

## 会議報告

## SATIF12 報告

佐波 俊哉<sup>\*1,2</sup>・平山 英夫<sup>\*1</sup>

## SATIF12 Report

Toshiya SANAMI<sup>\*1,2</sup> and Hideo HIRAYAMA<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

SATIF12 (The twelfth meeting of the task force on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities) は2014年4月28日から30日まで米国フェルミ国立加速器研究所において開催された。この会議の目的は、(1) 加速器遮蔽及びその関連分野の専門家の情報交換を促進すること、(2) この中で、国際協力が有用である項目を探ること、(3) 特に重要な項目について進展を得られるよう作業を行うこと、である。第1回会合が1994年の米国アーリントンで行われてから、約2年おきに米国、ヨーロッパ、アジアの順で開催されており、前回は2012年に高エネルギー加速器研究機構で行われた(表1)。

参加者は登録者ベースで66名であり、内訳は米国から37名、ヨーロッパから16名、アジアから12名であった。Fermilab, SLAC, J-lab, MSU, CERN, ESS, GSI, PSI, DESY, KEK, JAEAなどの大型加速器またはその建設計画を有する研究施設の遮蔽設計、放射線安全管理に携わるスタッフと、FLUKA, MARS, Geant, PHITS, MCNPXなどの高エネルギー放射線輸送コードの開発者が一同に会するという点で特色のある会議である。なお、本会議には大型放射光施設からの参加者はあまり多くないが、同じく約2年おきに開催される、RADSYNCH (International Workshop on Radiation Safety at Synchrotron Radiation Sources) という放射光施設を中心とした会議がある。RADSYNCHは

表1 History of SATIF meetings

	Date	Venue
SATIF12	28-30 April 2014	Fermilab
SATIF11	11-13 September 2012	KEK
SATIF10	2-4 June 2010	CERN
SATIF9	21-23 April 2008	ORNL
SATIF8	22-24 May 2006	PAL
SATIF7	17-18 May 2004	Sacavém, Portugal
SATIF6	10-12 April 2002	SLAC
SATIF5	18-21 July 2000	Paris-France
SATIF4	16-17 September 1998	Knoxville, Tennessee, USA
SATIF3	12-13 May 1997	Tohoku University, Sendai, Japan
SATIF2	12-13 October 1995	CERN, Geneva, Switzerland
SATIF1	28-29 April 1994	Arlington, Texas, USA

直近では2013年5月にBNLで開催されており、次回は2015年6月にDESYで開催予定である。

KEKでは大型加速器及び放射光施設の双方を有することから、どちらの会議にも概ね1～2名が出席している。会議では、施設の現状や計算コードの開発状況、ベンチマークデータや相互比較などによるコードの検証などの報告を行い、他

\*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: toshiya.sanami@kek.jp, hideo.hirayama@kek.jp)

\*2 総合研究大学院大学 SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

施設との情報共有を図っている。

今回の SATIF12 では, (1) Source Term and Related Topics, (2) Induced radioactivity, (3) Radiation Shielding, (4) Medical Accelerators, (5) Status of Codes and Data Bases, (6) Code Benchmarking and Inter-comparison の 6 つの口頭セッションとポスターセッションが設けられた。以下ではそれぞれのセッションに於ける発表内容のあらましの紹介を行い, 最後にまとめについて述べる。

Web page (<http://indico.fnal.gov/event/SATIF12-14>) には発表資料がまとめられているので, 詳細についてはこちらを適宜参照願いたい。

## 2. 各セッションでの報告の概要

### 2.1 Source Term and Related Topics

このセッションでは CERN, J-PARC, DESY, Fermilab, SLAC, Indiana 大学から各 1 件の報告があった。

CERN からは高エネルギー加速器周辺で生成する混合放射線場における電子回路部品の耐性試験のための照射場, CHARM が, CERN-PS の東実験室に構築されたことと, その照射場の特性と FLUKA コードによる放射線安全評価について報告があった。

J-PARC からは昨年 5 月のハドロンホールに於ける事故のあらましと, その環境影響についての報告があった。

Fermilab からは mu2e 実験のための共鳴取り出し部におけるビーム損失に起因する Sky shine の影響を, 取り出し部のビームロスモデル化した MARS コードによる 3 次元モンテカルロ計算で推定した報告があった。

