

## 会議報告

## 先端加速器科学技術シンポジウム開催報告

山下 了\*

## Report on the Symposium for the Advanced Accelerator Science and Technology

Satoru YAMASHITA\*

## 1. はじめに

2008年2月および9月に「先端加速器科学技術シンポジウム」が開催された。このシンポジウムは高エネルギー加速器研究機構が主催し今後も継続されることが予定されている。当シンポジウムは以下に述べるように、全国の大学・研究機関および関連する幅広い業種の企業等とで連携を深め、加速器科学技術の進展を促す目的のもとに企画された。今回このシンポジウムの報告をさせていただく機会を頂いたが、シンポジウムの具体的な内容に入る前に、釈迦に説法と承知の上で、このシンポジウムの目指す方向、理念について少し触れることにする。

加速器が自然を解明する装置として発明されて以来100年、宇宙・素粒子の様々な性質が明らかにされてきた。いまやTeVエネルギースケールでの探求がまもなく始まり時間・空間の概念に迫る新しい物理現象発見の期待がますます高まっている。一方で加速器は物質構造や生命といった多様な現象の解明に欠かせない装置となっている。分子構造・配列、そして電子構造がどのようにマクロの世界の物性を支配するのか、という研究はいままでにない物質像、生命像を明らかにしてきた。可視光では全く見ることでできない世界を「見る」ことができるようにする加速器と粒子線計測装置はますます必要不可欠なツールとなってきた。応用例には、医療、新しい薬剤の創出、高機能材料の開発、機械内部非破壊検査、環境・エネルギー分野への利用などがあげられる。

このように加速器科学は日本が世界をリードするひとつの分野であり、またこれほど多種多様な分野・業種が融合するものも珍しい。この力を結集すればとてつもなく大きなものに育てることができると期待され

る。更なる飛躍のために、加速器ビームの1)エネルギー増強、2)強度増強、3)時間分解能の向上、4)空間分解能の向上、5)そしてそれを計測するための計測器技術、以上に関して技術の先鋭化を行っていく必要がある。私たちはこの先鋭化された加速器を「先端加速器」とよぶことにする。

基礎科学と産業における利用可能性が加速器関連技術の進歩により飛躍的に拡大する一方、多額の経費を必要とするこうした大型科学研究の推進には納税者である国民の支援、研究者から社会への積極的な発信・貢献が不可欠である。しかし「加速器」という言葉自体、そしてそこから広がっている世界や先端技術の進歩に関してはまだまだ周知が行き届いていないのが現状である。いわんやその未来を担う「先端加速器」の世界に関しては実際に研究に携わる多くの研究者・技術者の中ですら全体像や方向を理解し合っているとは言えないかもしれない。

以上の観点から高エネルギー加速器研究機構を中心とするシンポジウムの企画会議が立ち上がり、加速器利用の現状、先端加速器の目指す科学と技術、そのための技術開発の動向、産業界への技術移転や社会との連携を深め、医療・環境・エネルギーといった社会的・世界的な問題の解決へも積極的に取り組むことを新たな柱に据えたシンポジウムをシリーズで開催することとした。

## 2. 第1回シンポジウムおよび、その発表内容

第1回は2008年2月27日、つくば国際会議場において、「加速器科学が創る21世紀テクノロジービッグバン」と題し開催された。全国の大学や研究機関、企業から220名を超える出席者を集め、加速器

\* 東京大学素粒子物理国際研究センター  
(E-mail: satoru@icepp.s.u.tokyo.ac.jp)

技術の高度化、産業応用を通じた社会への展開について、先端加速器科学の基幹技術である「超伝導加速器」「ナノビーム」「レーザー」に焦点を当てた講演、及びポスターセッションが行われた。参加者の約半数が企業から、約半数が大学・研究機関からであり産学連携シンポジウムの初回にふさわしく大変盛況であった。シンポジウムは、文部科学省量子放射線研究推進室の林室長の挨拶で始まり、加速器の分野から広がるこの産学連携の新しい動きへの期待が示された。

