

PROGRESS OF X-FEL/SPRING-8 PROJECT

Tsumoru Shintake^{1,A)} for Joint XFEL Project Team^{A,B)}

^{A)} RIKEN, XFEL Joint Project / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

^{B)} JASRI, XFEL Joint Project / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

Abstract

XFEL/SPring-8: the X-ray free electron laser facility is under construction, which is aiming at generating coherent, high intensity, ultra-short femto-second X-ray pulse at wavelength of 1 Å or shorter. XFEL will contribute to new science, such as, the single bio-molecular imaging, the pump-probe experiment in femto-second time-resolution. Year 2010 is the fifth year of five years project, the facility building construction has been completed in March 2009, and installations of hardware components in injector, main accelerator and the undulator section are currently underway. The high power operation of accelerator will start in October 2010, followed by the beam commissioning in March 2011. The first X-ray beam will be delivered to the user facility in 2011.

X線自由電子レーザー計画の進展

1. はじめに

図1に示すようにSPring-8に併設してX線自由電子レーザー施設[1]を建設中である(XFEL/SPring-8、ここでXFELはX-ray Free Electron Laserであり、以下X線FELと略す)図1は2010年1月に撮影したXFEL/SPring-8とSCSS試験加速器、そして既存のSPring-8である。試験加速器は、2006年に運転を開始し、熱電子銃の性能評価、加速器コンポーネントの開発、信頼性評価などを行ってきた。その中で特に、SCSSの独自技術であるCeB6単結晶を用いた熱電子銃が、XFEL/SPring-8実現に必要な低エミッタンスビームを供給できること、さらに速度変調によってバンチ圧縮し少なくとも300倍圧縮までは、エミッタンスを劣化させない運転が可能であることを実証した。XFEL/SPring-8では、450 MeVと1.5 GeVの高エネルギー域に2段のシュケイン磁場によるバンチ圧縮器を導入するため、最終的な圧縮率3000倍は可能であると結論している。

また試験加速器はユニークなVUV領域の線源として、多くのユーザーにビームを供給してきた。

さてX線FELの目的は、飛躍的に高い輝度ピーク輝度、極短パルス(10~300 fsまたはそれ以下)、空間的に100%コヒーレント、すなわちビーム断面で位相がそ

ろっているX線を波長1 nm ~ 0.1 nm以下の範囲(可変)で発生させるものである。そのX線を発生させるために使用されている技術は、最新の加速器技術によってはじめて実現可能となった自然放射の自己増幅型FEL(Self-Amplified Spontaneous Emission FEL、SASE-FEL)である。低エミッタンス電子銃から発生させた電子ビームを線型加速器にて8 GeVまで加速し、長さ100 mにも及ぶアンジュレータに通してX線波長にてSASE-FELを動作させ、アンジュレータ内の自然放射を増幅し、飽和レベル(~10 GW以上)に達したX線を実験に提供する。計画の初期は1本のアンジュレータ・ビームラインにてス



図1 XFEL/SPring-8 線型加速器棟、アンジュレータ棟、実験棟が完成

¹ E-mail: shintake@spring8.or.jp



図2 設置されたアンジュレータ。各5mの真空封止型アンジュレータを合計18台使用する。8月現在、磁場の最終調整中。

スタートするが、将来は合計5本のアンジュレータ・ビームラインを増設する。

SCSS:SPring-8 Compact SASE Source プロジェクトでは、日本で開発された3つの重要な技術によって、欧米にて建設中の同様のプロジェクトよりも小規模の加速器にてX線レーザーを実現できる。その技術は(1)真空封止型の短周期アンジュレータ、(2)高電場のCバンド加速器技術(35~40MV/m)、そして(3)CeB₆単結晶を用いた低エミッタンス熱電子銃である。これによってXFEL/SPring-8計画の総予算がヨーロッパの計画の数分の一に収まっている。民間の優れた製造技術ともあいまって比較的短期間で加速器が建設できることも重要である。XFEL/SPring-8は2010年度建設終了、2011年度運転開始の予定。

