

ミュオン線型加速器 APF IH-DTL のシミュレーションデザイン Simulation Design of an APF IH-DTL for Muon linac

大谷将士 for the J-PARC E34 collaboration, KEK IPNS

ミュオン異常磁気能率($g-2$)において素粒子標準理論(SM)による予言値と実験による測定値(精度 0.54ppm)の間に約 3 標準偏差の乖離があり[1], 更なる高精度測定と独立検証によって beyond SM を切り拓くことが切望されている。J-PARC E34 実験[2]では超低エミッタンスミュオンビームによる新測定手法によって世界最高精度 0.1ppm で $g-2$ の測定を目指している。ここで, ミュオンビームの超低エミッタンス化には世界初となるミュオン線型加速器[3]の実現が必要不可欠となる。

ミュオン線型加速器では RFQ による初期加速とバンチングの後 IH-DTL によって 0.34MeV から 4MeV まで加速し, 続いて DAW, disk loaded による加速で最終的に 212MeV まで加速する。 $\beta\lambda/2$ 加速構造である IH-DTL を採用することで短距離加速を実現できる一方で, IH-DTL では空洞全体の構造が RF 加速電場及び共振周波数に影響するために詳細な空洞設計が不可欠となる。さらに我々は近年医療用イオン線型加速器で可能になった Alternative Phase Focusing(APF)方式を採用して横方向収束のための四重極磁石を取り除き費用対効果も最大化することを目指している。APF 方式では横方向収束を可能にするための自由度として各セルでの同期位相が増えるが, 空洞設計との両立には高度な設計技術が必要となる。

本ポスターでは 3 次元電磁界解析ソフト CST MW Studio や 5 次ルンゲ=クッタ法による粒子軌道計算ソフト GPT などによるシミュレーションを用いた APF IH-DTL の設計について報告する。

[1] G.W. Bennett, et al., Phys. Rev. Lett. 92, 161802 (2004)

[2] J-PARC E34 conceptual design report (2011)

[3] M. Otani et al., PASJ2015 WEOM02

ミュオン線型加速器二重周期構造 DAW の設計 Design of a bi-periodic DAW for Muon linac

大谷将士 for the J-PARC E34 collaboration, KEK IPNS

ミュオン異常磁気能率($g-2$)において素粒子標準理論(SM)による予言値と実験による測定値(精度 0.54ppm)の間に約 3 標準偏差の乖離があり[1], 更なる高精度測定と独立検証によって beyond SM を切り拓くことが切望されている。J-PARC E34 実験[2]では超低エミッタンスミュオンビームによる新測定手法によって世界最高精度 0.1ppm で $g-2$ の測定を目指している。ここで, ミュオンビームの超低エミッタンス化には世界初となるミュオン線型加速器[3]の実現が必要不可欠となる。

ミュオン線型加速器では RFQ 及び IH-DTL によって 4MeV まで加速し, 続いて Disk And Washer(DAW)と disk loaded による加速で最終的に 212MeV まで加速する。DAW は結合型加速空洞の一種で特に高 β 領域で高いシャントインピーダンスを持つため高効率加速に適している。一方でミュオン加速は世界初の試みであり, また, 比較的低い $\beta E=4\text{MeV}$, $\beta \sim 0.3$ で用いられた前例がないため, 信頼度の高い空洞設計が必要不可欠となる。

本ポスターでは 3次元電磁界解析ソフト CST MW Studio などのシミュレーションによる DAW 空洞設計とプロトタイプ製作, さらに Parmila などを用いたビーム力学設計について報告する。

[1] G.W. Bennett, et al., Phys. Rev. Lett. 92, 161802 (2004)

[2] J-PARC E34 conceptual design report (2011)

[3] M. Otani et al., PASJ2015 WEOM02

St707[®]NEG ピル縦積層型 NEG ポンプの 開発と排気速度測定

Development and Pumping Speed Measurements of a NEG Pump Using Vertically Aligned St707[®] Pills

菊地貴司¹、田中正人²、小玉 開³、間瀬一彦^{1,4}

1 KEK 物構研、2 千葉大院融合、3 横国大院工、4 総研大

非蒸発型ゲッター (non-evaporable getter, NEG) ポンプは、油をまったく使用しない、 10^{-10} Pa 台まで排気できる、無振動無騒音、磁場を伴わない、小型軽量、蒸発・スパッターを伴わない、低コストで初心者でも製作できることから、ビームラインやエンドステーションの超高真空ポンプとして最適である。我々は St707[®]合金ピル 60 個を実効的な表面積が最大になるに配置した低コスト高性能ピル縦積層型 ICF70 NEG ポンプ (図 1) を開発し、オリフィス法に基づく排気速度測定装置 (図 2) を用いて排気速度測定を行なった。400°C、30 分加熱で活性化を行なった場合の H₂、N₂、CO、CO₂ に対する排気速度はそれぞれ、130-110、35-15、170-120、200-80 L/s であった。既存の NEG ポンプと比べても十分競争力のある性能が得られたので、本ポンプの製品化を進めている。

