

会議報告

Accelerator Reliability Workshop 2011 会議報告

高雄 勝^{*1}・坂本 成彦^{*2}・佐治 超爾^{*1}

Report on ARW2011 (Accelerator Reliability Workshop)

Masaru TAKAO^{*1}, Naruhiko SAKAMOTO^{*2} and Choji SAJI^{*1}

Abstract

The 3rd Accelerator Reliability Workshop (ARW2011) was held in Cape Town, South Africa on April 11-15 sponsored by iThemba LABS. The ARW provides a venue for the accelerator communities to meet and share their experiences on running reliable facilities. The outline of the workshop, including personal impression, is reported.

1. はじめに

ARW (Accelerator Reliability Workshop) は、加速器の安定運転を念頭にその信頼性向上に関して議論、情報交換を目的に始められた会議で、第1回が2002年に ESRF¹⁾ (グルノーブル)、第2回が2009年に TRIUMF²⁾ (バンクーバー) で開催された。医療応用加速器施設や多くの共同利用ユーザーを抱える放射光施設では、加速器の信頼性はより重要なものとなって

おり、より密に情報交換を行うため2年毎に開催することになった最初として、今年(2011年)4月11日から4月15日にかけてケープタウンの iThemba LABS³⁾ (iTL) で開催された。この研究所は、200 MeV 陽子サイクロトロンを持ち、核物理実験のほか粒子線による治療および放射性医薬品の製造を行っており、加速器の信頼性が重要であるという認識から、今回ホストを引き受けた次第である。

同じ加速器運転に関することを取り扱うワークショッ



図1 参加者の集合写真

*1 高輝度光科学研究センター JASRI, Japan Synchrotron Radiation Research Institute
(E-mail: takao@spring8.or.jp, saji@spring8.or.jp)

*2 理化学研究所 RIKEN (E-mail: nsakamot@ribf.riken.jp)

プとして WAO (Workshop on Accelerator Operation) があるが、これとは隔年で交互に開催されることになり、ARW が信頼性に特化したものと理解される。あるいは、ARW がハード寄り、WAO がソフト寄りと捉えることもできるのではないかと考える。

今回のワークショップには 14 カ国から 78 名の参加者が集まり、地域別内訳は地元南アフリカから 32 名、ヨーロッパから 25 名、アメリカ・カナダから 11 名、アジア (オーストラリア 2 名を含む) から 10 名であった。日本からの参加者は、SPRING-8 から 3 名、放医研、AEC、理研、各 1 名であった (図 1)。

ワークショップ会場となった iTL へは、ワークショップの公式ホテルからバスによる送迎があり、ケープタウンの象徴でワークショップのロゴにもなっているテーブルマウンテンを横目に見ながら 40 分かけて移動した。ホテルのあるウォーターフロント地区は治安も良好で、夜一人歩きしても何の問題もなかった。外務省の渡航情報 (危険情報) によれば、ケープタウンにおいても犯罪件数は高水準で推移しており、特に中央駅周辺では路上強盗に遭う事件が過去には報告されているということであるが、バスの車窓から見る雰囲気からは窺い知ることができなかった。iTL は、郊外にあり敷地内の芝生ではシマウマやインパラが草を食んでいたが、流石にライオンやチーターはいなかった (図 2)。このように人里から隔離された環境であるため、ワークショップの会場としては適していたのかも知れない (図 3)。

今回の会議では、

- History and basic theory of accelerator reliability
- General accelerator reliability
- Utilities
- How we do statistics
- Design for reliability
- Cyclotrons and linear accelerators
- Very large accelerators
- Light sources
- Medical accelerators
- Improving reliability
- Software tools & methods for reliability
- Magnets

という話題でセッションが構成され、50 件の口頭発表と 2 件のポスター発表が行われた。プログラム、発表資料などは web³⁾ からダウンロードが可能になっているので、詳しくはそちらに譲ることとして、ここでは簡単に会議の内容、感想などを報告したい。



図 2 iTThemba LABS. 振り返るとシマウマやインパラがいた



図 3 口頭発表会場

2. 会議報告

iTL 所長の挨拶に引き続き、最初の History and basic theory of accelerator reliability セッションでは、本会議のテーマである加速器の信頼性について、考え方や意識の変遷 (歴史) と、定量的アプローチ (理論) についてレビューがあり、面白い導入であると感じた。歴史については、この会議の第 1 回目を開催した ESRF の L. Hardy より加速器開発の黎明期には高強度、高エネルギーが最重要とされていたが、70 年代より文献にも信頼性という言葉が見られるようになり、重要性が高まっていると説明があり、現在の放射光施設では Availability 98% 以上、年間故障件数は 40 から 100 件程度を達成しているが、加速器による原子炉制御 (ADS: Accelerator Driven System) 等を考慮すると今後もさらなる信頼性の向上が必要であると締

