

会議報告

第五回 Accelerator Reliability Workshop (ARW 2015) に参加して

白形 政司*

Report of the 5th Accelerator Reliability Workshop (ARW 2015)

Masashi SHIRAKATA *

1. はじめに

2015年4月27日～5月1日にかけて、米国 Knoxville にて Accelerator Reliability Workshop 2015 (ARW 2015) が開催された。かなり直前の参加申請でばたばたしたうえ、2日目からの参加であったのだが、ここで話し合われたことを報告したい。

ARW はその名の通り、加速器の信頼性をどう向上させていくかを主目的として、2002年から開始された。第一回目は2002年2月、フランス・グルノーブルにある ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) での開催である。第二回目の2009年1月 (カナダ・バンクーバー, TRIUMF) までは7年の間が空くのだが、その後は **Table 1** に示すように2年毎の定期開催となっている。

Table 1 ARW これまでの履歴

Name	Date	Venue
ARW 2002	Feb. 4-6, 2002	ESRF (Grenoble, France)
ARW 2009	Jan. 26-30, 2009	TRIUMF (Vancouver, Canada)
ARW 2011	Apr. 11-15, 2011	iThemba (Cape Town, S.Africa)
ARW 2013	Apr. 14-19, 2013	Australian Synchrotron (Melbourne, Australia)
ARW 2015	Apr. 27-May 1, 2015	Crowne Plaza (Knoxville, USA)
ARW 2017	2017	SOLEIL (Saclay, France)

Knoxville はテネシー州の東の町で、今回ホストとなった ORNL (Oak Ridge National Lab.) から車で30分ほどの所にある。空港からの公共交通機関は無いので、会場となる Crowne Plaza のある市街地まではタクシーで約30ドルの移動である。ワークショップは参加総数90名程度で、リニアック、サイクロトロン、シンクロトロンを始め、MYRRHA, ITER 等の原子炉関係の話も聴かれた。青森県六ヶ所村で開発中である、IFMIF 関連の話も出ていたのが興味深い。なお、歴代の ARW の発表資料等は、ほぼすべてが Web からダウンロード可能になっているので、興味のある方は是非一読してみたい。

2. ワークショップの内容

2.1 議論の中からいくつか

このワークショップに参加してまず思ったのは、RAMI 解析という考え方が標準として浸透し

**Fig. 1** IOC (International Organizing Committee) の面々. 右端が LOC Chair の George Dodson 氏

* KEK/J-PARC (E-mail: masashi.shirakata@kek.jp)

ているらしいことだ。RAMIとはReliability, Availability, Maintainability, Inspectabilityの略で、近年製品開発やプラント設計などの分野で信頼性エンジニアリングに使用されている手法である。簡単に言うと、設計において次のような流れを採る。①システムの機能をツリー構造に切り分ける。②故障の仕方およびその影響を調査し、問題となりそうなものを特定する。③信頼性の観点からモデリングを行い、シミュレーションによって稼働率等を算出、信頼性向上に必要な改善点を導き出す。④設計にフィードバックし、必要な信頼性が得られるまで、②から④を繰り返す。とくに②のプロセスはFailure Mode, Effect and Criticality Analysis (FMECA)と呼ばれる。ESSやITER等の、現在設計/建設中の新しいプロジェクトほど、この考え方を取り入れているように見受けられた。

ワークショップ2日目(参加初日)冒頭の、ESS (European Spallation Source) の信頼度設計に関する話から紹介しよう。ESSはJ-PARCと同じ中性子実験施設であり、2014年から建設が始まった。稼働後は、年間2000～3000人のユーザー受け入れを目指している。ESSではトリップ時のビーム停止時間を1分、6分、20分、1時間、3時間、8時間、1日、3日等に細分化して、それぞれ一日当たりまたは一年当たりのトリップ頻度の許容数を仮定して管理する手法をとっている。もちろん、実際のマシンはまだ無いため、モデルによるシミュレーション上での話である。これをFig. 2の様にORNL SNS (Spallation

Neutron Source)の過去の実績と比較¹⁾することで、トリップ頻度の分布に対して妥当な上限値を設定している。ReliaSoft社の商用解析ソフトを採用し、Criticalityを含まないFMEA解析を用いている。じつはワークショップ1日目にFMEA解析が加速器の信頼性向上になぜ有効かというトークがあった。資料は頂いたが、直接話を聞けなかったのは残念である。トリップ頻度が上限値を下回れば設計としては成功であるが、トリップ頻度を特に抑えたいという場合も考慮して、ビームパワーを50%まで下げる様な運転モードも考えているようだ。ただし、その際は10日平均のビームパワーで80%以上を担保することが条件になっている。ESSでは最初の中性子生成が2019年、ユーザー運転開始が2023年、完成が2025年の予定である。