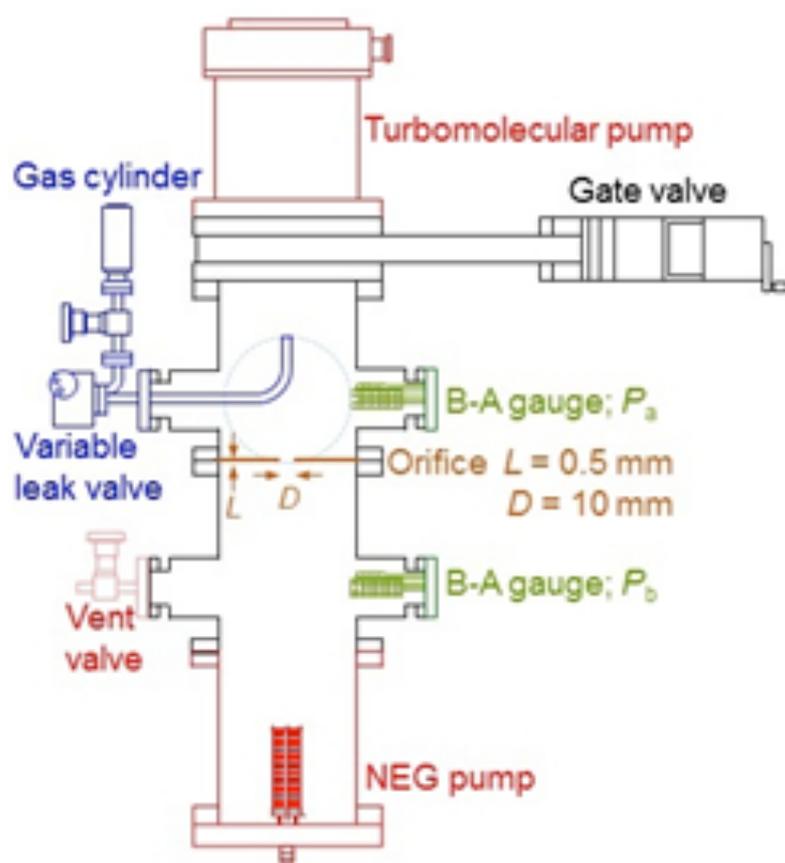


図 1. ICF70 NEG ポンプ。 図 2. オリフィス法に基づく排気速度測定装置。

セミマイクロ XAFS ビームライン BL-15A1 の整備状況

BL-15A1:Semi-micro beamline for XAFS

仁谷浩明^{1,2}, 武市泰男^{1,2}, 木村正雄^{1,2}

松岡亜衣¹, 小山篤¹, 清水伸隆^{1,2}, 五十嵐教之^{1,2}

¹)KEK-IMSS/PF, ²)総研大高エネルギー加速器科学研究科

1. 概要

PF BL-15A1 実験ステーションは PF 最後の短直線部を利用した XAFS 実験ステーションである。短周期アンジュレーターを光源とし、十分な強度と使い勝手のよさを念頭においた設計となっており、昨年度より段階的にユーザー実験を開始している。本発表ではビームラインの構成やエンドステーションに導入されている XAFS・XRF・XRD 複合分析システムを中心に紹介する。

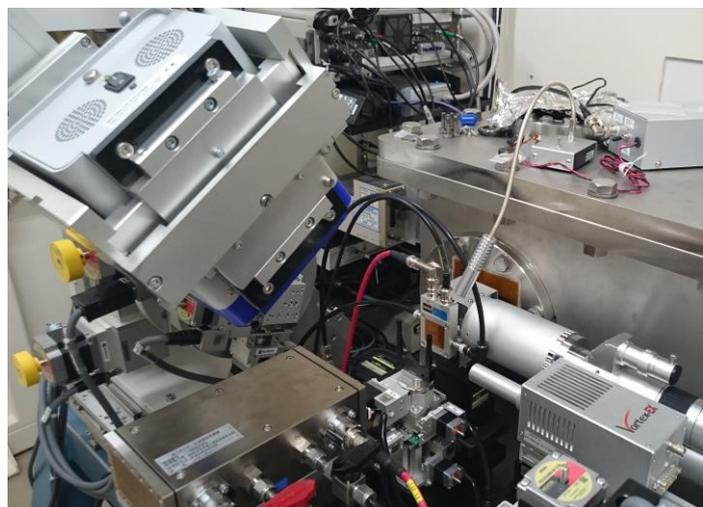
2. 光学系

BL-15A1 は短周期アンジュレーター(SGU#15)を光源とし、液体窒素冷却計算駆動方式の Si(111)二結晶分光器と組み合わせることで 2.1~15 keV のビームが利用出来る。X 線経路から Be 窓を排除することで低エネルギー域でのロスを抑え、利用可能な全領域で 10^{11} 後半~phs/sec の光子束が得られる。また、アンジュレーターと分光器が協調駆動するシステムを構築中である。

