率が 75%とかなり低いことを上げており、LEBT におけるマッチングに苦労している様子である。また透過率改善のため、新たなイオン源を開発中であるとの報告があった。

コミッショニングと平行して、下流部の建設を同時並行して進めており、それについては CCDTL の製作とコンディショニングに焦点を当てた口頭発表が BINP の A. Tribendis 氏からあった。この加速器は CERN とロシアの２つの研究所（VNIITF と BINP）の国際協力により、製作から据え付けまでをロシア側で担当している。据え付けは途中まで完了し、要求位置精度を満たすレベルで順調に進捗していると報告された。

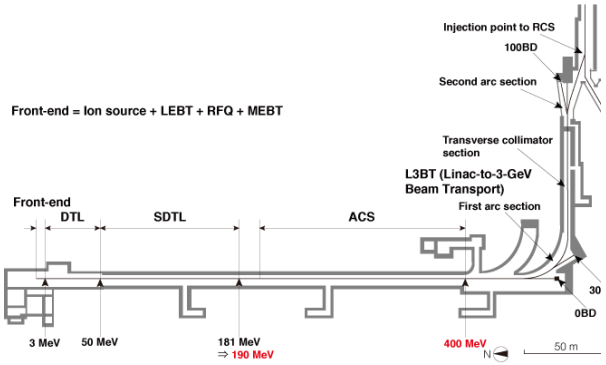


Fig. 1　J-PARC リニアック全体図

3.　発表内容

3.1.　J-PARC リニアックのビームコミッショニングの状況（TUPP094）

この発表では、J-PARC リニアックのビームコミッショニングの進捗について報告した。J-PARC リニアックでは、ビームパワーの増強計画の一環として、2013 年に既存加速器の下流に、Annular-ring Coupled Structure（ACS）型加速器を増設した。これによりビームエネルギーを 181 MeV から 400 MeV に向上した。増設後のリニアックの構成は Fig.1 に示したとおり、50 keV 負電荷水素イオン源、3 MeV Radio Frequency Quadrupole (RFQ)、50 MeV Drift Tube Linac (DTL)、191 MeV Separate-type DTL (SDTL)、400 MeV Annular-ring Coupled Structure (ACS)である。RF 周波数は RFQ から SDTL までが 324 MHz、ACS は 3 倍の 972 MHz である。ACS 増設の目的は、次段加速器である 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron（RCS）における空

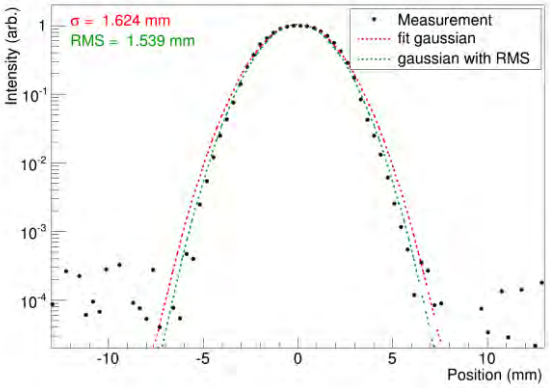


Fig. 2　ACS 入射部の横方向ビームプロファイル。赤線はガウス関数でフィットした結果。緑線は RMS をガウス関数の σ に代入しプロットしたものである。

間電荷効果の低減である。エネルギーを 181 MeV から 400 MeV にすることにより、ラスレットのチューンシフト　を 3 分の 1 程度に抑制できる。つまり 181 MeV ではピーク電流 15 mA で利用運転していたが、400 MeV では設計値の 50 mA でもそれと同等のチューンシフト量となる。

ACS 増設後初めてのコミッショニングは 2013 年 12 月 16 日から 1 月 30 日まで実施した。このコミッショニングの目的は大きく分けて 3 つあり、400 MeV 加速の達成、15 mA 利用運転のパラメータ作成、25 mA 大強度試験用運転パラメータの作成である。12 月 17 日から位相スキャン法による加速空洞の調整を開始した。調整は比較的順調に進捗し、2014 年 1 月 17 日に 400 MeV を達成した。1 月 18 日から本格的に 15 mA のビーム調整を開始した。この調整で最大の課題は、ACS 入射ビームの縦方向調整である。この調整のため、我々は、SDTL と ACS 間のビーム輸送系で縦方向のマッチングを計画し、そのためバンチャー空洞 2 台とバンチシェープモニター（BSM）を設置する予定だった。しかし、BSM が測定中に真空度が極端悪化することが分かり、真空系の改善無しには使用が困難であることが判明したため、このコミッショニングでの使用を断念した。そのため、バンチャーの振幅はシミュレーションにより求めた。Fig. 2 と 3 は ACS 入射部と出射部の横方向ビームプロファイルである。黒点が測定結果であり 10^{-4} で一様な分布になっているが、これはノイズである。赤線は測定結果をガウス関数でフィッティング、緑線は二乗平均平方根(RMS)を計算し、それをガウス関数の σ に代入し、プロットした結果である。ガウス関数のフィッティングがコアの分布の影響を強くうける一方、RMS はハロー部分についても影響される。したがって、ハローが少なければ、赤線と緑線がほぼ一致するが、ハローが増加するに従い、赤線より緑線が太くなるので、この 2 つの線を比較することにより、ハローの量を比較できる。図 1 では赤線と緑線がほぼ一致しているのに対し、図 2 では緑線が赤線と比較して太くなっており、ACS でハローが発生していることが分かる。この原因は縦方向のミスマッチが空間電荷効果のカップリングにより横方向にハローが発生したと考えられる。このハローの低減には BSM の真空系を改善し BSM を使った縦方向マッチングの実施が必要である。

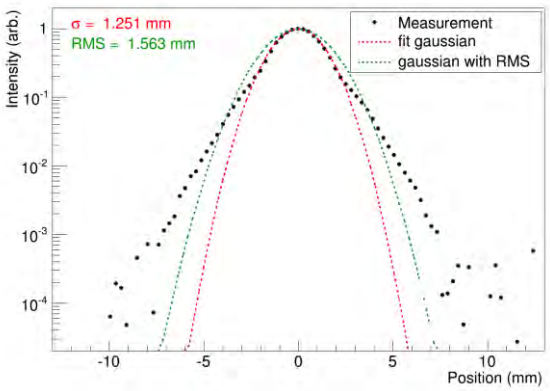


Fig. 3　ACS 出射部の横方向ビームプロファイル。赤線と緑線は図 1 と同じ。

発表では、BSM の真空改善の状況、ビームロスについての質問があった。また発表とは直接関係無いが、今年夏にイオン源から RFQ までの交換作業を実施しており、その状況についての質問が寄せられた。

3.2. ACS 加速器の縦方向測定（THPP090）

この論文では、2013 年末からの縦方向の測定結果について報告している先に示した通り、ACS 空洞増設後の初めてのコミッショニングを 2013 年末に実施した。各空洞の調整は SDTL と同様の位相スキャン法により調整したが、この方法が我々の要求精度を満たしているか確認する必要があった。そこで我々は、位相スキャン完了後に縦方向の測定を実施した。この論文では、その測定結果について報告した。測定は ACS 全空洞の運転位相を一律に変えることにより、ACS へのビームの入射位相を変え、その際のビームの透過率と、ACS から出射されるビーム運動量の変化を測定した。透過率の測定結果より、ACS の位相方向のアクセプタンスを求め、シミュレーションと比較することで、加速空洞が設計通りに調整できたか確認できる。Fig. 4 に透過率の測定結果を示す。ビームがアクセプタンスから外れると、横方向の

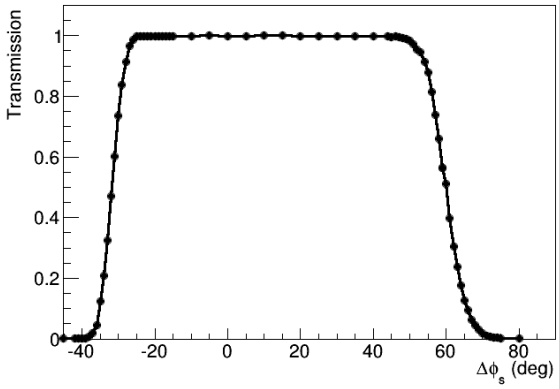


Fig. 4　ACS へのビームの入射位相のずれとビーム透過率の関係。

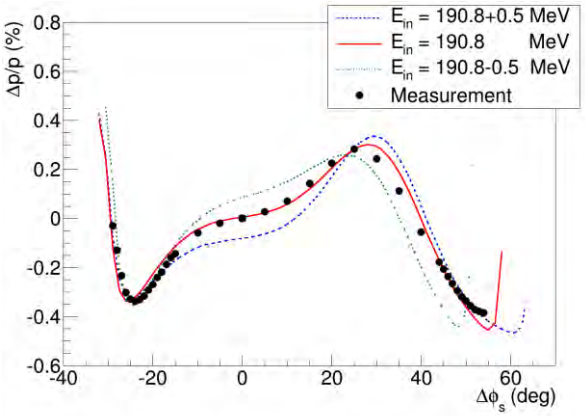


Fig. 5　ACS へのビームの入射位相のずれと、出射ビームの運動量変化（Δp/p）の関係

ミスマッチにより、ビームが途中でロスする。そこで透過率が 50%の時にビームバンチがアクセプタンスの端にいると仮定することで、アクセプタンスの幅を求めた。その結果アクセプタンスの幅は 92 度と、シミュレーションの幅 90 度とほぼ一致し、加速空洞がほぼ設計通りに調整されていることが分かった。もうひとつの ACS 出射ビームの運動量変動は、ACS 入射ビームのエネルギーを調べるため、つまり ACS より上流の加速空洞が設計通り調整できたか調べるために測定した。Fig. 5 に測定結果とシミュレーションを示す。シミュレーションは、設計通りのエネルギー（190.8 MeV）と、設計から±0.5 MeV ずれた場合の出射エネルギーの相関である。エネルギーによって分布の様子が変わるため、分布を測定することで入射エネルギーが分かる。実験では、アーク部の分散関数（η）が 0.55 m の場所に設置されているビーム一位置モニター（BPM）で位相を変えた場合の位置の変化を測定した。Fig. 5 の黒い点がその結果を示している。入射エネルギーが設計値の場合と良く一致していることが分かる。この結果より、入射エネルギーはほぼ設計通りであり、ACS より上流部分は、設計通りに調整されていることが分かった。

発表では、空間電荷効果を考えた場合のアクセプタンスについての質問や、加速空洞の調整方法についての質問が寄せられた。

4.　まとめ

第一章で述べたとおり、国際線形加速器会議には、世界中の線形加速器施設から研究者が一同に集まり、自由闊達な議論が行われる。また各研究所で進行中のプロジェクトについて、最新の結果が報告される等、加速器におけるトレンドや最新技術の情報を得るために、非常に重要な機会である。また、私が発表した内容について、SNS 等の研究者から有益なアドバイスをいただいた。今夏 J-PARC リニアックでは、フロントエンド部を交換し、最大ピーク電流を 30 mA から 50 mA に向上させる。これにより設計ビーム電力を達成する計画となっている。この会議で得た知見をもとに、設計ビーム電力を安定的に供給できるように取り組む所存である。

International Workshop on Future Linear Colliders 2014 (LCWS14)

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

仲井浩孝

1. はじめに

今回、公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会からの研究助成を受けて、セルビア共和国の首都ベオグラードで 2014 年 10 月 6 日から 10 日まで開催された「将来の線形加速器に関する国際ワークショップ」(International Workshop on Future Linear Colliders 2014; LCWS14) に参加したので、その内容を報告する。ただし、筆者の担当は超流動ヘリウムによる低温冷却システムと超伝導加速空洞や超伝導電磁石を冷却状態に保つためのクライオモジュールであるので、学術的な内容はこの 2 つに関する発表のみについて記載する。

2. ワークショップ報告

2.1. ワークショップの概要

LCWS14 の具体的な内容については、ワークショップのホームページ (http://lcws14.vinca.rs/welcome/) に詳しいので、そちらを参照していただきたい。ワークショップのホストは、ベオグラード大学の Vinča Institute of Nuclear Sciences である。会場はベオグラード大学ではなく、ベオグラードの新市街 (Novi Beograd) にあるハイアット・リージェンシー・ホテルとクラウン・プラザ・ホテルである。プレナリーセッションはハイアット・リージェンシーで、パラレルセッションはハイアット・リージェンシー・ホテルとクラウン・プラザ・ホテルの両方で行われた。この 2 つのホテルは若干離れているので、パラレルセッション間を移動する場合は結構大変であった。また、最終日のみ、国立劇場で各ワーキンググループのまとめの報告が行われた。

セルビア共和国はかつてのユーゴスラビア連邦共和国の一部であったが、ユーゴスラビア連邦解体後、ボスニア・ヘルツェゴビナやコソボ、クロアチアなどの民族紛争の嵐を経て、現在に至っている。しかしながら、今回ワークショップで訪れたベオグラードは、その過去のイメージとは異なり、路面電車や連結バスの行き交う、落ち着いた佇まいのヨーロッパの街であった。路面電車やバスの運賃は IC カードによる支払いが基本である。運転手に直接現金で支払うこともできるが、その場合の運賃は IC カードによる運賃よりも高くなるとのことであった。物価は日本の半分程度で、食事も全体的に美味しいものが多かった。因みに、ベオグラードの国際空港は「ベオグラード・ニコラ・テスラ空港」という名称で、磁束密度の単位にその名を残しているテスラがセルビア人であることを知らしめている。

ワークショップの開会式では、セルビア共和国大統領 Tomislav NIKOLIĆ 氏を始め、ベオグラード大学学長 Vladimir BUMBAŠIREVIĆ 教授および Vinča Institute of Nuclear Sciences 所長 Borislav GRUBOR 博士の歓迎の挨拶があり (Fig. 1)、このワークショップに対するセルビアの意気込みが感じられた。また、ワークショップ初日の夕方に催されたレセプションは、ベオグラー

Fig. 1　セルビア共和国大統領の歓迎の挨拶

ド市庁舎になっている旧宮殿で行われ、ベオグラード副市長の挨拶があった。

2.2. クライオモジュール

SLACに建設が計画されているLCLS-IIのクライオモジュールと低温冷却システムは、ILCの設計に若干の変更を加えたものとなっている。XFELと同様の設計で製作される超伝導加速空洞は、ILCと同じように2 Kで運転する。また、1台のクライオモジュールの中に8台の超伝導加速空洞と 1 台の超伝導四極電磁石を設置するのも ILC Type-B のクライオモジュールと同様であるが、ILCでは超伝導四極電磁石がクライオモジュールの中央に設置されるのに対し、LCLS-IIではクライオモジュールの端に設置される点が異なっている。さらに、KEKのSTF棟で研究が行われたS1-Globalの結果、コスト削減の1つとしてとして提案された5 K熱放射遮蔽の省略が実践されている。ただし、超伝導加速空洞に接続する入力結合器からの熱負荷を軽減するため、5 Kのサーマルアンカーは残してある。2 Kの超流動ヘリウムによる低温冷却システムも、基本的にはCERN-LHCやILCのヘリウム低温冷却システムと同様の設計になっている。(T. Peterson)

KEKでは、ILCのTechnical Design Report (ILC-TDR)に基づいたILC Type-Bのクライオモジュール（STF CM-1）を製作した。クライオモジュール中央部に設置した超伝導四極電磁石はFNALで製作したものである。この超伝導四極電磁石は2K超流動ヘリウム供給配管からの熱伝導によって冷却する。また、超伝導加速空洞4台を設置した、ILCクライオモジュール半分の長さのクライオモジュール（STF CM-2a）も製作し、ILCと同じ接続方法でこれら2台のクライオモジュールを連結して STF 棟のトンネル内に設置した（Fig. 2)。CM-2aに設置されている超伝導加速空洞は、空洞のCW運転に対応できるかどうかを確認するために、超流動ヘリウム供給配管をILCの設計よりも太いものにしている。CW運転時の空洞からの熱負荷を模擬するために、電気ヒーターを空洞のヘリウム容器に取付けてある。さらに、CM-2aの下流側端部には、ILC-TDRに示されているように、超流動ヘリウムの液面計を設置してある。今年の 10 月から、これらのクライオモジュールの最初の冷却試験を行っている。(N. Nakai)

2.3. グリーンILC

巨大科学の常として、ILCでも膨大なエネルギー（電力）を消費する。しかしながら、今後は省エネルギー化を図り、かつ、再生可能エネルギーあるいは持続可能なエネルギーを利用することが求められる。ILC-TDRには、Table 1に示すように、ILCの消費電力の推定値が記載されており、

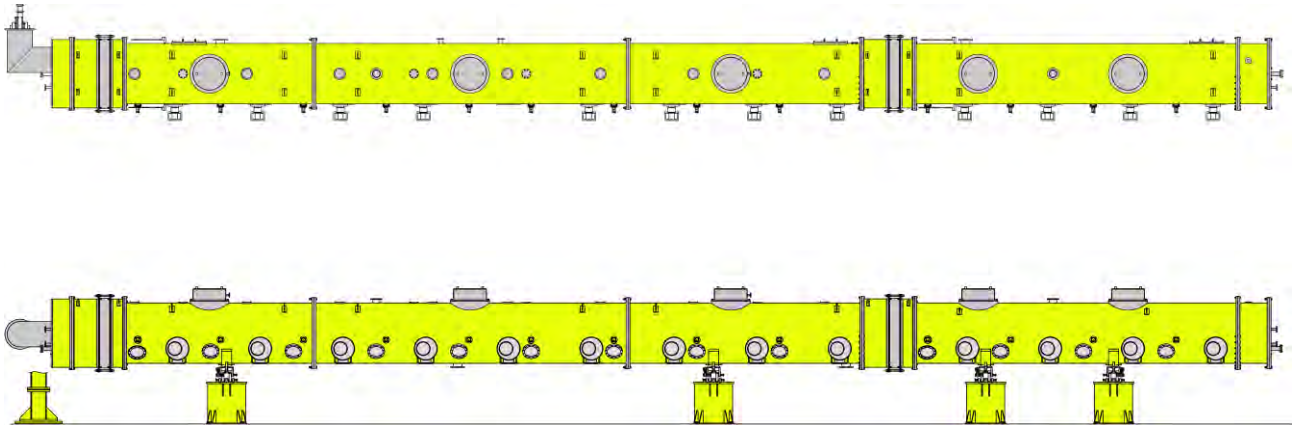


Fig. 2　STF棟に設置されたクライオモジュール（STF CM-1 と CM-2a）

Table 1　ILC (500 GeV) の消費電力推定値（単位：MW）[ILC-TRD より転載]

Accelerator section	RF Power	Racks	NC magnets	Cryo	Conventional		Total
					Normal	Emergency	
e^- sources	1.28	0.09	0.73	0.80	1.47	0.50	4.87
e^+ sources	1.39	0.09	4.94	0.59	1.83	0.48	9.32
DR	8.67		2.97	1.45	1.93	0.70	15.72
RTML	4.76	0.32	1.26		1.19	0.87	8.40
Main Linac	52.13	4.66	0.91	32.00	12.10	4.30	106.10
BDS			10.43	0.41	1.34	0.20	12.38
Dumps					0.00	1.21	1.21
IR			1.16	2.65	0.90	0.96	5.67
TOTALS	68.2	5.2	22.4	37.9	20.8	9.2	164