DESY からは FLASH の運転に伴う放射線線量の測定を, プラスチックシンチレータと減速型中性子検出器を組み合わせる検出器について報告があった。この検出器は加速器のビームの時間情報を利用し, シンチレータに誘導された短半減期放射能を測定することにより, 数え落としの影響を抑えたユニークなものである。

SLAC からは, LCLS の FEL ビームと大出力レーザービームを組み合わせた実験で使用される  $1.8 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  のレーザーが,  $100 \mu\text{m}$  厚みの銅に照射された場合の線量率の実測と FLUKA コー

ドによる計算の評価が示された。今後  $2.0 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  までの計画があることが報告された。

Indiana 大学からは, Fermilab で行われている Booster Neutrino Beam を用いた Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering 実験において主要なバックグラウンドとなる高速中性子の測定についての報告があった。

### 2.2 Induced radioactivity

このセッションでは MSU, INFN, ELI, Darmstadt 大学, IBS (Institute for Basic Science, Korea), PSI, J-lab から各 1 件, CERN, Fermilab から 2 件の報告があった。

CERN からは LHC 加速器を構成する様々な材質及び遮蔽材料について, 放射性廃棄物の検討を目的とした, 照射実験による生成放射能の実測値と, トンネル周辺の土壌中の生成放射能 (トリチウム, ナトリウム 22) について報告があった。

MSU からは Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) の放射線安全設計について, MARS コードによる土中の生成放射能, 漏洩線量, 水と空気放射化の検討について報告された。

CERN からはもう 1 件, 陽子加速器での放射化量予測のための ActiWiz というプログラムについて, その紹介と遮蔽計算用モジュールの組み込みについて報告があった。このプログラムは FLUKA コードによる計算結果に基づく決定論的手法を用いているために極めて短い時間で結果を与えることが示された。

INFN からは European ISOL (EURISOL) のための INFN のプロジェクトである Selective Production of Exotic Species (SPES) で RI ビームを作るために使用予定の UCx ターゲットについて, 8 kW の陽子ビームで 2 週間照射した後に一時保管を行う際の, 周囲の線量率を FLUKA コードで計算した結果と, これに基づく効果的な収納の方法に係わる検討が報告された。

Extreme Light Infrastructure (ELI) からは, 施設の紹介と FLUKA コードによる遮蔽設計の例, 放射化による残留放射能と材質との関係についての計算結果が報告された。

Fermilab からは NuMI の Decay pipe 内に生成する放射能の MARS コードによる計算と実測の比較が報告された。 $^7\text{Be}$  や  $^{22}\text{Na}$  等の生成された場所にとどまる核種はよい一致が得られたが,

トリチウムのような動きやすい核種については、実測の値が下回った。

また、もう 1 件の Fermilab からの報告では、Main injector の Hands-on-maintenance において放射化量を正確に定量する必要があり、トンネル内に銅と鉄試料を設置し生成核種をビームロスモニターの値を基準として定量した。生成核種から、Mn 同位体の他に、 $^{51}\text{Cr}$  と  $^{59}\text{Fe}$ , Sb の同位体が短期の線量率減衰に寄与があることがわかった。MARS コードで生成放射能を計算し、測定値と比較したところ、よい一致が得られていた。

Darmstadt 大学からは Hands-on-maintenance を可能とするビーム損失の上限が陽子ビームの  $1\text{ W/m}$  に対してウランビームの場合にどのような値になるかについて、エネルギーごとに FLUKA コードによるシミュレーションにより検討した結果が報告された。

IBS からは韓国での重イオン加速器施設に設置される予定の中性子照射施設の設計について、PHITS コードと MCNPX コードによる計算結果の報告があった。

PSI からは Swiss Spallation Neutron Source (SINQ) の鉛ターゲット内での予想外の Po 生成について、最新版の MCNPX コードで核子-核子反応モデルが改良されたことにより放出される高いエネルギーの三重陽子による反応から生成されることが明らかになったとの報告があった。

J-lab からは数 GeV の電子ビームから生成される薄いターゲットの放射能の測定値について、電子と原子核の直接反応を考慮に入れることで計算値の再現性が改善することが報告された。FLUKA コードに反応を組み込み、実験値との比較が示された。

