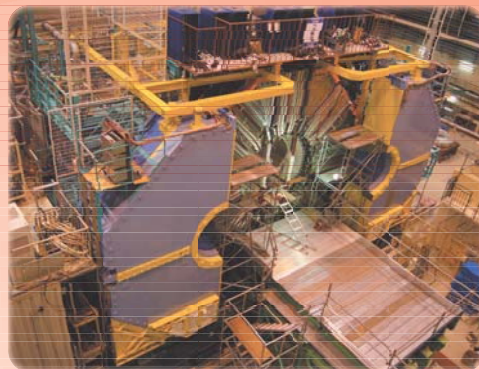




FOUNDATION FOR HIGH ENERGY
ACCELERATOR
SCIENCE

FAS だより

2015.11 第11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 11 号 目次

平成 27 年 11 月

1. 研究助成報告

- 1) 米国 LCLS 視察および UCSF ワークショップ講演に参加して…………… 1
(自 27.06.15 至 27.06.16 米国 サンフランシスコ)

国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科・講師 溝端 栄一

- 2) 「大学生のための加速器入門コース」報告…………… 4
(自 27.07.06 至 27.07.15 国内 高エネルギー加速器研究機構)

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 道園 真一郎

- 3) イオン源国際会議参加…………… 7
(自 27.08.23 至 27.08.28 米国 ニューヨーク)

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 柴田 崇統

- 4) 第 13 回 重イオン加速器技術に関する国際会議参加…………… 12
(自 27.09.07 至 27.09.11 国内 横浜市)

国立研究開発法人 理化学研究所 仁科加速器研究センター
サイクルトロンチーム 坂本 成彦

2. 第 32 回 高エネルギー加速器セミナー (OHO'15) 報告…………… 15
(自 27.09.01 至 27.09.04 高エネルギー加速器研究機構内)

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 小林 幸則

3. 第 5 回 特別講演会開催報告…………… 18
(27.10.16 アルカディア市ヶ谷 (私学会館))

4. 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 賛助会員一覧…………… 20

- 編集後記…………… 21

米国 LCLS 視察および UCSF ワークショップ講演に参加して

国立大学法人大阪大学
大学院工学研究科
溝端 栄一

2012年に我が国で供用が開始された SACLA は、米国 SLAC 国立加速器研究所の LCLS (Linac Coherent Light Source) に次ぎ、世界で2番目に設立された X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設である。近年、超高輝度・極短パルス・高空間コヒーレンスという XFEL の特性を利用して、微結晶 (ナノ～ミクロンサイズ) 試料で蛋白質の構造解析を可能にする新しい技術: 連続フェムト秒微結晶解析法 (Serial Femtosecond X-ray crystallography: SFX) が考案された。これは、多数の微結晶溶液をインジェクターから極細の液体ストリームとして噴出し、そこに XFEL パルスを照射して、多数の異なる配向の微結晶からの回折データを連続測定する手法である (Fig.1)。

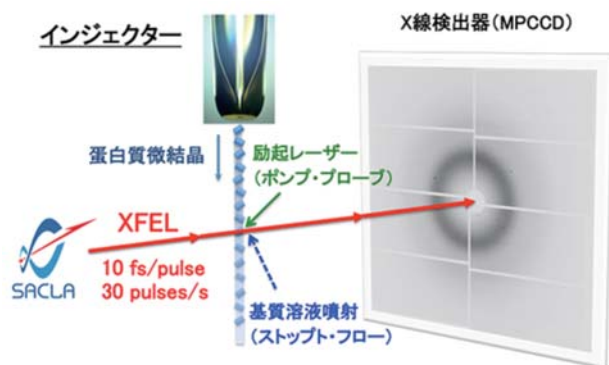


Fig.1 連続フェムト秒微結晶解析法 (SFX) の概念図。実験目的に応じて、ポンプ・プローブやストップ・フローの技術を組み合わせて、蛋白質の構造解析を行う。

SFX では、このインジェクターの技術が構造解析を成功させるためにきわめて重要である。LCLS の稼働は SACLA に3年先行して開始されたため、インジェクターをはじめとする実験装置の開発や測定手法のノウハウについて、日本

は米国に遅れを取っている。そこで、筆者らは、LCLS を視察して最新装置の稼働状況や新規コンセプトの情報収集を行うとともに、LCLS を利用する米国の研究者らと UCSF (カリフォルニア大学サンフランシスコ校) にてワークショップを開催し、最先端の研究成果の議論を通して交流を深め、これを SACLA における装置開発と研究の加速化に繋げて、我が国の将来の高エネルギー加速器科学の発展への基盤を構築することを目的として、本事業を企画し実施した。

今回の事業では、SACLA での実験に携わる者として、筆者のほかに、KEK の湯本史明博士と、理研播磨研究所の田中里枝博士と山下恵太郎博士による視察チームを編成して米国を訪れた (Fig.2)。また、現地でのサポートメンバーとして、スタンフォード大学の加藤英明博士と松井勉博士にご協力をいただいた。



Fig.2 視察チームと米国研究者との交歓会にて。左から、田中、溝端、Stroud、湯本、山下、Holton (敬称略)。

6月16日にサンフランシスコ空港に到着後、加藤博士の車に同乗し、最初に LCLS を訪れた。ここでは、Aina Cohen 博士が歓迎をしてくださり、施設内の複数のビームラインを2時間に渡って案内していただき、実験装置についての詳細な説明を受けた (Fig.3)。様々に示唆に富んだ話を伺うことができたが、特に興味深かったのは、ひとつの実験ハッチ内に2つの測定チャンバーを上流と下流に直列に設置することで、上流のチャンバー

で測定がなされた後の XFEL のビームを下流で再利用して実験をするシステムを構築していたことである (Fig.4)。このシステムは実験効率を2倍に向上させることができるので、このコンセプトを参考に SACLA 独自の装置開発に繋げ、運用することも可能であろう。

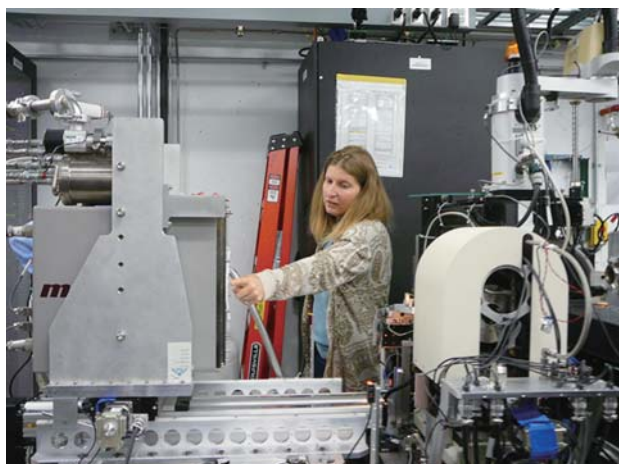


Fig.3 LCLS 内で最新の実験装置の説明をするCohen 博士。

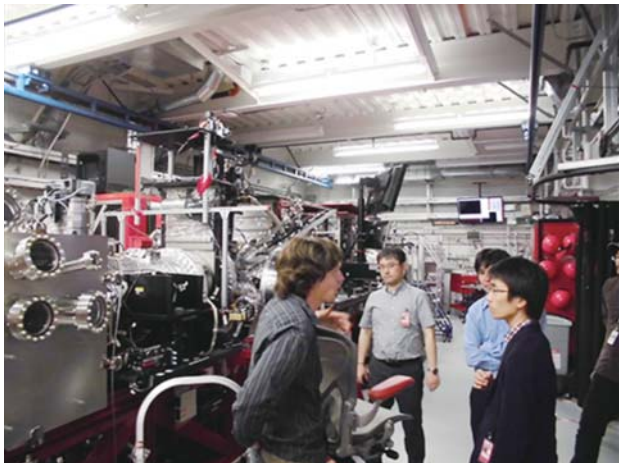


Fig.4 LCLS 内で直列測定チャンバーの説明を受ける筆者ら。

次に、LCLS に隣接する米国最古のシンクロトロン放射光施設 SSRL (Fig.5) に移動し、さらに2時間をかけて、各種ビームラインの視察を、Cohen 博士、および、SSRL のビームライン管理者の松井博士の案内のもとに行った。SSRL は屋舎も内部の備品も古い物が多かったが、実験効率