## 2.1 基調講演

続いて、鈴木厚人・KEK 機構長による「基礎科学は役に立つのか？」と題した基調講演があった。基礎からの変革である本当の「イノベーション」、先端加速器にはその源と力がある。大きな国費を投じて行われる大型基礎科学研究において、より積極的に「基礎科学を役に立てる」との立場に立つことの重要性を強調。その役立ち方には、直接に研究が実用化されることだけではなく、間接的効果、波及効果、思考の育成など、様々な面があるとした。産学連携に関しても、産学が緊密に連携しなければ成り立たない分野であることを逆に利点ととらえ、従来型でない産学連携がこの先端加速器の分野から創られ、新しいモデルケースとできるようにしたい、その一環としての本シンポジウム・シリーズが大いなる第一歩となることを期待する、とした。

## 2.2 超伝導が拓く新しい世界

午前の部では、先端加速器科学技術の一つの基幹技術である「超伝導加速器」によって広がる物質・生命そして環境分野に関する2つの講演があった。

まず、河田洋氏（KEK・物質構造科学研究所）による、「超伝導加速器と生命科学、材料科学」と題する講演では、放射光において従来の蓄積リング型を超えた高品位電子ビームの実現にはリニアック型に移行することが必須となっていることが紹介された。超伝導加速空洞を用いれば、MHz, GHz の繰り返し周波数が現実のものとなり、リニアック型の加速器でCW運転が可能となること、放射光生成の後に品質の落ちたビームのエネルギーを次のビームの加速に用いる「エネルギー回収型」の新型放射光 ERL (Energy Recovery Linac) 計画の紹介を行った。ERL 方式により、エミッタンスにおいて、また放射光パルス巾に関しても現状から3桁の飛躍が期待され、また多くの放射光ラインを併設できることから多くのユーザーが物質・生命科学やタンパク質・素子などの研究を同時に遂行できるようになる。SPring-8 で建設が進む超高輝度コヒーレント X 線をもたらす X 線自由電子

レーザー施設と相補的なものとなる。

次に、佐々敏信氏（日本原子力研究開発機構 J-  
PARC センター）により、「超伝導加速器と環境」と題する講演があった。高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離するとともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換する分離核変換技術に関し、歴史と世界動向の解説から始まり、ひとつの方式として加速器駆動核変換システム (Accelerator-Driven System) の紹介があった。このシステムで重要な要素のひとつとなるのが「超伝導加速器」による大強度の陽子を高効率で加速することである。陽子は Pb-Bi との核破砕反応で大量の中性子を発生。その中性子によりマイナー・アクチノイドを核分裂反応で核変換。さらに核分裂で発生した中性子も核変換に使用。核分裂の連鎖反応で、1 個の中性子を 20 個に増倍。核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給を行う。このシステムでは加速器を止めれば核分裂の連鎖反応は停止するため、安全性が高いといえる。超伝導加速空洞技術の環境への応用として期待が高まっている。この技術が完成すればエネルギー・環境問題の解決に大きな貢献となるだろう。

## 2.3 超伝導加速器の技術開発について

午後の第1部は午前を引き続き、超伝導加速空洞の製造に関し3つの講演があった。まず、山本明氏（KEK・共通基盤研究施設）による「超伝導加速器技術」では、超伝導磁石技術と超伝導加速空洞技術の発展に関し、CERN での LHC 計画および J-PARC 計画におけるその役割、その開発と進展状況について報告があった。最後に、ILC 計画にむけた産業界との一層の開発協力の必要性が強調された。

次に、「超伝導加速空洞の工業化」と題して長島是氏（三菱重工業㈱神戸造船所技師長）による講演が続いた。超伝導加速空洞は超伝導加速器の心臓部と言えるが、実際の製造を行っている現場の観点から各製造工程に必要な技術と課題が示された。超伝導加速器の製造には精密非鉄製品、高真空部品としての技術・管理手法が必要である。その技術・管理手法は、加速器用コンポーネントだけでなく、先端装置・製品等の幅広い分野の製造にも応用されているということを示した。ILC 計画用超伝導空洞の量産化には、各項目で解決すべき課題があり、100 台規模の空洞先行試作を行って製造技術・工法を確立するための量産化 R&D の早期立上を期待するとした。

