

SLACのLCLS-II、世界で最も強力なX線レーザーの初めての照射に成功

サリー・コール・ジョンソン

このQ&Aでは、LCLSの科学およびR&Dディレクターでスタンフォード大の光子科学教授であるマティアス・クリング氏(Matthias Kling)、LCLSディレクターのマイク・ダン氏(Mike Dunne)、Accelerator Directorate Superconducting Linac Physics Departmentの責任者であるダン・ゴンネラ氏(Dan Gonnella)に、XFELのアップグレードとこの工学的偉業が科学にもたらす意味について、Laser Focus World誌の質問に答えてもらった。

10年間に及ぶ11億ドル規模のアップグレードを経て、米エネルギー省(Department Of Energy : DOE)傘下のSLAC国立加速器研究所のX線自由電子レーザー(XFEL)施設であるLCLSは、量子物質や生体物質から核融合エネルギーに至るまでの原子レベルの超高速現象を調査する科学者の能力に革新をもたらそうとしている。

LCLS-IIの中心にあるのは、絶対零

度よりも2ケルビン高い温度(-456°F)に冷却された37の極低温モジュールで構成される超伝導加速器で、ここでは、ほぼエネルギー損失なしで電子を高エネルギーに加速することができる。LCLS-IIにはその他に、新しい電子源、クライオモジュール内のニオブ構造用の冷媒を生成する2つの強力なクライオプラント、そして電子ビームからX線を生成する2つの新しいアンジュレ

ータに加えて、レーザー技術、超高速データ処理、センサ、検出器に関するさまざまな進歩が搭載されている。

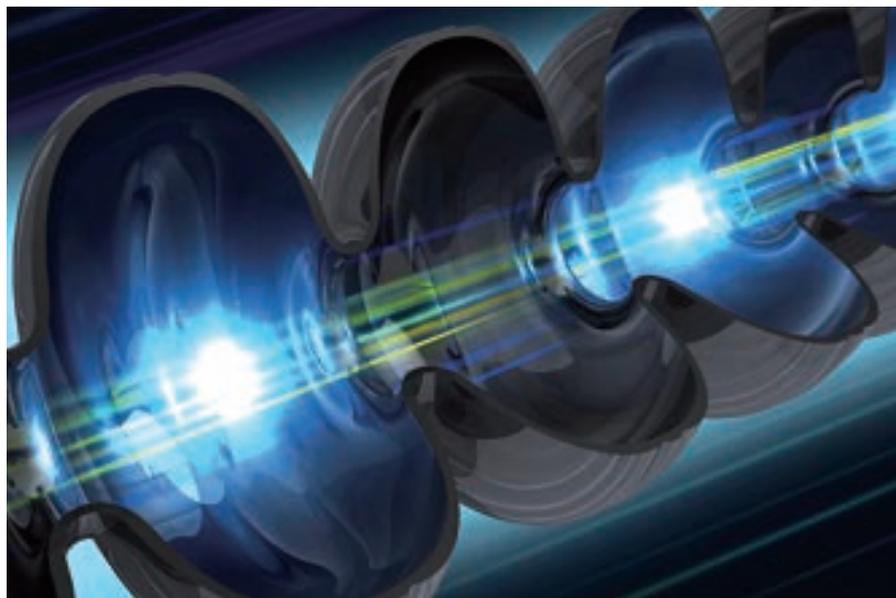
LCLS-IIからの初めてのレーザー照射を成功させるには、数千人もの科学者、研究者、エンジニア、技術者の並々ならぬ努力が必要だった。すべての関係者に祝意を表したいと思う。

Laser Focus World(以下LFW) : LCLS-IIは科学にとってどのような意味を持つか。

クリング氏 : これは、ミクロの世界を深く観察する能力という点において、一世一代の大躍進である。LCLS-IIは、地球上で最も明るいX線光源であり、LCLS-Iの8000倍の輝度を備える。これによって、機能する物質のダイナミクスを原子空間分解能とアト秒時間分解能の動画で記録することができるようになる。