HL-LHCでは、過去の不具合データを基にモンテカルロシミュレーションモデルを構築して信頼性の評価を行っている。最新のモデルは2012年の運転データを反映したもので、Availability-Cost平面上においてメンテナンス等の可用性に伴って増大するコストと装置寿命等の減少するコストを合成し、コストを最小化して可用性の最適値を算出している。LHCではコリメータから飛んでくる数MeVのハドロンシャワーが電子回路に及ぼす影響が問題(Radiation to Electronics問題を略してR2Eと呼称)となっているが、長期シャットダウン中に遮蔽の増強やデバイスそのものの配置変更等の対策を続けてきた。2012年の故障実績から重要度の大きいものを抜き出すと、QPS (Quench Protection System), PC (Power Converter)が、それぞれ31回と14回のダンプを引き起こしており、停止時間もそれぞれ80時間、60時間となっている。HL-LHCでは年間のダンプ回数をそれぞれ9回と4回、対応する停止時間32時間と14時間が目標である。LHCの過去の運転における平均停止時間の目標は4.4時間であったが、2015年以降のRun2, Run3ではそれぞれ3.9時間、3.7時間と徐々に停止時間を減らしてゆき、2025年のHL-LHCではRun中の平均ダウンタイムとして3.4hを見込んでいる。

MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications)は、ADS

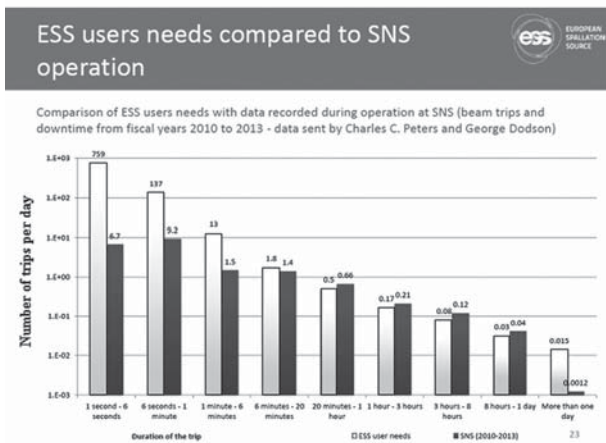


Fig. 2 ビームトリップ頻度の分布。ESSのモデルをSNSの実績と比較している

(Accelerator Driven System) による放射性核種変換を目的としたプロジェクトである。600 MeV, 2.4 MW の大強度超伝導 LINAC により原子炉を駆動し、核廃棄物の減量化を目指すもので、J-PARC の ADS 計画と競合する。MYRRHA では ARW 2011 で示された SNS のモデリングを参考に Fault tree reliability model を構築し、設計の信頼性向上を目指している。目標はかなり大胆なもので、トリップからビーム復帰までの所要時間を 3 秒以内、停止時間 2 秒以上のトリップは 3 ヶ月で 10 回未満を掲げている。

ITER では、2010 年頃からすでに RAMI 解析の手法を取り入れている。今回はインターロックシステムの設計について、報告があった。ITER でリスクソースと考えられているものは、プラズマを閉じ込める超伝導電磁石、プラズマ加熱&燃料導入システム、プラズマそれ自身、真空および冷凍機システム、冷却/加熱水システム、遠隔操作システムである。特に超伝導電磁石は 100 GJ ものエネルギー (LHC の超伝導電磁石全体の 10 倍) を蓄えるため、インターロックシステムの信頼性は非常に重要となる。インターロックでは、その対象とするシステムの複雑さがどの程度かによって適する制御方式が異なる。ITER においては、単純なものであれば速度にかかわらずハードワイヤーで電流ループを組む。中程度の複雑さの場合、速度の要求が厳しければ FPGA、そうでないものには PLC を用いる。高複雑系のインターロックについては、現在 R&D を進めている。設計完成は 2016 年 3 月を予定しており、CIS (Central Interlock System) Ver. 1 は遅くとも 2017 年内の構築を目指す。