めくられた。理論については SNS の G. Dodson よりレビューがあり, まず信頼性の指標として MTTF (Mean Time To Failure) と MTBF (Mean Time Between Failures) が示された。MTBF は運転時間を故障回数で割る方法で求められることがあるが, 故障率は時間に対して一定ではないため, 故障率を時間関数として定義し, モデル計算するべきと説明があった。ワイブルモデルを用いた計算例が示され, そのような計算を行うアプリケーションも紹介された。また, 予備物品数についても, 使用品数の 10% もしくは 2 個で数の多い方, という考えではなく, MTBF や解析的に求めた交換時期を考慮して検討すべきと提案があった。予備物品数を見積もる商用ソフトウェアも紹介された。

前半のセッションは, 信頼性の向上について改善手法毎に紹介がなされ, ややまとまりが無い感もあるが, 形式にとらわれない自由な構成はこの会議の特色ではないかと思う。

General accelerator reliability のセッションでは, GSI の線型加速器 UNILAC について L. Dahl より報告があった。UNILAC は 1974 年に運転が開始され, 現在まで 2 回の大きなアップグレードを経ている。約 30 年間に経験した数多くのトラブル, 特に機器破損の例が多く報告された。同様なトラブル紹介は他の報告でも多く見られ, 大変興味深く聞いた。このような普段表に出てくることがないトラブル事例を数多く知ることができるのも, 本会議の特徴であると感じた。SLAC の W. Colucho より FEL 施設である LCLS の報告があり, Availability は 94.6% を達成しているが, さらなる Availability 向上のためにワイブル関数を用いた長期的なトラブル解析が必要という認識を持っているとの事であった。

Utilities のセッションでは, いくつかのアプリケーションが報告された。CERN の P. Sollander からはインフラ施設についての事象を共有・分類するための, データベースを用いた事象ドキュメント管理システムが紹介された。単に事象をデータベースに蓄積するだけでなく, 複数の部署(オペレータ, 機器担当者, ユーザー等)が会議等を経て最終イベントレポートを作成する手順が印象に残った。Australian Synchrotron の D. McGilvery よりフライホイール型 UPS とコンデンサー型 UPS を組み合わせて, 蓄積リングの RF と電磁石電源, 冷却設備を瞬時電圧低下より保護する手法が報告された。これほど大規模な停電対策は初めて聞いたため大変驚かされた。

Design for reliability (Control software) のセッションでは, Australian Synchrotron の J. Trewhella より

運転自動化のメリット・デメリットについての報告がなされた。自動化のメリットが入射時間・入射効率の向上を例に示されたが, 逆にオペレータのスキルが未熟となり, 信頼性を損ねる場合があることが指摘された。対処としてオペレータが自動システムの仕組みを理解し, また時には自動機構をオフにした運転を経験することにより, 非常事態にオペレータによる柔軟な対応が可能となり, 信頼性が向上すること。また柔軟な対応を達成するには操作系デザインも重要であるとのことである。ESRF の A. Gotz からは所内で開発された制御システムである TANGO についての報告があった。TANGO は階層性を有する機器オブジェクトと, それを管理する独立動作のサーバープロセス群が特徴である。あるサーバーが落ちてても他のサーバーには影響を与えないため, 高可用性が担保される。この TANGO システムについて, ソフトウェア可用性の測定が行われ, 各サーバープロセスの結果が数値として示された。また, 各プロセスの自動再起動を行うことによって, 可用性が向上したことが測定結果として明らかになった。今後はトラブル分類や解析の効率化によりさらなる信頼性の向上に務めるとのことである。

How we do statistics セッションでは, PSI の A. Luedeke より異なる加速器施設の Availability の比較が示され, 比較の際の注意点が報告された。一般的に, Availability は供給されたビームタイムを予定されたユーザータイムで割った値で表されるが, 施設によってはユーザータイムとは別に確保されたビームタイムや, トラブルで失われた運転時間を取り戻す計画外の運転を行うなどビームロスタイムの扱いが異なり単純に比較できないため, 注意が必要であるとの指摘があった。

Design for reliability (Mechanical, electrical, safety) のセッションでは, SPring-8 の C. Saji 等により安全インターロックの拡張性, メンテナンス性向上のための更新について報告があり, 加速器エリアの段階的な追加・拡張に対応するため, 従来の運転モードによる安全管理から, 加速器エリアによる管理に切替え, 加速器運転形態の変化に依存しない柔軟性に富んだ新しい管理システムへの移行が完了している旨の報告があった。シーメンスの 250 MeV の陽子と 430 MeV/u の炭素を扱う粒子医療加速器施設では予防的なメンテナンス作業を行うために, 蓄積されたセンサーのデータより作成された故障予測のモデルをもとに修理・交換次期を予測するソフトウェアを用いている。例えばあるセンサーについて, ある条件が何日間

