

SPRING-8 に於ける広域遠隔実験システム (WRES) の開発 ～安全、確実な遠隔実験システムを目指して～

古川行人 公益財団法人 高輝度光科学研究センター 〒671-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨 安全かつ確実に遠隔実験を行うために SPRING-8 で開発した広域遠隔実験システム (WRES) の概要について解説を行うと共に現状と今後の計画についても述べる。安全・確実な実験を遂行するために SSL/TLS というネットワーク通信技術の利用及び放射線安全インターロックとの連携が行われている。

1. はじめに

SPRING-8 を始めとする放射光施設の多くは広く国内外から利用課題を募って実験・研究を遂行する共同利用施設である。安全上を始めとする様々な理由によりユーザーは与えられたビームタイムの間、施設に来所して実験・測定を行うことが基本となっている。このことはユーザーに旅費や拘束時間など様々な制約を課すことになり、利用形態の拡大のために遠隔実験システムの整備が望まれてきた。特に共同研究においては、試料の状態やデータなどをリアルタイムに共有して実験条件をその場で決めていくことが研究の効率化、速度向上に繋がる。全国あるいは全世界にまたがる共同研究では、全研究者が同時に共同利用施設に来所することは困難であったが、遠隔実験システムを用いることで上記のような研究形態が可能になる。

遠隔実験は KEK-PF のコラボラトリシステム¹⁾や、海外での蛋白結晶構造解析の分野で先行事例があるが、これらは施設側に操作者の存在が前提になっていたり、単純な Virtual Private Network (VPN) や Virtual Network Computer (VNC) で遠隔ユーザーとビームラインを結ぶものである。我々は次節以降に述べるように安全性や使い勝手の面を考慮して SPRING-8 独自の遠隔実験システムを構築することとした²⁾。

遠隔実験は施設側で実験装置を制御する実験制御サーバーと遠隔ユーザー側で利用するクライアントソフトウェアおよびその間を結ぶミドルウェアから構成されているが、本稿では主にミドルウェア部分について詳しく説明を行う。クライアントソフトウェア及び実験制御サーバーは実験の種類毎に用意する必要があるが、ミドルウェアは実験の種類によらず共通に使えるように設計されている。本ミドルウェアは、インターネット接続ができれば世界中どこからでも実験が行えるという意味を込めて「広域遠隔実

験システム (Wide-area Remote Experiment System) WRES」と名付けられた。

2. システム構築にあたって考慮すべき点

遠隔実験では、実験装置から遠く離れた場所から実験操作を行うために、来所して行う実験とは異なる点にも考慮が必要である。特に(1)放射線安全、(2)一般労働安全、(3)実験の健全性の3点が重要である。

(1) 放射線安全は遠隔実験であろうがなかろうが極めて重要である。ビームライン放射線安全インターロックシステムが放射線安全を担保しており、遠隔実験でも安全条件に変更を加えないため、通常実験と変わらずに放射線安全が担保される。

(2) 一般労働安全は実験装置近隣での作業者の安全確保である。放射光ビームラインには大型の回折計やプレスなどの重量物や高電圧発生機器、レーザー等、一般労働安全上注意が必要な機器が利用されている。実験ハッチ内で SPRING-8 スタッフや次の実験ユーザーなどが作業をしているのを知らずに遠隔実験ユーザーがこれらの機器を操作してしまうと、人への衝突、挟まれ等の人的安全上重大な問題が発生する。これを避けるためには実験装置へ人がアクセスしない事が担保されている時だけ遠隔からの操作を許可するようにすればよい。硬 X 線ビームラインでは実験装置は放射線遮蔽ハッチの中に収められており、ハッチ内への X 線導入時にはビームライン放射線安全インターロックによってハッチ内に人が居ないことが保証されているので、放射線安全条件成立時にのみ遠隔からの操作を許可するようにすればよい。

(3) 実験の健全性は、不確実なネットワークであるインターネットを経由して如何に確実な実験を保証するかという事である。インターネットの基本プロトコル (IP) は

ベスト・エフォート型の通信で到達の確実性が保証されていない上、なりすましや盗聴などに対して無防備であり、実験の妨害やデータの盗み見などのリスクがある。また、より可能性の高い問題として、次のビームタイムを貰っているユーザが実験開始前に通信のテストを行ってビームラインの機器を操作してしまうと、現在施行している実験のセットアップが崩されてしまうため、実験の遂行上問題が発生する。このような問題は次節で詳しく述べるように、インターネット上で電子商取引等のミッション・クリティカルな通信を行うために開発された SSL/TLS (Secure Sockets Layer/Transport Layer Security) を導入することで解決される。