LCLS-IIの繰り返し周波数は完全にチューニング可能で、最大1 MHzに達し、化学変換などの希少だが極めて重要な事象の研究を、初めて可能にするタイプのデータを生成する。また、この繰り返し周波数の増加によって、そうした変換の研究を、それが自然に生じる条件の下で行うことが可能になる。

より高い安定性と改善された性能をユーザー実験に与えると期待される、この全く新しい超伝導加速器とともに、一連の実験用ビームラインも全面的に刷新した。それらは、LCLS-IIの新しい可能性を最大限に活用する、新たな機能を提供するように設計されて



SLACのX線レーザー施設LCLS-IIの主要コンポーネントである、ニオブ共振器を通過する電子ビームの図。2ケルビン(-456°F)という、ニオブが損失なしで電気を伝導する温度に維持されており、これらの共振器によって、1秒あたり最大100万パルスという、現行または計画されているX線レーザーよりも多くのX線を生成する、高エネルギービームが生成される(画像提供 : SLAC国立加速器研究所のグレッグ・スチュワート氏[Greg Stewart])

いる。これによって、全く新しい方法で物質を研究することが可能となり、創薬と人間の健康を目的とした科学的発見、クリーンエネルギーの生成、エネルギーの輸送と貯蔵に影響を与えて、次世代デバイスのサステナビリティ、マイクロエレクトロニクス、量子物質に関する重要な問題を解決することができるようになる。これは、X線科学にとって最も心躍る時期の1つだといえる。

LFW：レーザのアップグレード、設計の改良点、その過程で生じた課題について聞かせてほしい。

ダン氏：最大の改良点は、1秒あたりのX線パルス数が120個から100万個に大幅に増加したことである。もう1つは、X線を生成する1台の古い「アンジュレータ」が、X線レーザエネルギーを動的に走査できる2台の新しいシステムに置き換えられたことである。これによって、例えば、エネルギーの流れを把握するために、分子の中のさまざまな要素を簡単に追跡できるようになるため、クリーンエネルギー技術と超高速コンピューティングの速度と効率の向上を促進することが可能になる。

多くの課題に遭遇した。1つは、米国のある場所（フェルミ国立加速器研



このクライオプラントは、ヘリウムを（宇宙空間よりも低温の）2ケルビンに冷却する。ヘリウムはその後、超伝導共振器を実現するためのLCLS加速器極低温モジュールの冷却に用いられる（画像提供：SLAC国立加速器研究所のオリヴィエ・ボニン氏 [Olivier Bonin]）

究所 [Fermilab] とトーマス・ジェファソン国立加速器施設 [Jefferson Lab] で製造された極低温加速器モジュールを、SLACに輸送して、トンネル内部で溶接するという作業を、確実に行うことだった。モジュール内部に塵一つでも混入すると性能が損なわれるため、決してそれが生じないようにする必要があった。

この作業に、丸10年の年月がかかった。米エネルギー省が「Mission Need Statement」（ミッションニーズステートメント）の更新版を発行した

のは2013年9月27日で、最終的な完了審査報告書を発行したのは2023年9月27日だった。

ゴンネラ氏：加速器は、以前の超伝導加速器よりもエネルギー効率を高めるために、全く新しい技術を採用して構築されている。この新しい技術の開発には、SLACだけでなく、フェルミ研究所、ジェファソン研究所、米コーネル大 (Cornell University) における、各施設の数十年間にわたる経験を活かした、多大な労力を要した。この効率によって加速器は、新しい科学を可能



SLAC国立加速器研究所のLCLS-II XFELは、初めてのX線照射に成功し、X線による研究の新しい時代を切り拓いている（画像提供：SLAC国立加速器研究所のグレッグ・スチュワート氏）