集光光学系には水平方向の集光に 16 素子の圧電素子を備えたバイモルフミラーを使用し、試料位置でのビームサイズで 10 ミクロン台を達成している。また、光学素子の安定性向上のため、実験ホールの床改修工事やリアルタイムビームポジションモニタを整備中である。

3. 測定系

試料位置でのビームの照射位置を正確に把握するため、X 線同軸顕微鏡を備えており、容易に狙った位置に X 線を照射することが可能である。検出器には通常の電離箱の他に SDD と PILATUS100K を装備している。SDD は蛍光 X 線測定用、PILATUS100K は回折実験となっている。これらの検出器は同時に使用することができ、サンプルのスキャン機能と組み合わせることにより、化学状態と相状態をずれなくマップすることができる。また、低エネルギーの出射が可能な分光器の特徴に合わせ、低エネルギー実験用の試料マウントシステムを作成中である。



硬 X 線 XAFS ビームラインの近況 Hard X-ray XAFS beamlines

仁谷浩明^{1,2}, 丹羽尉博¹, 武市泰男^{1,2}, 阿部仁^{1,2}, 木村正雄^{1,2}

¹)KEK-IMSS/PF, ²)総研大高エネルギー加速器科学研究科

PF 物質化学グループでは、硬 X 線 XAFS 実験ステーションを運用しており、現在 PF および PF-AR において 6 つの専用ステーションを有している。XAFS 実験は、年間約 200 件の課題が実施されているが、XAFS はあくまで分析手法であるため、分析対象は触媒から構造材料、岩石、細胞など、あらゆる分野に利用されている。このように多岐にわたる XAFS 実験をスムーズに行えるように、既存の実験ステーションをある程度“特化”させて、似通った実験をまとめることで、効率的なビームタイム運用を目指している。具体的には次のような振り分けとなっている。

- BL-9A: 高強度・軟 X 線ステーション
2.1keV から利用出来る高強度 X 線を生かして、低濃度試料や表面分析をターゲットにしている。19 素子 Ge 半導体検出器が利用可能。
- BL-9C: その場観察実験ステーション
触媒や電池材料など、主にガスフローを伴う化学実験のその場(in situ)観察実験をターゲットにしている。コンピュータによりプログラミング可能なマスフローガス混合システムとそれと同期制御された昇温炉が使用可能。
- BL-12C: ハイスループットステーション
産業利用など、ルーチンワーク的に大量の試料を測定する実験をターゲットにしている。100 連装ロボットアーム型自動試料交換装置や、自動電離箱ガス切り替え装置等が使用可能。
- BL-15A1: セミマイクロビームステーション
アンジュレータからの高輝度ビームを利用して、試料位置において 20 ミクロン角のビームが利用可能。9A に匹敵する強度もあるため、高速試料スキャンによるマッピング実験も短時間で可能。
- AR-NW2A: 時間分解および高強度単色 X 線ステーション
白色 X 線と湾曲分光結晶を利用した DXAFS 実験をターゲットにしている。レーザーを利用したポンププローブ実験など AR リングの特徴である単バンチ運転を生かした実験が可能。
- AR-NW10A: 高エネルギー X 線ステーション
6.5GeV の AR リングを光源とし、最大 42keV までの単色 X 線が利用可能。PF では届かないエネルギー域であるため、半導体検出器やその場観察実験設備など多くの実験に対応が可能。

参考: PF-XAFS Web サイト <http://pfxafs.kek.jp/>

KEK-PF における STARS をベースとしたビームライン制御システムおよびソフトウェアの現状

Present status of the STARS-based beamline control system and softwares at the Photon Factory

永谷康子、小菅隆、渡邊一樹、仁谷浩明
KEK-PF

KEK-PF では、KEK-PF で開発された標準制御ソフトウェア STARS (Simple Transmission and Retrieval System) をベースとした放射光ビームライン制御システムの整備とソフトウェアの開発を行っている。

放射光ビームライン制御システムは、主にビームラインにある分光器やミラー、スリットなど光学系機器の制御を対象としており、ビームラインの放射光の位置や強さを調べるための調整ツールなどを提供している。さらに一部のビームラインにおいて STARS をベースとした計測系システムの提供も行っている。