重心系エネルギーが 500 GeV の場合の総消費電力は 164 MW となっている。この内、超伝導加速空洞や超伝導電磁石を冷却するための低温冷却システムの消費電力は 37.9 MW であり、ILC 全体の消費電力の 23 %を占め、2 番目に大きな電力消費となっている。したがって、省エネルギーのために、低温冷却システムでもシステム全体の最適化や効率の良い冷却装置の導入が求められる。ILC-TDR では全ての冷却は液体ヘリウムのみで行うことになっているが、クライオモジュールや低温配管の予冷には液体窒素を使用することにより消費電力を低減できるとの試算がある。また、エネルギー貯蔵あるいは再生可能エネルギーを用いたエネルギー回収の媒体としての液体窒素の利用も提案されている。ILC の近くに設置した風力や太陽光あるいは地熱発電装置で窒素の液化を行い、また、液化した窒素で様々な装置や素子の冷却を行う。さらに、液体窒素が気化して高圧のガスとなるため、この高圧ガスで発電機を回して発電するなどのアイデアが示されている。さらに、風力は、直接窒素ガスの圧縮・液化に使用することもできる。(D. Perret-Gallix)

低温冷却システムの中で、消費電力の一番大きい機器はヘリウム圧縮機であるが、水を冷媒とした吸着冷凍機を使用してヘリウム圧縮機からの排熱を利用し、ヘリウム圧縮機全体の消費電力を減らす研究も行われている。この水を冷媒とした吸着冷凍機は比較的低い温度領域を高温源とすることができるため、ヘリウム圧縮機からの排熱などのエネルギー回収に用いることができる。(T. Saeki)

3. まとめ

今回の LCWS14 では低温冷却システムについての具体的なセッションはなかったが、ILC 以外の大型超伝導加速器の低温冷却システムやクライオモジュールなどの設計や、グリーン ILC の概念など、多角的な考え方を学び、様々な関連情報を収集することができた。これらをこれから具体的な設計を始める ILC の低温冷却システムやクライオモジュールの詳細設計に反映し、省エネルギーかつ低コストの ILC 用低温冷却システムやクライオモジュールを製作することができると期待している。

謝辞

LCWS14 に参加するに当たり、渡航費および宿泊費の研究助成をしていただいた公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会に御礼申し上げる。また、ワークショップへの参加およびこの助成の申請に関して、高エネルギー加速器研究機構リニアコライダー計画推進室長・山本明教授、加速器研究施設施設長・生出勝宣教授および加速器研究施設加速器第六研究系主幹・山口誠哉教授には、特別のご配慮をいただいた。各位に感謝する。

International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS14)

高エネルギー加速器研究機構

放射線科学センター

佐波俊哉

1. はじめに

International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS14)について紹介いたします。LCWS14 の会場はセルビアのベオグラードで、2014 年 10 月 5 日から 10 日の日程で行われました。参加者は 84 の研究機関、23 の国からの 193 名で、発表は参加者総数を上回る 243 件でした。ほとんどの発表資料は会議のホームページ(http://lcws14.vinca.rs/welcome/)から取得可能なので、より詳しい情報を求められる場合は参照ください。会議のプロシーディングも 2015 年 3 月締切でまとめられる予定です。なお、次回は Asian Linear Collider Workshop として 2015 年 4 月に東京とつくばで開催される予定とのことです。

筆者は 2014 年の 6 月より ILC の放射線遮蔽設計に係わり、LCWS への参加は今回初めてである。ILC の現状なども含め、放射線遮蔽設計の視点から述べることにより会議の紹介としたい。内容の若干の偏りについてはご容赦願います。

2. ILC めぐる状況と放射線遮蔽設計

ILC の概要については本誌をご覧の方はすでにご存じと思われるが、高エネルギー加速器科学研究奨励会が共催している OHO セミナーが 2014 年に ILC をテーマとして行われており、大変詳しい情報がまとめられているので、以下にリンクを掲載します (http://www.heas.jp/index.shtml)。

ILC の全体像を図 1 に示す。KEK にある加速器を例に乱暴に述べれば、地下 100m に KEK の電子陽電子加速器と KEKB リング相当の加速器を設置し、そこからのビームを約 11 km 長の電子用と陽電子用の超伝導線形加速器(STF の約 1000 台並べたものに相当)で 250 GeV まで加速し、ビームを整形して(ATF の FF ラインに相当、ただし全長は約 1km)、衝突させる加速器である。筆者は電子陽電子加速器と KEKB リングの放射線遮蔽設計の経験があるが、STF、ATF については経験がない。そこで、CERN、SLAC の放射線遮蔽のスタッフと KEK のシニアスタッフの協力を仰ぎ、放射線遮蔽のための国際チームを組織して検討に当たっています。

この会議が開催された 2014 年 10 月現在の ILC をめぐる状況ですが、2012 年に Technical Design Report (TDR)がまとめられ、2013 年には日本国

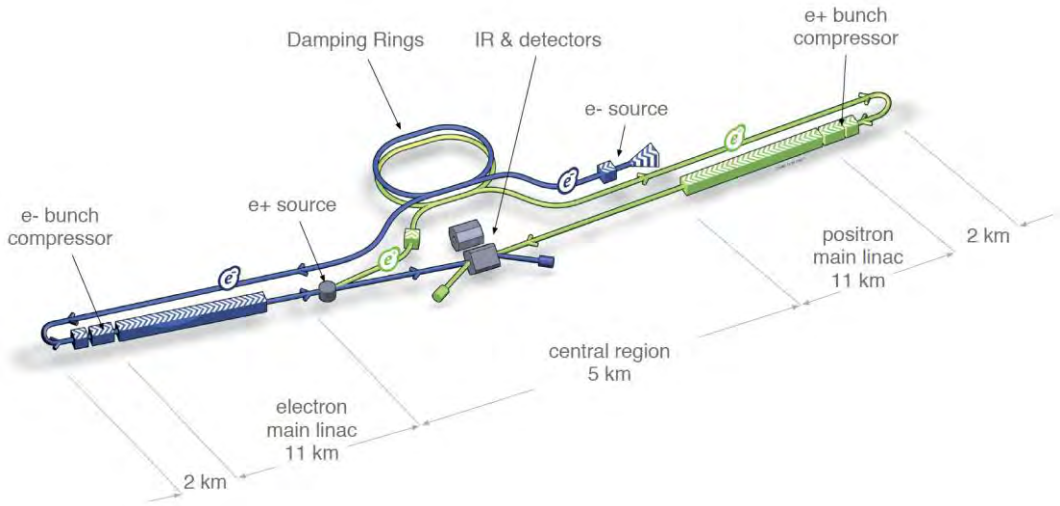


図 1. ILC の全体構成図(TDR より引用)

内の設計対象サイトとして岩手県から宮城県にまたがる北上山地が選定されたのを受けて、特にサイトを特定していなかった TDR の内容を、実際にサイトと組み合わせた場合の設計について検討が進められています。具体的サイトに TDR の設計を組み合わせた場合に、建設費の抑制や設計の合理化がはかれる変更を行う場合は Change request を出し、加速器設計チームで情報を共有して検討を進めていく仕組みも作られており、すでに 2 つの Change request が提出されています (http://ilc.desy.de/cm)。

また、文部科学省では「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」を設け日本学術会議からの提言における諸事項につき専門的見地から議論が行われています (http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm)。

この段階において放射線遮蔽設計に求められていることは、ILC 建設コストの少なくない部分を占める施設設計の詳細化に必要な遮蔽壁や基幹設備の機能に対する情報です。特に施設の大部分を占める主リニアックを納めるかまぼこ形トンネル(図 2)の中央に設置される予定の遮蔽壁については、コストの面から最適化が求められています。その他に放射線遮蔽の観点からは、主リニアックを納めるトンネルの外壁厚み、空気の取り扱い、等もかまぼこ形トンネルの成否を決める重

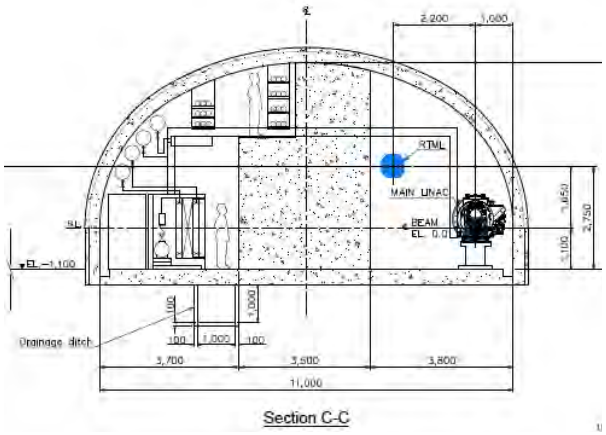


図 2. かまぼこ形トンネルの断面図　右側が加速器トンネルで左側がクライストロンや電源を納めるサービストンネル。中央にはこの 2 つを仕切るコンクリート製の隔壁がある

要な要因であると考えている。また、主リニアックから下流に目を移すとビーム輸送システム、電子源、陽電子生成ターゲット、ビームダンプなど、TDR で設計はされているが、実際にサイトに設置し、施設の形状を決めるためには重要な機器がある。これらはコストの面ではかまぼこ形トンネルほどのインパクトはないと思われるが、放射線遮蔽設計にとっては施設全体の設計方針を左右する大変重要な部分である。今回の会議で、これらの部分の検討状況を直接聞き、発表者と直接意見交換ができたことは今後の設計において大変有用であった。

3. かまぼこ形トンネルの遮蔽設計

かまぼこ形トンネルの遮蔽設計についての議論は ILC の Conventional Facility and Siting (CFS)グループのセッションとして 3 日目の朝に行われた。出席者は 20 名ほどで CFS のメンバーの他には、Accelerator Design and Integration (ADI)のメンバー、Technical Board(TB)のメンバーであった。筆者より加速空洞、モジュールの形状と材質を組み込んだ 3 次元モンテカルロシミュレーションによる通常運転状態での線量率、誘導放射能の推定、ビーム異常があった場合のサービストンネル側の線量率推定について報告を行った後、その内容について議論が行われた。

ILC の主リニアックトンネルの遮蔽設計について常に論点になるのは、そのビーム損失の特異さである。主リニアックは地球の丸みに沿った直線で、完成形では口径の大きい加速空洞が並んでいるだけのところに、ダンピングリングで得られた非常に小さいビームが通る事になっている。通常状態では TDR の最大ビーム出力 13.64 MW に対し、10,000,000 の 1 である mW オーダーのビーム損失が見積もられている。これは現在の技術で当然実現できるとされており、一方で今までの加速器の設計に使われてきた値と比べ、非常に高い最大定格であるとともに、非常に低い損失率である。実際に加速器チームからは最も大きな「ビーム」損失は、ビームによるものでなく空洞の暗電流によるものであるとされており、生成放射能の

推定はこの値をもちいて行っている。現在は無限時間運転した場合の値を推定しているが、今後運転時間と休止時間の見積もりをもとに実生成量を推定する段階にある。

一方、サービストンネルの線量率は暗電流によるものは、そのエネルギーが低いことも有り、十分に低い。この厚みを決めるのは通常時の10,000,000 倍のパワーが失われる「かも知れない」機器異常時の線量率推定である。この異常時のビーム損失量の総量と事象の進展については、翌日の ADI セッションにおいて Nikolai Solyak 氏による検討状況が報告された。まだ、検討の中途であり、具体的な値を与える状況ではないものの、加速器の組み合わせと実際の運転状況、期待できる機器を考慮に入れた、加速器の規模とパワーに見合った非常にしっかりした検討内容であるという印象を受けた。今後の検討の進展に期待したい。

残念ながら今回の会議では、ビーム損失の推定検討の報告の前日に CFS の議論があったために、定量的な機器異常時のシナリオに基づいた線量率の議論ができなかった。参加者からはビームを十分にとめることができれば、遮蔽壁のコスト最適化が可能であるとの意見が相次いだ。一方で主リニアックを納めるトンネルの外壁厚み、空気の取り扱い、などの点についてはほとんど議論にならなかった。これは筆者の力不足によるものである。

今回の議論を受けて CFS グループでは遮蔽壁を薄くできるとの感触を得て Change request に進む道筋を進めていくようである。Change request ではこれに至る検討とインパクトについて慎重に検討されることから、現在十分でない情報についても確認の上、最適化がはかられるものと期待できる。このような変更を積み重ねることにより、加速器としての全体的な設計が整えられていく過程に係わることは大変興味深い。

4. ビーム損失と設計に係るセッション

発表を行ったセッションの他は、Plenary セッションとビーム損失に係わる部分のセッションに参加し、検討過程について理解を深めることができた。参加した主なセッションは、ビーム輸送システムの設計に係わるもの、コリメータの設定に係わるもの、衝突後引き出しラインのビーム損失に係わるもの、クライオモジュールの暗電流の測定値に係わるもの、陽電子生成ターゲットの配置に係わるもの、ダンピングリングのトンネル形状に係わるもの、である。どのセッションも、大変参考になる報告があったが、KEK からの参加者が議論をリードし、また、詳細かつ実際的な検討を進めていることを知ることができた。これまで、同じ研究所にいながら担当加速器が違うことから業務にかかわる議論をすることが無かったので、大変よいきっかけになったものと思う。

コリメータから、L*、引き出しラインにおけるチューニングの設定、ビーム損失の見積もりにおいては、KEK の奥木氏、SLAC の Glen White 氏、Yuri Nosochkov 氏の発表が大変参考になった。現在 Change request として提出されている L*の変更の影響について、理解することができた。なかでも奥木氏の発表内容は大変充実しており、実際的でも有り、このような検討が行われているのであれば、主リニアックで直面しているような検討事項は早い段階で放射線遮蔽の検討に入れられるのではないかという感触を得た。会議後に筆者の素人質問にもおつきあいいただき感謝している。

空洞の暗電流と放射線の関係については Fermilab の Elvin HARMS 氏の発表と、これに係わる KEK の山本康史氏との意見交換が大変参考になった。空洞の特性の系統測定が DESY や Fermilab、KEK で行われている中で、放射線の視点からの測定量の定量化と影響の推定という部分で、協力ができそうな部分があることが共有できた。暗電流は前述の通り主リニアックの遮蔽設計の根幹をなすものであるので、実際について常に気を配り、必要であれば設計に反映することが必要であると感じた。

陽電子生成ターゲットとその周辺の機器配置と遮蔽構造について、TDR 後の Conventional システムの配置の最適化について、EDMS の情報を

東北大学の佐貫氏よりいただき、これを運営している DESY の Benno List 氏と現状の認識について議論できた。3D のトンネル配置図ではなく建築図面を用意して放射線遮蔽設計を進めていく必要性とこれを実現するための具体的方策について、直接協議できたのは、情報の共有とこれまでのアジア、ヨーロッパ、アメリカの 3 極での検討資産の活用という意味で遅ればせながら意味のあることになると確信する。

謝辞

今回の会議参加において渡航費と宿泊費の援助をいただいた高エネルギー加速器科学研究奨励会に感謝いたします。また、一週間の会議参加について格段の配慮をいただきました、山本明リニアコライダー計画推進室長、山口誠哉加速器第 6 研究系主幹、伴秀一共通基盤研究施設長、佐々木慎一放射線科学センター長及び放射線管理室員各位に感謝いたします。

リング Higgs Factory の研究

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
船越義裕

2014 年 10 月 9 日から 12 日に中国高能研の近くのホテル（Wanda Realm）で開催された「Workshop on High Luminosity Circular e+e- Colliders - Higgs Factory」に高エネルギー加速器科学奨励会より助成金を頂き参加した。このワークショップは中国や CERN で計画されている主にリング型衝突加速器を用いた Higgs Factory（ヒッグス粒子を大量に作ってその性質を調べる）について議論し、検討を行うことを目的に行われた。中国高能研,CERN の他、BNL, SLAC, FNAL, LBL, DESY, INFN, Cornell 大,BINP, KEK 等から 98 名が参加し、真剣な議論が行われた。KEK からは大見和史氏、大西幸喜氏、杉本寛氏、森田欣之氏、中山浩幸氏、及び筆者の 6 名が参加した。このワークショップの URL は以下の通りである。

http://hf2014.ihep.ac.cn

ワークショップの初日に行われたプレナリーセッションでは、Higgs Factory を中心とする衝突型加速器による物理研究の意義や CERN や中国で検討されているリングを用いた Higgs Factory の検討の現状などについて報告があった。初日の夕方からパラレルセッションに入った。このパラレルセッションでは９つのテーマごとにワーキンググループに分かれて報告や議論を行ったが、二つのワークンググループの報告や議論が並行して行われ、興味あるテーマの報告や議論に参加できず不満が残るケースが多かったような印象がある。

筆者は、ワーキンググループ３の convener の仕事を引き受けたが、このワーキンググループは、「interaction region and machine-detector interface」を扱うものであり、ビームの衝突点付近の設計や加速器と検出器の間の整合性などを検討するものであった。このワーキンググループでどういう人にどういう話をしてもらうかの計画を立てることも convener の仕事であり、またワークショップでの講演の進行や最後にまとめを行うことも仕事の一部であった。具体的には、以下のような報告（講演）が行われた。

(1) CEPC IR optics : Yiwei Wang (IHEP)
(2) Status of the FCC-ee interaction region design : Roman Martin (CERN)
(3) Crab waist interaction region : Anton Bogomyagkov (BINP)
(4) Choice of L* I: SR and other issues (Joint with WG4) : Michael Sullivan (SLAC)
(5) Choice of L* II: IR optics and dynamic aperture : Eugene Levichev (BINP)
(6) Choice of L* III: requirement from detector : Gang Li (IHEP)
(7) Lost particles in the IR and Touschek effects : Manuela Boscolo (INF)
(8) Detector beam background simulations for CEPC : Hongbo Zhu (IHEP)
(9) SuperKEKB background simulations :

Hiroyuki Nakayama (KEK)

(10) Beam-beam limit vs. number of IPs and energy I: beam-beam simulation : Kazuhito Ohmi (KEK)

(11) Beam-beam limit vs. number of IPs and energy II: scaling law : Ming Xiao (IHEP)

(12) Long-range beam-beam interaction with the bunch train operation : David Rice (Cornell U.)