いずれの場合でも信頼性の観点から加速器や原子炉をモデル化し、リスク評価と信頼性向上のためのシミュレーションを行っている。このような系統だった設計方式の採用は、確かに有効と思われる。特に開発スタッフの入れ替わりが多い研究所では、効果を発揮するだろう。もちろん、リスクが低いと思われていた高圧直流電源が数年に亘って主要なビーム停止原因になるなど、想定と現実が大きく異なることもあり得るが、今後ますます必須なツールになっていくのではないかと考える。

TRIUMF からは、如何に信頼性の高い設計を

するかの話があった。主に耐放射線に関するもので、素材に対して性能を数値化した Material Index を作成している。じつは J-PARC を含めいくつかの研究所で同様のデータセットを持っているが、単純に一つの指標で比較できる (それで本当に良いかという話はあるが) と使用する側としては便利である。Table 2 に一例²⁾を示す。その他、部品を標準化することの功罪、放射線管理区域内には極力ものを置かないなど、分かってはいるが耳が痛い話があった。

ワークショップ 4 日目、木曜日午後にはパラレルセッションが組まれていたが、急遽参加者からの意見を募り、それに応じて議題をたてるということになった。もともとは議題として

- Ageing facilities
- Open source control system

の 2 つが予定されていたのだが、Fig. 3 の様な投票ボードが用意され、結果 Human factors にか

Table 2 Material selection from R.I.

Resistive Index	Name
7.8	Epoxy, glass laminate
7.5	Polyimide (Kapton)
6.8	Polyester/Polyurethanes
6.5	PEEK
5.8	Aromatic Polyamide (Nomex)
5.3	Polyethylene

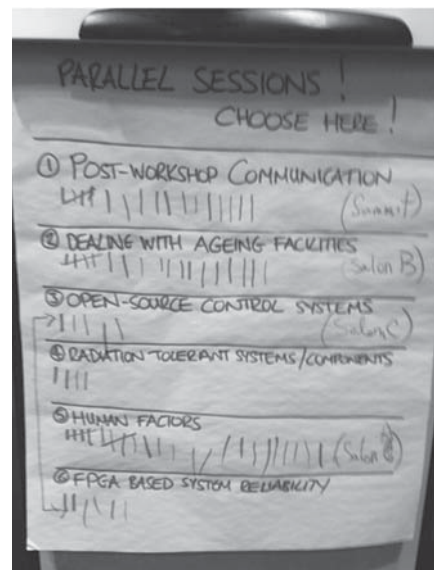


Fig. 3 パラレルセッション投票ボード

なりの人気が出たため、

- Human factors
- Ageing facilities
- Open software control systems and FPGA

の3本で行われることとなった。

自分が参加したのは、Ageing facilitiesである。かつて KEK-PS で老朽化の問題に何度か直面した経験があることと、J-PARC においても建設から10年が経過し、すでに一部で経時劣化に伴う障害が発生し始めているからである。座長の Thomas Spickerman 氏が Los Alamos National Lab. での具体例をあげて問題提起を行ったが、つまるところどこも

- Reducing staffing (人員の減少)
- Tightening budget (厳しくなる予算)
- Ageing equipment (老朽化する機器)

に直面しているのである。研究施設の信頼性、可用性の維持にはそれなりのコストがかかるものであるが、その点は常に声を上げておかなければならない。

Human factors のセッションは、“what was the threshold to classify a failure as human error?” という問い合わせがあったのがきっかけとなり、議題にあがったとのことである。この議題については、ワークショップの最終日にも追加で議論がなされた。それによると、ビーム停止時間の原因分類の中で「人為的ミス」という項目を使わないことにした研究機関もあるそうである。もちろん、これには賛否両論あった。

2.2 施設見学 SNS (Spallation Neutron Source)

ワークショップ2日目、火曜日午後は、施設見学として SNS へのツアーが組まれていた。その名の通り中性子を用いた実験施設で、J-PARC の RCS+MLF と直接競合する施設である。SNS を有する ORNL に入構するには、事前に入所手続きをして入構パスを貰わなければならない。その際 Waiver-Business 以上の Visa が必要になるため、参加者に対しては事前に米国入国時にくれぐれも観光客として入国しない様にとという注意喚起が LOC からなされていた。

Oak Ridge は Knoxville の隣町で、ワークショップ会場の Crowne Plaza から ORNL までは車で30分程度である。1 GeV (制御室の運転表示で



Fig. 4 ゲスト用入構票 (背景は入構許可証)