### 2.3 Radiation Shielding

このセッションでは IST, CERN, ANL, KEK から各 1 件, ORNL, ESS (European Spallation Source), PAL (Pohang Accelerator Laboratory) から各 2 件の報告があった。

ORNL からは Spallation Neutron Source (SNS) の遮蔽設計を MCNPX コードで行った結果について報告があった。この中では中性子ビームライン遮蔽の他に、加速器周辺の遮蔽設計や、放射化の評価についても含まれていた。

ORNL からはもう 1 件, MCNPX コードの計

算値の収束を早めるための分散低減 weight window のパラメータを決定論的コードで生成する方法を、SNS の中性子ビームラインの遮蔽設計に適用した結果が報告された。

European Spallation Source (ESS) からはプロジェクトの概要と放射線安全設計の基準とビーム損失, MARS コードを用いた導波管貫通口, 非常脱出口, Sky shine 等の評価結果が報告された。

ESS からはもう 1 件, MCNPX コードを用いた, RFQ, DTL, MEBT, Target Monolith からの漏洩線量評価について報告があった。この中で低エネルギー陽子加速器の設計の場合には、 $^{12}\text{C}$  と  $^{13}\text{C}$  のような核反応閾値の同位体による違い、また閾値の正確なデータ化について問題点が指摘された。

IST からは ISOL 手法を用いた RI ビームの生成施設に於ける遮蔽設計について、EURISOL と ISOLDE, HIE-ISOLDE を例に FLUKA コードを用いた結果について報告があった。

CERN からは HIE-ISOLDE 施設の概要と、Post acceleration section における遮蔽設計について報告があった。主な線源は空洞のダークカレントによるものであり、その漏洩線量について FLUKA コードにより見積が行われた。

ANL からは Argonne Tandem Linear Accelerator System (ATLAS) の Booster のアップグレードに係わる遮蔽の設計と建設の進行状況について報告があった。

PAL からは、重イオン加速器において粒子の電荷量の違いが遮蔽設計に与える影響についての検討が報告された。これまでの遮蔽設計用コードは、重イオンはフルストリップであるものとして輸送されてきたが、RI 加速器の設計では必ずしもそうでない場合が多く、これを考慮して二次粒子による線量分布の検討を行う必要があるというものである。

KEK からは現在建設中の SuperKEKB factory に於けるビームロス評価と、空気の放射能濃度とバルク遮蔽の検討結果、MARS コードとビームロス分布を組み合わせた実験室の漏洩線量評価についての報告があった。

PAL からは、現在建設中の PAL-XFEL についてビーム損失シナリオ、バルク遮蔽、迷路、ダクトの遮蔽設計及び Sky shine の見積を Shield11 コードと FLUKA コードで行った結果について報告があった。

## 2.4 Medical Accelerators

このセッションでは Fermilab, MSU, NIU, Helmholtz Zentrum München (HZM), UT Southwestern Medical Center (UTSW) から各 1 件の報告があった。

Fermilab からは Fermilab の LINAC で行われている Neutron Therapy の概要について, Photon Therapy との比較, 施設と中性子のエネルギースペクトルを含めて報告があった。

MSU からはがん治療に用いられる粒子加速器について, それぞれの加速方式の現状と比較を行った結果について報告があった。

NIU からは Boron Neutron Capture Therapy の特徴と現状のまとめ, Fermilab の LINAC における適用可能性についての報告があった。

HZM からは陽子線治療施設における二次中性子の線量及びボナーボールによる中性子スペクトル測定についての報告があった。前方方向に非常に高い中性子束が測定された。

UTSW からは Dallas での, 陽子線, 光子線, 重イオン線の複合治療施設の将来計画について報告があった。

## 2.5 Status of Code and Data Bases

このセッションでは ORNL, CERN から各 1 件, Fermilab から 2 件の報告があった。

ORNL からは放射線輸送計算コードのベンチマークデータの整備活動, Shielding Integral Benchmark Archive and Database (SINBAD) について現状の報告があった。

CERN からは FLUKA コードの最近の改良, LHC の実験データを再現する高エネルギー物理モデル, Sixtrack コードとの組み合わせ, 医療応用の進展, ニュートリノ物理への応用について報告があった。

Fermilab からは MARS コードの最近の進展として, ROOT-based geometry の組み込みと低エネルギー陽子断面積の組み込みに係わる検討について報告がされた。