を最適化するための種々の工夫が凝らされていたことが印象的であった。ここでは蛋白質構造をSFX や小角散乱などの複数の技術を利用して解明する複合構造解析の可能性について意見を交換した。さらに、Cohen 博士から、最近報告した論文で使用した生データの提供を申し出ていただき、日本での最新の構造精密化プログラムの改良を着手できるようになるなど、新しい研究の展開につながる成果も得られた。



Fig.5 SSRL 屋舎の正面玄関。

翌17日には、UCSF Mission Bay キャンパスの Genentech Hall において、複合構造解析についてのワークショップ『Workshop on Serial Femtosecond Crystallography, SAXS, & Cryo-EM』(オーガナイザー: James Fraser 博士、湯本博士)を開催した。筆者ら日本人メンバーも演者として参加した (Fig.6)。



Fig.6 UCSF で開催したワークショップの講演会場の様子。

この会場には、構造生物学の世界的権威である Robert Stroud 博士をはじめとする著名研究者のほか、Adam Frost 博士や Henry van den Bedem 博士など若手の気鋭の研究者および学生ら、約 60 名が参加し、5 時間にわたって未発表データを含む最新の研究成果についての講演と討論が行われた。筆者の講演では、SACLA における装置開発の進捗を紹介するとともに、金属蛋白質の無損傷構造解析について、SACLA、Photon Factory、SPRING-8 を利用して得られた研究成果を中心に、発表を行った。

ワークショップの後半には、会場となった建物内の実験室の見学会が催された。特に、1 階の実験室には UCSF が誇る最先端の電子顕微鏡と関連設備が設置されており、それらを使った実験の様子を詳しく視察した (Fig.7)。



Fig.7 UCSF の電子顕微鏡 (左) とクライオ実験装置 (右)。

この実験室において、Yifan Cheng 博士や David Agard 博士らによって新型の直接検出器が共同開発された。これを使用することで、蛋白質のクライオ電顕による構造観察の精度は飛躍的に進歩し、現在世界の注目を集めている。クライオ電顕では、その構造解析において結晶を必要としない。そのため、超分子複合体や天然変性領域を含む不安定で結晶が得られにくい標的分子を対象にした構造解明に向けて、クライオ電顕の広範な利用が期待されている。

昨年ごろより、日本においてもクライオ電顕の利用を望む声が高まっているが、日進月歩で進む

装置改良の速度や、高度な解析技術に対応する国内の体制や人材が不足していることが、日本でのクライオ電顕の展開を阻む壁となっている。クライオ電顕での構造解析には、SACLA や Photon Factory など結晶解析により得られた精度の高い部分構造を役立てることができる。これは複合構造解析時代の重要な技術テーマであり、今回のワークショップを開催した理由のひとつでもある。

ワークショップの最後に、会場内にて懇親会が開催され、参加者と実り多い議論を交わすことができた。特に、ポスドクや学生といった若い研究者と、実験の具体的なノウハウについて情報交換を行うことができたのは有意義であった。中でも、LCLS にて複数のタイプのインジェクター開発の現場を担当してきた若手研究者たちから、これまでの装置の特性や、最新のインジェクターの開発状況についての詳細な情報を得ることができた。この意見交換を機に、日米合同の装置開発の共同研究が開始されている。同行した湯本博士は、この秋の SACLA でのビームタイムの実験に彼らを招へいし、LCLS で開発された最新のインジェクターを使って SACLA で初の実験を行う予定である。その他、ワークショップ参加者との複数の共同研究が着手されており、今回の事業により、日米の研究者の往来を含め、研究交流のパイプを強化することに成功した。近々、共同研究業績として形になることが期待される。

上述の事業成果は、我が国の将来の高エネルギー加速器科学の発展に資するものと確信している。今後、一層の貢献ができるよう研究に注力して参りたい。

「大学生のための加速器入門コース」 報告

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
道園 真一郎

1. 開催の経緯

「大学生のための加速器入門コース」が7月6日から7月15日までの10日間、KEKで開催されました。参加者は中国科学技術大学の大学院生と学部生19名と引率者1名の計20名です。

そもそもこの企画は、加速器研究施設が申請した科学技術振興機構（JST）の「さくらサイエンスプラン」に採択されたところから始まりました。当初の計画では、JSTの招聘で中国科学技術大学の教官1人と10名の学生が参加する予定でした。が、このプログラムへの参加希望者を大学内ではかったところ、100名を超える応募者があったということから、一人でも多くの学生をKEKに招聘して、加速器の魅力を知ってもらおうと加速器奨励会に補助をお願いしました。その他、加速器研究施設や先方大学からの補助もあり、結果、さくらサイエンスプランで予定していた約2倍の規模のスクールとなりました。



2. 報告

中国科学技術大学は中国でも屈指の名門大学ですが、彼らの大半はまだ加速器物理を勉強し始めたばかりの若者達です。経済発展の著しい中国では科学技術でも目覚ましい発展を遂げていることは言うまでもなく、加速器物理分野に於いても医療用加速器、テラヘルツ FEL、次世代放射光施設等、多くのプロジェクトが計画中です。

上海から飛行機で内陸へ1時間の合肥にある中国科学技術大学の一行は梅雨も半ばを超えた7月5日の夜、成田空港に到着しました。朝、8時の合肥発の飛行機に乗るために5時起きで自宅を出てから、KEKの宿舎に到着したのが午後10時という長旅でした。20名のほとんどが日本はもちろん、外国に出るのは初めてという若者達です。

加速器施設長・山口誠哉氏、受入責任者の大見和人氏の挨拶から始まった開会式の後、現在、世界最先端のプロジェクト、SuperKEKB、ILC、ERLsで中核を担って活躍中のKEKの研究者がそれぞれ“Introduction to SuperKEKB accelerator”, “Accelerator System of International Linear Collider”, “Energy Recovery Linacs”と題した講義を行いました。その後、2日間をかけてKEKが有する主だった加速器施設全てを見学しましたが、まず我々が驚かされたのは、彼らの旺盛な探究心と積極性でした。講義でも施設見学でも、講師や説明者が学生達の質問攻めにあい、予定時間をオーバーしてしまうのです。彼らの新しいものに対する率直な興味や活発な質問が、おとなしい日本人学生に慣れた受け手には新鮮で、非常に好ましいものと写ったようです。

今、世界の加速器分野では次々と新たな大型プロジェクトが計画中、建設中ですが、人的資源の不足が大きな問題となっています。そういう意味で未来の加速器の担い手を育てることは、世界最先端の研究と共に非常に重要な課題となっています。研究への好奇心を物怖じせずに表現してくる学生達に次世代の加速器分野の可能性が見いだせるかもしれません。

このスクールでは実習を行いました。実習は普段の研究所業務で忙しい指導研究者に大きな負担がかかり、また人数制限もあって、なかなか実現が難しいものですが、今回は KEKB の真空グループが引き受けてくれたのを皮切りに QCS マグネット、電子銃、LLRF グループに実習をお願いし、これに理論実習も加えて、計 5 コースに分かれて実習を行うことができました。話を聞くだけでなく、研究施設内で実際のハードに触れての実習は学生達の実験となり得ました。



今回のプログラムの目玉は 7 月 10 日の加速器の実習と共に、細山謙二名誉教授による “Feynman’s World of Physics” と銘打った実習でした。まずはファインマンの物理を周氏が中国語で講義した後、細山教授オリジナルの科学おもちゃ、「超電導コースター」「鉄球リニアック」「ころがりトロン」などを使っての実習が始まりました。学生達はまさに「おもちゃを与えられた子供」のように目を輝かせてファインマンの世界を楽しみました。「今までは本の上で、頭の中にしかなかった知識を実際に手で触れて、体で会得した」という一人の学生の言葉が印象的でした。

学生達の興味は加速器物理だけにではなく、初めての日本の文化にも余すところなく発揮されたようです。7 月 13 日の日曜日は自由時間となっていました。朝早くから東京に出かけ、KEK

の宿舎に帰ってきたのは、つくば駅発の最終バスだったと翌月曜日に聞きました。浅草や秋葉原で目一杯の買物をしたり、居酒屋でアジの活け造りに驚いたりして日本の休日を満喫しました。中には土曜日のプログラムが終わってから東京に出かけて、カプセルホテルに泊まり、日本の文化を目一杯満喫してきた強者もいたようです。カプセルホテルは小さいけれど全てが清潔で便利にできており、非常に快適だったとのことでした。