更に、浅野克彦氏（日立製作所電力グループ MDA 推進本部長）による「超伝導加速器用低温システム」

に関する講演があった。超伝導加速器において加速空洞と並ぶ基幹要素技術である冷却装置「クライオモジュール」の基礎技術上の課題として、クライオスタットの静的負荷、冷却収縮及び、圧力損失があり、また工業技術上の課題としては、0.05 mm を目標精度とする機械加工精度、溶接部における耐リーク性能の向上、0.1 mm 以下の設置制度の確保、断熱真空容器等における  $50 \mu\text{T}$  を大幅に下回る残留磁場の達成が必要であることが指摘された。その上で、研究所・大学と企業の連携による、技術の「ブレイクスルー」と「改良」の双方による持続的かつ段階的技術開発を先端加速器科学技術プロジェクトの進め方のひとつとして提案した。企業としては性能向上と品質のばらつきの低減との最適化が課題であり、その解決により技術を通じて社会に貢献するスキームを提案した。

昼食のブレイク及び、午後の第1部と第2部の間のブレイクでは、ポスターセッションによる27件の発表が行われた。

#### 2.4 ナノビームとレーザーが拓く新しい世界

午後の第2部は栗木雅夫氏（広島大学大学院先端物質科学研究科）による「ナノビームテクノロジー」と題する講演により再開された。ナノビームとは原子スケールでの物理的理解、制御、技術開発の総体としての「ナノテクノロジー」の派生概念である。空間的及び時間的に制御された量子ビームのことを「ナノビーム」と呼ぶ。ILCやERL、ナノテクノロジーなど、様々な場面で重要な役割を担う。特にナノビームのテストファシリティであるATF2はILCの最終収束系プロトタイプであり、世界で最も絞られかつ制御されたナノビームを実現する。ILCにおける高性能偏極電子源の開発、ERL用DC電子銃の開発等が紹介された。2007年度に発足した広島大学量子ビーム開発センターにおける高性能光電陰極開発も紹介された。

ナノビーム関連として、引き続き上坂充氏（東京大学大学院工学系研究科）による「高性能電子線源とその拡がる未来」の講演が行われた。レーザーと高周波技術の融合したレーザーフォトカソードRFガンにより、病院で使用可能なサイズの単色X線源が実現されようとしているとの報告がされた。更に高エネルギー物理学用に開発されたXバンドライナックが非破壊検査など産業用に、また医学用に実用化が進められていることが紹介され、今後も先進小型加速器を活用したX線薬品送達システムの開発を通しての研究開発型医学物理の創成と教育を進めていく方針が話された。

最後に日本原子力研究開発機構関西光科学研究所長・田島俊樹氏による「レーザーが開く世界」と題するレーザーと加速器の掛けあわせによる光核物理や相対論的工学などの新しい物理領域の開拓の講演があった。数センチメートルでGeV以上の加速エネルギーを達成するレーザー航跡場加速は、一般にレーザーのパルス長が短ければ短いほど質の良い電子ビームを生む。レーザーの大強度化と相まって、適切な加速条件を整えば100 GeVクラス、そして1 TeV領域も遠くない将来達成されると考えられる。さらに、この原理を応用することにより小型の医療用陽子ビームの生成の可能性も示唆された。

### 3. 第2回シンポジウム発表内容

第2回のシンポジウムは9月25日、東京の学術総合センター・一橋記念講堂において、「LHCとJ-PARC—始動、世界最強の加速器—」と題して催された。シンポジウムは、KEK機構長・鈴木厚人氏の挨拶で始まった。今回は前回の将来の加速器科学と技術のもととなる現在の最新鋭の加速器ということで、ちょうど稼働を開始したばかりのLHCとJ-PARCに関して、共同で先端加速器技術を開発している産業界や一般の方々にそれらの計画の概要とそれらを支えている技術を紹介することを目的として開催された。全国の大学や研究機関、企業及び一般から約180名の参加であった。