米国SLACに建設中であったLCLS (SLAC Linac Coherent Light Source)は順調にビームチューニングが進行し、2009年4月10日に波長1.5 Åにて最初のレーザー増幅を観測し、引き続きFEL飽和に達した[4]。実際にX線波長において、FELが理論予想どおりに動作することを実証した歴史的意義は大変に大きい。これはまた、XFEL/SPring-8にとっても朗報であり、低エミッタンスの電子ビームを加速し、正しくアンジュレータに通過させれば、X線FELになることが保証された。若干の不安要素は、LCLSでは入

射器に設置されたレーザーヒーターによって、あえて電子ビームにエネルギー分散を与えて、シケイン磁場の中のビーム不安定性を抑えているのに対して、XFEL/SPring-8では、熱電子銃からの電子ビームに内部構造がなく、滑らかである事実を根拠にして、シケイン磁場のビーム不安定性がないと結論しており、あえてレーザーヒーターは準備しないという大きな決断をしており、注意してビームチューニングを行う必要がある。

なおX線波長のFELでは、長さ100mに及ぶアンジュレータ区間において、軌道誤差5ミクロン以内という極めて高度なビーム真直度が要求されるが、LCLSではビームベースアラインメントでこれを実現している。

現在、XFEL/SPring-8でもLCLSの成果に真摯に向き合い、ビームベースアラインメントの技術の習得、さらに高度な方式の検討を行っている。

今回の報告では、主に主加速器部の建設の状況を報告するが、ビームパラメータや加速器の構成等は昨年までの報告と同じであり、そちらの報告を参照していただきたい。

2. 加速器コンポーネントの量産

8 GeVの線型加速器は大型施設である。特にCバンド加速器が物量共に大きく、量産の如何がプロジェクトの成否を決定する。これまで加速管、導波管系は三菱重工業及び日本高周波にて大量生産が行われ、すでに2010年3月までに製造を完了している。クライストロンは東芝那須電子管にて量産が順調に進行した。そのパルス電源系はニチコンが受注し、2008年より量産に取り掛かり、2010年4月までに量産が終了し、すでにクライストロンギャラリーへの設置が終了した。また集束磁石と電源、高周波制御、機器制御の量産も順調に進行し、下流側より順次ラックに設置されている。入射器は電子銃タンクを始め、ほとんどすべての機器が設置された。一部、Lバンドの導波管系、加速管に遅れがあるが、来年3月のビーム運転までには、納入、設置



図3 (左) Cバンド加速管128本、Sバンド8本の設置が終了。(右) モジュール、制御ラックの設置が進行中。

の見通しが立っている。

アンジュレータは、重要な課題であった真空チェンバ内での磁場測定技術(SAFALI)が開発実用化され、現在、設置の終了したアンジュレータの最終磁場調整を継続中である。

3. 機器の量産に伴うトラブル

試験加速器にて性能を確認したはずの機器を、量産したさいに、いくつかのトラブルを経験した。ここでは、主加速部に関して、その原因を総括してみた。

(1) 開発段階のデバッグが十分ではなかったケース

(2) 開発段階の試験サンプル数が少なく、偶然に優れたデータが得られ、内在する問題に気がつかなかったケース。

(3) 若干の性能スペック変更が大きく信頼性を損なう結果となったケース。特に大電力、高電圧機器では、わずかの電圧上昇がブレークダウンを頻発させることがある。

(4) 開発段階の製造業者と量産の業者が異なり、ノウハウの伝達ができなかったケース

(5) 製造ラインのスピードを上げるため、不慣れな下請け業者を導入し、必要な加工精度が得られなかったケース

(6) コストダウンを図るため、安価な部品を調達し、真空リークを多発したケース

(7) ノウハウをもつ技術者が製造ラインの整備に時間を取られ、最も重要な製造技術の伝達がなされないまま、量産部品が流れてしまったケース。

(8) 量産部品製造を図面指示のみで行い、注意すべき要点を十分に伝達しなかったケース。

(9) 海外より調達する部品のロット性能がばらついたケース

(10) 現地組立作業において、不適切な取り扱いにより、性能を損ねたケース。

以下に主加速部に関して経験したトラブルのいくつかを説明する。将来、他のプロジェクトを実施するさいの教訓となれば幸いである。

(1) ダミーロードの量産初期に、SiCディスクのろう付け不良が発生。N社に出向き、銅製の冷却ブロックにろう付けされたSiCをハンマーで軽く叩いてみると、あっさりとSiCがはずれてしまう。SiCのろう付け面は若干緑色を帯び、煤けたように見える。全くろう材が乗っていない。これは、SiC表面の酸化または炭化であろうと推察し、SiCディスクの焼結後の表面研削状態を調査してもらったところ、研削不良と判明、研削条件を最適化し、ろう付けが安定した。