3. SSL/TLS による確実な遠隔実験

前述のように SSL/TLS はインターネット上で商取引などの重要な通信を安全・確実に行うために開発され、Web 上でショッピング、いわゆるネットショッピングを行うときなど、ごく身近に使われている技術である。SSL/TLS には、(1)認証、(2)通信の暗号化、(3)改ざんの防止という3つの重要な機能があり、いずれも遠隔実験に必要な要件である。

SSL/TLS では片側だけの認証と双方向の認証があり、ネットショッピングでは片側だけの認証が使われている事が多い。つまり正しいショップのサイトに接続している事を Web-browser が確認出来た時だけ、取引が出来るようになっている。この認証のためには「電子証明書」が用いられる。電子証明書は発行者以外が書き換えることは出来ない。遠隔実験ではビームタイムを与えられたユーザーだけがアクセスできるようにするため、ユーザーの認証も行う双方向認証を行う。

SPring-8 側が認証したユーザーに「課題番号」を書き込んだ電子証明書を発行し、ユーザーは実験開始時にその電子証明書を提示し SPring-8 側のサーバーでその電子証明書が正しい物と認証された時のみ接続を許可する。(ユーザーの操作としては送付された電子証明書ファイルを選択するだけで、あとはクライアント側のソフトウェアが自動的に処理する。) さらに証明書に書かれた課題番号に割り当てられたビームタイムであるときのみ、ユーザーの操作を許可するようにする。これによってビームタイムを割り当てられているユーザーのみが遠隔実験を行うことができる。さらにビームタイム外でも接続までは許可することで、事前の接続確認も可能になっている。

SSL/TLS で途中の通信が暗号化されていることで、データの盗み見等を防止でき、改ざんの防止機能によって実験操作の妨害を防ぐことが可能である。

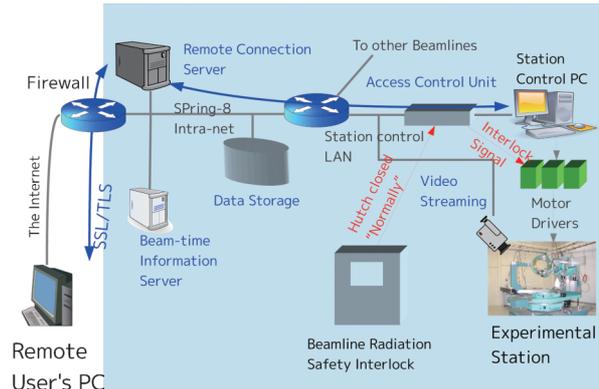


Fig. 1 (Color online) Overview of the Wide-area Remote Experiment System (WRES).

4. WRES の構成

Fig. 1 に WRES の構成を示す。SPring-8 側に 1 台の遠隔実験用の中継サーバー (remote connection server) を置き、全ての遠隔実験ユーザーはこの中継サーバーに SSL/TLS を用いて接続を行う。中継サーバーはユーザーから送られてきた証明書に記述されている課題番号から、遠隔実験用データベースサーバー (beam time information server) に登録されている情報を用いて、ビームタイムや接続すべきビームラインを特定する。正しいユーザーが与えられたビームタイムにアクセスしているときに限り、ユーザーから送られてきたコマンドをビームラインに設置された動作制限ユニット (access control unit) を経由して、実験制御サーバー (station control PC) に送る。

動作制限ユニットはビームライン放射線安全インターロックから実験ハッチの安全条件成立信号 (図中の Hutch closed "Normally" 信号) を受け取り、安全条件成立時のみ実験機器の動作を許可するローカルインターロックを構成している。さらに念のためハッチ安全条件成立時のみ中継サーバー経由で送られてくる遠隔実験ユーザーからのコマンドを実験制御サーバーに転送するように作られている。

ユーザーから送るコマンドは SPring-8 の制御フレームワーク MADOCA³⁾ と同様「S/V/O/C」形式のテキストメッセージである。これは MADOCA との親和性という観点と同時に、中継サーバーに於いてメッセージのフィルタリングを行うという点で重要である。実験装置には調整用に用意された、誤って操作すると実験の遂行に支障がある機能がある場合が多いため、遠隔実験に必要な機能のみコマンドを受け付けるようにするためにフィルタリングを行っている。またテキストメッセージの交換方式は VNC 等の GUI 共有方式の遠隔実験に比べて要求されるネットワーク帯域が狭いため、携帯電話網や海外からの接続でも良好な実験環境が提供できる。