最終日には学生達は 10 分間の持ち時間が与えられ、10 日間の日本滞在で学んだこと、感じたこと、将来の目標などを KEK の聴衆が見守る中で発表しました。その中で多くの学生が近い将来、必ずまた KEK に来たいと感じていました。中国と日本は隣国でありながら、日常生活で英語が通じないという言葉の壁もあり、これまでは海外での活動を希望する研究者の視線は欧米に向いていました。しかし、実際に訪日し、日本の研究所で世界最先端の研究が進んでいることを目の当たりにすると、彼らの考え方は随分と違ってきます。今回の訪問をきっかけとして、大きな可能性を秘めた中国の若い研究者達が日本に関心を持ってくれたことは、今後の日中の科学技術協力の発展に大きな弾みをつけることにつながると確信しました。

今回のスクールの特徴は、受入担当者が助教の周徳民氏を中心とした中国人若手研究者の面々であったということでしょう。KEK には多くの外国人研究者が在籍していますが、加速器研究施設では 10 名を超える中国人研究者が働いています。彼らが一致団結して、事務局長の周氏を支え、母国からやってきた後輩達のために奔走しました。施設見学では自分の普段仕事をしている加速器の説明をしたり、実習では各グループで中心となって活動しました。

3. 最後に

先に述べた中国人若手研究者のこのスクールでの活躍を支えてくれたのが、同じ加速器研究施設の日本人若手研究者でした。特に実習ではキャリアの浅い中国人研究者を指導して、計画を練ったり、放射線手続きを進めたりに非常に心強い存在でした。近い将来、KEKの加速器を背負って立つ日本人と中国人が自然に協力して働く姿はKEKが国際研究所として成熟してきたということです。

JSTのさくらプログラムと同時進行ということで何かと煩雑な事務を根気よく処理してくださったKEKの研究協力課の方々は大変お世話になりました。

また申請に当たり、不慣れな我々を色々ご指導いただき、補助金を支給してくださった財団と加速器研究施設に深く感謝いたします。



イオン源国際会議(16th International Conference on Ion Source) 参加

高エネルギー加速器研究機構
加速器施設
柴田 崇統

ブルックヘブン国立研究所(Brookhaven National Laboratory; BNL)主催にて、第16回イオン源国際会議(International Conference on Ion Sources; ICIS)が、米国・ニューヨーク州・ニューヨーク市にて8月23日から28日の期間にわたり開催された。申請者は同会議に参加し、J-PARCイオン源内のプラズマを対象とした数値シミュレーションの立ち上げと、その計算結果について発表を行った。この報告では、第1章にてイオン源国際会議の概要、第2章では、ICISで見かけた特に興味深い発表、第3章で本研究発表について述べ、第4章で全体のまとめを記した。

1. 会議の概要

イオン源国際会議は、隔年で開催され、2015年に第16回を迎える国際会議である。同会議は世界各国からイオン源応用・設計開発に関連する研究者が参加する、イオン源分野最大の国際会議であり、例年200件の発表(400件の発表申込み)が寄せられる。

今年度のICISでは、衝突型加速器、核融合プラズマ加熱、中性子源用イオン源における大強度、高輝度、また電荷の高いイオンビーム生成、また、放射性イオンビーム(radioactive ion beam)生成、電荷繁殖(charge breeding)用イオン源の高効率化に向けた実験・シミュレーションの成果が主として報告された。発表件数は、例年に並び、口頭発表49件、ポスター発表206件の計255件であり、参加者は一般193名、シニア8名、学生35名の計236名であった。日本からの発表は44件と、開催地米国からの76件に次いで2番目に多い報告がなされた。

近年、イオン源の研究開発に向けたプラズマの数値シミュレーションに関連する発表が増えてきたことが印象深い。この背景として、ここ数年の数値計算機性能の進展に伴い、プラズマ輸送過程・相互作用の計算に必要なメモリなどのマシンパワーの確保が容易になったことが考えられる。従来のイオン源国際会議では、フィラメント陰極を用いたアーク放電型イオン源内のプラズマのシミュレーションに関する発表は行われてきた。しかし、プラズマ温度・密度分布がマイクロ秒以下の短い時定数で変化する、高周波放電型(RF)イオン源、電子サイクロトロン共鳴型(ECR)イオン源を対象としたプラズマの解明に関する発表は少なかった。今回のICISでは、申請者が確認する限りでは、RFイオン源に関する計算結果の発表が本発表を含めて少なくとも3件(J-PARC以外にSNS, CERN)、ECRイオン源発表が6件あり、高精度・高分解能のイオン源プラズマシミュレーションが各研究所・大学で立ち上げられたことが認識された。

2. 国際会議で見かけた興味深い発表

ユバスキュラ大学(JYFL, フィンランド)の発表では、ECRイオン源内で発生する電磁流体力学的(MHD)不安定性について説明している。イオン源内のプラズマが示す空間的・時間的变化とビーム電流値の係りに言及した発表は近年シミュレーション研究の進展とともに増加しており、J-PARCイオン源の設計にも重要であると考えたので、ここで紹介する。

ECRイオン源に限らず、RFイオン源、アークイオン源など含め、加速器用、加熱用イオン源性能向上の目的の1つは大電流化(大強度化)である。そのためには、イオン源内のプラズマ生成効率の向上、あるいは生成されたイオンの引き出し効率の向上が要求される。上記を達成するためには、イオン源内プラズマの空間的・時間的な挙動を設計検討レベルで(定量的に)理解することが必要である。一方、イオン源内の高密度プラズマ(プラズマ密度 n_p が $10^{16} - 10^{19} \text{ m}^{-3}$)では、プラズ

マ粒子同士の相互作用、電磁場の空間・時間変化などの効果を同時に考慮する必要があり、理論解析的に定量的なプラズマ挙動を知ることは容易ではない。

本発表は、JYFL, LBNL, 理化学研究所、米国ミシガン州立大学の保有する ECR イオン源について、ビーム電流値とイオン源磁場強度に関する実験結果を集計し、イオン源内部の電子のエネルギー分布と MHD 不安定性の発生条件を説明している。入射磁場強度 B_{ECR} とイオン源内の最小磁場強度 B_{min} の比 $B_{\text{min}}/B_{\text{ECR}}$ が低い場合、イオン源から引き出されるビーム電流値が低下する原因は、MHD 不安定性の抑制条件の 1 つ

$$\beta = \frac{n_e k T_e}{B^2 / 2\mu_0} \ll 1 \quad (2-1)$$

がイオン源中心の弱磁場 (B_{min}) 領域で満たされなくなるためである。一方、磁場強度比が最適値より高い場合、ビーム電流値が時間的に振動するため、暗転したビームが得られない結果が測定されている。発表では、この振動が次のようなモデルで生起すると説明している。ECR 加熱によって電子の加速が行われると、磁力線に垂直・平行方向で、電子輸送過程が異なるために、電子はエネルギーの低い電子と、高エネルギー電子に 2 極化したエネルギー分布関数 (EEDF) を持つ。プラズマ中のエネルギーの大部分は高エネルギーの電子が有しており、これらがプラズマ中に励起された電磁場 (プラズマ電流に起因する誘導電磁場) と相互作用することで、電磁波 (マイクロ波) および電子のバーストを誘起するとしている。同物理モデルを検証するため、JYFL では ECR イオン源にバイアス電圧を印加可能なディスクを取り付け、不安定性が生起した際に生じ得る電子電流のバーストを測定を予定している。今後の方針として、EEDF の 2 極化や励起電磁場と電子間の相互作用が発生する過程を実験的に確かめる方法が検討中されている。

このようなプラズマ中の励起電磁場と荷電粒子 (電子) との相互作用の理解は、ECR イオン源だ

けでなく、プラズマの生成に RF コイルの振動電流によって誘起する誘導電磁場を用いる RF イオン源でも共通の課題と言える。特に、磁場強度の勾配や β など MHD 不安定性の抑制条件は、RF プラズマ中でも重要な可能性が高い。しかし、前述したように、イオン源内部の EEDF の形や、電磁場分布とプラズマ・電磁場間の相互作用を理解するためには多様な効果を含めた理論モデルを仮定し、それを検証する必要がある。イオン源内の EEDF やポテンシャル構造を図るには、アーク放電型のイオン源では静電プローブなどが用いられるが、ECR や RF イオン源内の時間変化が急峻なプラズマでは困難である。