#### 3.1 LHC

最初の講演は小林富雄氏（東京大学・素粒子物理国際研究センター）により「LHCから期待される物理成果」と題し、実験とその目指す物理が紹介された。LHC加速器はスイス・ジュネーブに位置するCERNが保有する世界最大の加速器である。その前身の電子・陽電子衝突のLEP加速器で建設した周長27 kmのトンネルを再利用し7 TeVの陽子と陽子を衝突させる。LEP終了の2000年以降LHC加速器コンポーネントのインストールが行われ、総建設費は約5000億円。9月10日first beam周回に成功したが、直後の14日にヘリウムガスの流出事故により、実験が停止され、再開は来年春以降にずれ込んだ。その目指す物理の一つは標準理論の中で唯一未確認のヒッグス粒子の探索である。LHCの前身であるLEP実験などでこれまでの素粒子理論を超える物理も見えてきている。この新しい基本法則の最有力候補である超対称性粒子もLHC実験において発見の可能性がある。これは宇宙観測で発見され長年の謎である正体不明の暗黒物質「ダークマター」の有力候補でもある。さらに、

4次元を超えた時空構造の解明, LHCによるマイクロ・ブラックホール生成などの可能性についても説明があった。

次に山本明氏(KEK・共通基盤研究施設)により, その世界最大の加速器LHCを支えた日本の技術の概観が紹介されたのに次いで, 目黒信一郎氏(古河電気工業株式会社, 研究開発本部・企画部担当部長)による「LHCを実現させた超伝導線材」の講演となった。LHC加速器の最大の基幹技術は陽子の軌道を精密に曲げるための超伝導磁石である。これが27 kmの全周にわたり連なっている。超巨大な心臓部である。LHC加速器におけるダイポールマグネット用超伝導線材の製造に関してCERNから以下の品質要求があったことが明かされた: ダイポール磁場均一度と超伝導線材への要求, 超伝導線材量産製造時の品質管理, 超伝導線材量産製造時の納期管理。これらに 대응するため, 高充填率・高剛性のラザフォード型成形撚線を採用し, シングルスタック技術, 銅比制御技術, Sn-Agメッキ技術, 高精度撚線技術によってそれらを達成した。結果, 世界最速で要求項目を達成しつつ量産を完了することとなり, 2003年, 「LHCゴールデンハドロン賞」を受賞している。その達成には「同じ船の乗員である」とのCERNとの信頼関係の構築が不可欠であった。

また, 同年に同じく「LHCゴールデンハドロン賞」を受賞している株式会社IHIから吉永誠一郎氏(機械事業本部・回転機械事業部・圧縮設計部主査)が「LHCを支える世界最大容量の冷凍機システム」と題する講演を行った。LHC加速器に用いられる超伝導磁石は1.8 K(約-271°C)まで冷却せねばならない。「極低温ヘリウム冷却設備」は, この超伝導磁石の冷媒である液体ヘリウム温度を下げるために用いる。IHI社はリンデ社とコンソーシアムを組み, システムの要となるコンプレッサ(超低温及び常温コンプレッサ)を担当, コンソーシアムリーダーとしてプロジェクト全体をマネジメントした。同社は本プロジェクト全体の遂行能力および極低温ヘリウム冷却設備初ユニットの品質, 性能, コスト, 納期と併せて, IHIが長年にわたって蓄積してきた最先端極低温回転機械技術の結集である低温排気圧縮機の性能を特に高く評価され受賞にいたっている。

### 3.2 J-PARC

第2部は「J-PARCで期待される中性子科学」と題して, 池田進氏(KEK・物質構造研究所)による, J-PARC加速器の紹介から始まった。東海村に建設中であったJ-PARCでは, 第1段目の加速器である