続くとどのような障害が出る、というような予測を可能とするようである。Fusion Energy Engineering Laboratory の E. Bargalló より核融合炉内部の放射線環境を模擬するための中性子源加速器である国際核融合材料照射施設 (IFMIF) について報告があり、工学計画段階のようではあるが、加速器施設として Availability 88%以上が要求されている。この要求に対して核融合・加速器施設、電気・電子機器等あらゆる既存データベースを駆使し設計に反映する手法 (RAMI 解析) を採用しているとのことである。

後半は、Cyclotrons & Linear Accelerators, Very Large Accelerators, Light Sources, Medical Accelerators のカテゴリー分けでそれぞれの加速器施設での Reliability に関する状況報告がなされた。加速器施設の Availability についての報告のあった発表についてご紹介する。

Availability について報告があったのは、サイクロトロンを主加速器とする施設ではスイス PSI (Paul Scheler Institute- リングサイクロトロン)、米 NSCL (National Superconducting Cyclotron Laboratory- 超伝導サイクロトロン)、日本 RIBF (Radioactive Isotope Beam Factory- 超伝導リングサイクロトロン)、南ア iThemba LABS (Laboratory Accelerator Based Sciences- リングサイクロトロン)、独 HZB (Helmholtz ZB- サイクロトロン)、医療用として建設された米 BPTC (Burr Proton Therapy Center- 医療用サイクロトロン)。他に、ハドロン加速器として、欧 Large Hadron Collider、米 Fermilab (シンクロトロン)、電子加速器は、日本 SPring-8、中国 SSRF (Shanghai Synchrotron Radiation Facility- 電子シンクロトロン)、米 SLAC (Stanford Linear Accelerator Center- 電子リニアック)、独 TUD (Technische Universität Darmstadt- 超伝導電子リニアック)。加速方式も違えば、施設のミッションも様々で当然信頼性に対する取り組みも違ってくる。それぞれの発表について簡単に内容をご紹介する。

リングサイクロトロン (K590) からの 1 MW 陽子ビームを中性子源 (SINQ) に供給する PSI は、Availability が 2005 年から 2010 年の統計で 84% から 90% と高い水準を維持している。昨年度 84% と低迷したのは、ビームの取り出しに用いる静電デフレクターに関するトラブルで、その原因は、RF 空洞から漏れ出る RF 電磁場により電子雲ができ、ビームチャンバー内を伝わって静電デフレクターのビームパッフルの放電を引き起こし、静電場を不安定にしていたと A. Luedeke により報告された。当研究所では、さらなるビームパワー

の増強を図って入射器、主加速器の加速空洞の改造を進めている。2 台の世界初超伝導サイクロトロン (K1200 MeV, K500 MeV) のカップリング運転で RI ビームを用いた研究を行っている NSCL は、90% 以上の Availability を実現するために、マシンタイムのスケジュールに先立って、計画的、かつ有効なメンテナンスを行っており、2008 年から 2010 年の統計では、80-97% の Availability を実現していると J. Bonofiglio が報告した。また、Quality Managed System を導入し ISO9001:2000 を取得している。世界初の超伝導リングサイクロトロン -SRC- (K2600 MeV) を有する RIBF では、リニアックと 4 台のサイクロトロンによって重イオンビームを 345 MeV/u まで加速する。2006 年のファーストビーム以来、年々その性能を上げている。ビーム供給が中断する最大の原因が SRC の RF 系のトラブルであるとして、改良を重ねた結果、当初 64% だった Availability が 80% まで向上したと N. Sakamoto により報告があった (^{48}Ca ビーム)。今回のワークショップのホストである iTL は、分離セクター型リングサイクロトロンからの 66 MeV, 250 μA の陽子ビームを用いて週末の原子核実験のためのビームタイムを除き、週のうち 5 日間は、陽子線、中性子線治療、および放射性核種の製造を行っている。週末は、ビームを変更して偏極陽子から重イオンビームを用いた原子核実験を行っている。放射性核種製造のため、ビーム強度の増強とビームラインの 2 重化を計画している。月に数回から 10 回の停電が起こるなど商用電力の供給が不安定なため、4.5 MW のバックアップ電源を用いて対応している。Availability は 2002 年から 2010 年の統計で概ね 80%。独 HZB は、1977 年 Hahn Meitner Institut として原子核実験を主たる目的としてきたが、近年 BESSY と統合され HZB として組織を改変し、2007 年より粒子線治療のみを行う施設として再スタートを切った。治療を主たる目的とするがために些細なトラブルが大きなインパクトを与えるとして、入射器のヴァンデグラフのベルトやペレットの定期的な交換、電源、真空ポンプの部品共通化と交換品の整備を行った。その結果 2007 年当時、Availability 95% であったのが、2008 年には 98% まで改善した。