このような測定困難なプラズマ中のパラメータ分布を理解する 1 つの手段として、プラズマの数値シミュレーションが活用され始めている。近年では、数値計算機の性能の進展に伴い、プラズマ中の多粒子間相互作用の計算や、高い空間・時間分解能の電磁場計算を可能とする計算機が容易・安価に得られるようになってきている。今回の国際会議でも、イオン源プラズマのシミュレーションに関する報告が増えたのは、このような背景があるためと考えられる。とは言え、プラズマ中のすべての効果を含めた数値計算は現状では困難であり、プラズマ全体の挙動に支配的な物理機構・パラメータに特化したモデリング技術の確立が今後重要となる。

3. 本発表内容

2014 年 9 月 29 日より、J-PARC リニアックではセシウム (Cs) 添加型、高周波放電型 (RF)

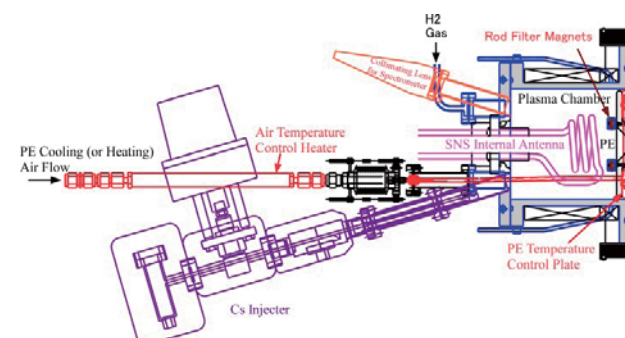


Fig.1 Schematic drawing of J-PARC ion source.

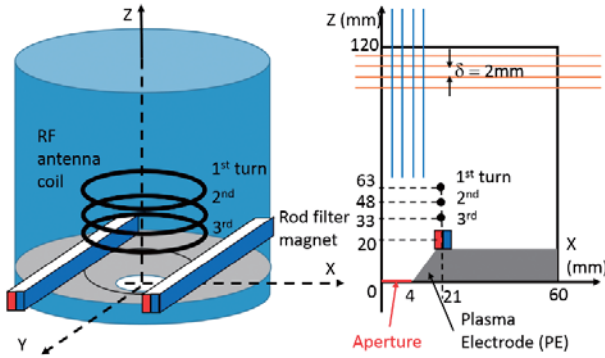


Fig.2 Geometry of 2D numerical model.

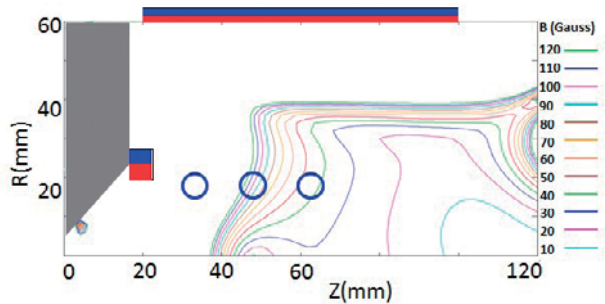


Fig.3 Contour of absolute magnetic flux density by cusp and filter magnets.

水素負イオン (H^-) 源の運転が開始された。バルブの誤操作による Cs 過多で 10 月に 1 回の RF アンテナ破損以外、運転は順調であり、電流値 33 mA、duty factor 1.25 % ($0.5 \text{ ms} \times 25 \text{ Hz}$)、規格化 RMS エミッタンス $1.5\pi \text{ mm mrad}$ の H^- ビームを 1100 時間引き出すことに成功した。またイオン源寿命は 1 か月以上保持した。今後の運転では、さらなる H^- ビーム大電流化 (30 $\rightarrow$ 50 mA) が図られる予定であり、イオン源に高パワーを印加した連続運転が行われる。イオン源内部のプラズマ生成・輸送機構と、 H^- 生成量への影響の理解は、ビーム大電流化に不可欠な課題である。本発表では、上記目的のための数値シミュレーションモデルの構築と、今後問題となりうる RF イオン源内部アンテナの損耗機構について報告した。

RF イオン源の寿命を決定する最大の要因は内部アンテナの破損である。これまでのイオン源実験データから、アンテナ破損の 1 つの原因は、製作時にアンテナ表面のガラスコーティングに生じるクラックであるとされている。しかし、プラズ

マの輸送過程とアンテナ破損条件の関係は未だ完全には理解されていない。プラズマ熱流束の集中を緩和することができれば、アンテナ・イオン源寿命を延ばすことができる可能性がある。本研究では、プラズマの生成・輸送過程を予測するため、イオン源内の電子、陽子 (H^+)、分子イオン (H_2^+) の輸送過程と、プラズマ中に励起される容量性・誘導性電磁場を同時に解析するシミュレーションモデルを構築した。

J-PARC イオン源の概念図を Fig.1 に示す。3 巻きの内部アンテナコイルが円筒型の無酸化銅 (OFC) チャンバの中央に設置されており、周囲にはプラズマ閉じ込め用に計 22 本のカusp磁石が取り付けられている。1 組のロッドフィルター磁石が、Fig.1,2 に示すように、アンテナコイルとプラズマ電極 (PE) の間に挿入される。Figure 3 に上記の磁石によるイオン源内の磁場強度分布を示した。イオン源の放電条件は、Table 1 に簡潔に示した。

シミュレーションでは、2 次元のイオン源幾何形状を Fig.2 のような XZ 平面内にとった。ロッドフィルター磁石が形成する磁力線の影響を取り入れるため、磁石に垂直な平面を選択した。モデルでは、プラズマ粒子 (電子、 H^+ 、 H_2^+) の Boltzmann 方程式を Leap-Frog 法と呼ばれる差分法で計算する。Table 2 に、各粒子の初期密度と、超粒子の重み、差分計算の時間ステップ幅を示した。Boltzmann 方程式の差分計算は、電磁場によ

TABLE I. Discharging conditions in the numerical model.

H_2 gas pressure	3.0 Pa
Gas temperature (H_2, H, Cs)	1000 K
Dissociation degree	0.1

TABLE II. Initial particle density and calculation conditions.

Electron density	$1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$
Proton density	$9.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$
H_2^+ density	$1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$
Particle weight	$w = 10^6 - 10^7$
Time step width for orbit calculation	$dt = 1 \times 10^{-13} \text{ s}$
Time step width for collision calculation	$dt_{\text{coll}} = 1 \times 10^{-11} \text{ s}$
FDTD cell width	$\delta = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$

る軌道計算と衝突による生成・消滅・運動量移行の計算の2部に分かれる。また、プラズマ粒子が経験する衝突過程は、背景粒子 (H , H_2 , Cs , H_3^+) との間の弾性・非弾性衝突と、プラズマ粒子同士のクーロン衝突に大別される。弾性・非弾性衝突による運動量移行や反応エネルギーロスの計算は、擬衝突法 (Null Collision Method; NCM) によって扱われる。クーロン衝突時の運動量移行は、二体衝突モデル (Binary Collision Model; BCM) により計算した。イオン源内に形成される電磁場は、永久磁石による静磁場、RF コイル内の交流電流が作り出す誘導電磁場がある。一方、コイル自身の電位により作り出される容量性電場がプラズマ粒子加速に影響しうるシミュレーション・測定結果が CERN の Linac4 イオン源で報告されている。RF コイルによってイオン源内に形成される誘導電磁場は、Maxwell 方程式を、FDTD (Finite Differential Time Domain) 法を適用して計算した。アンテナコイルの電位が形成する容量性電場は、コイル表面を境界条件とした Laplace 方程式を SOR (Successive Over Relaxation) 法により計算することで求めた。

上述のモデルを用い、RF 半周期が経過した後の電子密度 (a)、 H^+ 密度 (b)、および H_2^+ 密度 (c) 分布を Fig.4 に示した。アンテナ印加電圧は初めの 0.25RF サイクルで正の値を持つ。そのため、電子はアンテナに向けて加速される。また、ロッドフィルター磁石 ($Z = 20$ mm, $R = 20$ -30 mm) に形成する磁力線、特に磁束密度の絶対値が 30-120 Gauss (Fig.3 参照) の領域に電子は捕われる。これらの影響により、初期条件で一様に与えた電子密度はアンテナコイル 1 巻きと 2 巻き部の外側に局在化する。高電子密度 ($\sim 10^{16}$ m $^{-3}$) 領域では、電子と水素分子・原子間の電離過程が促進される。シミュレーションでは、分子解離度を 0.1 としたため、 H_2^+ の生成が H^+ の生成レートより 1 桁近く高い。これにより、高電子密度領域では、電子と H_2^+ イオンによって、プラズマ中の準中性が保たれる。