## 2.6 Code Benchmarking and Inter-comparison

このセッションでは KEK, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Michigan State University (MSU), SLAC から各 1 件の報告があった。

KEK からは FLUKA, Geant, MARS, PHITS, MCNPX の各コードについて, 1 GeV, 10 GeV, 100 GeV の陽子が Al, Cu, Au に入射した際に生成する中性子のエネルギーと角度分布を比較した結果について報告があった。

HZDR からは 18 GeV 電子を銅に入射した際に前方方向に放出される muon の分布を FLUKA で計算した結果と, SLAC で測定された実験値と比較の報告があった。

MSU からは PHITS コードの重イオン輸送計算と実験値について 140 MeV/u  $^{48}\text{Ca}$  が Be ターゲットとタンタルターゲットに入射した場合の報告があった。

SLAC からは Geant4 version 10 を遮蔽計算に適用した場合のデータの再現性についてモデル依存性を含めた報告がされた。

## 2.7 Poster Session

このセッションでは Center for Physical Sciences and Technology, Lithuania (CPST), MSU, ESS, J-lab, KEK から各 1 件, HZDR から 2 件, Fermilab から 4 件の報告があった。

MSU からは FRIB の設計のために用いる PHITS と LISE++/COSY コードとの比較について報告があった。

ESS からは核破砕ターゲットの環境影響に係わる報告があった。

J-lab からは薄いターゲットにおける電子直接反応の寄与についての報告があった。

CPST からは ESS のターゲットステーションの遮蔽と誘導放射能についての報告があった。

KEK からは ILC の Pre-Project phase における放射線安全設計の現状と課題について報告された。

HZDR からは MYRRHA プロジェクトの核破砕中性子源の設計についてと, High Power Laser Plasma 実験での放射線遮蔽における線源項について報告があった。

Fermilab からは Energy Production Demonstrator (EPD) concept について, Long-Baseline Neutrino Experiment (LBNE) でのエネルギー付与計算及び遮蔽計算について, 多重クーロン散乱と放射線損傷における Moliere's Screening Parameter の影響についての報告があった。

### 3. 会議全体について

今回の参加者のうち最も多かった所属は会場となった Fermilab で、13 名であった。Fermilab からはコード開発、加速器遮蔽への応用、医療応用などの幅広い内容の報告があり、広く加速器の応用が進められている印象を持った。国単位で見ても宿主国の米国が最も参加者が多かったが、その次に多かったのは韓国の 9 名であったのが目を引く。韓国では現在 3 つの大きな加速器建設プロジェクト、XFEL, RI 加速器, 陽子加速器が進行中であり、これに伴う遮蔽や放射線安全に係わる検討が活発に進められていることがうかがわれる。これらの他にも、ESS, SuperKEKB, mu2e, Euro-XFEL, FRIB, ATLAS-Booster upgrade, ELI など様々な加速器が計画、建設段階にあり、放射線遮蔽設計の検討が行われている。

その放射線遮蔽設計の手法であるが、Radiation Shielding のセッションなどで述べられたように、これまで広く用いられてきた、経験式などに基づく決定論的手法に加え、ほぼ全ての施設で計算コードを用いたモンテカルロ法による手法を取り入れている。モンテカルロ法を用いることにより、より現実に即した体系において遮蔽を設定することが出来る他、経験式を適用した場合に過大評価されがちであったダクトストリーミングや迷路のような場合においても適切な推定値が得られることが期待される。また、近年、並列計算が一般化し、計算能力が大幅に向上したことから、加速器の一部の要素のみならず、その大部分を 3 次元でモデル化し、より広い範囲での放射線輸送計算が行われるようになってきたことも特徴としてあげられる。

この設計結果は運転開始後の線量測定により妥当性が検証される。しかし、この検証についての報告はあまり多くない。ほとんどの加速器が出力に余裕を持って設計されること、実際に運転した際のビームロスが定量しにくいこと、などがその原因と推察される。今後、今回報告された施設が稼働し、実測により設計手法とツールの妥当性が検証され改善されていくことが期待される。