ユーザー用の電子証明書は課題情報を遠隔実験用データベースに登録する際に自動的に生成されるようになってい

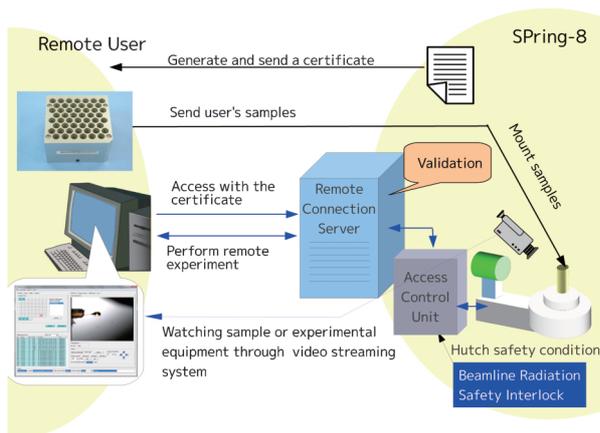


Fig. 2 (Color online) Flow of the remote experiment.

る。生成された証明書はランダムな文字列によるパスワードで暗号化されており、電子証明書を電子メール等の手段でユーザーに送付した上で、パスワードは親書便によってユーザーに送付され、電子証明書とパスワードの両方を持っていないければ遠隔実験を行えないようになっている。

また試料や実験装置の状況を確認するために、ビデオストリーミングシステムを用意している。

5. 遠隔実験フロー

Fig. 2 に遠隔実験のフローを示す。遠隔実験を行うことが決まった実験課題について、SPring-8 スタッフが遠隔実験用データベースに課題番号、ビームタイム、利用ビームライン、ユーザー情報等を登録する。登録時に自動的に課題用の電子証明書とパスワードが発行されるので、前述のようにスタッフがユーザーにそれぞれ電子メール及び親書便にて送付する。

一方ユーザーは試料を SPring-8 に送付し、試料を受け取ったスタッフはビームタイム開始時に試料を実験装置にセットし、ハッチ安全条件を整えた上で遠隔実験ユーザーに利用可能になったことを連絡する。ユーザーは電子証明書とパスワードを使って遠隔実験システムに接続し利用実験を開始する。ビームタイムが完了すると、遠隔実験システムはビームタイムが終了したというメッセージを返すので、ユーザー側で完了を確認することが出来る。

実験データについては、サイズの小さいデータは実験中にシステムを通じて取得する事が出来るほか、Web サービスなどを通じて事後にデータを取得することも出来る。

6. 蛋白質結晶構造解析ビームラインへの応用

WRES は最初に蛋白質結晶構造解析ビームラインへ適用された。遠隔ユーザー用クライアントソフトウェアの製作及び実験制御サーバーの構築は理化学研究所播磨研究所

および JASRI の構造生物学グループによって行われた。遠隔実験ユーザーはあらかじめクライアントソフトウェアをダウンロードしておき、起動時に SPring-8 から送られてきた電子証明書（課題番号がファイル名になっている）を選択してパスワードを入力すれば、接続処理やビデオ表示を自動的に開始するようになっている。SPring-8 に送付した結晶試料の一つを選ぶと、ゴニオメータに試料が自動的にマウントされて、ビデオ画像を通じてリアルタイムに結晶の位置を確認しながら、試料位置を X 線の位置に合わせ込むことが遠隔からの操作で可能になっている。

所内での様々な試験を経て、2010年10月に理研和光キャンパスから BL26B1 への接続試験を行った結果、遠隔から良好に実験操作が可能であり、得られたデータの質も SPring-8 に来所して実験した場合と同等であることが確認できている⁴⁾。また遠隔から操作して、ビデオ画像を通じてその操作を確認できるまでの遅延は1秒以下に収まっており、操作に支障が無いことも確認ができた。以上の結果をふまえ、安全や運営上の課題もクリアした上で、2011年度上半期から理研ビームライン BL26B1 で、下期からは共同利用ビームライン BL38B1 での利用が開始されている。また海外からの利用も視野に入っており、既に2011年10月には台湾からの接続試験にも成功している。

ネットワーク帯域は制御メッセージで100 kbps 以下、ビデオストリーミング用に VGA サイズ10 fps で800 kbps 程度で全体でも1 Mbps 以下に収まっている。ビデオストリーミングは占有帯域幅に対して2から3倍のバンド幅があることが望ましく、またこれら以外の Web サービスを同時に利用することもあり、数 Mbps の帯域が確保されていれば安定に実験が行える。余裕を見て10 Mbps 以上の帯域が確保されていることを実用指標としている。