0.25RF サイクル後 ($t > 1.25 \times 10^{-7}$ s) では、ア

ンテナ表面電位の符号が負に変化する。このとき、正イオンがアンテナコイルへと加速される。

Figure 5 にアンテナコイルの 1-3 巻きへ電子、 H^+ 、および H_2^+ によって運ばれる熱流束の総和の時間変化を示した。アンテナコイルの表面電位が負になる時刻で、正イオンによる熱流束が増加している理由は、上記アンテナ電位が負になるため

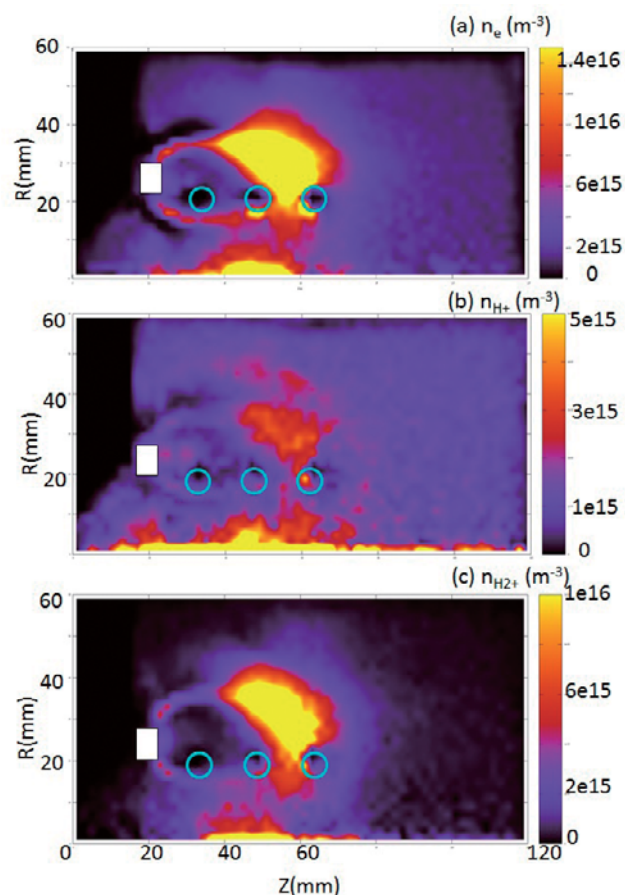


Fig.4 Spatial variations of electron (a), H^+ (b) and H_2^+ (c) density after 0.5 RF cycle.

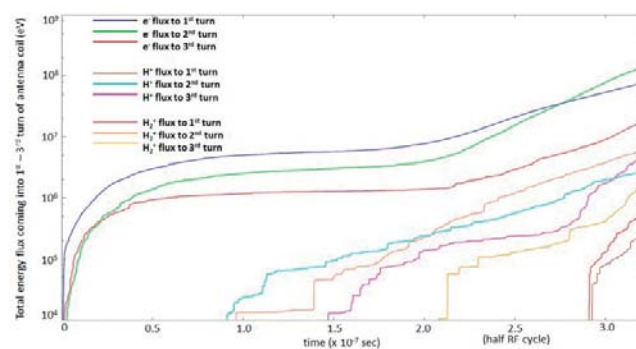


Fig.5 Total electron, H^+ and H_2^+ heat flux to 1 st - 3 rd turn of antenna coil.

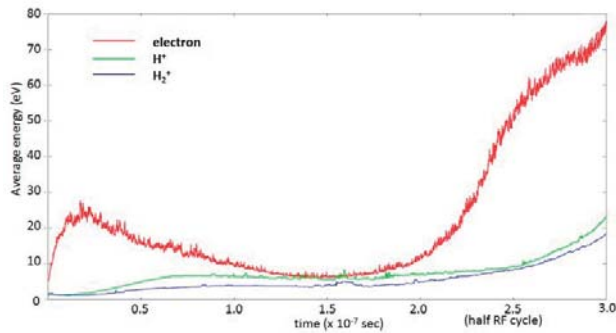


Fig.6 Time variations of average energy.

である。しかし、アンテナへの熱流束の大部分は、初期放電時は電子によって担われている。Figure 6 に電子、 H^+ 、 H_2^+ の平均エネルギーの時間変化を示す。Figure 5 において 0.5RF サイクルまでに電子による熱流束が正イオン束を上回るのは、電子の平均エネルギーが、アンテナ電位が負に転じた後も正イオンのエネルギーを上回るためである。これは、アンテナによる容量性電場 ($t = 0, 2.5 \times 10^{-7} \text{ s}$ でそれぞれ正負のピークを持つ) の立ち上がりに対し、電子の応答が早いためである。

本発表では、J-PARC RF イオン源内のプラズマ輸送過程と電磁場分布を計算可能な 2 次元シミュレーションモデルと、その計算技法について説明した。また、内部 RF アンテナの損耗機構を明らかにするため、プラズマによる熱流束の時間発展を調べた。アンテナ熱負荷の発生機構は以下に要約される；

- ロッドフィルター磁石による磁力線、およびアンテナ表面の正電位により、コイルの 1, 2 巻き近傍に電子が局在化する。
- 電子密度の局所的増加により、 H^+ 、 H_2^+ の電離生成過程が促進される。
- 0.25RF サイクル以後、アンテナ表面電位が負に切り替わることで、アンテナコイルに向けた正イオン熱流束が、電子熱流束に加わる。

本発表では、RF プラズマに対する物理モデルの検証を兼ね、アンテナ損耗機構を理解するための熱流束計算を行った。しかし、計算結果のみでは物理モデルが十分に検証されたとは言えない。同モデルによるプラズマの空間分布・時間変化と、

イオン源分光計測やビーム計測結果と比較することが、RF プラズマモデルを確立する今後の課題となる。

4. まとめ

第 16 回イオン源国際会議 (ICIS) はイオン源分野最大の国際会議であり、今年度は米国 BNL 主催のもと、255 件の研究報告、236 名の参加者が米国ニューヨーク市に集った。申請者には、今年度の ICIS はイオン源の実験結果だけでなく、イオン源の内部で生成されるプラズマの物理機構を明らかにするための解析、シミュレーションに関する報告が増えてきたことが印象深かった。特に、JYFL の ECR イオン源における電子エネルギー分布を理解する実験・理論解析の試みは、従来、経験的手法が主であったイオン源設計を次の段階に前進させるものであると感じさせられた。申請者も、J-PARC イオン源シミュレーションモデルを構築し、その詳細と初期計算結果について ICIS にて発表を行った。本発表については、CERN、SNS、NIFS、IFMIF など国内外の研究機関の参加者から非常に有用なアドバイスをいただいた J-PARC リニアックでは、H- ビーム強度の大強度化（今年度は連続運転におけるビーム電流を 30 mA から 50 mA へと増加）や、イオン源の長寿命化は重要な課題であり、今回の国際会議において得られた知見をもとに、シミュレーションモデルを向上させ、定量的なプラズマ挙動の理解とともに装置設計への応用を行う所存である。

第13回 重イオン加速器技術に関する国際会議 (HIAT2015)

国立研究開発法人 理化学研究所
仁科加速器研究センター
サイクロトロンチーム
坂本 成彦

1. 概要と目的

第13回重イオン加速器技術に関する国際会議 (13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology: HIAT2015) が、横浜ベイエリアにあるワークピア横浜において2015年9月6日から9月11日まで開催された。ホスト研究機関は理化学研究所仁科加速器研究センター、大阪大学核物理研究センター、筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門、放射線医学総合研究所、日本原子力研究機構高崎量子応用研究所である。

この会議は、1973年に英ダレスブリで開催された「静電加速器技術に関する国際会議」に端を発する。1995年の第7回（豪キャンベラ）から重イオン加速器技術に関する国際会議として開催されるようになり、その後、重イオン加速器の幅広い分野において、先端技術開発・応用研究・施設現状報告・将来計画などの議論を活発に行ってきた。