これらの内、(1)~(3)は衝突点付近の加速器の設計一般に関する報告であり、また(4)~(6)はその中で特に重要な、衝突点から最初の 4 極電磁石までの距離（L*）の設計値を決めるためにいろいろな観点から検討を行った結果が報告された。(6)~(9)は衝突点付近のビームロスや放射光のため検出器にバックグラウンドノイズが乗ってしまう問題に関する検討結果の報告である。これも、場合によっては深刻な問題になる。(10)~(12)は二つのビームの相互作用による問題（ビームビーム効果）を検討した発表であった。これはいずれも非常に重要な問題であり、発表に続いて活発な議論がなされ、将来の Higgs Factory の設計にも重要な示唆を与えたものと思う。この中で興味深いと思った BINP の Eugene Levichev 氏による(5)の講演について、簡単に紹介する。この講演は、衝突点付近で発生する非線形成分の評価を衝突点から最初の 4 極電磁石までの距離（L*）の関数として評価したものである。全ての非線形成分を評価することは難しいので、以下の式で定義されるα_{yy}を指標に取った。

$$\Delta\nu_y = \alpha_{xy}J_x + \alpha_{yy}J_y \qquad (1)$$

ここで、$\Delta\nu_y$は垂直方向のベータトロン振動数の変化、J_x, J_yは水平及び垂直方向のアクション変数である。以下では、右辺の第一項は小さいとして無視し、第二項のみを考える。このα_{yy}は非線形の８極成分にあたる。この報告では、衝突点付近の非線形性の発生源として以下の３つを考えた。

（１） 主に衝突点と最初の４極電磁石の間のドリフトスペースから生じる Kinematics 項（α^k）

（２） 主に最初の４極電磁石のフリンジから生じる非線形性（α^f）

（３） 衝突点付近の chromaticity を局所的に補正するために用いられる６極電磁石からの非線形性（α^{sp}）

これら三種類のα_{yy}の項について、まず世界のいろいろな加速器についての比較が示された。例えば、SuperKEKB の LER ではα^kが 1.26×10^6 m^{-1}, α^f が 5.1×10^6 m^{-1}, α^{sp} が -0.65×10^6 m^{-1} となり、４極電磁石のフリンジからの寄与が大きいとされている。因みに、α^kは、L*に比例し、α^fは L*の３乗に比例し、α^{sp}は L*の２乗に比例するとされている。CERN のリング Higgs Factory の計画である TLEP の場合は、これらの項が L*の関数として Table１のように評価される。この表に見られるように、TLEP の場合は、６極電磁石による非線形性が最も危険である。非線形性が大きい場合の最大の問題は、dynamic aperture が減少して、ビーム寿命やビーム入射に困難をもたらすことである。

Levichev 氏は、この dynamic aperture 減少の問題をトラッキングシミュレーションを用いて、研究中である。６極電磁石の非線形性については、６極電磁石をペアで設置して、そのペアの間で非線形をキャンセルする方法が取られるが、６極電磁石の長さが有限であることに起因して高次の項がキャンセルされずに残る。これに対しては、より弱い６極電磁石の別のペアを近くに設置することにより、非線形をかなり減らすことができるとされている。

このように、衝突点付近の光学上の非線形性の問題、従って dynamic aperture の観点からは、L*は小さい方が望ましい。また、(4)の講演では検出器に影響を与える SR（放射光）の観点からも L*は小さい方が望ましいことが示された。しかし、(6)の講演では、検出器の観点からは L*は大きい方が望ましいことが示された。今後、TLEP や CEPC の設計ではこれらの問題を考慮して、最適な L*の値を決めることが必要である。

L^* (m)	$\alpha^k \times 10^{-6}$ (m^{-1})	$\alpha^f \times 10^{-6}$ (m^{-1})	$\alpha^{sp} \times 10^{-6}$ (m^{-1})
0.7	0.08	0.009	-8
1	0.11	0.025	-16
2	0.20	0.21	-64
3	0.71	0.71	-144
	$\propto L^*$	$\propto L^{*3}$	$\propto L^{*2}$

Table 1. TLEP のパラメータを用いた衝突点付近の非線形性の評価（β_y^*=1mm, K2=0.16m^{-1})

筆者自身は、ワーキンググループ９（Instrumentation and Control）において、「Lessons learned from the B-Factories and implications for a high-luminosity circular e+e- Higgs factory」と題した３０分の講演を行った。ここでは、KEKB における以下の経験について話をした。（１）電子雲の効果の診断や対策、（２）ビーム位置モニタ(BPM)を用いた光学系の補正や BPM 自身に関する問題で、例えばビーム用いた電極のゲイン校正や４極電磁石や６極電磁石との相対位置（オフセット）の補正の問題、BPM のケーブルが日光による加温で誤った値を出した時のルミノシティへの影響の問題、（３）衝突を維持するための衝突点付近の軌道フィードバックシステムの経験、（４）ルミノシティ調整の方法や連続入射に関する経験、等である。これらの経験のいくつかは、将来のリング Higgs Factory でも有用であると期待される。講演後、軌道フィードバックシステムやルミノシティ調整に関する熱心な質問が出た。また、筆者は個人的な事情で参加できなかったが、このワークショップの直後に、中国高能研のリング Higgs Factory の計画である CEPC に関するレビューが開催され、ここでも KEKB のルミノシティ調整の方法について議論が行われたと聞いている。

高ルミノシティ加速器実験におけるビームバックグラウンドの見積りと検出器保護対策に関する研究

高エネルギー加速器研究機構

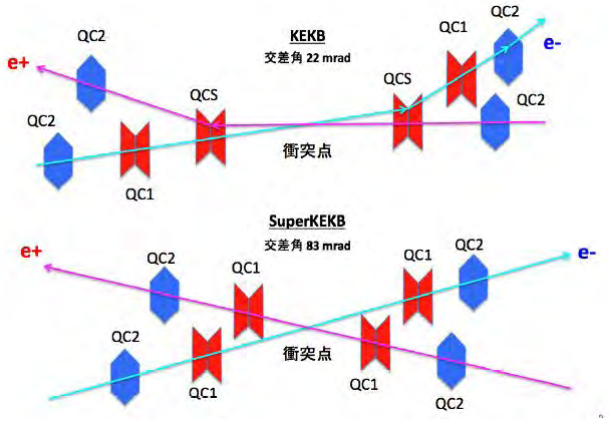
素粒子原子核研究所

中山浩幸

1. イントロダクション

我々は, 現行の KEKB 加速器をアップグレードし，低エミッタンスビームを用いて約 40 倍の高ルミノシティを目指す SuperKEKB 加速器の建設準備を進めている。SuperKEKB では，ルミノシティの向上に伴い検出器バックグラウンドも大幅に増える。衝突点付近の設計の際には，これらのバックグラウンドの詳細を理解し，検出器の性能を著しく損ねない程度に抑える必要がある。

2. 衝突点設計



SuperKEKB のビーム交差角は KEKB の 22mrad より大幅に大きい 83mrad となった。KEKB では最終収束磁石を電子リング・陽電子リングで共有していたが，SuperKEKB では交差角を大きくしたことで各リング専用の最終収束磁石を置くことができ，光学調整の自由度が増した。また，KEKB では衝突点を通り抜けたビームが下流側最終収束電磁石の中心から離れた点を通過し，そこで軌道が曲げられていた。これによってディスパージョンが発生し，それを抑えられなければエミッタンスの増大につながる。SuperKEKB では各リング専用の最終収束磁石を持つことで，こういった無用なベンドを回避している。また，後述するバックグラウンドの抑制にもつながっている。

大きな交差角への変更に従い，衝突点付近の設計は KEKB と比べて大きく様変わりした。まず，最終収束電磁石よりも内側でビームパイプが二股に分かれるため，ビームパイプ径は 20mm よりも小さくなければ，他方のビームがコイルの外を通るような電磁石の設計が成り立たない。また，水平方向に交差するため，ビームパイプが占める容積が大きくなり，検出器とビームパイプの間の隙間が減って，ケーブル配線や冷却配管のスペースの取り合いが厳しくなっている。さらに，その狭いスペースの中で，増大するバックグラウンドに備えて，バックグラウンドを止めるシールドを置く場所も確保する必要がある。また，細い径で十分な強度を実現するため，サポート機構についても注意深く設計する必要がある。

3. ビームバックグラウンド

SuperKEKB で想定されるバックグラウンド源には以下のようなものがある。

(1) タウシェック散乱：

同一バンチ内のビーム粒子が衝突して運動量が増加または減少する。軌道を外れた粒子が衝突点付近でビームパイプに当たってシャワーを生成し，検出器へ届くとバックグラウンドとなる。散乱確率はビームサイズに反比例するため，KEKB に比べてタウシェック散乱は大幅に増える。

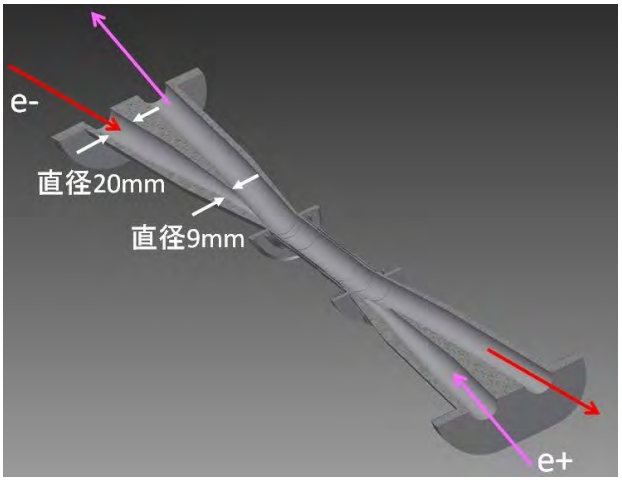
対策としては，軌道を外れた粒子をリング各部に配置した可動コリメータで可能な限り落とし，衝突点付近まで到達させないことが鍵になる。詳細なスタディの結果、衝突点直前の直線部に複数の可動コリメータを導入することで、衝突点のロスを 100 分の 1 程度（1GHz 以下）にまで抑えることができることがわかった。検出器に最も近いコリメータは衝突点から約 20m に設置され、チップスキャッタリングによる二次シャワーの影響に留意する必要がある。KEKB では水平コリメータはリング内側にのみ設置されたが、SuperKEKB ではリングの外側からもコリメートする必要があるため、放射光による発熱を抑える冷却機構が組み込まれる。

(2) ビームガス散乱：

ビーム粒子が残留ガスに衝突し，クーロン散乱により角度が変わるか，制動放射によってエネルギーが減少する。後者は大したことはないが、前者はナノビームにおいて非常に危険なバックグラウンド源である。最終収束電磁石での垂直ベータ関数が非常に大きく、衝突点付近ビームパイプ径が小さいことから、ビームガス・クーロン散乱によるビーム寿命は KEKB の時よりも大幅に短くなる（10 時間→30 分）。最終収束電磁石の内部で 100GHz 以上のビームロスがあってはたまらないので、垂直コリメータを導入することになるが、置き場所の選択が難しい。通常、可動コリメータはベータ関数の大きなところに置くとビームコアとハローを分離しやすいが、ベータ関数に比例して大きくなる Transverse Mode coupling instability がこのケースでは問題になってくる。詳細なスタディの結果、許される解は、「ベータ関数が比較的小さい(~100m)場所に、ビームとの距離が非常に狭い(~2mm)コリメータを置く」であることがわかった。コリメータ幅の許容範囲は小さく、50μm の制度が要求される。

(3)　シンクロトロン放射

ビームが磁場によって曲げられる際に放射光を出す。衝突点手前の最終収束電磁石で発生した放射光(数～数 10keV)がビームパイプのベリリム部を貫通して内装の検出器(PXD/SVD)に当たると、バックグラウンドとなる。



衝突点付近のビームパイプ形状に工夫がある。上流側のビームパイプは衝突点に近づくに連れて半径が 10mm→4.5mm に小さくなるテーパ構造になっており、ビーム軌道と平行に飛んできた放射光が直接ベリリウム部分に当たることはない。テーパ部分の斜面には鋸歯状の段差がついており、斜面で一回散乱した放射光もベリリウム部に到達しにくい。

(4) Radiative Bhabha 散乱

ルミノシティに比例する。衝突点で電子と陽電子が Radiative Bhabha 散乱すると，ビーム軸方向に光子が出る。この光子がずっと下流の偏極電磁石の鉄に当たって巨大双極子共鳴反応によって中性子が発生し，検出器付近まで戻って来たものがエンドキャップ検出器のバックグラウンドとなる。また，高いエネルギーの光子を出し、エネルギーが 2GeV 以下になったビーム粒子（電子・陽電子）の一部は、軌道を外れて検出器内部でロスする。粒子のロスレート

元のビームエネルギーに換算して各リング約 1GHz で、この値は検出器ソレノイド磁場とビーム軌道の角度でほぼ決まり、削減は事実上不可能である。 SuperKEKB が設計ルミノシティを達成した際には、Radiative Bhabha 散乱が最も大きなバックグラウンド源となる。

(5) 2 光子過程

同じくルミノシティに比例する。
e+e-→e+e-e+e-過程で生成した電子陽電子対は、ソレノイド磁場に巻き付く軌道を描き、3MeV 以上の場合は最内層の PXD 検出器に到達する。ビームパイプで多重散乱して軌道がずれると、PXD に多数回ヒットする事があり、注意が必要である。

４．検出器シミュレーション

我々は、加速設計に用いられるトラッキングコード SAD と、検出器シミュレーションで用いられる GEANT4 を併用して、バックグラウンドの影響を見積もっている。具体的には、散乱した粒子がビームパイプの内壁に当たるまで SAD でトラッキングを行い、SAD が出力した粒子の位置と運動量を Geant4 の初期粒子として入力して検出器シミュレーションを行っている。

ビームバックグラウンドが検出器に与える影響は、大きく分けて以下の様なものがある。

(1) バックグラウンド信号増加による測定精度の悪化（運動量測定、粒子識別など）

(2) バックグラウンド信号増加による不感時間の増加（PXD の読み出し帯域不足、中性子による FPGA エラーのリセットなど）

(3) 長期運転による検出器ダメージ蓄積（ガンマ・中性子によるシリコンを使った検出器やカロリメータ結晶へのダメージ等）

これまでの検出器シミュレーションの結果、10 年間の SuperKEKB 運転において、現在の検出器バックグラウンドはほぼ許容値以下に抑えられている。唯一、TOP 検出器の PMT の光電面の寿命は数年しか持たないが、最近開発された新型 PMT では寿命が大幅に伸びるため、運転開始後数年以内に新型と交換する予定である。

５．終わりに

本研究の成果は、2014 年 10 月に北京で行われた国際学会 The 55th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Luminosity Circular e+e- Colliders – Higgs Factory 2014 において発表された。

以上

超高ルミノシティ衝突型加速器における力学口径研究会参加

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

大西幸喜

1. 序

「Advanced Beam Dynamics on High Luminosity Circular e^+e^- Colliders – Higgs Factory (HF2014)」と呼ばれる国際会議が、中国北京において平成２６年 10 月 9 日より 10 月 12 日の 4 日間にわたり開催された。これは、将来の加速器を考える国際委員会（ICFA）によって主催された会議である。ICFA が主催する会議では、発表者は会期中に研究内容に即したプロシーディングの提出が厳しく義務付けられている。本研究の詳細かつ専門的な内容は出版予定のプロシーディングに書かれている。プロシーディングの研究内容を交えて国際会議で得た研究成果の報告をしたいと思う。

世の中には、医療用加速器、放射光利用光源、素粒子実験用の衝突型加速器などがある。本研究対象は、衝突型加速器である。衝突型加速器実験では、自然界の基本的な物質（これ以上構成要素に分けられない素粒子）とは何か、また素粒子に働く力の性質とは何かという人類普遍の根源的な疑問を解明する学問である。これらの事が解明できれば、「宇宙の始まり」を理解し「将来の宇宙」を予測することが可能と思われる。

衝突型加速器で注目されるパラメータは、加速する荷電粒子のエネルギーと、それらを互いに反対方向から衝突させる頻度である。加速器の形状的な分類によれば、加速器は円形型と直線型に分類される。加速器で加速される多数の荷電粒子の集まりをビームと呼ぶこととする。ビームを構成する荷電粒子の飛行軌道をプリズムの役割を果す偏向磁石で曲げようとすると、光を放って放出した光のエネルギーを損失する。円形型では失ったエネルギーを補いつつ加速する必要があるために高エネルギーまで加速することはたやすいことではない。従って、飛行軌道を曲げない直線型加速器の方が高いエネルギーまで到達しようとすると原理的に有利である。しかしながら、衝突させる頻度では、ビームが何周も同じところを回ってくるので円形型加速器の方が有利であることが容易に想像される。この研究会では、円形型加速器についての研究に焦点を絞っている。その理由の一つとして、最近、欧州原子核研究機構（CERN）の LHC 加速器実験で観測された「ヒッグス粒子」と思しき粒子の質量が 125 GeV と比較的軽かったことが挙げられる。ヒッグス粒子を生成するには、重心系のエネルギーで 240 GeV の加速器が必要であることがわかった。そのエネルギー領域に到達する衝突型円形加速器の可能性を検討し始めているところである。具体的に検討されているものとして、CERN の FCC と中国の CEPC と呼ばれる加速器が挙げられる。

ヒッグス粒子は、物質に質量を与える機構を備えていると考えられている。物体が運動する時にヒッグス粒子が抵抗として働き重さを感じるが、等速運動の場合にはヒッグス粒子は感じず、加速度のある場合のみヒッグス粒子を感じるという特徴がある。従って、所謂エーテルのような抵抗とは異なり、等速運動する物体は減速しない。このようなヒッグス粒子が発見されたと言っても、未解明な領域が多く残っている。従って、現在ヒッグス粒子を研究することは素粒子物理学の最重要課題となっている。ヒッグス粒子を大量に生成する加速器は、ヒッグス・ファクトリーと呼ばれる。高エネルギー加速器研究機構で建設中である SuperKEKB 加速器[1]における最先端水準の「技術の結晶」は円形のヒッグス・ファクトリーに応用できるので、ベンチマークとして SuperKEKB 加速器は世界中から注目されている。

「新しい物理」の兆候を発見しようとする場合、前述したように直接高いエネルギーの加速器を建設するという手段の他に、後に述べる衝突頻度

の高い加速器を建設するという２つのアプローチがある。後者に分類される SuperKEKB 加速器は、次世代の B ファクトリーである。B ファクトリーとは B 中間子を大量に生成し、B 中間子に含まれる b クオークが、“間接的に高いエネルギー状態”に遷移して崩壊する事象を調べ「新しい物理」の兆候を発見しようとするものである。間接的な高いエネルギー状態は、非常に稀な現象なので、大量の B 中間子を作り出す必要がある。物理事象の数（N）は、反応断面積（σ）と衝突頻度（L）と実験期間（T）をかけ合わせたものである。

$$N = \int_0^T \sigma L dt \qquad (1\text{-}1)$$

反応断面積 σ は自然界の法則によって決まっているので事象数を大きくしようとすると人間の努力によって衝突頻度 L を大きくするしか手立てがない。L はルミノシティと呼ばれ加速器の性能を示すパラメータの一つである。従って、SuperKEKB 加速器では、KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティに相当する $8\text{x}10^{35}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ という超高ルミノシティを達成することが課題となる。