ライナックから入射された陽子ビームを, RCS陽子シンクロトロンにより予定通り3 GeVまで加速, 物質・生命科学実験施設に設置した核破砕中性子源に入射する試験を行い, 5月30日, 核破砕反応による中性子発生に成功した。講演では, J-PARCにより始まる中性子の本格研究と, その産業利用, 特に医療や材料開発など暮らしに密着した分野での利用の促進が強調された。中性子の利用が本格化すると水素など放射光では捕らえきれなかったものが「見える」ようになる。産業利用にとって非常に大きな一歩となるだろう。(なお, 同シンポジウム開催の翌日, 9月26日には物質・生命科学実験施設(MLF)において, ミュオンビームの発生にも成功したことを付記する。)

続いて, 「J-PARCの世界最強パワーを支える高周波源」として林健一氏(東芝電子管デバイス株式会社電力管技術部長)による講演があった。同社は1915年国内初のX線管を開発して以来, 研究機関との共同開発により, 508 MHz/1.2 MW連続波管や2.8 GHz/100 MWパルス管, 5.7 GHz/50 MWパルス管, そして11.4 GHz/50 MWパルス管等, さまざまな周波数で世界最大級のクライストロンを商品化し, 高効率, 高利得を達成してきた。また, 出力窓に施したマルチパクタ放電抑制のチタンコーティングで大電力性能を実現し, また自社開発の長寿命高電流密度カソードを採用するなどの特長が紹介された。

最後にJ-PARCに関連し, 広田克也氏(株式会社日本中性子光学代表取締役)による「中性子ビームラインを支える高分解能デバイス」の講演があった。J-PARC物質生命科学実験施設で使われる各種中性子デバイスが紹介された。特に中性子線源, 中性子ミラー・レンズ, 検出器及び検出器回路等の発展は著しく, 測定精度の大幅な向上につながっていることが紹介された。

### 3.3 量子ビーム基盤技術開発プログラム

シンポジウムの最後に, 先端加速器技術の最近の動向を伝える講演として, 浦川順治氏(KEK・加速器研究施設)による「量子ビーム基盤技術開発プログラム」に関する報告があった。同プログラムは平成20年から24年までの5ヵ年の次世代量子ビーム採択課題である。その目的は, 超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発であり, 小型(全長10 m以下), 準単色X線(エネルギー幅1%以下), 高フラックス(小型常伝導X線源の100倍), 高輝度(2.5世代放射光施設級の輝度), 極短パルス(フェムト秒)の実現である。それらの実現のために, 次の4つの基盤技術開発課題を掲げている: 1)大強度電子

ビーム源, 2) 超伝導高周波加速技術, 3) レーザーパルス蓄積, 4) 電子ビーム・レーザーパルス衝突技術の高度化。超伝導加速は, 大電流ビーム化と高品質ビーム維持に必須の技術であり, 超伝導高周波加速器の小型化と信頼性向上により, 先進医療, 物質構造解析, 核燃料廃棄物処理等への利用展開が期待できることが強調された。

#### 4. 終わりに

今後も本シンポジウムは幅広い先端加速器技術の中から具体的なテーマを選んで, 回を重ねて行く予定である。さしあたり次回は先端加速器技術の医療応用を3月頃に予定している。まだ2回であるが, シンポジウムの感想は, 冒頭で述べたように「先端加速器」の

持つ将来の可能性は膨大な物であるとともに, それを一つずつ着実に実現していくためには全国の大学・研究機関と産業界の夢の共有はもとより, 現実の状況の相互理解とこれまでにない新しいスタイルの緊密な連携が必要だということである。今更のようであるが, 加速器科学の世界が実に多くの方々の知恵と努力があってはじめて成し遂げられる世界であることを痛感させられたが, ここから生まれる将来の可能性もとてつもない物であることも実感できた。今後ますますこのシンポジウムが意義深いものになることを願っている。

最後に本報告をまとめるに当たって本シンポジウムの実施世話人を努めていただいている KEK・素粒子原子核研究所の藤本順平氏には的確な情報をいただいた。ここに厚く感謝の意を表す。