ほぼ3年おきに開催され、2009年に第11回を伊ヴェニスにて開催(参加者129名)、2012年には、第12回がアルゴンヌ国立研究所の主催で米シカ

ゴにて開催された(参加者約80名)。今回、会場を横浜に移して第13回を開催する運びとなった。

規模はそれほど大きくないが、重イオン加速器に焦点を絞った国際的な研究会が他に無い所為もあって、世界の主要なRIビーム施設から活発な発表が行われている。この会議が日本で開催されるのは初めてで、この機会に、基礎科学から応用研究までをカバーする日本の重イオン加速器施設と協力して、重イオン加速器技術とRIビーム加速器施設の発展を図ることとした。

今回、口頭発表数は招待講演を含めて50、ポスター発表は53であった。会議の参加者は120名(企業展示関係者および同伴者を除く)で、うち58名が国外からの参加であった(表1)。

2. 会議で議論された内容

9月6日の夕刻より、レセプション中に研究助成による補助を受けた学生によるポスターセッションを行った。これは、当会議始まって以来、初めての企画である。これによってレセプション参加者も80名を超え、会議前日から盛会となった。

会議に於いて取り扱われる、以下7つの議題

- ・静電加速器
- ・室温・超伝導の線形加速器
- ・室温・超伝導の円形加速器
- ・シンクロトロン及び蓄積リング
- ・RIビーム発生施設
- ・イオン源及びイオントラップ
- ・加速器の主要構成装置とそのシステム

について、初日の9月7日より最終日まで16の口頭発表セッションにて議論を行った。以下、口頭発表のあった論文について、スケジュール順に簡単に報告する。

表1. 国別参加人数

国名	人数	国名	人数
日本	62	スイス	3
アメリカ	11	ロシア	3
フランス	9	インド	3
ドイツ	7	カナダ	3
韓国	5	ポーランド	2
イタリア	5	マレーシア	1
中国	5	オーストリア	1



初日は、本会議議長の開会宣言に続き、ホスト機関を代表して理化学研究所仁科加速器研究センター長の歓迎挨拶、並びに実行委員長からの運営説明により幕を開けた。引き続き、プレナリーセッションとして、Y. Kadi による HIE-ISOLDE のビームコミッショニングの報告、J. Wei による 400 kW のウランビーム供給を目指す FRIB の超伝導線形加速器建設の状況についての報告が行われた。さらに、重イオン加速器の応用・利用の話題として、H. Ohno により、群馬大重イオン医療センターでの最近の治療の状況、P. Schaffer により TRIUMF における ^{99m}Tc など放射性医薬品の製造に関する報告がなされた。

午後は、N. Fukunishi による重イオンサイクロトロンレビューを皮切りに、最近新しい炭素素材を用いた荷電変換膜に関する発表が H. Hasebe により行われた。GANIL の O. Kamalou により近年の GANIL の RI ビーム生成の状況の報告があり、また A. Calanna による LNS-INFN 超伝導サイクロトロンのビーム増強のアイデアの紹介、K. Kamakura による新しい高温超伝導材を用いたリングサイクロトロン設計、I. Ivanenko による JINR の新しいサイクロトロン (DC280) と、W. Beeckman による JINR/FLNR で開発された RI ビームの Fragment Separator についての報告がなされた。

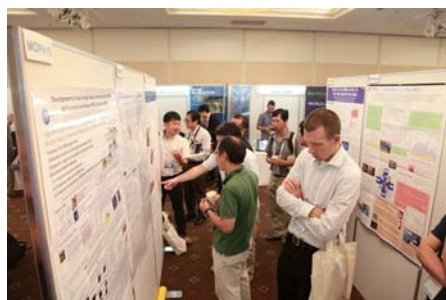
口頭発表に引き続き行われたポスターセッションでは、加速器利用と応用、静電加速器、サイクロトロン、シンクロトロン及び蓄積リング、そして加速器の主要構成機器の発表（ポスター数 27）が行われた。

2 日目は、午前中よりシンクロトロン及び蓄積リングのセッションが設定された。HIRFL/IMP、LEIR/LHC のビーム強度増強に関する報告がそ



れぞれ L. Sun、M. A. Bodendorfer によってなされた。M. Grieser は、MPI での CSR (クライオジェニック静電リング) で Ar 一価ビームの蓄積に成功し、今年の春に最初の実験が行われたと報告した。また、Y. Yamaguchi から RIBF における Rare RI Ring のコミッショニングについての報告があった。続いて、JINR での医療用超伝導シンクロトロン、J-PARC でのウランビーム加速のシミュレーション、神奈川がんセンター (iRock) のシンクロトロンのコミッショニングの状況についてそれぞれ、E. Syresin、P. Saha、E. Takeshita により報告された。2 日目午後のセッションは、RI ビーム発生施設のセッションで、FRIB からは、荷電変換用の液体リチウム膜装置の建設状況の報告があり、GSI からは、L. Groening と P. Scharrer からそれぞれ入射器 UNILAC のアップグレードとパルス化したガスジェットストリッパの紹介がなされた。また、SPIRAL2 プロジェクトの報告として、J-M Lagniel が進捗状況を、P. Anger が建屋の建設プロセスについて説明を行った。続いて INFN の SPES プロジェクトの建設状況と UC_x 標的の製作状況が、それぞれ M. Comunian、A. Andrichetto により報告された。この日のセッション終了後、夕刻より神奈川がんセンターの見学会が開催された。

3 日目は、線形加速器のセッションとなった。Z. A. Conway、M. Hendricks、C. Dickerson、R. Pardo、R. Vondrasek により、それぞれアルゴンヌ研究所 ATLAS 加速器施設での、高電場勾配の低 β 空洞の開発の成功、ATLAS の運転状況、ビームシミュレーションによるフィードバックを取り入れたビーム調整、ビーム強度増強プロジェクト、さらに CARIBU プロジェクトの現状についての報告があった。続いて、TRIUMF の M. Marchetto が ISAC-II 超伝導空洞の性能変化についての報告、





Z. Wang が IMP での ADS プロジェクト用クライオモジュールの大強度 CW ビーム加速試験に関する報告を行い、さらに H. J. Kim と M-S. Won が IBS および KBSI での線形加速器建設の進捗状況について報告した。また、D. Robertson により低バックグランド測定を可能にする地下静電加速器施設についての発表と、P. Gerhard により、UNILAC の CW 化プロジェクトについての報告がなされた。

2 回目のポスターセッションは、RI ビーム施設、線形加速器、サイクロトロン、イオン源のトピックについて 26 の論文発表があった。

4 日目、5 日目は午前中のみセッションで、それぞれイオン源・静電加速器、加速器利用の応用をテーマとした発表が行われた。イオン源のセッションでは、T. Nakagawa による理研 28GHz 超伝導 ECR イオン源の性能とパラメータの最適化に関する発表、J. Y. Park による KBSI で進められている重イオン加速器用のイオン源の報告、M. Okamura による BNL での重イオンのレーザーイオン源の性能に関する報告があった。また、T. Lamy の発表では、次世代の大強度イオン源として 60 GHz のマイクロ波を用いた ECR イオン源の可能性について議論された。静電加速器のセッションでは、N. Lobanov により ANU のタンデムの高圧の安定度測定に関する報告、K. Sasa による筑波大の 6 MV タンデムの建設状況についての報告があった。応用のセッションでは、Y. Iwata により放医研の超伝導のガントリーの開発状況について、また、K. Katagiri により AVF サイクロトロンを用いた ^{12}C の加速について報告された。さらに、誘導加速シンクロトロンを用いた小型重イオ

ン治療施設の設計についての報告がなされた。会議最後のセッションでは 3 本の論文が発表された。R. Hariwal は IUAC で計画されている重イオン加速器のためのコンパクトな診断機器の設計について、J. Choinski からはワルシャワ大学重イオン研究所についての紹介があった。最後に A. Chakrabarti により VECC での RI ビーム発生のための新しい施設 ANURIB についてその進捗状況が報告された。