は 940 MeV だったが) の LINAC に蓄積リングを持つ構成で、LINAC は 6 台の DTL (Drift Tube Linac), 4 台の CCL (Coupled Cavity Linac), 23 台の SCL (Superconducting Linac) で構成されている。超伝導空洞は、81 台あるそうだ。これをクライストロン電源室から順に巡り、イオン源、MEBT、LINAC、Storage Ring へと進んだ。DTL、CCL については現場でもその様に表記されていたが、SCL についてはなぜか CM という表記になっていた。2つの CM 間に、四極ダブレットとステアリング、ゲートバルブという配置である。CM は 23 個が置かれており、将来のアップグレード用か、壁には 24 以降のナンバーリングとビームラインには空き空間が確保されていた。リングは出射点は見ることが出来たが、入射点は荷電変換フォイルの少し手前までしか行けなくなっていた。これには残留放射線の問題もあるのだろう。実験ホールはまさに J-PARC の MLF をやや小さくしたような感じで、ジブクレーンの配置などかなり似た造りであった。

制御室のモニター記録から、SNS では 26 mA, 1.4 MW でのビーム供給を行っていた。J-PARC RCS でも次第にビーム強度を上げ本年 4 月 14 日から設計性能の半分である 500 kW 利用運転を開始したが、なかなか世界との競争は厳しい。第 2 ターゲット建設後は、2 MW (最大 38.4 mA, 平均 11.7 mA) での運転を見込んでいるとの事だ。

3. Provision Center

今回のワークショップで、偶然 Knoxville 市内



Fig. 5 Provision Center for Proton Therapy

に Provision Center という陽子線治療施設があることを知った。ワークショップに参加されていた Niek Schreuder 氏と Vladimir Derenchuk 氏の好意により施設内を案内して頂く機会を得たので、ここで触れておきたい。Knoxville 中心から 169 号線を西に 8 km ほど行くと、医療施設が何棟か立ち並んだ一角があり、見晴らしの良い丘の上に陽子線治療施設が建っている。

立地や景観は、治療に訪れる患者さんのために明るく清々しいイメージにしてあるそうだ。待合室は図書館のロビーのようになっていて、高い天井と全面ガラス窓から手入れされた庭がよく見えるようになっていて、これも患者さんの気分を明るくするための工夫だとか。受付には “We love PROTON” というロゴの入ったグッズも売られていた。待合室にある『勝利の鐘』はここですべての治療を終えた患者さんが鳴らすためのもので、偶然にも一組の家族が鐘を鳴らしながら記念写真を撮る場面に出くわした。本人達の了承を得てその貴重な映像を撮影することができたが、極めて個人的な内容であることからここでは鐘だけを掲載しておく。

施設内部には 2 台のサイクロトロンがあり、それぞれにガントレット 3 基と 2 基が繋がっている。後者は ProNova 社による新型の 360° 対応ガントレットで、1 基は建設中のためその構造を細かく見ることが出来た。大型の「動く」装置は、やはり面白い。なお、サイクロトロンには住友重機の製品を使用していた。

彼らは陽子線治療施設としての加速器の運用に



Fig. 6 治療を終えた人のための『勝利の鐘』

ついて、航空会社を比較対象として高い信頼性と安全性を目指している。例えば“フェイルセーフ”という考え方にしても、飛行中の航空機ではフェイルセーフ自体がありえない。直接人間を対象としたシステムでは、一段高い信頼性が要求されるというものである。ゆえに、「誤作動や想定範囲を超えた場合はシステムをダウンさせる」「制御システムにすべてを決定させる」「動作速度を落とす、また検査回数を増やせば安全性が向上する」といったアプローチは正しくないとする。我々から見るとやや極端なところもあるので、ワークショップにおける Schreuder 氏のトークでは議論が白熱した。

4. 終わりに

次回 ARW 2017 は、再びフランスでの開催である。信頼性エンジニアリングの考え方を取り入れた設計は、加速器建設や施設のアップグレードにおいてメジャーな手法になりつつある。信頼性と可用性は共同利用実験施設の重要なパラメタであるため、その向上のために RAMI 解析などを取り入れることは、今後ますます不可欠になって行くであろう。

参考文献

- 1) Enric Bargalló, “ESS reliability and availability approach”, ARW 2015, Knoxville, Apr. 27-May 1, 2015
- 2) Doug Preddy, “Designing for Reliability”, ARW 2015, Knoxville, Apr. 27-May 1, 2015