ルミノシティは、重要な 3 つのパラメータによって表される。

$$L \propto \frac{I\xi_y}{\beta_y^*} \qquad (1\text{-}2)$$

ここで、I はビーム電流、ξ_y は垂直方向のビームビーム・パラメータ、β_y^*は、衝突点垂直ベータ関数と呼ばれる。ビームビーム・パラメータは衝突するビームとビームの相互作用の強さを示す。KEKB 加速器では 0.09 程度が達成されており、SuperKEKB 加速器でも同程度の値が達成されると仮定している。式(1-2)より、ルミノシティを高くするためには、衝突点垂直ベータ関数を小さくし、ビーム電流を大きくすれば良いことがわかる。衝突点垂直ベータ関数は、衝突点で垂直方向にビームを如何に小さく絞るかを示し被写界深度に相当する。SuperKEKB 加速器では、超伝導４極磁石を用いて KEKB 加速器の 1/20 にあたる 300 μm まで垂直にビームを絞ることが可能である。また、ビーム電流は KEKB 加速器の 2 倍の 3.6 A を設計値としている。以上より、KEKB 加速器の到達した 40 倍のルミノシティが設計上達成できる加速器パラメータとなっている。

SuperKEKB 加速器は２つの円形加速器からなっている。一つは電子を蓄積し、もう一つは陽電子を蓄積し、互いに反対方向に何周も周回させる。山手線で言えば外回りが電子ビームであり、内回りが陽電子ビームである。山手線と異なるところは、２つの円の大きさが全く同じというところである。従って、２つの円を水平方向に少しずらした配置となっている。このため、内外入れ替わる場所が２箇所でき、そのうちの一箇所は上下に素通りさせ、もう一箇所で電子と陽電子を衝突（交差）させる。ここに、巨大な測定器を設置し、衝突反応で発生する粒子を観測し物理現象を解明する。

2. ビーム光学設計

陽電子ビームを蓄積する円形加速器（リング）を LER 、電子ビームを蓄積するリングを HER と呼ぶ。B ファクトリーで必要な重心系エネルギーを得るためには、LER のビームエネルギーは 4 GeV、HER は 7 GeV である。電子と陽電子は線形加速入射器（リナック）によって、リングと同じエネルギーで供給される。ビームはリングの中を水が流れるように流れているわけではない。高周波加速空洞を用いて加速する性質上、安定なポテンシャルは離散的になるので、ビームは、安定ポテンシャルの周りで固まりとなる。この固まりのことを「バンチ」と呼ぶ。バンチには大きさがある。水平方向の広がり、または垂直方向の広がりを「ビームサイズ」と呼び、進行方向の広がりを「バンチ長」と呼ぶ。バンチに含まれる粒子数には上限がある。1 つの円形加速器で電子バンチと陽電子バンチを蓄積し衝突させることは可能であるが、全部で衝突点と同数のバンチしか基本的に蓄積できない（でないと、多くの望まない場所で衝突してしまいビームは不安定になる）。円形加速器を 2 つ作ることで、前述の制限は無くなる。従って、多数バンチを蓄積することが容易と

なりアンペアー級の大電流を蓄積することを可能としている。

ビームを互いに正面衝突させる場合、垂直方向のベータ関数を 300 μm まで絞ると、バンチ長も同程度に短くしないとルミノシティは幾何学的に大損し、式(1-2)のようにルミノシティは高くならない。このことは「砂時計効果」として知られている。しかしながら、このレベルまでバンチ長を短くすると SuperKEKB 加速器の場合、コヒーレントな放射光によりビームが不安定になることがわかっている。この事態を打開するために「ナノビーム」と呼ばれる方式がイタリアの P. Raimondi らによって提唱された[2]。この方式では、衝突点水平方向のビームサイズを小さくし、大きな交差角を持たせて、細長いビームを斜めに衝突させて、進行方向の重なり合う領域を実際のバンチ長よりも圧倒的に小さくする。このアイデアによると、バンチ長は KEKB 加速器と同程度である 6 mm と長くても良いことになる。

重なり合う領域に相当する見かけのバンチ長は、

$$\tilde{\sigma_z} = \frac{\sigma_x^*}{\phi_x} \qquad (2\text{-}1)$$

と表される。ここで、σ_x^*は水平方向のビームサイズ、φ_xは２つの衝突するビームのなす水平交差角の半分で 41.5 mrad である。ナノビーム方式において、砂時計効果を避けるためには以下の条件を満たす必要がある。

$$\beta_y^* > \tilde{\sigma_z} \qquad (2\text{-}2)$$

従って、垂直ベータ関数を 300 μm まで絞るためには、式(2-1)より、水平ビームサイズを 12 μm 以下にする必要がある。ビームサイズは、「エミッタンス」と呼ばれるパラメータと水平ベータ関数の積の平方根として表されるので、エミッタンスを 3 nm~5 nm、衝突点水平ベータ関数を約 30 mm に絞る。エミッタンス（ε_x）はビームの品質を表すパラメータである。エミッタンスは、モード結合がない場合、次式で表現される。

$$\varepsilon_x \propto \frac{\gamma^2}{2\pi\rho^2} \oint_{Bend} H(s)ds$$
$$H(s) = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_x' + \beta_x \eta_x' \qquad (2\text{-}3)$$

ここで、γ はローレンツ因子、ρ は偏向磁石の曲率半径、α_x と β_x は Twiss パラメータ、η_x は分散関数である。SuperKEKB 加速器でエミッタンスを小さくするには、偏向磁石でエネルギーの違いによって軌道が分散する割合を出来るだけ小さくするビーム光学系が必要となる。そのためには、偏向磁石の長さを長くする（曲率半径を大きくする）、凸レンズおよび凹レンズの役割をする収束・発散 4 極磁石の磁場強度を強くする（分散関数の調節）などの努力を行う。

一方、垂直ビームビーム・パラメータは、

$$\xi_y \propto \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\varepsilon_y}} \qquad (2\text{-}4)$$

と表されるので、垂直ベータ関数を小さくする分、垂直エミッタンス（ε_y）も小さくしないとビームビーム・パラメータは設計値に到達しない。必要な垂直エミッタンスは水平エミッタンスの約 0.3 %である。従って、加速器の制作誤差およびビームビーム相互作用等で垂直エミッタンスが悪化する要因を含めて達成しなければならない ε_y は約 10 pm と非常に難しいものである。

3. 力学口径

ビームを安定にリングで蓄積するためには、ビームの寿命は、ある程度長くなければならない。SuperKEKB 加速器では低エミッタンスであるために Touschek 寿命がビームの寿命を決める大きな要因となる。Touschek 寿命とは、バンチ内粒子の水平方向の衝突によって、僅かな横方向の運動量変化が、ローレンツ因子によって進行方向の運動量が大きく変化し、力学的な安定領域から逸脱し失われることによって決まる寿命である。Touschek 寿命を長くするためには、力学的に安定な領域、つまり力学口径を大きくすることが考えられる。

力学口径は、ビーム光学系の非線形効果によって制限を受ける。まず、衝突点でビームを小さく絞るための最終収束磁石での非線形効果が問題となる。その指標として

$$J_{y0} = \frac{\beta_y^{*2}}{(1+2/3 \mid K \mid L^{*2})L^*} A(\mu_y) \quad (3\text{-}1)$$

ここで、J_{y0} は初期垂直振幅（アクション）、K は最終収束磁石の磁場強度、L*は衝突点から最終収束磁石までの距離、$A(\mu_y)$は普遍関数である。式(3-1)は、衝突点垂直ベータ関数が小さい程、また最終収束磁石が衝突点から離れるにつれて力学口径が小さくなることを意味する。表 1 に、関係するパラメータを示す。KEKB 加速器の $J_{y0}/A(\mu_y)$ は 4.2μm なので、それと比べると SuperKEKB 加速器は約 200 倍も小さいことがわかる。

表 1　力学口径の指標となるパラメータ

項目	LER	HER	単位
β_y^*	270	300	μm
K	-5.1	-3.1	$1/m^2$
L^*	0.76	1.22	m
$J_{y0}/A(\mu_y)$	0.032	0.018	μm

次に、最終収束磁石でビームを絞ることによって、大きな「色収差」が発生する。この大きな色収差を補正するために、非線形磁場である 6 極磁石の強さが強くなり問題となる。色収差とは、凸レンズや凹レンズの収束・発散磁石で運動量の異なる粒子について焦点距離が変化する割合を意味する。SuperKEKB において色収差は、LER で -105（水平）、-776（垂直）、HER で-171（水平）、-1081（垂直）である。これは KEKB 加速器の 10 倍に相当する。これらの色収差のうち約 80 %が衝突点（IP）付近の最終収束磁石で発生している。これを有効に補正するためには、なるべく最終収束磁石の近くで色収差を補正することである。SuperKEKB 加速器では、「局所的色収差補正」を導入する。局所的色収差補正では、「ノンインターリーブド 6 極色収差補正」を採用している。ノンインターリーブドでは、2 台の 6 極磁石を、その間の転送行列が-I'となるように配置する。また、6 極ペアーを入れ子には配置しない。こうすることによって、ペアーのうち片方の 6 極磁石によって受ける非線形キックは、他方の 6 極磁石によってキャンセルされるので、力学口径を大きく取れることが期待できる。

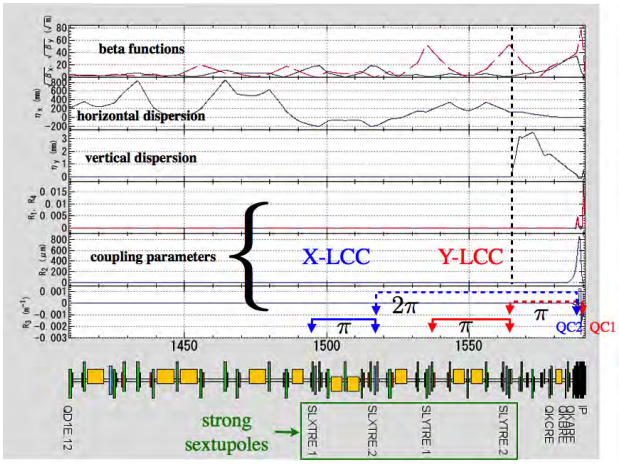


図 1　LER における局所的色収差補正。

局所的色収差補正は、垂直方向用（Y-LCC）と水平方向用（X-LCC）の 2 種類が衝突点を挟んで両側に配置されている。最終収束磁石と局所的色収差補正とのベータトロン位相差は π ないし 2π と調節され色収差を効率よく補正している。図 1 および図 2 に局所的色収差補正のビーム光学設計を示す。

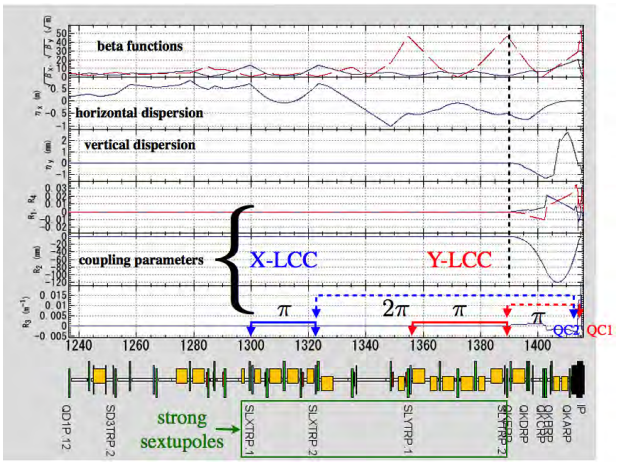


図 2　HER における局所的色収差補正。

円形加速器のアーク部においても、力学口径を大きく取りたいのでノンインターリーブド 6 極色収差補正を採用している。

4. 力学口径の最適化

力学口径を推定する方法として、解析的な手法や摂動論は適用することが難しい。なぜならば、加速器には、最終収束磁石、6 極磁石などの非線形要素が必ず存在するからである。従って、力学口径の評価は、数値計算に頼らざるを得ない。ここでは、SAD と呼ばれる計算機コードを使用している。粒子の力学的状態を表す 6 個の正準変数、x、p_x、y、p_y、z、δ を用いて粒子の軌道を追跡するトラッキングと呼ばれる手法を使う。トラッキング・シミレーションでは、放射減衰を入れずにシンクロトロン振動を入れる。

力学口径を最適化するためには、54 ペアーの 6 極磁石、2 ないし 3 台の 8 極磁石、10 ないし 12 ペアーの歪 6 極磁石の磁場強度を調節して最適化する。このように、多くの変数を一度に最適化する必要があるために 2 段階に分けて最適化を行う。第 1 段階では、6 極磁石を用いて色収差補正を行う。第 2 段階では、全ての変数を用いて、Touschek 寿命を評価関数とした downhill-simplex 法によって最適化を行う。図 3 および図 4 に、力学口径と Touschek 寿命を示す。図に示す横軸は運動量方向の安定領域であり、縦軸は水平方向の安定領域である。垂直初期振幅の水平初期振幅の比率はエミッタンス比に固定されている。２本あるプロットは初期位相の異なる場合を示す。これら

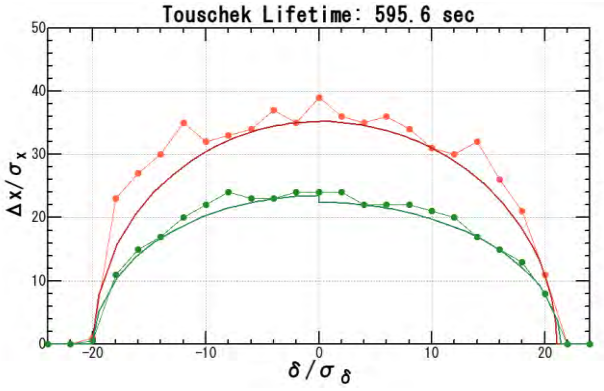


図 3 LER における力学口径と Touschek 寿命。

を内接する楕円でフィットし、楕円の面積からそれぞれ、Touschek 寿命を計算し、2 つの平均値を最終的な Touschek 寿命としている。これらの図から、ほぼ 600 秒の Touschek 寿命が得られており、これは SuperKEKB 加速器の目標値であり、入射器がビームを供給する能力と測定器に与えるバックグラウンドからの要求を満たす。

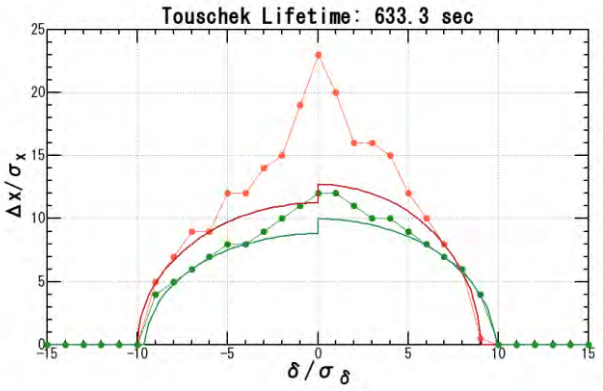


図 4 HER における力学口径と Touschek 寿命。

5. ビームビーム相互作用における力学口径

前章までは、製作誤差およびビームビーム相互作用のない場合の力学口径について述べてきたが、特にナノビーム方式ではビームビーム相互作用が力学口径に与える影響は大きいと予測される。水平方向に振幅を持つ粒子は、大きな交差角があるために進行方向に衝突点から離れた場所で相手ビームと衝突する。ビーム軸に沿った衝突点からのずれ Δz によるベータ関数は、

$$\beta_y(\Delta z) = \beta_y^* + \frac{\Delta z^2}{\beta_y^*} \simeq \frac{\Delta z^2}{\beta_y^*} \qquad (5\text{-}1)$$

と表される。従って、水平振幅を持つ粒子は大きなベータ関数のところで相手ビームよりキックを受ける可能性がある。この現象は、前述した砂時計効果と同様のものである。ビームビーム・キックを受けた場合の垂直方向の振幅は、

$$\Delta y \propto \theta_{bb,y}\sqrt{\beta_y(\Delta z)} \qquad (5\text{-}2)$$

ここで、$\theta_{bb,y}$ は、ビームビーム相互作用によるキック角を表す。垂直振幅が増加して力学的に安定領域から逸脱すれば、粒子は失われ力学口径が減少する。例えば、$30\sigma_x$ の水平振幅を持つ粒子の場

合、進行方向のずれは 3.6 mm となり、その場所での垂直ベータ関数は 48 mm となる。これは衝突点垂直ベータ関数の約 180 倍に相当する。

ビームビーム相互作用による Touschek 寿命は、HER では 10 %の減少に過ぎないが、LER では影響が大きい。その理由は、ビームのエネルギーが低い上にバンチ内粒子数が大きいためである。図 5 に LER におけるビームビーム相互作用のある力学口径を示す。

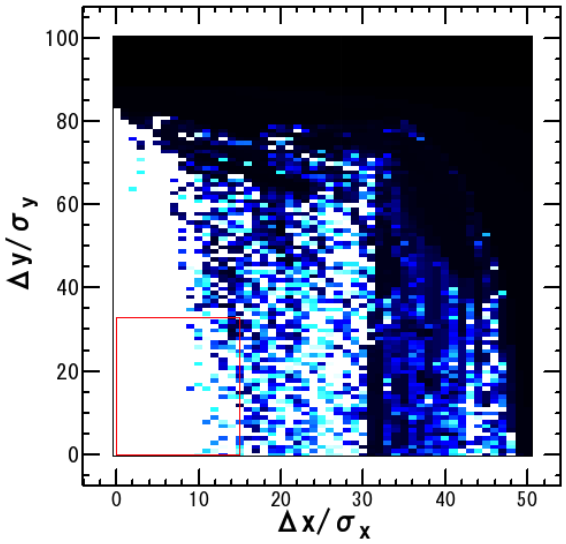


図 5　LER におけるビームビーム相互作用のもとでの力学口径。横軸は水平、縦軸垂直方向。

図 5 で、初期運動量のずれが 0 の場合における水平方向と垂直方向の力学的に安定な領域を白色で示している。黒色は力学的に不安定な領域である。図 3 と比較して、ビームビーム相互作用がない場合約 $40\sigma_x$ の水平振幅を持つ粒子が安定であるが、ビームビーム相互作用のもとでは $10\sigma_x$ の水平振幅までの安定領域しかない。Touschek 寿命で言えば 100 秒程度に寿命が短くなっている。現在、ワーキング・ポイントを変えて再最適化を行っても 230 秒程度の Touschek 寿命までしか達成されていない。これを解決する方法の一つとして次章でのべる「クラブ・ウエスト」方式[3]がある。

6.　クラブ・ウエスト方式

クラブ・ウエスト方式では、ビームの水平方向の広がりによる砂時計効果を緩和することができる。そのため、垂直方向のビームビーム・キックを抑えることができ力学口径が回復するというものである。垂直ベータ関数が最小になる設計上の衝突点の場所をウエストと呼ぶ。水平方向の振幅に合わせてウエストをずらすことができればビームビーム相互作用による力学口径の減少を回復することができる。ウエストをずらす方法として、衝突点の両側に 6 極磁石を配置して非線形磁場を利用する。6 極磁石では、水平方向の変位に比例した 4 極磁場（レンズ）を作って衝突点でのウエスト（焦点距離）をずらす。写像を用いた理想的なクラブ・ウエストについてはビームビーム相互作用のもとでの力学口径が回復することが数値シミレーションによって確認されている。