3. まとめ

本会議の多様な報告の中で、特に議論が活発に行われたのが、ビーム強度増強のために必要な次世代の加速器とその構成機器に求められる性能の向上についてであった。同時に、現代の加速器として、いかにコンパクトな設計、すなわち建設費、運転費の削減につながるような設計で、必要な性能を発揮させるかについても議論された。そのためには、例えば高加速勾配の超伝導空洞の技術、Charge Breeder や次世代の多価・大強度イオン源の開発が必要不可欠で、本会議で議論することはまだまだたくさん残されているという R. Pardo の総括で閉会となった。

次回は、2018 年に、中国近代物理学研究所（蘭州）にて開催される。

謝辞

この国際会議を開催するにあたり、研究助成を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心より御礼申し上げます。

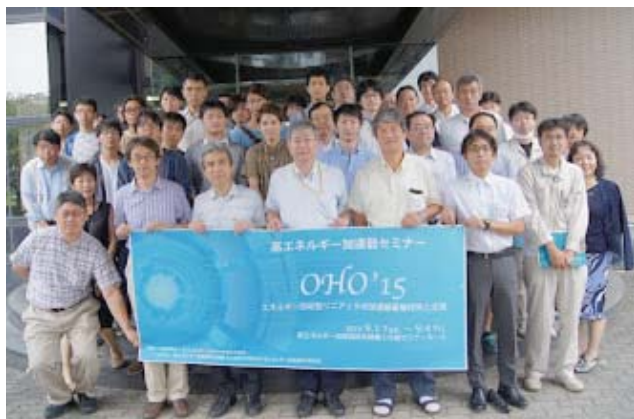
第 32 回 高エネルギー加速器セミナー（OHO'15）報告

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
小林 幸則

1. 報告

2015 年 9 月 1 日～4 日まで高エネルギー加速器研究機構に於いて OHO'15 を開催しました。今年のテーマは「エネルギー回収型リニアックの加速器基盤技術と応用」です。

参加者は全部で 86 名、企業、研究所、大学等、日本各地からの参加者には学部生 3 名も含まれています。



2015 年 9 月 1 日 KEK3 号館前

ERL は 2008 年にも OHO のテーマとして取り上げられています。新しい放射光光源として注目され、KEK に準備室が立ち上がったのを契機として、「次世代加速器技術としての可能性を秘めた ERL、その原理と応用を学ぶ」と題して開催されました。今回はコンパクト ERL (cERL) が 2013 年に完成し、同年、エネルギー回収の総合運転に世界で初めて成功したことを受けての企画でした。

ERL はエネルギー回収によって、一般の直線加速器にはない省エネルギー性、低エネルギービームダンプによる加速器放射化の低減などの特長があり、昨今、世界でエネルギー問題が大きく取り扱われている状況からも、誠に時を得た加速器だ

ということができるでしょう。

そしてその実現には言うまでもなく、加速器の最先端技術が必要です。cERL の建設や運転に実際にに関わり、さらなる研究を進めている研究者が講師となって、ERL の概要から始まり、その物理、ビーム力学、電子銃、レーザーの基礎と加速器への応用、超伝導加速空洞、LLRF、モニター、真空、ERL の応用等を講義しました。

特筆すべきは今年の OHO の「講師陣の若さ」でしょう。一番若い講師はまだ 20 代の青年です。彼は受付で受講者の大学生に間違われてしまうほどで、研究者になって初めての講師を今年の OHO で務めました。他の講師陣も若手研究者が中心となっており、これからの加速器をリードしていく方々です。若さには勢いがあり、熱意があります。講義にも講義ノートにもそれは表れており、実際、今年のテキストは今までの倍の厚さになりました。また講義の後では、参加者からの質問に熱心に答えたり、アドバイスをしている姿がよく見受けられました。



若手講師による講義

例年通り、2 日目の午後はラボツアーがあり、放射光科学研究施設 (PF)、超伝導空洞開発施設 (STF)、そしてコンパクト ERL 開発施設 (cERL)

を見学しました。講義で説明された技術が実際の施設でどのように使われているかを目の当たりに見ることができたと参加者には大変好評でした。



cERL 見学風景

今年の夜話には東芝の内山貴之氏に ERL 应用の一つである EUV リソグラフィ（極端紫外線）の話、また東海大学の盛英三氏には医学利用の話をしていただきました。

2. これからの OHO について

高エネルギー加速器セミナーは 1984 年以来、常に将来の高エネルギー加速器をにう若手研究者の育成と、一般企業の研究者の加速器科学への理解を深めることを目的として、実に四半世紀以上の長きに渡って毎年開催されてきました。日本の加速器科学分野の第一線で活躍中の各分野の専門家が、その年のテーマ毎に最先端の加速器科学を基礎から講義しています。

1984 年という年はトリスタン入射蓄積リング (AR) で電子を 6.5GeV まで加速に成功した年です。7 月にこの成功があり、1 ヶ月後の 8 月に OHO の第一回目、「高エネルギー加速器入門」の講義が行われました。少し長くなりますが、この時のテキストの緒言 [1] をここに一部引用してみましよう。

本書は、昭和 59 年 8 月 27 日－9 月 1 日に、工エルギー物理学研究所で行われる、粒子加速器セミナー“OHO-84”の講義ノートをまとめた

ものです。このセミナーは、特に若い研究者に、加速器の基礎を、できるだけ実際に即して勉強してもらいべき、加速器研究系の一部有志が企画しました。

近年、粒子加速器の進歩は目覚しく、その最高エネルギーは、10 年間に約 10 倍の割合で増加する一方、放射光実験施設やブースター利用施設など、素粒子・原子核以外の分野への加速器の応用も、ますます盛んになりつつあります。しかるに、我が国を含め世界的に、加速器研究者は高齢化の傾向にあり、今後研究者の不足が予想されるところから、若手研究者の育成が急務となってきました。このような事情を反映し、欧米では、サマースクールのような加速器講習会が、近年、頻繁に行われるようになっております。

この加速器セミナー“OHO-84”は、もちろんそのような大掛かりなものではありません。むしろここでは、外国のセミナーが内容的にやや高度であり、言葉や費用に問題のあることを考へ [2]、誰もが気楽に参加し、加速器を納得が行くまで勉強できることに重点を置きました。

引用してみても我ながら少し驚きました。30 年以上前に書かれた OHO の主眼や目的が現在もまるで色褪せて見えないからです。

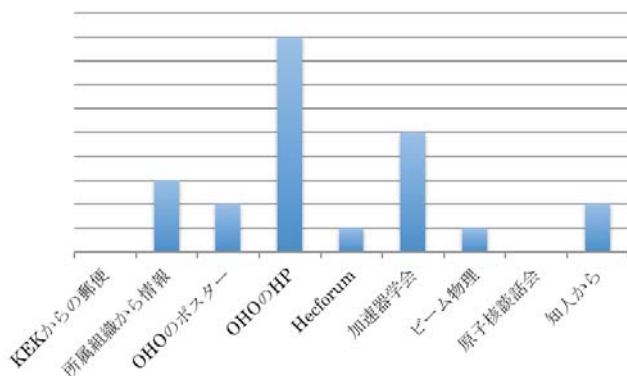
今現在も加速器分野は人材不足に悩んでいます。もちろん加速器研究は飛躍的な発展を遂げ、日本のプロジェクトは日本だけのものではなく国際プロジェクトになって研究者交流も盛んですが、どこも高齢化が進み、研究者不足です。この分野をさらに発展させるためには積極的に若手を育てるしか方法はありません。まずは大学院に入る前の若い人に加速器科学に興味を持ってもらうことでしょう。これは既に KEK では高校生に向けては理系女子キャンプや BELLE Plus があり、学部生にはサマーチャレンジが貢献しています。

OHO はもう少し専門的なことを講義しています。それでは今年の OHO の参加者構成はどうなっているのでしょうか。



グラフ1 OHO'15の出席者の割合

グラフ1を見ると、学生が占める割合が他のスクールに比べると少ないようです。繰り返しになりますが、OHOの講師は世界最前線の現場で活躍中の一流の研究者です。教科書の上の論理ではなく、実際に加速器を自分の手で作り、動かしている専門家中の専門家です。彼らの講義をこれから加速器物理分野で研究しようという若者が聴講しないのは余りにもったいない話です。



グラフ2 OHOの情報をどこから入手したか

OHO事務局では来年からのOHOをより多くの人に知ってもらう必要があると考えています。グラフ2に今年の参加者がどこでOHOの情報を得たかをアンケートに基づいて示しました。我々は今までのOHOの広報のあり方を検証し、さらに有効な手段を模索していく所存です。皆様のご協力をお願い致します。OHOについてのご意見やアイデアを常時受け付けています。加速器奨励会 [3] か筆者 [4] までご連絡ください。