その計算コードの妥当性であるが、最も端的にこれが試されるのが、より単純な体系における実験データとの比較である。これは Code

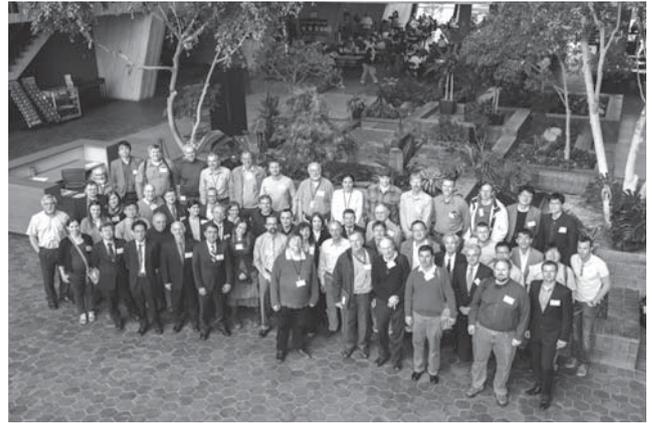


図 1 会議参加者の集合写真

Benchmarking and Inter-comparison, Induced radioactivity のセッションで報告されているが、総じて実験値がある場合にはモデルやパラメータの検証が進み、良好な再現性を示すものの、実験値のない領域でコード同士を比較すると結果が異なるという傾向がある。これは以前の SATIF から継続的に指摘されており、実験値の拡充とともに、コードに使用されているモデルとパラメータの適用範囲と切り替えなどについて検討されていくべきものと考えられる。SINBAD のような良質なベンチマーク課題を収集する活動はこれに資するものと考えられる。

計算コード自体の開発は、利用者と利用範囲の拡大に伴い、精力的に続けられている。これは Status of Code and Data Bases で報告されており、入力や出力において他のコードとの接続利用が進められてきている他、必要とされる応用に応じて適用範囲を拡充しようという試みが継続的に行われている。

まとめのセッションでは、各セッションの Convener からのセッション内容のまとめの報告の他、全体を通じた議論が行われた。その中で、これまでの会議で公表された実験データを元にした新たなベンチマークの必要性、新たに計算コードの結果として得られるようになった Displacement per atom (DPA) の実用上の意義と実験値との確認、プラズマ加速の今後の進展と放射線安全対策、ナノスケールでの放射線輸送計算コードの再現性と確認、ビーム損失シミュレーションと放射線漏洩計算の接続、等の課題について意見交換がなされた。

開催日初日は第1回会合からちょうど20年後となる記念すべき日であった。参加者の顔ぶれも、第1回から参加している各研究所の放射線遮蔽セクションを取り仕切ってきたメンバーが定年近くなり、変わりつつあるなか、定年のない米国のメンバーの高齢化が目立っていた。今後情報交換を

続けていくためにも、継続的な参加を行えるKEKの果たす役割は重要であると考えます。

次回開催は2年後の2016年を予定している。順番ではヨーロッパになり、会場はドイツのドレスデンが有力である。

## 休憩室

### インドの贈り物

ゾウは地上最大の哺乳類。長鼻目ゾウ科に属し、アジアゾウ、アフリカゾウ、そしてマルミミゾウの三種類からなる。長鼻目とは愛嬌がある。マルミミゾウはアフリカの森林地帯に生息し、アフリカゾウの変種の亜種とされてきたが、最近の遺伝子解析の結果、固有種である可能性が強くなった。上野動物園では戦時中に、東京市からだされた猛獣処分命令により多くの動物が殺処分されたが、その中には三匹のゾウも含まれていた。その経緯は、絵本「かわいそうなゾウ」に描かれている。戦後、台東区の子供議会はゾウの購入を提案し、各機関への陳情を行い、それにこたえる形で、篤志家と独立間もないインド政府から合計で二匹のゾウが贈与された。東京港芝浦埠頭に到着したゾウは、歩いて上野動物園に移動したという。交通事情を考え、ゾウの移動は真夜中に行われることとなったが、起きだして来た近所の子供たちや、待ちきれない台東区子供議会の議員達もかけつけ、ともに上野動物園まで行進したという。この年、1949年の日本は敗戦後4年でいまだ占領下であり、インドは独立後2年という、両国にとってまだまだ困難な時代である。上野動物園の象舎横にはネール首相の言葉がきざまれている。「インドの子供達からの贈り物」と。(K)

コラム「休憩室」では、自由な投稿をお待ちしております。  
加速器学会事務局 学会誌「休憩室」係  
E-mail: gakkai@kasokuki.com