2022年4月6日に撮影されたLCLS-IIトンネル内部からの写真を基に作成された図(図作成: グレグ・スチュワート氏、写真撮影: ジム・ゲンスハイマー氏[Jim Gensheimer]。ともにSLAC国立加速器研究所所属)

にする高い繰り返し周波数で動作することができる。加速器を構築しながら、成功に不可欠な新しい技術を開発することが、特に難しい課題だった。

LFW: 現在のレーザーについて最もクールな(素晴らしい)点は何か。

ダン氏: 全長700mのこの加速器は、宇宙空間よりもクールで(温度が低く)、絶対零度のわずか2ケルビン上である点だ。もう少し真面目に答えると、この施設から生成されるデータレートがとてつもなく高いことである。これは、地球上で最も大きなデータマシンの1つになる見込みで、1秒あたり最大1テラビット、年間1エクサバイト(Exabyte)のデータを生成する。計測器から流れてくるそのデータを、リアルタイムに解析することが必要になる。

これは、検出器とデータサイエンティストにとってとてつもなく大きな課題で、人工知能の活用と、LCLSから世界最速のスーパーコンピュータへの直接リンクが必要になる。わずか1秒以内に終了するように超高速速度で再生される1000本のオンライン映画を同時に視聴して、映画のすべてのフレームをリアルタイムに解析して、予期せぬ何か映っていなかったかを確認

する作業を想像してほしい。それを、数十もの異なる種類の映画(すなわち実験)を対象に24時間年中無休で行わなければならないため、この差し迫った課題を解決するには、科学と技術のほぼすべての分野の専門家が力を合わせる必要がある。

LFW: このアップグレードで最も驚いた部分は何か。

ダン氏: 最も喜ばしい驚きは、このX線レーザーには信じられないほどの精度とアライメントが必要であるにもかかわらず、初めて電源を入れてからわずか数時間でシステムが動作したことがある。最初のX線を画面上で確認したとき、そしてその後の数多くの検査によってそれが正しいことが確認されたとき、加速器制御室は大きな喜びに包まれた。

LFW: 応用分野という点で、LCLS-IIは何を可能にするか。

クリング氏: LCLS-IIを最大限に活用する新しい計測器の1つは、qRIXS装置である。これによって、量子やその他の物質における励起とその結合を、これまでにならぬほど詳細に調べることができるようになる。

これまでの研究は主に、関連過程や異なる励起の結合の時間分解能なしで行われていた。量子物質や超伝導物質を特定の用途に向けて最適化したい場合は、その量子励起を高いレベルで制御することが望ましい。一般的に、自然界ではこれが容易ではない。複数の励起が競合し、用途に向けた物質の使用が制限される可能性があるためである。このような励起を時間領域で研究することは、基本的な理解を深めるためだけでなく、量子コンピューティングや新しい電子デバイスなどにおいて、従来の希土類物質をこれらの物質で置き換えられる応用分野を拡大するための手段にもなる。

この目的のために最適化された新しい装置ChemRIXSを使用することにより、触媒作用、燃焼、生化学過程などの応用分野に関連する条件下での化学変換を研究する能力においても、同様の飛躍的進歩が期待される。LCLS-IIによって、分子からの時間依存の共鳴非弾性 X 線散乱を記録することが可能となり、LCLS-Iによる初めての大規模実装は標準的な手法へと進化する。

LFW: 次の目標は何か。

ダン氏: 変化のペースは目覚ましい。われわれは既に、次のアップグレードであるLCLS-II-High Energyに向けた作業の半ばに差し掛かっている。これによって、加速器のエネルギーは2倍になり、X線は硬X線の領域に達して、タンパク質や技術物質などの複合分子に対して、かつてないレベルの空間分解能が提供される見込みである。

これと並行して、MEC Upgradeという別のアップグレードも進行している。これは、核融合エネルギーや星と惑星の物理学を、この地球上で調査する能力に変革をもたらすものである。

LFWJ