(2) 導波管の量産において、フランジ面が赤褐色に変色するトラブルが発生。アセトン洗浄を行い、真空炉にて空焼きするとステンレス地肌にもどるが、数日に変色が元に戻るとの報告。これはNiメッキ後の洗浄不良により塩類が残っているためであろうと推察し、ブラッシングしながら水洗し、再度から焼きにより、変色のトラブルは解決した。注意すべきは、アセトンやアルコール洗浄は、塩基類の汚染には無力だという点である。

(3) 導波管の真空引きポートのICFフランジが真空リークするトラブルが多発した。このポートはフランジを溶接後に導波管フランジの真空ロウ付けを実施するため、約950°Cの高温を経験するきびしい条件にあるが、従来は問題なく製造されてきた部分である。しかし量産においてコストダウンをはかるため、安価なICFフランジを購入して使用したところ、真空リークが多発した。これは問題の解決までに数ヶ月という長期を要した。A社製のフランジとの組み合わせでリークせず、B社製とはリークが発生。さらに、増し締めで止まる場合と止まらない場合など、様々なケースの解析に振り回された。これは、なんとか現状の製品を救済したいとの思いであったが、時間を失ったことが最大の損失であった。大型加速器の建設にあたっては、時間というものが大変に高価であることを認識し、わずかに疑いが残る場合には、潔い決断が必要である。結局、関連の導波管のフランジ全数を切断し、信頼性の高いフランジに入れ替えた。なお、不良となったフランジの表面状態や、ステンレスの調査を行ったが、明確な原因は確定していない。

現実の加速器コンポーネントのトラブルにあっては、単純な原因が特定されることは少なく、各種の複合現象のかげに隠されてしまうことが多いため、原因究明に労力をかけ過ぎることは得策ではない事が多い。

(4) パルスコンプレッサーの量産において、周波数調整用のネジにガタがあり、周波数が安定しないというトラブルが発生した。

これは、完成品のパルスコンプレッサーを大電力試験すべく、SPring-8内組み立て調整棟テストスタンドにて壁に取り付け後、周波数調整を行った際に、異常な周波数ジャンプが発見されたことに端を発している。その原因は周波数調整ネジにガタがあるか、異物を巻き込んでいるものと推察された。さっそく工場へ持ち帰り、分解し、手でネジのみを回してみると、驚くほどゆるく、また引っ張るとガタがある。手の感覚では50ミクロンほどのガタがある。また、ゴロゴロと何か砂を咬んだような感覚があった。

周波数調整ネジは、微妙な調整が可能であり、バックラッシュがゼロでなくてはならない。そのため差動ネジとなっており、



中心のネジが空洞の可動端板へ固定され、外周のネジが支持アームへ固定されている。その間に差動用の真鍮製スリーブネジがはいる。ネジを解体して、中心のネジ表面を不織布にてふき取ると、金属の粉が付いてくる、よく見ると薄く剥離したような粉である。事情を聞くと鉄製ボルトにニッケルメッキをしたとのこと。ピカピカの表面が滑らかな滑りを与えるであろうとの期待であった。褶動面にメッキは禁物である。摩擦によってすぐに剥離する。なおイオン注入や浸炭処理によって表面を強固にすることは、母材そのものの組成を向上させるため褶動面に適している。

対策として中心ボルトをステンレスにて製造し直したが、ボルトの製造業者がセンターを取らずに全数のねじ加工をしてしまったため、先端が20ミクロンほど太く根元が細いボルトとなってしまった。そこで真鍮製スリーブネジを太くなったボルトに厳密に合うように製造し直し、ようやく周波数が安定した。