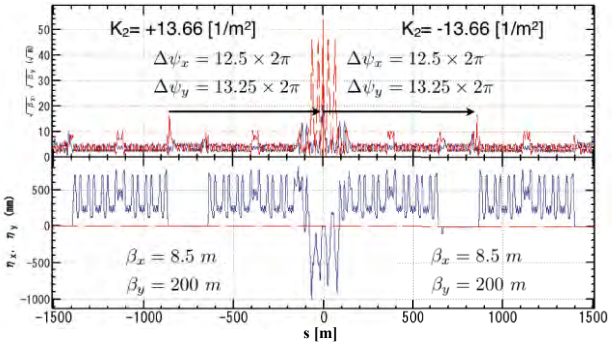


図 6　クラブ・ウエスト方式を採用した LER のビーム光学系。

次に、具体的に LER のビーム光学系にクラブ・ウエスト方式を組み込む。図 6 にビーム光学系を示す。2 台のクラブ・ウエスト用 6 極磁石を分散関数が 0 である直線部に設置した。6 極磁石と衝突点とのベータトロン位相差は、水平方向で π、垂直方向で π/2 の整数倍になるようにする。さらに 6 極磁石での垂直ベータ関数を大きく、水平ベータ関数を小さくする。図 7 に、ビームビーム相互作用のもとでの水平方向の力学口径を示す。横軸はクラブ・ウエスト用 6 極磁石の磁場強度である。確かに、クラブ・ウエスト用 6 極磁石の磁場強度を上げていくと力学的に安定な領域が回復していることがわかる。しかしながら、別の制限で力学的安定領域が制限されていることもわかる。ビームビーム相互作用がなければ、水平方向の力学的安定領域は約 $40\sigma_x$ はある。クラブ・ウエスト用 6 極磁石の磁場強度を上げていくにつれて、安定領域が減少している。従って、ビームビーム相互作用がない場合でも、クラブ・ウエスト方式では力学口径が減少していることが問題となる。例えば、6 極磁石の磁場強度を 11 m^{-2} とした場合、力学口径のはずれでは水平方向の運動は

安定であるが垂直方向の運動が不安定になっていることがわかった。これは、衝突点を挟む 2 台の 6 極磁石の間の写像が線形性を保っていればクラブ・ウエスト用 6 極磁石の非線形キックは互いにキャンセルされて問題とならないが、現実的には最終収束磁石による強い非線形があるためにキックがキャンセルされずに大きな問題となることを示している。

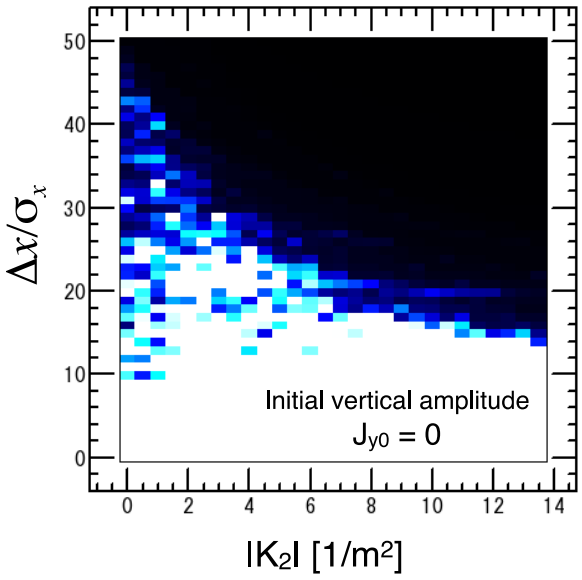


図 7　クラブ・ウエスト用 6 極磁石の磁場強度とビームビーム相互作用のもとでの学口径の関係。

この効果を緩和するために、弱い 6 極磁石をクラブ・ウエスト用 6 極磁石の近くに配置して非線形性をキャンセルするという方法がある。この方法は、ここでは検証されていないが試す予定である。

7.　研究成果と研究の展望

SuperKEKB 加速器の基本的な方針が、ナノビーム方式に決まったのは 2009 年 12 月のことである。超高ルミノシティを達成するためには、今のところナノビーム方式を除いて可能性は低い。しかしながら、衝突点ベータ関数を、今まで経験したことのないレベルまで小さくする難しさや、超低エミッタンスを実現できるかの検証など、様々な困難を克服してきたという経緯がある。２つのリングの設計は、それぞれ独立に行われてきた。特に衝突点の設計は、ナノビーム方式に特化したものである。SuperKEKB 加速器は、KEKB 加速器を改造して建設されている。従って、出来るだけ多くのものを再利用することに大きな労力をかけている。特に、既存のアーク部をほとんど再利用して低エミッタンス化を行っている。リング単体での設計が成熟してからも、ビームビーム相互作用のもとでの LER における力学口径の問題は未解決である。

ナノビーム方式は、もともとイタリアのフラスカッティ研究所の加速器グループから出てきたアイデアである。また、イタリア・グループと KEK との共同研究が継続して行われてきた中で様々なことを検討し成熟させてきた。クラブ・ウエスト方式の弱点を克服するアイデアはロシアのノボシビルスク・グループから提案された。この一連の研究活動には、国内のみならず海外の研究者との交流は必要不可欠である。今後も新しいアイデアを捻出し検討を続けていく予定である。

8.　謝辞

この研究は、SuperKEKB 加速器グループによってサポートされており、関係する全ての人々に感謝します。特に、ビーム光学グループの人々、理論的見地からアドバイスしていただいた大見氏と船越氏に感謝します。また、当該国際会議に招待してくださった国際会議組織委員会の皆様、ならびに会議で活発な意見交換を行った研究者の皆様に感謝いたします。最後に、当該国際会議に出席するために助成してくださった加速器奨励会ならびにサポートされている企業の皆様に感謝いたします。

参考文献

[1] Y. Ohnishi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 03A011 (2013).

[2] “SuperB Conceptual Design Report”, INFN/AE-07/2, SLAC-R-865, LAL 07-15, March 2007.

[3] P. Raimondi et al., LNF-07-003-IR, February 2007.

HF2014 REPORT OF WORKING GROUP 5: SUPERCONDUCTING RF*

Sergey Belomestnykh[#,1,2] and Yoshiyuki Morita[§,3]
[1)]Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, U.S.A.
[2)]Stony Brook University, Stony Brook,NY 11794, U.S.A.
[3)]KEK, Tsukuba,Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

This report summarizes presentations and discussions that took place during two sessions of the Working Group 5 (WG5) of the HF2014 workshop. In WG5 we reviewed Superconducting RF (SRF) systems of FCC-ee and CEPC and considered SRF structures, peripheral components and other issues relevant to the future circular colliders. In particular, we discussed the validity of cavity parameters and cavity design (frequency, voltage, input RF power, coupling, and HOM damping scheme), high power couplers, HOM dampers, frequency tuners, operating experience and other issues. As the result of WG5, we have come up with a list of important issues that have to be addressed in future studies.

INTRODUCTION

The two proposed future high luminosity energy frontier e^+e^-circular colliders, Circular Electron-Positron Collider (CEPC) in China and Future Circular Collider (FCC-ee) at CERN,would operate as Higgs Factories as well as at other energies of interest (Z, W, top quark) for precision measurements and search for rare processes. Circumference of these machines will be in the range of 50 to 100 km. Radio-frequency systems of these colliderswill utilize superconducting RF structures and will have to compensate energy loss of several GeV due to synchrotron radiation with an RF power limit set to ~100 MW. As a result, these systems will have a large number of SRF cavities equipped with high-power RF input couplers and with strong damping of higher order modes (HOMs). Working Group 5 of the 55th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop onHigh Luminosity Circular e^+e^- Colliders – Higgs Factory (HF2014) was dedicated to discuss topics relevant to the SRF systems.In this report we summarize the discussions and outline important R&D issues.

SRF SYSTEM PARAMETERS AND REQUIREMENTS

Both CEPC and FCC-ee would use large superconducting RF systems as the energy loss to synchrotron radiation is very high and the systems would have to compensate power loss of ~50 MW per beam.

Table 1: Key parameters of the CEPC and FCC-ee SRF systems

Parameter	CEPC	FCC-ee
Beam energy	120 GeV	120 GeV (175 GeV)
Energy loss per turn	3.11 GeV	1.67 GeV (7.5 GeV)
Synchrotron radiation power	103.4 MW	100 MW
Bunch charge	60.56 nC	59.2 nC (13 nC)
Bunch length	2.65 mm	N/A
Beam current (two beams)	33.2 mA	60 mA (13.2 mA)
RF voltage	6.87 GeV	2.7 GeV (11.2 GeV)
RF frequency	650 MHz	400 MHz
Number of cavities	384	568
Number of cells per cavity	5	5
E_{acc}	15.5 MV/m	2.53 MV/m (10.5 MV/m)
Q_0	$2\cdot10^{10}$ at 2 K	$2\cdot10^{10}$ at 2 K
Number of cryomodules	96	71
RF power per cavity	260 kW	176 kW
HOM power per cavity	3.5 kW	N/A

As a result, requirements to the RF input power couplers are quite demanding. The systems need SRF cavities with strong HOM damping to avoid multi-bunch instabilities and reduce parasitic beam power loss to HOMs. These and some other considerations lead to selecting relatively low operating RF frequencies. Table 1 lists key parameters of the two colliders relevant to the SRF

*Work is partly supported by Brookhaven Science Associates, LLC under contract No. DE-AC02-98CH10886 with the US DOE.
[#]sbelomestnykh@bnl.gov
[§]yoshiyuki.morita@kek.jp

system considerations. To make the comparison easier, we list only the beam parameters at 120 GeV for both machines (Higgs Factory regime) and at 175 GeV for FCC-ee (Top Factory regime). More details can be found in references [1]-[2].

CEPC SRF system [1]

The CEPC SRF system will be distributed through all eight straight sections of CEPC. In the baseline configuration, each cavity isdriven by an individual RF powersource. The total installed RF power will reach 124 MW. Eight 18-kW plants will comprise the CEPC cryogenic system, similar to LHC. The system design optimization led to choosing the SRF parameters listed in Table 1. The RF frequency, 650 MHz, has synergy with other projects, such as ADS and PIP-II.

Within a reasonable CW accelerating gradient range, the number of cavities in the collider ring is limited by an input coupler power of 260 kW. While in the future the project might benefit from alternative cavity materials (Nb/Cu or Nb_3Sn), the CEPC specifications are beyond the state-of-the-art of these materials at present. Therefore bulk niobium cavities operating at 2 K were chosen as the baseline design. The quality factor of $2 \cdot 10^{10}$ can be reached without advanced cavity treatment techniques. However, niobium doping and magnetic flux expulsion will be studied and might lead to a cost reduction.

Very dense beam frequency spectrum and short bunch length require strong HOM damping of the SRF structures with quality factors in a range from 10^3 to 10^4. An average HOM power loss is calculated to be 3.5 kW per five-cell SRF cavity with 80% of the power at frequencies above the cavity beam pipe cut-off, as illustrated in Figure 1. As a result, in addition to hook-type couplers, ferrite beam pipe absorbers will be installed to deal with the high-frequency portion of HOM spectrum. Waveguide HOM damping scheme is also under consideration.

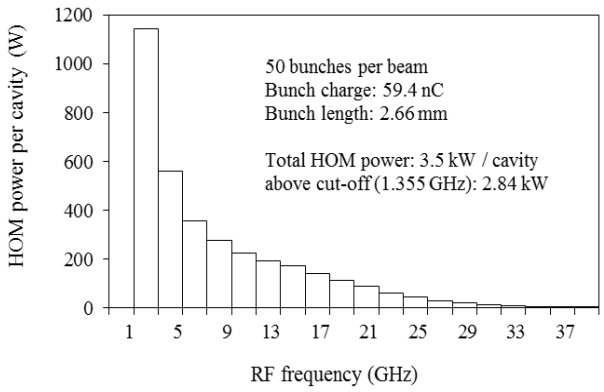


Figure 1: CEPC SRF cavity HOM power spectrum [1].

Large amount of HOM power traveling through the cryogenic environment will introduce an additional heat load. Careful evaluation and design optimisation will have to be carried out to minimize this parasitic heat load.

FCC-ee SRF system considerations [2]

An SRF frequency of 400 MHz was chosen for the FCC-ee as a staring point. Upon careful optimization it may change in a frequency range between 200 MHz and 800 MHz, but will have to be a harmonic of 40 MHz. As an accelerating gradient was chosen to be quite moderate at 10.5 MV/m, the preferred SRF cavity fabrication technology is thin film niobium on a copper substrate. In addition to cost savings, this would allow scaling to large cavity size (low frequency) if necessary. Three FCC RF R&D areas were identified with the following topics:

- Superconducting RF
  - Cavity technology
  - Power couplers
  - Cavity optimization
  - Cryomodules
- Large RF Systems
  - Availability
  - Reliability
  - Maintainability
  - Operational aspects
- Energy Efficiency
  - Efficient power sources
  - Lowering cryogenic load
  - Energy recovery?

In addition to pushing R&D of Nb/Cu coating techniques, Nb_3Sn research recently produced promising results. New treatment techniques (nitrogen doping) will be looked at as well. The SRF R&D for FCC blends well into a wider R&D program at CERN, which includes developments for LHC, HL-LHC, HIE-ISOLDE, SPL and ERL-TF.

CERN is also pursuing a very high efficiency klystron development. Recent studies make an efficiency of 90% look possible. Another option would be a multi-beam IOT. ESS has revived this research recently in a joint effort with CERN.

SRF CAVITY OPTIONS

There are no SRF structures developed specifically for either CEPC or FCC-ee yet. Both teams just starting this process and consider some existing structures as possible prototypes for their future designs. In particular, SRF cavities under development at BNL and JLab might be considered as such prototypes and were discussed at the workshop.

BNL3 cavity as an option for CEPC/FCC [3]

A 704 MHz five-cell SRF cavity, BNL3, was designed at BNL for high current linacs (SPL, eRHIC). One of the cavity's salient features is a compact and efficient HOM damping scheme with three HOM coupler ports on each beam pipe of the cavity, as shown in Figure 2.

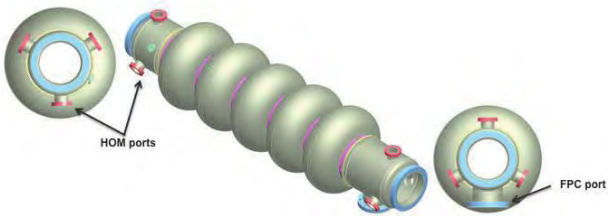


Figure 2: BNL3 cavity [3].

The strong HOM damping offered by this cavity makes it an attractive option as a prototype for future e^+e^- colliders. Two versions of HOM couplers are under development. One version employs a high-pass lump-element filter; the other is based on a dual ridge waveguide. Each of the couplers will be capable of handling ~1 kW of the HOM power. Two Nb cavities have been fabricated with one of them reaching ~20 MV/m.

Alternative structures at JLab [4]

JLab is traditionally developing SRF structures with waveguide type HOM couplers. Recently, the focus of these efforts was directed toward the future electron-ion collider MEIC. The MEIC SRF systems face challenges similar to the future e^+e^- colliders. The SRF structures will have to support high beam currents;deliverhigh accelerating voltage in a limited available space; provide large amount of RF power needed to compensate synchrotron radiation losses. The baseline design frequency is 750 MHz, while 1500 MHz is under consideration.

An “on-cell” damper concept, depicted in Figure 3, was shown to meet stringent HOM damping requirements of MEIC. However, there are still many technical challenges associated with this design.

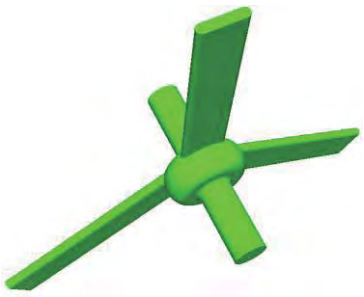


Figure 3: MEIC cavity concept with an “on-cell” HOM damper (courtesy of JLab).

Previously, two five-cell cavities were developed at JLab for high-current ERL applications: a 1500 MHz cavity for 100-mA beam current and an Ampere-class 750 MHz cavity. Both cavities feature waveguide HOM couplers attached to their beam pipes. Prototype cavities of both designs were built and tested, demonstrating very good performance. Figure 4 shows a photograph of the 750 MHz cavity.

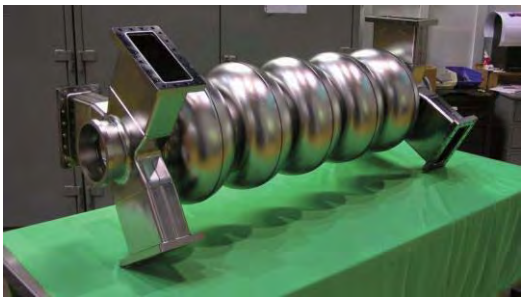


Figure 4: 750 MHz Ampere-class ERL cavity (courtesy of JLab).

HOM DAMPER HARDWARE [5]

There are a large variety of HOM damper designs for SRF cavities. However, very few of those are designed to handle high average HOM power and even fewer demonstrated this in operation. Designs of the HOM dampers, existing and under development were reviewed in WG5 with an emphasis on applicability to future energy frontier circular colliders.

Three main design types were presented. Those types are beam pipe absorbers, rectangular waveguide HOM couplers and loop/antenna HOM couplers to a coaxial line.Then, pros and cons of different HOM damper types were discussed.

The beam pipe absorbers are arguably the most efficient in HOM damping and likely will be required to absorb very high frequency portion of the HOM power, which propagates along the beam pipe.Room temperature HOM loads demonstrated capacity to absorb several kW of HOM power at CESR and KEKB.Drawbacks of the beam pipe absorbers are: i) most absorber materials are brittle, can create particulates that contaminate SRF cavities; ii) parasitic beam-absorber interaction is significant and contributes to the overall HOM power; iii) the main disadvantage for large SRF systems is that the HOM loads occupy real estate along the beam axis and thus reduce the SRF system fill factor.

The waveguide couplers can provide very efficient damping in a broad frequency range and don’t compromise the fill factor. In theory, these couplers should be able to handle high HOM power, but this has not been demonstrated in operation yet.The disadvantage of using waveguides is that their large size significantly complicates the cavity and cryomodule designs. This damping scheme is worked on at Jefferson Lab primarily.

The coaxial loop/antenna HOM couplers require means of rejecting the fundamental mode. Rejection filters can be very narrowband and difficult to tune. The LHC HOM couplers were designed for ~1 kW HOM power levels, but operate at lower HOM power levels so far. High-pass filters can be used instead of narrowband rejection filters. The high-pass filters, if properly designed, should be easy to tune.A couple of promising designsare under development at BNL for the BNL3 cavity as mentioned in the previous section.Yet another

~1 kW HOM coupler design, which might be suitable for the future colliders, is being worked on for the HL-LHC compact crab cavities.