米 BPTC では、年間 700 人を超える患者の陽子線治療を行っている。Availability は、95% を基準としてサイクロトロン RF 共振器や、電磁石の改良を行ったと報告があった。また、患者 (ユーザー) にとっての信頼性とは何かという議論もなされた。

電子加速器については、SPring-8 の M. Takao 等よ

り Reliability 向上のため準備されているバックアップシステムについての報告があった。最近の放射光施設では、積分輝度の向上と放射光強度一定化のため利用運転中もビーム入射を行う Top-up 運転が一般的になっている。このため、入射器の信頼性が重要性を増しており、SPring-8 では電子銃 2 重化などがなされている。線型加速器モジュラータ改良などもあり、利用運転中のトップアップ入射の継続率は 99% を達成している。その他、蓄積リングダウンタイム削減に寄与している予備部品の使用例などの紹介があった。SSRF は 3.5 GeV の蓄積リングを有する第 3 世代の放射光施設であり、2009 年にユーザー運転が開始されている。Availability 低下の主な原因は超伝導 RF キャビティであり、信号回路設計の見直しや、電子機器の温度調整等の対策を施している。Availability は 2009 年 94.6%, 2010 年 95.7% と向上しており、2011 年は 97% 以上を目指している。今後は、RF 冷凍機トラブル時の再起動時間（現在 20 ~ 40 時間）を短縮するため液体ヘリウムの備蓄量を倍にすることや Top-up 運転、FOFB 等が検討されている（L. Yin 等）。1980 年代に建設された TUD の超伝導加速器 S-DALINAC は 130 MeV, 60 μ A の電子ビームを生成するデザインである。本加速器のアップグレードは、修士・博士学生の卒業論文のテーマの一環としてなされており、一生懸命さは伝わるが決して上手とは言えない学生による装置設計の例や、運転上の問題点が R. Eichhorn より紹介された。とはいえ年間運転時間は約 2500 時間である。

最後のセッションとして、磁石の信頼性を上げるための設計手法について、また信頼性を確保するためのソフト、ハード、制御、管理の方法についてのオープンディスカッションが行われた。最後に各研究所において起こる様々な機器のトラブルを集約したデータベース構築のワーキンググループを結成して閉会した。

3. おわりに

この種のワークショップとして、2 年毎 (WAO も含

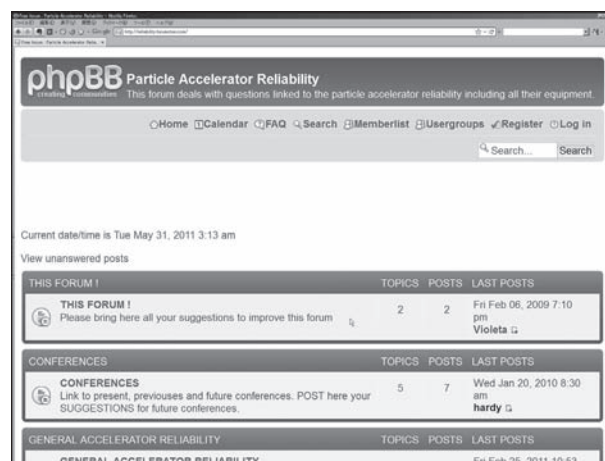


図 4 ウェブフォーラム

めると毎年) の開催は頻度が多すぎる感も否めないが、何処の施設も同じようなトラブルを抱えているような現状を見ると、一堂に集まって議論、情報を交換することは意義があるのではないと思われる。今日のような情報化社会では、今回の発表でもあったように、インターネット上にフォーラムを形成して情報公開しようという動き^{4,5)} (図 4) もあるが、これをプロモートする場としても、まだ暫くはワークショップを続ける必要があるのかなと考える。

次回の ARW2013 は、Australian light source がホストとなってメルボルンで開催されることが決まった。今回に引き続き南半球での開催となるが、加速器運転に関わる方々には是非参加頂き、有益な情報交換をして頂きたいと期待します。

参考文献

- 1) <http://www.esrf.eu/Accelerators/Conferences/ARW/>
- 2) <http://www.triumf.info/hosted/ARW/>
- 3) <http://www.arw2011.tlabs.ac.za/arw2011/>
- 4) <https://sites.google.com/site/particleacceleratorreliability/Home/>
- 5) <http://reliability.forumotion.com/>