精密な調整を必要とするネジの加工には、注意深い製造工程の検討と、寸法管理が必要である。

またパルスコンプレッサは、Q値が20万にも達し、わずかの寸法変化にて電気的特性が変化してしまうため、特にチューナーの機械精度、剛性には注意が必要である。

(5) Cバンド加速管の量産初期において、ロウ付け後の周波数が大きく変動。さらに個体ごとの周波数のばらつきが大きいというトラブルが発生した。Cバンド加速管では、ビームが誘起する高調波ノイズを減衰させるため、SiCリングを内蔵しているが、その固定にはタングステン製のコイル状スプリングを使用しており、SiCリングを銅製ディスクの溝に圧入するとコイルスプリングが楕円に変形して、SiCリングを強固に保持するという設計である。コイルの強度、変形量、銅製ディスクの変形等は、ANSYSにて構造解析し、周波数の変動が十分に小さくなるという計算結果であった。しかし実際にはロウ付け工程によって周波数が大きく変化した。

その後の調査によって明らかとなったことは次の通りである。内蔵されたSiCリングと銅製のディスクは熱膨張係数が大きく異なり、ロウ付け

温度950℃にて、SiCリングと銅製ディスクの間に1mm程度の隙間ができる。コイルスプリングは圧力が開放されるので自然形状にもどる。加速管のロウ付けが終了し、温度を下げてゆくと銅製ディスクが収縮し、400℃付近でふたたびコイルが接触し圧力が増加する。このまま室温にもどれば、何もトラブルはない。しかし問題は400℃付近での銅材のクリープが室温よりはるかに大きいことを見落としていたことである。コイルスプリングの圧力により銅ディスクが大きく変形し、周波数がずれることとなってしまった。400℃付近の銅材の機械的強度をANSYSに再入力し、コイルスプリングの強度と圧縮量の最適化をおこないトラブルは解決した。ただちに量産を再開。その後順調に進行し、2010年3月には全数128本の製造を完了した。結局予定より2ヶ月ほど早く製造が終了した。2009年の後半から加速管の製造と設置が同時進行し、2010年3月には全数の加速管の設置が終了した。

(6) モジュレータ電源等に関するトラブル

2008年までにXFEL/SPring-8向けにPFN部とパルストランス部を一つの鉄製タンクに収めた「一体型モジュレータ」の開発を終了しており、2008年4月より量産に移った。試作機を注意深く開発したにもかかわらず、量産にて新たに次のようなトラブルを経験した

- パルストランスの製造において、カットコア端面のショート、層間絶縁不良により、渦電流ロスが増加した。コア材には渦電流ロスの小さい6% Si ドープのSuper-E Coreを採用したが、絶縁皮膜に耐熱性がなく、コア材巻き取り後の焼鈍処理工程において、層間の絶縁不良を発生、またコアをカットしたさいに、カット面での層間ショートを発生した。そこで、巻き取り方法の最適化、エポキシ含浸工程の見直し、エッチング処理工程の見直しを行いコア特性が回復した。
- サイラトロンの保護回路であるPFN回路のEOLダイオードが、クライストロンの放電に伴い、破損するトラブルが発生。ダイオードのスペックを見直したが、余裕が十分にあり問題がない。その後、タンク内配線の詳細なチェックによって、EOLダイオードのカソード側が、PFN回路のグランド側の終端ではなく、サイラトロン側に接続されていることが発見された。クライストロン放電に伴う100 MHz以上の高周波ノイズによって、PFN回路にコモンモード振動が発生。サイラトロン側と終端側にて

位相が180度異なる電圧によりEOLダイオードに一瞬、順方向電流が流れ、注入されたキャリアが消滅する前に、再び50 kVの逆電圧がかかり、ダイオードの空乏層になだれ現象を発生し、シリコンが熔融し、ダイオードが導通モードで破損した。EOLダイオードのカソード側を正規の位置、PFNの終端に戻し、トラブルは解決した。