HIGH POWER COUPLERS [6]

A high power RF input coupler is one of the most critical components of an SRF system. Design of an input coupler strongly depends on a cryomodule structure. Essential considerations for input couplers are:RF power capability($P_{RF} = I_{beam} \cdot V_{acc} \cdot \cos\phi$); coupler type (coaxial or waveguide); ceramics window type (disk or cylindrical); number of windows (single or double); coupling with cavity (fixed or adjustable); cooling method (air, He-gas, N_2-gas or water); and bias voltage (useful or needless).Important technical issues are: ceramics window (material, purity); metalizing of ceramics; copper plating (thickness, RRR, adhesion, pits, uniformity);TiN coating (thickness, uniformity); joining by brazing; welding by TIG, laser or E-beam;RF properties; thermal characteristics; mechanical analysis; multipacting simulation; cleaning procedure; and assembly in clean room.

TRISTAN-type high power couplers were reviewed. The coupler was originally designed for TRISTAN 508 MHz SRF cavities by S. Noguchi, E. Kako, et al. It has a coaxial disk ceramic window with a choke structure. Couplers of this type are used for cavities at many laboratories around the worldin a wide range of frequencies between 500 to 1300 MHz. An RF power up to 380 kW was demonstrated inCW operation and up to 2 MW in pulsed regime. High power couplers developed at CEA-Saclay, CERN and BNL were also reviewed.

At CEPC, the BEPC-II 500 MHz SRF cavity coupler is taken as the baseline for the CEPC main ring SRF cavities. The KEK cERL main linac power coupler is taken as the baseline for the CEPC booster SRF cavities.

Parameters of the input couplers in a frequency range between 650 and 802 MHz weresummarized in a table [6]. Main RF parameters were considered for the input couplers of CEPC and FCC, such as the RF frequency, required RF power, range of external Q factors, etc.

Coaxial CW high power input couplers with a single warm RF window have been developed in a frequency range of 500 to 1300 MHz at a power level higher than 100 kW in many laboratories around the world. Design studies of high power couplers at400 MHz, 176 kW CW for FCC and at 650 MHz, 260 kW CW for CEPC should be started as soon as possible. Fabrication of the prototype high power couplers and RF conditioning at a test stand should be carried out at an early stage.

OTHER ISSUES [7]

Three other issues were presented. Those are frequency tuners, operating experience and performance recovery.

Frequency tuners

A frequency tuner is an important system for cavity operation to tune the cavity to its operating frequency, detune to compensate the beam loading and help to stabilize its RF amplitude and phase. The frequency tuner designs have well advanced for a variety of requirements. Presently there are many excellent tuner designs from whichone can select an appropriate design.Mass production and reliability issues have to be taken into considerations during thetuner design selection. In this talk several tuner design examples were presented.

Four tuner systems from an early stage of the SRF technology development were reviewed. The CESR tuner had a flex hinge system without backlash. The CEBAF tuner had a drive shaft system with a stepping motor driver exterior to the cryomodule. The LEP tuner utilized thermal expansion and contraction of three Ni bars for coarse tuning with a magnetostrictive effect utilized for a fine tuner. The TRISTAN tuner applied a lever system with a piezoactuator for fine tuning. This mechanism was also used for the KEKB 509MHz, single cell cavity. Furthermore it will be used for the SuperKEKB operation.

The S1-Global cavity string test for the ILCat the superconducting RF test facility (STF) of KEK hasthree tuner systems. Those are a blade tuner developed by INFN Milan, a double lever system developed by DESY based on the Saclay tuner and a slide jack system developed by KEK. All components of the first two systems are located in a cold section while the driver of the KEK tuner is located in a warm section.

Other tuner examples are a double lever and eccentric shafts system recently developed by Saclay and a scissor jack system for the CEBAF upgrade cryomodule.

Among those tuner designs, the lever and piezoactuator system has been in service for a long time and proved to be a reliable system. The KEK 509 MHz tuner system has reallylong life. Location of the tuner driver is an important consideration. A cold location makes a tuner system compact, while a warm and exterior to the cryomodule location makes the maintenance easy.

Operating experience

Operating experience gained elsewhere provides very useful information for designing a new SRF system. As an example, operating experience at KEKB was presented. KEKB is a high luminosity, electron-positron double-ring asymmetric B-factory. Eight single cell SRF cavities, operating at 509 MHz, were operated in its high energy ring. Three main issues were presented. Those are cavity RF trip rate, cavity troubles, and performance degradation.

The cavity trips were mainly caused by high voltage breakdown in the cavity or in the high power coupler. The trip rate was 0.5 trips per day for eight cavities during the 1.4 A operation. In order to keep the trip rate low, maintenance work is important. RF processing of the input power coupler with voltage biasing was emphasized as an effective maintenance tool. There were several vacuum leak troubles. Some of the leaked cavities were

re-assembled at indium seal joints without further surface treatments.

KEKB cavities still provided an accelerating voltage of 2MV after 10 years of operation. However the cavity'sQ factors degraded from $2\cdot10^9$ to several 10^8 with strong field emission. Further degradation wouldmake the operation difficult.

Performance recovery

Performance recovery methods are desired and needed for long-term operation.Therecovery should be accomplished with a low risk, low cost and in a short period of time.KEK has developed a horizontal high pressure water rinsing that can be applied directly to a cavity in the cryomodule. Two KEKB cavities successfully recovered their$Q$ factors after horizontal high pressure rinsing.

SUMMARY

In WG5, we have considered parameters of the SRF systems for CEPC and FCC-ee, requirements and challenges. Also, we discussed SRF cavity designs, HOM dampers, RF input couplers, frequency tuners and operational experience, performance degradation and recovery.

There are a number of important issues that have to be addressed in future studies. Among those are:

- HOM studies, including: trapped modes; efficient HOM coupler designs; propagation of the very high frequency portion of HOM power, its absorption, and associated parasitic heat load.
- SRF cavity design: frequency; number of cells per cavity; optimal operating temperature; nitrogen doping at low frequencies; new materials.
- Design of high power RF input couplers.
- Does FCC-ee at Higgs and Z energies require two different SRF systems? It appears that these are two very different regimes: LEP-like *vs.* B-factory-like.
- General SRF/cryogenic system optimization.
- Efficiency of RF power sources.

Ideally, these studies will be executed in collaborations, utilizing synergy with other projects and labs

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the WG5 presenters Frank Zimmermann (CERN), Jiyuan Zhai (IHEP), Wencan Xu (BNL) and Eiji Kako (KEK) for delivering talks and participating in the working group. Erk Jensen of CERN, Robert Rimmer and Haipeng Wang of Jefferson Lab are acknowledged for providing materials for the workshop.

REFERENCES

[1] J. Zhai, "CEPC SRF system," these proceedings, HF2014, Beijing, China, (2014).

[2] F. Zimmermann and E. Jensen, " Future Circular Collider study: FCC-ee SC RF system," these proceedings, HF2014, Beijing, China, (2014).

[3] Wencan Xu, "704 MHz BNL3 cavity as an option for CEPC/FCC,"these proceedings, HF2014, Beijing, China, (2014).

[4] R. Rimmer and H. Wang (Jefferson Lab), private communications.

[5] S. Belomestnykh, "HOM damper hardware considerations for future energy frontier circular colliders,"these proceedings, HF2014, Beijing, China, (2014).

[6] E. Kako, "High power couplers for Higgs Factory,"these proceedings, HF2014, Beijing, China, (2014).

[7] Y. Morita, "Other issues,"these proceedings, HF2014, Beijing, China, (2014).

ヒッグスファクトリーにおける超伝導空洞用大電力高周波入力結合器の研究

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

加古　永治

ヒッグスファクトリー国際会議（HF2014）が２０１４年１１月９日より１２日まで中国・北京市八宝山の万達ホテルにて開催され、高エネルギー加速器科学研究奨励会からの助成によりこの会議に出席し、ヒッグスファクトリー用超伝導空洞システムに関するセッションに参加して、入力結合器についての研究発表を行ったのでその内容を報告する。

1. はじめに

将来のヒッグスファクトリーとして、ヨーロッパでは CERN を中心に FCC（Future Circular Collider）計画が提案され、中国では IHEP を中心に CepC（Circular electron positron Collider）計画が提案され、それぞれの加速器計画の設計検討が進められている。FCC と CepC の両加速器では、超伝導加速空洞システムを用いた設計が行われており、本研究では、超伝導空洞に高周波電力を供給するための入力結合器について検討を行った。Fig.1 に、FCC と CepC における加速器の基本パラメーターと超伝導空洞用入力結合器の高周波パラメーターのまとめを示す。ここで、開発すべき入力結合器の仕様として、要求される高周波電力は FCC では周波数 802MHz, 連続運転（CW）, 125kW であり、CepC では 650MHz, CW, 260kW となる。

Machine Parameters	FCC (TLEP)	CepC
Beam Energy	175 GeV	120 GeV
Beam Current	6.6 mA	16.6 mA
Circumference	100 km	54 km
Total RF Voltage	11 GV	6.9 GV
Coupler Parameters		
RF Frequency	802 MHz	650 MHz
Accelerating Gradient	20 MV/m	15.5 MV/m
Cavity Effective Length	0.93 m (5-cell)	1.15 m (5-cell)
Required RF Power	CW, 125 kW	CW, 260 kW
External Q of Coupler	5.4×10^6	2.4×10^6

Fig. 1 FCC と CepC の加速器の基本パラメーターと入力結合器の高周波パラメーター

2. 大電力入力結合器の開発状況

大電力（100kW 程度）の連続運転で使用される入力結合器としては、トリスタン型室温部水冷式単一高周波窓を有する入力結合器が、周波数範囲として 500 MHz ~ 1300 MHz で数多く利用されており信頼性の高い運転実績を持っている。このトリスタン型高周波窓は、チョーク構造を持った同軸型アルミナ製セラミック円板を用いており、マルチパクティングを抑制するために真空側セラミック表面には 10nm 程度の窒化チタン（TiN）膜がコーティングされている。この高周波窓は 508MHz トリスタン超伝導空洞用として開発された後、KEKB (508MHz), HIPPI (704MHz), SNS (805MHz), ADS (972MHz), cERL (1300MHz) などの超伝導空洞システムにおいて広範囲に応用されている。FCC と CepC において検討されている 650 ~ 805 MHz の周波数帯においては、Fig.2 に示すように各種仕様にて、同様な入力結合器の開発が行われている。

Facility	Frequency	Window, DC-Bias, Coupling, Cooling	Maximum RF Power
CepC /IHEP	650 MHz	Under design	Spec., 260 kW, CW
SRF-Gun /BNL	704 MHz	Coax. Disk, no-Bias Fixed, water & He gas	Test-stand, 125 kW, CW 250 kW, pulse (20% duty)
HIPPI /CEA	704 MHz	Coax. Disk, no-Bias Fixed, water & He gas	Test-stand, 1.2 MW, pulse (10% duty)
SPL /CERN	704 MHz	Disk/Cylind., DC-Bias Fixed, & He gas	Test-stand, 1.0 MW, pulse (10% duty)
ESS /CEA	704 MHz	Coax. Disk, DC-Bias Fixed, water & He gas	Specification, 1.2 MW, pulse (4% duty)
SNS /ORNL	805 MHz	Coax. Disk, DC-Bias Fixed, water & He gas	Test-stand, 2 MW, pulse Operation, 350 kW, pulse
FCC /CERN	802 MHz	Under design	Spec., 125 kW, CW

Fig. 2 開発が行われている大電力入力結合器

3. ヒッグスファクトリーでの入力結合器

入力結合器の設計を行う場合において、重要となる検討事項を次に示す。

1. 要求される入射高周波電力（＝ビーム電力）
2. 空洞との結合タイプ： 同軸、導波管
3. セラミック窓タイプ： 円筒型、円板型
4. 高周波窓の数： 単一、二重
5. 空洞との結合定数： 固定、可変
6. 冷却方法： 空冷、水冷、He・N_2 ガス冷却
7. バイアス電圧： 必要、不要

などについて、適切な選択を行う必要がある。

また、技術的な検討課題としては、

1. セラミック窓の材質、純度
2. セラミックのメタライズ処理
3. 銅メッキの厚み、RRR、密着性、均一性、傷
4. TiN コーティングの厚み、均一性
5. ろう付けによる接合技術
6. TIG、レーザー、電子ビームによる接合技術
7. 高周波特性の最適形状計算
8. 発熱特性の計算
9. 機械的特性の解析
10. マルチパクティングのシミュレーション
11. 製造後の清浄化処理
12. クリーンルーム内での清浄組立工程

などがあり、十分な知識と成熟した技術を確認したうえで、製作が行われるべきである。

ヒッグスファクトリーとして FCC と CepC において検討された超伝導空洞用入力結合器のまとめを Fig.3 に示す。空洞との結合定数に大きく関係するビーム電流や運転加速電界などの主要な加速器パラメーターが両加速器計画において最適設計があまり進んでいないため、入力結合器の結合度を可変にする必要があるのか、固定にすべきかを、今のところ判断できない。しかしながら、これまでの運転経験・実績から、同軸アンテナタイプで、トリスタン型室温部水冷式単一高周波円板セラミック窓を有し、バイアス電圧印加可能で、外導体をガス冷却する構造の入力結合器を基本として、まず設計を開始することが推奨される。今後さらに詳細な設計検討が行われ、プロトタイプ製作へと進んでいくことが期待される。

Requirement	FCC (TLEP)	CepC
Frequency	802 MHz	650 MHz
RF power	125 kW, CW	260 kW, CW
Beam current	varied / (fixed)	varied / (fixed)
Operating E_{acc}	varied / (fixed)	varied / (fixed)
Adjustable coupling	yes / (no)	yes / (no)
Range of QL / (Fixed)	- x 10^6 / (5.4 x 10^6)	- x 10^6 / (2.4 x 10^6)
Coupler type	coaxial	coaxial
RF window	single warm window	single warm window
Ceramics window	coaxial disk / cylindrical	coaxial disk
Bias voltage	yes	yes
Cooling method	inner conductor : water outer conductor : He gas	inner conductor : water outer conductor : N_2 gas

Fig. 3 ヒッグスファクトリーのための超伝導空洞用入力結合器の検討事項のまとめ

4. まとめ

- 室温部水冷式単一高周波窓（Single warm RF window with water cooling）をもつ連続運転（CW）での大電力高周波入力結合器については、周波数範囲として 500 – 1300 MHz、高周波電力として 100 kW 以上の性能を有する同様な入力結合器が、世界各地の研究所における加速器計画の中で現在開発が進められている。
- ヒッグスファクトリー用超伝導空洞で用いられる入力結合器の基本仕様として、FCC では 802MHz, CW, 125kW 、CepC では 650MHz, CW, 260kW の性能を有するものが要求され、その入力結合器の設計研究が早期に開始されるべきである。
- 超伝導空洞の開発と並行して、プロトタイプ入力結合器の製作、および、テストスタンドでの大電力高周波試験（RF conditioning）は重要な研究課題であり、早い段階で実施されるべきである。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、現在開発中の大電力入力結合器に関する重要な資料を提供頂いた、CEA-Saclay の Guillaume Devanz 氏、CERN の Eric Montesinos 氏、BNL の Wencan Xu 氏、お

よび、IHEP-Beijing の Huang Tongming 氏について、各氏の多大なご協力に感謝いたします。

また、本会議において研究発表する機会を与えて頂いた高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設長の生出勝宣教授、および、森田欣之教授に感謝いたします。

さらに、本国際会議への出席に関して助成を頂いた高エネルギー加速器科学研究奨励会に、深く感謝いたします。

国際加速器アラインメント研究会参加

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

増澤美佳

International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA)は、世界中の加速器のアライメントに従事しているもの（近年は物理グループも参加するようになった)、および関連技術をやっている会社からの関係者が集まり、加速器アライメントに関して報告、議論する場となっている。２年に１度の割合で北米大陸、ヨーロッパ大陸、アジア圏で持回り開催をしており、過去には1995 年に KEK で、2002 年に SPring-8 で、2008 年には KEK でこの研究会を開催した。今回 2014 年はアジア圏としては初めて日本から出て中国での開催になった。PM2.5 等の影響もあり会議開催を危ぶむ声もあったが、結果的に例年とほぼ同程度の参加者が集まり活気のあるワークショップとなったことは喜ばしいことである。Fig. 1 に今回の参加国を示す。約半数は開催国中国からの参加で特にポストドッククラスの若い研究者の発表が印象に残った。精密測量分野での若い力の台頭を感じる。また現在最も多くの研究機関の加速器精密アラインメントに使用されているレーザートラッカーは Leica、Faro、API の３社で100%のシェアを閉めているのが現状であるが、今回中国では自国でレーザートラッカー製作にとりかかり始めたことがわかった。まだまだ測定精度としては３社の製品に比べて数十倍劣ってはいるが彼らの本気度を考えると同等品を作り上げる時期もそう遠くないのではないかと想像する。レーザートラッカーを製作するにあたり、Faro の前身の SMX 社製のレーザートラッカーを分解して勉強したとのことである。我々にはとても高価なトラッカーを分解してしまう勇気と発想はない。今後の開発進捗状況に注目していきたい。

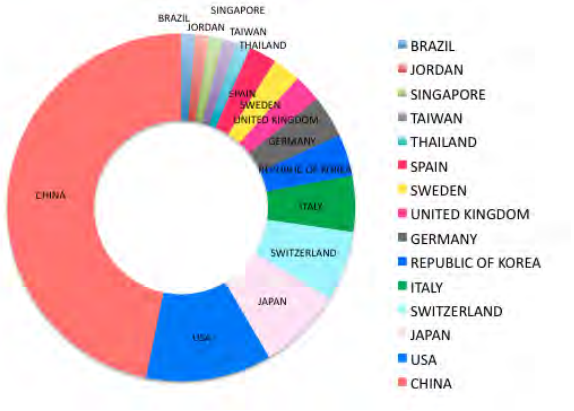


FIG. 1 参加者国別割合

1. プログラム

参加登録者が会議開催直前まで確定しなかったこともありワークショップのプログラムの公開が会議初日直前になったことは今後の会議運営について委員として反省すべきところである。また同様の理由から例年の会議のようにプログラムがカテゴリーに分類されていなかったことも参加者から問題点として指摘されたので今後の会議運営に於いて反映させて行きたい。IWAA は1989 年に SLAC の Robert Ruland、CERN の Michel Mayoud、DESY の Franz Loffler の３氏により発足したもので、今回はその２５周年という節目の年に当たる。IWAA 誕生２５周年を記念して会議の冒頭で Ruland 氏より IWAA の創設に至る歴史について紹介があり、また祝辞が述べられた。Fig.2 は初回参加メンバーの写真である。