7. WRES の今後

WRES は様々な放射光利用実験に適用できるように設計されており、現在産業利用 XAFS ビームラインでの遠隔実験に向けて、クライアントソフトウェア、実験制御サーバーの開発を進めている。さらに小角散乱実験への適用を行うことも決定されている。本稿ではもっぱら実験制御の部分について述べたが、データの持ち帰りについても SPring-8 共通データリポジトリの開発を並行して進めており、多様な実験データに柔軟に対応するよう準備を進めている（蛋白質構造解析のデータ持ち帰りに関しては、すでに D-Cha⁵⁾ と呼ばれるシステムが存在したため開発は不要であった）。

ところで IT 技術の進歩はめざましい物があり、蛋白質結晶構造解析用のシステム開発を開始した数年前には想像していなかったような技術が現在は利用可能になっている。特に HTML5 と呼ばれる次世代の Web 技術を用いると、蛋白質構造解析用のソフトウェア開発を開始した時に

は困難と思われていた Web ベースでの遠隔実験用クライアントソフトウェアが容易に構築できることが分かってきたので、XAFS 用クライアントソフトウェアは Web ベースで開発を進めている。

Web ベースに移行することにより蛋白質構造解析のケースでは Windows 専用になってしまったクライアントソフトウェアが、様々なプラットフォーム上で実行できる。単に Mac のような PC ライクなフォームファクターのマシンでも利用できるということではなく、Tablet 等のモバイルデバイス上からも利用可能となる。これにより共同研究者が出張先においても（あるいは新幹線の中など移動中でも）実験装置や試料、データにアクセス出来るため、その場その場で実験の進め方を随時検討、変更していくことができるようになるなど、今までとは全く異なる利用形態が生まれてくることが期待される。

8. まとめ

SPring-8 における広域遠隔実験システム (WRES) について概要と今後の計画などについて説明した。広域遠隔実験は、放射光実験はユーザーが試料や実験装置を抱えて施設にやってきて実験を行いデータを持ち帰るという 20 世紀型の放射光利用からのパラダイムシフトであり、これにより多くの機関、国々での共同研究等に新しい利用形態が生まれるのではないかと考えている。

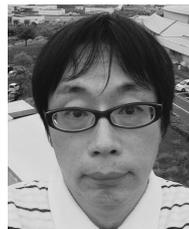
本システムの開発に当たっては、安全性の検討、利用方針の検討に理研山本雅貴博士、理研播磨研究所篠原茂己安全管理室長、JASRI 長岡鋭安全管理室長、JASRI 松下智裕博士、JASRI 竹下邦和博士、JASRI 鈴木昌世部長を始めとする研究調整部の方々にご尽力いただいた。また蛋白質結晶構造解析用遠隔実験ソフトウェアは理研上野剛博

士、JASRI 長谷川和也博士が中心になって開発された物であり、遠隔実験システム設計にも深く関わっていただいた。末筆ながら皆様に感謝申し上げて本稿を閉じさせていただきます。

参考文献

- 1) H. Sawa: International Symposium on Frontier in Materials Design, Synthesis and Measurements, Hyogo, JAPAN, 2005/3.
- 2) Y. Furukawa, K. Hasegawa, D. Maeda and G. Ueno: Proc. ICALEPCS 2009 (Kobe, Japan) P. 615.
- 3) R. Tanaka, T. Fukui, K. Kobayashi, T. Masuda A. Taketani, T. Wada and A. Yamashita: Proc. of ICALEPCS'97, Beijing, China, (1997) p. 1.
- 4) Y. Furukawa, K. Hasegawa and G. Ueno: Proc. ICALEPCS 2011 (Grenoble, France) P. 1193.
- 5) N. Okazaki, K. Hasegawa, G. Ueno, H. Murakami, T. Kumasaka and M. Yamamoto: J. Synchrotron Radiat. 2008; 15: 288-291.

● 著者紹介 ●



古川行人

公益財団法人高輝度光科学研究センター
制御・情報部門 主幹研究員

E-mail: furukawa@spring8.or.jp

専門：ビームライン、実験ステーション
制御

【略歴】

1989年大阪大学大学院博士後期課程単位取得退学、同年株式会社神戸製鋼所入社。1999年より高輝度光科学研究センター。

Development of a Wide-area Remote Experiment System (WRES)

Yukito FURUKAWA Japan Synchrotron Radiation Research Laboratory.
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

Abstract A wide-area remote experiment system was developed for SPring-8 synchrotron radiation experiments. System description, current status and future perspectives are described. For safe and secure remote experiments, SSL/TLS based network communication and radiation safety interlock system of the SPring-8 beamline were combined in operation.