- パルストランスのエポキシ含浸1次2次巻線間が放電破損するトラブルが2回発生。1台からは明らかにゴミが原因らしい放電痕が発見された。推定される原因は、パルストランスをクレーンにて釣り上げ、モジュレータタンクに設置したさい、クレーンのナイロン製スリングからゴミが落下し、パルストランスの極間に付着したものと思われる。そこで、出来るだけ清浄な状態を保って作業を行うこととした。N社でのモジュレータ組み立て作業終了時に、油ポンプにて絶縁油をノズルからジェットで噴出し、内部の洗浄を徹底した。またCVD静電分割型の高電圧モニターもゴミが原因らしい放電を経験したので、積極的な洗浄を行った。

(7) インバータ方式PFN高電圧充電器に内蔵されたフィルムコンデンサが破裂する事故が2回あり、現在も原因究明と対策を続行中である。これは、20 kHzにてスイッチングするIGBTの出力を、昇圧トランスに供給するラインに直列に入れられた共振コンデンサ(0.05 μ Fのフィルムコンデンサを100並列、2直列)であり、2.4 kVpp、20 kHz、300 Aの大きな電力を伝送している。電圧が正負に振動するため、電解コンデンサやタンタルコンデンサは使用できない。周波数が比較的高いため、ロス小さい蒸着フィルムコンデンサが使用されている。N社では単純な蒸着フィルムコンデンサではなく、アルミ箔電極を両極に用いて、電流許容量を大きくしたコンデンサを採用している。最近の調査では、このアルミ箔のエッジを起点とするグロー放電の可能性、静電気力に伴ない膜が振動しアルミ箔エッジとの摩擦で絶縁フィルム面が損傷した可能性が疑われている。そこで現在、アルミ箔を使用していない蒸着フィルムのみコンデンサに入れ替え、連続運転試験を行っている。

今回のフィルムコンデンサのトラブルは、IGBTを始めとするインバータ素子の進歩、これによる電源回路の高度化、過剰な小型化がもたらした弊害に遠因がある。小型化のために10ミクロン以下

の絶縁フィルムを使用し、いまや内部の電界強度は10 MV/mを超えることがめずらしくない。このため潜在的な放電の危険を回避するために、金属蒸着膜の厚みを数十ナノメートルにまで薄くした、いわゆる自己回復型のコンデンサが主流となっている。また製造工程の短縮、パッケージングの簡素化のため絶縁オイルを用いないドライタイプとなっている。

しかし加速器向けの機器では、民生品のような過剰な小型化は必須ではなく、大電力にて使用されるため信頼性が最重要事項であり、部品の選択にあたっては注意が必要である。いまのところ、20kHz周波数帯の共振回路に用いるコンデンサとして最も安全と思われる選択は、少々寸法が大きくなるが十分な耐圧を確保した絶縁油入りオイルコンデンサであろう。

最近、大電力に耐える積層セラミックコンデンサーが開発され注目を集めている。しかし電気自動車EV向けのIGBT回路のスナッパや平滑コンデンサでは、リップル率が高くないため、そこでの実績をもって、共振コンデンサへ応用した場合の信頼性の保証とならないことに注意が必要である。

4. まとめ

現在まで数々のトラブルを経験しながら、メーカーの方々とXFEL/SPring-8のスタッフとの協力によって、次々と解決してきた。残された問題も、本質的に困難な部分ではなく、技術的に解決可能な範囲であると判断している。

したがって、大きなスケジュールの遅れは予想されず、来年3月のビーム運転には準備が完了できるであろう。X線波長でのレーザー発振を早期に実現したい。

参考文献

- [1] XFEL/SPring-8、X線自由電子レーザー計画については、次のホームページを参照：
<http://www.riken.jp/XFEL/>
- [2] T. Shintake, et al., "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region", Nature Photonics advanced online publication, 27 July 2008 (doi:10.1038/nphoton.2008.134). T. Shintake, et al., "Stable operation of a self-amplified spontaneous-emission free-electron laser in the extremely ultraviolet region", PRST **12**, 070701 (2009)
- [3] 試験加速器の状況、XFELの建設、加速器機器の開発、量産状況について本学会に10本以上の論文が発表されているので、詳細はそちらを参照されたい。
- [4] <http://ssrl.slac.stanford.edu/lcls/commissioning/>
P. Emma, "First Lasing of The LCLS X-ray FEL at 1.5 Å