FIG.2 1989 年初回 IWAA の参加者。前列左端が R. Ruland 氏。

プログラムは主に各加速器研究施設からの Status report 関係の発表と開発的要素を含んだトピックスの発表で構成されていた。CERN、SLAC、Fermilab、アルゴンヌ、IHEP、SPring-8 、J-PARC をはじめ、CEBAF 12GeV 加速器、中国合肥放射光、台湾放射光、ドイツ GSI FAIR、スエーデン MAX IV、スペイン ALBA、ヨルダン SESAMI 放射光、ブラジル LNLS、タイ放射光施設等の様々な加速器施設からの Status report があった。開発的要素を含んだ発表としては、CLIC からナノメートルレベルの精度を追求したアライメント方法、APS からクライオスタットの冷却中の動きをモニタするためのシステムについて、等多方面に及んだ。

2. トンネル変動についての発表

今回 SuperKEKB 建設時における主リングトンネル変動について発表を行った。これに先立ち午前のセッションでは CERN SPS に於けるトンネルレベル変動についての発表があったのでここでその一部を紹介する。Fig.3 に SPS トンネルレベルを示す。全長 6.9km に及ぶサーベイの結果 5500m から 7000m にかけて大きく 2 箇所でトンネルが沈んでいるのがわかる。この部分が LHC トンネルと立体交差するところで、その影響が明らかになった。この他にも局所的なレベル変動が見えるが、Fig.4 にあるようなスムージングで対応したとのことである。このようなトンネル変動は実は SuperKEKB 主リングでも見られており、これについての発表を行った。Fig.5 に SuperKEKB 主リングで行ったレベル測量の結果を示す。これは 2013 年の 10 月の測量結果と 2014 年の 6 月の測量結果の差を衝突点からの距離（周長に沿って）を横軸に示したものである。また図中の 3M、6M、9M、12M は地上部の機械棟新設工事箇所に対応している。また PF-AR とあるのは PF-AR（Photon Factory Advanced Ring）への直接入射路工事箇所に対応している。８ヶ月間のトンネル変動は場所によっては数ミリを越えて SPS 同様、SuperKEKB 稼働前の精密アライメント時にはなんらかのスムージングが必要である。またその際にはトンネル変動が収束していなければ変動と修正アライメント作業との「いたちごっこ」となってしまう。このトンネル変動の収束状況は我々にとって大きな懸念である。

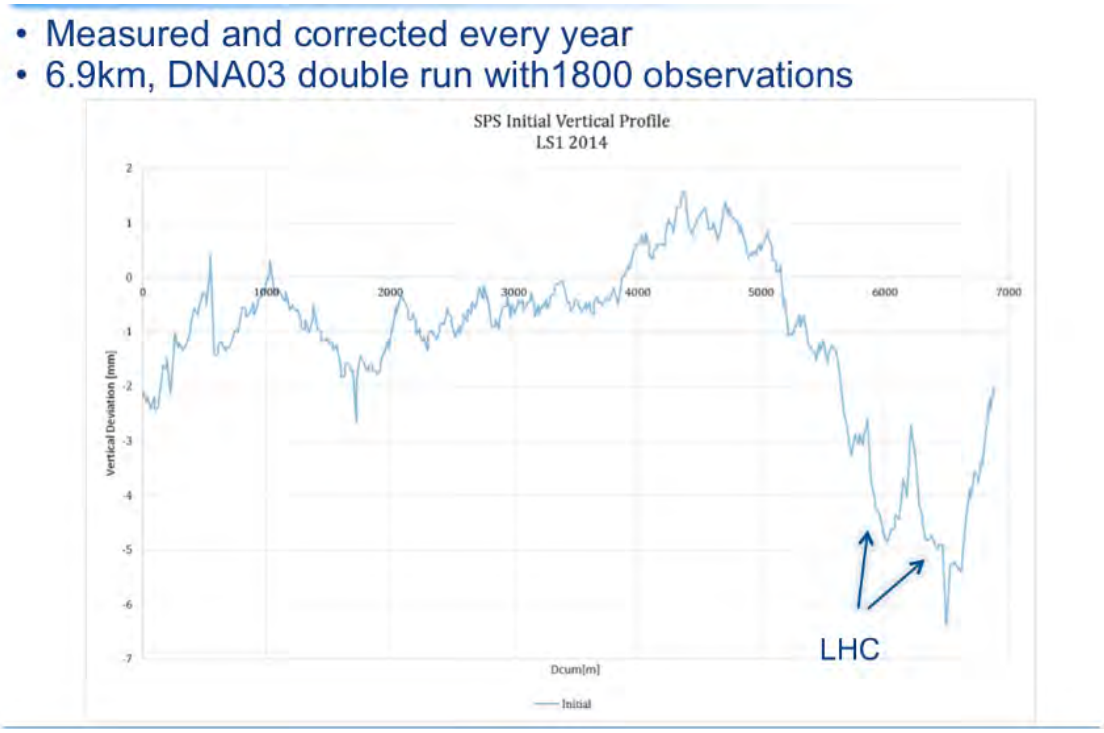


FIG.3 SPS トンネルレベル測量の結果。

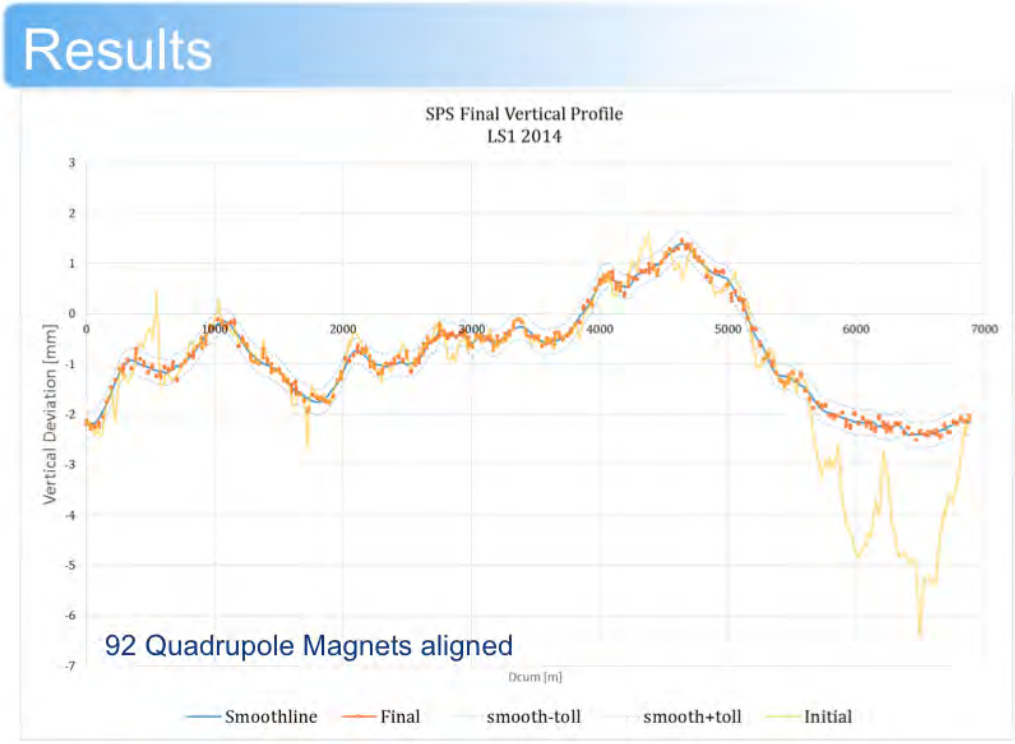


FIG.4 SPS スムージングの結果。

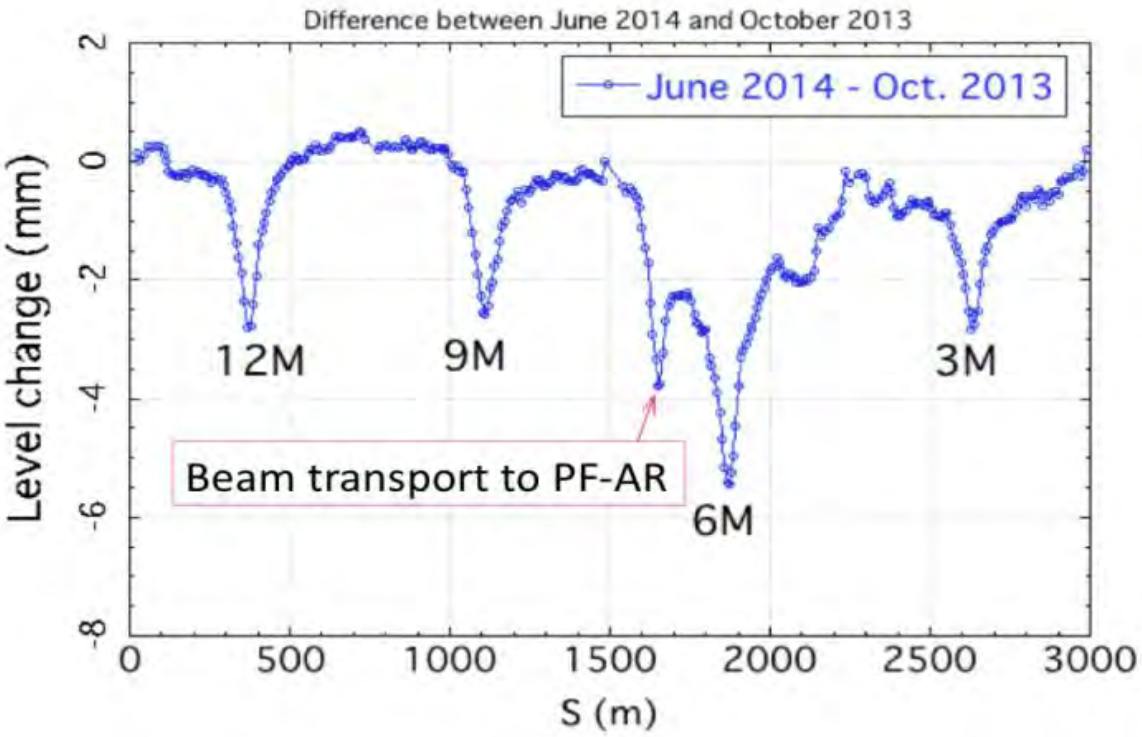


FIG.5 SuperKEKB 主リングに沿ったトンネルレベル変動。

3. まとめ

現在ナノビームサイズの衝突を目標とするSuperKEKB主リングの建設が進んでおり、近々に2000 台にも上る電磁石の最終精密アライメント作業を開始する。我々のトンネルは３０年以上前のトリスタン建設時に作られたもので、KEKBで再利用され、今回の SuperKEKB では再々利用となる。また 2011 年には東日本大震災を経験しておりトンネルのあちこちで老朽化やダメージ（特にトンネル継ぎ目のエキスパンションジョイント部にて顕著）が見られる。その上、工期の関係から地上部では機械棟建設、新ビームライン建設等の大規模工事が同時進行しているのが現状である。従って、トンネル内で精密測量・精密アライメントを行うにはとても厳しい環境であると言わざるを得ない。

今回この会議に参加することで、他の研究所の測量・アライメントの現状と新しい測量技術開発状況についての情報を得ることが出来た。また測量・アライメント分野の識者の皆様よりSuperKEKB 建設についての多数の助言を頂くことが出来た。これらは今後の研究を進めて行く上で大変参考になる。

今回この会議に参加するにあたり高エネルギー加速器科学研究奨励会より助成をして頂いた。ここに改めて感謝致します。

国際ワークショップ PCaPAC2014 参加および GSI 重イオン研究所訪問

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

上窪田 紀彦

高エネルギー加速器科学研究奨励会の国際交流助成を受け、2014 年 10 月に国際ワークショップ PCaPAC2014 に参加し、また GSI 重イオン研究所を訪問しました。以下に報告します。

1. PCaPAC2014 参加

1.1. 国際ワークショップ PCaPAC

PCaPAC は、1996 年の DESY の PCaPAC、及び同年の KEK の IWSCMSA が発端となって 2 年毎に開催される国際ワークショップである。今回の PCaPAC2014 は、ドイツの Karlsruhe で 10 月 14 日から 17 日という日程で開催された。ホストは KIT (Karlsruhe Institute of Technology) で、会議 Chairman は、W. Mexner 氏である。

加速器制御分野では奇数年開催の ICALEPCS が最重要で最大規模の国際会議であるが、偶数年の PCaPAC は ICALEPCS では埋もれてしまう中小規模加速器の制御・データ収集系や、PC-base の低コストシステムが議論の中心となる。また、若手技術者の育成を意識して初日を Tutorial Day としている。

1.2. Tutorial Day on Oct.14

Tutorial は 6 種類用意された。うち 5 つはおなじみの加速器施設スタッフが準備したもので: (a) 加速器制御 Framework である TANGO (by ESRF)、(b) EPICS の tool CSS (by DESY)、以下は最近の流行技術である (c) Web2c (by DESY)、(d) noSQL (by INFN)、(e) FPGA (by KIT)、である。6 つ目は会社によるセミナーで、(f) 効率的なソフトウェア開発環境 (JUnit, Git, Jenkins and Redmine) の実習であった。

私はソフトウェア開発環境実習に参加した。その場に用意した local server に自分の PC を接続して Eclipse を install し、参加者で Java アプリを開発、Project 管理や version control, 文書管理を実践する、という詰め込んだ内容であった。

1.3. 本会議 on Oct.15,16,17

本会議で特に目立ったのは、データ収集に特化した database (noSQL など) や Storage (Hadoop や Cassandra) の応用報告である。Tutorial の (d) 、H.Ehrlichmann (DESY)の Invited talk、L.Catani (INFN)の!CHAOS、さらに SP-ring8 の石井氏や J-PARC 菊澤氏と、多数の報告があった。

PCaPAC らしい報告としては、Trieste の小型コントローラ BBB の応用例があった。全体では大規模化システムに対応する報告も多くなり、ICALEPCS との差がなくなりつつある。

Open Source の ZeroMQ は、message-base のネットワーク通信ライブラリで、手軽さと使い勝手の良さから加速器での応用例も多い（私が知る範囲では ESRF, CERN, SP-ring8、など)。Invited talk で ZeroMQ の創始者が登場した。アカデミックな会議に似合わぬ T シャツの P.Hintjens 氏に目を奪われた（私はこういう人は大好きである)。氏は講演後も会議に帯同し、我々を喜ばせた。

今回の PCaPAC は約 100 名の参加者が集まったが例年に比べると少なめで、GSI と DESY の参加者が目立った（1.5 に裏事情)。日本からは J-PARC と KEK で私を含め 5 名、ほかに SP-ring8、佐賀放射光、からの参加があった。私は poster 発表 1 件 (“Integration of Independent Radiation Monitoring System with Main Accelerator Control”) を行ったほか、J-PARC 関連発表のバックアップを行った。

1.4. ANKA 見学 on Oct.16

KIT は放射光実験施設 ANKA を運用している。16 日にはその見学が組まれた。ANKA 制御室はコンパクトで、端末よりもオシロやＴＶが幅を利

かせるやや旧世代に見える（Fig.1）。また、ANKA では、加速器が EPICS、Beam Line が TANGO と、通常は相容れない 2 種の Framework が共存する珍しいケースである。この背景には、両者に精通した COSYLab のスタッフの常駐がある。

Fig. 1 ANKA Control room

1.5. IPC プログラム委員の活動

PCaPAC では、若手参加者で特に優秀な人を選び、Isamu Abe Prize を出している。IPC で議論し、今回は GSI の Mathias Kreider 氏に決定した。なお、Isamu Abe（阿部勇）は 2002 年に急逝した KEK 職員で、今も若手を encourage する賞名として関係者の記憶に留まっている。

今回の頭痛の種は、米国の参加者が DOE のサポートが受けられず、極端に少なかったことである（約 30 名の参加がキャンセルされた模様）。次回開催予定の ANL の IPC メンバーも参加できず、2016 年の開催地がアナウンスできない異常事態であった。なお、次々回の 2018 年はアジアの順番で、KEK が本命として期待されている。

2. GSI 重イオン研究所訪問

2.1. GSI と J-PARC

GSI 重イオン研究所と J-PARC の加速器は、両者とも Hadron 加速器であること、遅い Cycle（~秒）の加速器を持つこと、ビーム行き先が複数選択可能な Timing 系を持つこと、など共通の技術課題がある。J-PARC の制御系は更新を検討する時期であり、建設を開始した GSI の FAIR 加速器の制御技術の選択は、J-PARC にも重要な情報となる。今回、Karlsruhe からの帰路に GSI が位置すること、GSI 加速器制御の Ralph Baer 氏が PCaPAC IPC メンバーで顔なじみであったことから、絶好の機会と考え GSI を訪問した。

1 日のみの限られた時間だったため、私の興味が Front-end、Application 開発環境、FAIR 制御系準備状況、等と事前に伝えた。

2.2. Front-end (1) : SCU

Fig. 2 SCU developed by GSI

J-PARC 制御系では、Front-end のうち単純な I/O 信号には、VME board や PLC module を使用している。担当の Matthias Thieme に話を聞いた。GSI の単純 I/O は既存加速器では Field-bus (MIL1553)が中心だったが、その更新および FAIR での新規利用を想定した新システム「SCU (Scalable Control Unit)」を開発した。SCU は、CPU module は Com-Express ベース、それに多種類の I/O module を適時組み合わせる。CPU module には WhiteRabbit-Timing 用 SFP（光素子）が標準で組み込まれており、J-PARC のように別途 Timing module (VME や NIM) を用意する必要が無い。

Front-end 機材を Commercial 製品でなく独自開発品で保守していくには内部マンパワーが必要であるが、GSI は問題無いようだ。SCU は、GSI 内部事情に整合するよう良く検討されていると感じた（Fig.2）。

2.3. Front-end (2) : Beam-Diag. DAQ

ビーム診断機器の信号は高機能な計測器が必要で、機器ごとに特殊な仕様になりやすい。Tobias Hoffmann は、VME や PCIe から MicroTCA を標準 platform とする動きが進んでいることを説明した。MicroTCA は DESY が強くサポートしており、特殊な要求には地元の会社(S 社)で board を新規開発している。高速 AD には FMC が使用されている。

Tobias はまた、CERN で開発された FESA (Front-end Software Architecture)を GSI に導入した経緯を述べた。FESA によるソフト仕様の標準化で、hardware platform の種類にかかわらずビーム診断機器の設計開発が出来、複数の加速器・platform を持つ GSI では有意義である。

2.4. Application 開発環境

加速器の運転パラメータ設定・管理は、複数の加速器やビーム行き先が錯綜する FAIR では非常に複雑になる。この点を、Jutta Fitzek に尋ねた。GSI は CER で開発された LSA (LHC Software Architecture)に注目し、CERN と共同で GSI (FAIR)向けの改修を行った。この過程で、CERN と GSI の多数の加速器が抽象化され、共通・個別パラメータの抽出が行われた。この結果、あらゆる加速器のパラメータ設定は、統合アプリ 1 つから可能となる。