参照

- [1] 1984年OHOテキスト、緒言
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt1.html>
- [2] 原文ママ。旧仮名遣が嬉しい。
- [3] (公財) 高エネルギー加速器科学研究奨励会：
info@heas.jp
- [4] 小林幸則：yukinori.kobayashi@kek.jp

第5回 特別講演会開催報告

1. 開催日時 平成 27 年 10 月 16 日（金）14：00～17：00・・・27 名の参加

2. 開催場所 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. 演 題 等

1) 「半導体向け EUV リソグラフィの現状と展望」

講演者 内山 貴之 氏（株式会社東芝 セミコンダクター&ストレージ社）

【講演要旨】

波長 13.5nm の EUV 光を用いたリソグラフィは、最先端半導体の微細化・高集積化を加速・推進するための有力な次世代技術として開発が続けられている。現在、量産化に向けた最大の課題は光源パワーが低いことである。

そのため、将来技術として高出力化が期待できる FEL 光源への期待が高まってきている。ここでは半導体向け EUV リソグラフィの概要と展望について紹介する。



内山 貴之 氏（株式会社東芝 セミコンダクター&ストレージ社）

2)「エネルギー回収型リニアック（ERL）を用いた高出力 EUV 光源の開発」

講演者 小林 幸則 氏（高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設）

【講演要旨】

高出力 EUV 光源は、次世代における半導体微細加工のカギを握る重要な開発項目である。その性能仕様として、13.5 nm の波長域を中心に約 1% のバンド幅内に、10 kW を超える出力が求められている。しかし、現在までの光源開発においては、まだ 1 kW レベルにも到達しない状況である。

そのため近年新たな EUV 光源として、超伝導空洞技術をベースにしたエネルギー回収型リニアック（ERL）と自由電子レーザー（FEL）を組み合わせ、加速器を用いた方式で 10kW 以上の高出力を実現することが提案されている。

本講演では、これまで高エネルギー加速器研究機構（KEK）で行われてきた ERL 技術開発の現状を紹介しながら、この技術を活かしてどのように高出力 EUV 光源を実現していくのかについて解説する。



小林 幸則 氏（高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設）

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

(公) 高エネルギー加速器科学研究奨励会賛助会員一覧

平成 27 年 10 月 31 日現在

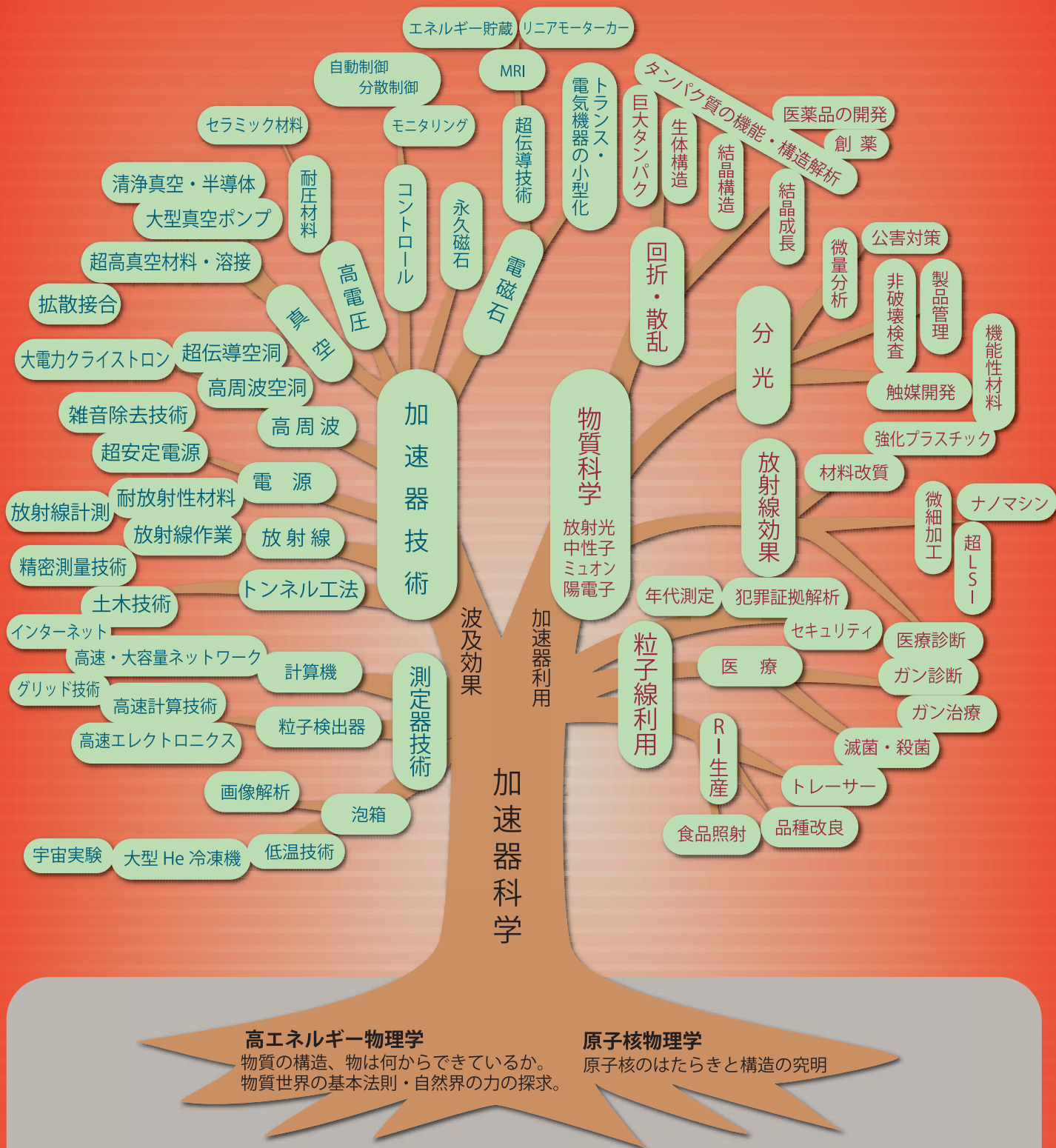
	会員名		会員名
1	(株) I D X	31	(株) 日建設計
2	味の素 (株)	32	(株) 日本アクシス
3	FV イーストジャパン (株)	33	日本アドバンステクノロジー (株)
4	S.P. エンジニアリング (株)	34	日本高周波 (株)
5	エーザイ (株)	35	日本電磁工業 (株)
6	(株) 大阪真空機器製作所	36	(株) 野村鍍金
7	川崎設備工業 (株)	37	V A T (株)
8	(株) 関電工	38	浜松ホトニクス (株)
9	金属技研 (株)	39	日新パルス電子 (株)
10	工藤電機 (株)	40	日立金属 (株)
11	(株) ケーバック	41	(株) 日立製作所
12	小池酸素工業 (株)	42	日立造船 (株)
13	神津精機 (株)	43	富士通 (株)
14	新日鐵住金 (株)	44	武州ガス (株)
15	秀和電気 (株)	45	(有) 双葉工業
16	セイコー・イージーアンドジー (株)	46	(有) マイテック
17	太陽計測 (株)	47	(株) 前川製作所
18	大陽日酸 (株)	48	三菱重工業 (株)
19	(株) 多摩川電子	49	三菱電機 (株)
20	ツジ電子 (株)	50	三菱電機システムサービス (株)
21	(株) 電研精機研究所	51	三菱電線工業 (株)
22	東京ニュークリアサービス (株)	52	(株) ジェック東理社
23	(株) 東芝 電力システム社		
24	東芝電子管デバイス (株)		
25	利根コカ・コーラボトリング (株)		
26	(株) トヤマ		
27	豊田通商 (株)		
28	長瀬ランダウア (株)		
29	ニチコン (株)		
30	ニチコン草津 (株)		

■ 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 高エネルギー加速器科学研究奨励会に対する格別のご協力を頂き、心から厚くお礼申し上げます。
- 広報誌「FAS だより」も公益財団法人に移行してから第 11 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あ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。
- 当公益財団法人の「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/>