実装面では、アプリは Java GUI (Swing 使用)、中間層の LSA は Database (Oracle)を持ち、LSA は Front-end 層(FESA)と Corba または ZeroMQ で指令を出す、という構成になっている。

Tobias と Jutta の話から、GSI と CERN の両制御チームの強いつながりが窺える。あるいは、CERN で研究が進んだ各層の標準化が、GSI でも成果を出しつつある、とも読める。J-PARC（特に MR）ではこのような研究は少なく、結果として多種多様な上位アプリが平行して存在し、長期的な保守に苦しむ傾向が出ている。急な方向転換は難しいが、GSI や CERN の動向は今後も注目していきたい。

2.5. FAIR 制御系準備状況

最後は Baer 氏自らが FAIR の建設現場を案内し、来るべき未来を熱く語ってくれた。FAIR の建設現場は更地であった。その広大さは、J-PARC 建設前の原研敷地を思い起こさせた。

当面の焦点は、FAIR の一部となる CRYRing の建設である。この Ring で FAIR 向けの制御システムを試行的に構築し、初期の問題を洗い出す、という考えであった。

Baer 氏の尽力で、適切な GSI の加速器スタッフと面会し、彼らの「生活現場」で生々しい議論が出来た。GSI のスタッフに深く感謝したい。

3. まとめ

今回のドイツ滞在中は穏やかな天候に恵まれた。一方、成田出発時は台風 19 号(10/13)、出張の終盤はドイツ鉄道のスト(10/18,19)やルフトハンザ航空のスト(10/20)に見舞われた。私は移動日程に余裕があり、幸運もあって難を逃れたが、週末の PCaPAC からの帰路にドイツ鉄道が動かず青ざめた人は多かっただろう。

PCaPAC2014 では、各加速器施設の制御担当者と最近の動向の議論が出来たほか、ヨーロッパの研究所の若手技術者と交流をはかることが出来た。GSI とは、加速器制御分野では過去にほとんど交流が無かった（核物理分野では GSI と日本は強いつながりがある）が、今回の訪問で交流が進むことを期待したい。

以上のように、今回の国際交流助成による出張は、大変実りのあるものとなりました。ここに感謝いたします。

この報告には加速器制御やデータ収集の専門略語が多数含まれ、他分野の方には読みにくいと思われますが、紙面の都合もありご容赦下さい。

PCaPAC 2014 報告

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
小菅 隆

2014 年 10 月 14 日から 17 日まで、10thInternational Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC 2014)がドイツの Karlsruhe にて開催され、出席してきました。今回のワークショップ出席に対しまして高エネルギー加速器科学研究奨励会から助成を得られました事を深く感謝し、本ワークショップ PCaPAC2014 出席に関して報告をさせていただきたいと思います。

1. PCaPAC の概要

International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC)は 1996 年にドイツのハンブルグにある DESY において開催されて以来、以下のように開催されています。

1996 年：Hamburg, Germany
1999 年：Tsukuba, Japan
2000 年：Hamburg, Germany
2002 年：Frascati, Italy
2005 年：Hayama, Japan
2006 年：Newport News, USA
2008 年：Ljubulijana, Slovenia
2010 年：Saskatoon, Canada
2012 年：Kolkata, India
2014 年：Karlsruhe, Germany

PCaPAC はパーソナルコンピュータ(以下 PC)を中心とした加速器に関連する制御に関するワークショップで、発表内容は PC をベースとした加速器の制御システムに関する事をはじめ、組み込み用のシステムなども含む多岐にわたるものになります。また、今回のカテゴリーとしては次のようなものがアナウンスされていました。

- Control systems (Status reports, Control system frameworks (EPICS, Tango, Tine), Network design, Reliability and longevity of control systems)
- User interfaces and Data Displays (mobile systems, web services and other)
- Cyber security (Gateways, Internet connectivity and other)
- Hardware technologies (DSP, FPGA and devices, Accelerator specific development, Timing System PC busses and other)
- Modern Data Acquisition (commercial off-the-shelf systems, (real-time) operating systems. embedded systems, PLC´s, IOC´s and other)
- Management of Software projects (Development processes, Quality Assurance, In time development and other)
- Databases (Control DBs, extremely large databases, noSQL DBs and other)

なお、今回の PCaPAC では 100 件程度の Abstract が提出されたようです。

2. 今回のワークショップの様子

今回のそれぞれの発表は大変興味深いものでした。これらの発表に関しては既に PrePress が http://www.anka.kit.edu/2810.php にアップロードされています。また、Joint Accelerator Conferences Website (JACoW)の Web サイト http://www.jacow.org にも掲載される予定です。発表の詳細に関してはそちらをご参照いただく事として、ここでは私に関する事柄について報告したいと思います。

2.1 Tutorial Day

ワークショップとしては 10 月 15 日からの開催だったのですが、14 日には Tutorial Day として、Tango Introduction, CSS Introduction, Software Development Environment, Introduction Hardware Programming(FPGA), Introduction noSQL Databases, Introduction Web2c Toolkit の複数のチュートリアルが企画されました。このうち私は Web2c Toolkit のチュートリアルに参加しました。Web2c Toolkit はドイツの DESY で開発された、Web をベースとしたグラフィカルユーザインターフェースを作成する事が出来るソフトウエアで、今後私の所属する高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory (以下、KEK-PF)での応用に期待が持てます。

2.2 ポスター発表

ポスターセッションは 15 日と 17 日の 2 回に分けて行われましたが、私の発表は 15 日の午後に割り振られました。なお、今回は「STARS: Current Development Status」の題目でポスター発表を行いました。STARS は KEK-PF に於いて開発された、非常にシンプルなメッセージ配信システムで、制御システム等での利用など幅広い応用が可能です。KEK-PF では共通のビームライン制御システムのためのソフトウエアとしてこの STARS を採用しています。今回での発表では現在の導入状況や新しく開発が進んでいる部分についての報告を行いました。特に前述の Web2c については昨年 DESY とのコラボレーションにより、STARS 用インターフェースの開発が進行しています。ここでは実際のテスト動作画面等を示しながら、報告を行いました。

2.3 Poster in Pills

PCaPAC で行われる Poster in Pills セッションとは、ポスター発表の中から幾つかの発表がピックアップされ、それに選ばれた発表者は、ポスター発表とは別に質疑応答無しで 3 分間の口頭発表を行うというものです。大変光栄な事に私のポスターも Poster in Pills セッションに選ばれました。大変うれしかったのですが、一方ではポスターの他に数枚のパワーポイントも準備しなければならず、四苦八苦する羽目になりました。

Poster in Pills セッションはこれまでの PCaPAC ではポスターセッションの前に行われ、「私のポスターを見に来てねー」と宣伝する場だったのですが、何故か今回はポスターの後に設定されていました。1 回目の Poster in Pills セッションでは間に合わなかったのですが、2 回目からは Poster in Pills の Session Chair の提案でポスターセッションの前に行われる事になりました。

2.4 Session Chair

これも大変光栄な事なのですが、Session Chair を承りました。実はこれが私には大変重荷で、とにかく終わるまでは必死でした。担当したセッションは Software Management と言う事であらかじめ Abstract が出ていたので、兎に角予習をする事にしました。出発前には Plenary Talk 1 件を含む合計 4 件の Abstract を一生懸命読み込み、色々と考えを巡らせました。飛行機の中でも読もうとしたのですが、ちょっと読みだすと眠くなって撃沈、現地に着いてからの夜にかけたのですが、やはり同様に・・・。結局準備不十分のままに勝負する事になりました。

ドキドキしながら臨んだのですが、結局発表内容も興味深いものが多く、殆ど私から質問する必要も無く、逆に質問を制限して時間オーバーの心配をする事となりました。そして、セッションを何とか乗り切り、私は燃え尽きました。

2.5 Isamu Abe Prize

PCaPAC には Isamu Abe Prize という賞があります。この賞はかつて PC を使った加速器制御や PCaPAC そのものにも尽力され、そして 2002 年に急逝された阿部勇氏(当時高エネルギー加速器研究機構技術部次長)の意思を継ぐために設けら

れた章で、この分野の新人の中から顕著な功績をおさめ、そして優秀な発表を行った発表者に送られる賞です。

今回は GSI(ドイツ)の Mathias Kreider 氏が「New Developments on the FAIR Timing Master」の発表で受賞(写真 1)されました。

写真 1: Isamu Abe Prize 授賞式の様子、Mathias Kreider 氏が受賞。

3. その他の出来事

3.1 ストライキ

今回の渡航では Frankfurt まで飛行機で、その先 Karlsruhe までは電車を使う事となりました。行きは特に問題が無かったのですが、ワークショップ最終日に、「明日電車がストライキで止まるらしい」との情報が・・・。空港までのシャトルバスがあるとの情報も貰ったのですが、良く分かりませんでした。ワークショップ終了後 Karlsruhe 駅(写真 2)の周りを探したのですが、シャトルバスが出そうなターミナルも見当たらず、結局その日はギブアップして夕食をとりホテルに帰りました。

なお、私と同行していた方は海外渡航歴が殆ど無い方で、相当ドキドキされたようです。もうちょっと安心させてあげられれば良かったなと、反省しております。

写真 2: Karlsruhe 駅、結局シャトルバスのターミナルは見つけられなかった。

帰りの日は予定より早起き、DESY(ドイツ)の方に教えていただいた Web を見ると、どうやら我々の乗る電車は止まっていないようです。「最悪の場合、Baden-Baden まで行けばシャトルバスがあるかな」などと覚悟しながら駅に向かうと、どうやら我々の乗る電車は動いているようです。結局は何の問題も無く空港にたどり着きました。後から聞いた話ですが、同時期にドイツの別の場所に渡航されていた方はとても大変な思いをされたとの事です。

3.1 クレジットカード

ワークショップ最終日の未明、突然日本からの電話で目が覚めました。電話はクレジット会社からのものでした。何回か「カードをゴールドカードにしませんか」などと言うコマーシャルの電話があったことがあり、今回もそうかなと思い、始め私は不機嫌になりました。しかし、その後フランスの航空会社のチケットをネットで買おうとしてリジェクトされた事象がある旨を伝えられ、まったく身に覚えが無い私は真っ青になりました。慌ててカードを止めていただき、被害は特にありませんでした。支払等は別会社のクレジットカードも持っていたので何とか乗り切る事が出来ました。

ホテルでの朝食の時(あまり星の数は多くなかったのですが、朝食は付いていました)、同行していた方と、同じホテルに泊まっていた DESY の方にその話を、そしてこちらに来てからカードで買い

物はしていない事を話したらびっくりされました。

帰国してから聞いた話ですが、同行していた方も、その話をホテルでしたDESYの方も、その後同様の事があったそうです。同行した方は、日本ではそのカードを使った事もなく、ドイツ国内でも特に怪しいところで買い物をしたことは無いとの事でした。とても怖い話でした。

4. おわりに

今回の波乱万丈なドイツ渡航で、技術的・学術的な報告の部分が少なくなってしましました。しかし実際には、今回PCaPAC 2014に参加する事でPC 等を使用した制御システムの現状や新しいテクノロジーに関して広く情報を収集する事が出来ました。

以上のように今回助成をいただきPCaPACに参加する事で非常に有意義な結果を得る事が出来ました。改めて高エネルギー加速器科学研究奨励会にお礼を申しあげたいと思います。

第4回　特別講演会開催報告

1. 開催日時　平成26年10月10日（金）14:00～17:00・・・・・約20名の参加

2. 場　所　　アルカディア市ヶ谷（私学会館）
住所　東京都千代田区九段北4－2－25）
TEL　03－3261－9921（代表）

3. 題　　目

1）J-PARCの現状とMLF施設運用

講演者　池田裕二郎（J-PARCセンター長）

講演の概要

日本原子力研究開発機構（JAEA）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で建設し運営する大強度陽子加速器施設、J-PARC、を概観する。

中性子、ミュオン、K 中間子、ニュートリノなどの 2 次粒子を用いる複数実験施設の特徴と目標とするサイエンスを紹介する。

中でも、多くの利用者が訪れる中性子とミュオンを使った物性研究の拠点となる物質・生命科学実験施設、MLF、の中性子性能、ビームライン構成など世界の他の施設との比較による優位性、等を紹介する。

さらに、MLF 施設の利用の仕組みとともに、最近のサイエンス課題の動向と産業界からの利用需要について我が国の科学技術推進への貢献の観点で言及する。

池田裕二郎（J-PARC センター長）

2) J-PARC/MLF における産業利用

講演者　林　眞琴　（茨城県企画部　技監）　専門分野　構造強度信頼性

講演の概要　「中性子の産業利用」

日本国内には原子炉中性子源 JRR-3 とパルス中性子源 J-PARC/MLF がある。

2006年に整備された JRR-3 における施設共用制度、ならびに、文部科学省が設けたトライアルユース制度をきっかけに中性子の産業利用が大きく拡大を始めた。

2006年に供用を開始した世界最先端の実験施設である J-PARC/MLF においても産業界の中性子の利用は着実に増加している。装置グループの利用や JAEA プロジェクトならびに KEK の S 型課題を除いて、J-PARC/MLF での 2008 から 2014A までの期間に採択された課題数は 1,099 件(3.11 大震災で全く運転されなかった 2011A を除く)であるが、そのうち産業界の利用は 31.5%を占める。

本講演では茨城県が J-PARC/MLF に設置した2台の中性子実験装置の概要と中性子の産業利用の現状について紹介する。

林　眞琴　（茨城県企画部　技監）

・講演の詳細につきましては、奨励会ホームページ（http://www.heas.jp/）をご覧ください。

■ 編 集 後 記 ■

● 賛助会員の皆様方には益々ご清栄のこととお慶び申し上げます。
日頃より、当公益財団法人に対する格別のご協力を頂き、心から厚く御礼申し上げます。

● 広報誌「FASだより」も公益財団法人に移行してから第9号を発行することになりました。

● 投稿等が少なく、年3回の発行予定が年々少なくなりつつあります。
賛助会員の皆様で、広報誌「FASだより」に投稿したい高エネルギー加速器に関する記事等が有りましたら是非お知らせ下さい。
投稿をお待ちしております。

● 研究報告等を見やすくするために、広報誌「FASだより」も第7号からモノ黒印刷から全面カラー印刷に変更いたしました。

● 本文中に掲載しておりますが、皆様のご協力で、平成26年度「高エネルギー加速器セミナー OHO‘14」・「第4回 特別講演会」とも、無事に終了する事ができました。ありがとうございました。
平成27年度も同様にセミナー及び講演会を開催する予定です。
多くの皆様のご参加をお待ちしております。

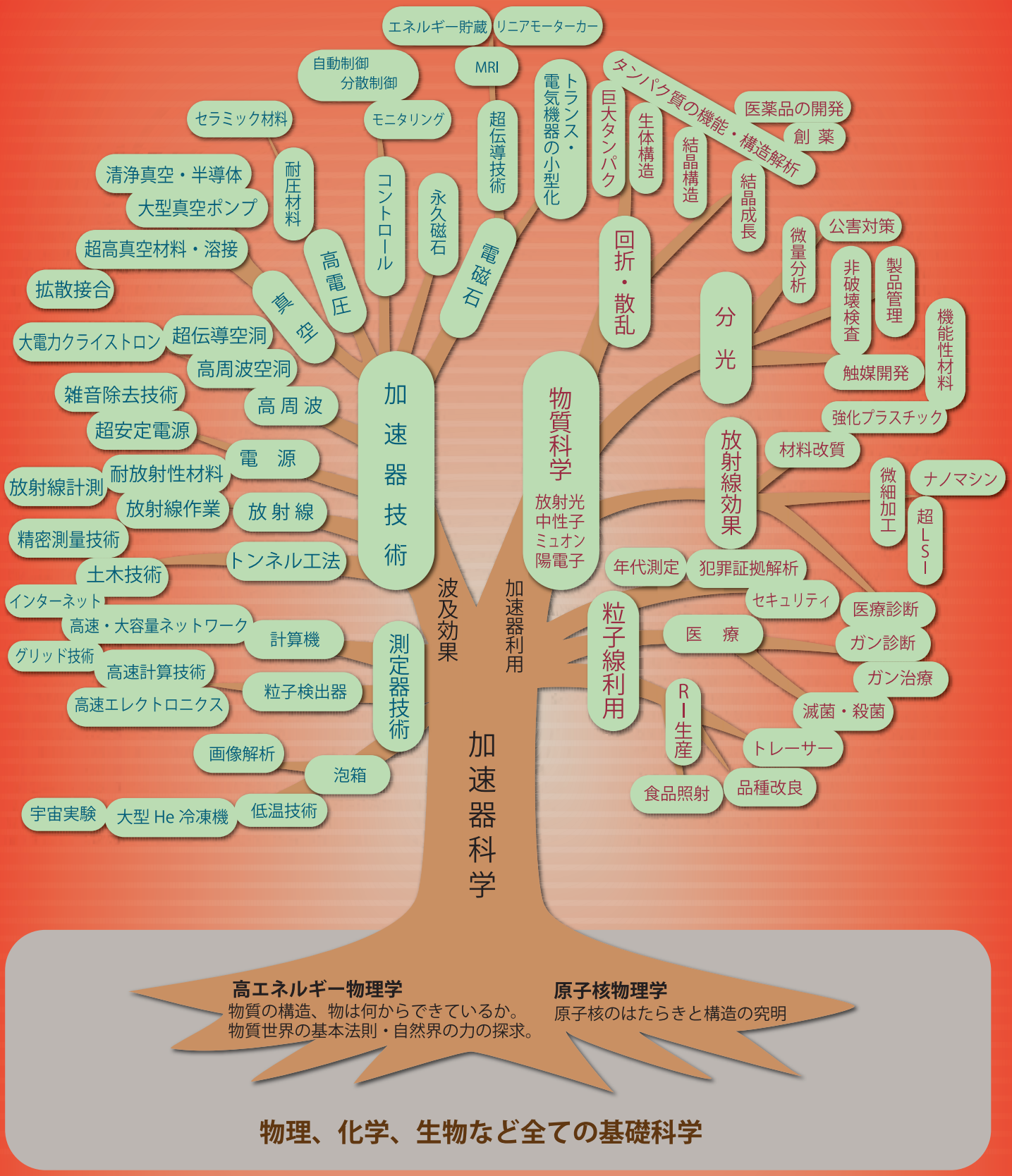
● 当公益財団法人では、多くの皆様に「公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会」をお知りいただくために、平成25年1月にパンフレットを、2月にホームページをリニュアールいたしました。

● 「ホームページ」・広報誌「FASだより」等をご覧いただき、より良いものにするために皆様のご意見をお寄せください。お待ちしております。

● 賛助会員のバナー広告掲載について
当公益財団法人のホームページ上に賛助会員様のバナー広告を掲載しております。
バナー広告掲載を希望される賛助会員様は、ぜひご利用ください。（無料）

＜連絡先：info@heas.jp又はTEL／FAX029-879-0471＞

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 事務局



発 行 公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会

〒305-0801
つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内（職員会館 2F）
TEL・FAX：029-879-0471
E-mail：info@heas.jp
URL：http://www.heas.jp/