2015 年度は、NE5C 高圧ビームラインに、XAFS ビームライングループの協力を得て STARS ベースの XAFS 実験システムが新たに設置された。

また、BL-2 及び BL-13 の斜入射分光器を対象とした分光器制御プログラムの更新を行った。

そして、BL-15A2 ではサンプルチェンジャーの制御と組み合わせた連続測定システムの試験運用が進行中である。

ここでは、KEK-PF における STARS をベースとしたビームライン制御システムの導入および制御ソフトウェアの開発の現状について報告する。

表 STARS で制御をおこなっているビームライン一覧

カテゴリー	ビームライン名
2.5 GeV Ring X-ray	BL-1A, BL-3A, BL-3B, BL-4B2, BL-4C, BL-5A, BL-6A, BL-6C, BL-7C, BL-8A, BL-8B, BL-9A, BL-9C, BL-10C, BL-12C, BL-14A, BL-15A1, BL-15A2, BL-17A, BL-18B, BL-18C
PF-2.5 GeV Ring VUV and Soft X-ray	BL-2, BL-11A, BL-11B, BL-11D, BL-13A/B, BL-16A, BL-19, BL-20A, BL-28
PF-AR	NE1A, NE3A, NE5C, NE7A, NW2A, NW10A, NW12A, NW14A
その他	Slow Positron Facility

J-PARC ミュオン施設の新規ビームライン:Hライン A new beam line in J-PARC Muon Facility: H line

河村 成肇

KEK 物構研ミュオン・J-PARC ミュオンセクション

J-PARC ミュオン実験施設 (MUSE) は平成 21 年末に 1.8×10^5 個/パルス @120kW の強度を観測し、パルスビームとして世界一の強度となった。強度の増加は、従来では不可能と思われていた高統計、即ち多くのミュオンを必要とする実験を現実のものへと変える。

ニュートリノ振動の観測などで既に矛盾が生じている標準理論は、それを超える理論の構築を目指し多くの研究がなされてきた。第 2 世代レプトンとして不安定でありながら、比較的容易に大量生成できるミュオンは、強度フロティアでの実験に最適な素粒子である。

MUSE で得られる大強度ミュオンビームは、従来のを超える高統計の実験を実現することが可能である。一方、既設のビームラインは、汎用性を目指して設計されたビーム強度が中庸なもの (D、S ライン)、または大強度だが取り出せるミュオンの運動量が固定のもの (U ライン) である。また、既設ビームラインでは多くのユーザーが、短期間 (数日程度) で入れ替わりながら実験を行う。このことは 1 年程度を単位とする高統計実験の実施を現実的に難しくしている。そこで、MUSE では基礎物理分野の高統計実験 [1-3]、透過型ミュオン顕微鏡の実現などに供する新規ビームライン (H ライン) の設計・設計が進められている。平成 24 年、26 年夏期に放射化の著しいビームライン先頭部が下流に先行して完成し、陽子ビームライントンネル内での作業はほぼ終了した。

本講演では、来年度以降で設置を予定するビームライン下流側の電磁石、遮蔽等の設計の進捗、及び今後の予定に関して報告する。

参考文献：

[1] N. Saito, NuFact11 proceedings.

[2] S. Mihara, *ibid.*

[3] K. Shimomura, *ibid.*

Offline SEOP 方式偏極ヘリウム 3 ガス中性子スピ ンフィルター用の磁場環境の設計 Design of Magnetic Cavities for Offline SEOP Based Polarized ^3He Neutron Spin Filters.

吉良弘¹、林田洋寿¹、奥隆之²、酒井健二²、廣井孝介²、猪野隆³、
大河原学⁴、大山研司⁵、大石一城¹、岩瀬裕希¹、鈴木淳市¹、高田慎一²、
加倉井和久²

1 総合科学研究機構、2 原子力機構、3 高エネ機構、4 東北大金研、
5 茨城大院理工

原子核スピ
ンが偏極したヘリウム 3 は、原子核スピ
ンと反対向きのスピ
ンを持つ中性子に対して非常に大きい吸収断面積を持つこと、散乱断面積が非常に小さいことから、J-PARC MLF のパルス中性子の効果的な偏極・検極手段として利用可能である。我々は、BL15 でのアナライザーとしての利用を念頭に、Offline SEOP 方式の偏極ヘリウム 3 ガス中性子スピ
ンフィルター(^3He NSF)の開発を進めてきた。今回は、この結果を受け開発を進めてきた Offline SEOP 方式 ^3He NSF 用磁場環境のデザイン(図 1)について報告する。Offline SEOP 方式の採用によりシステム全体の簡略化を図り、また試料をセル直前に設置可能なので検極可能な立体角を大きく取ることができ小角バンク全体のスピ
ン分析が可能となる計画である。また、 ^3He ガスセルの偏極は MLF 第一実験ホールに設置予定の偏極ステーションで行う予定である。

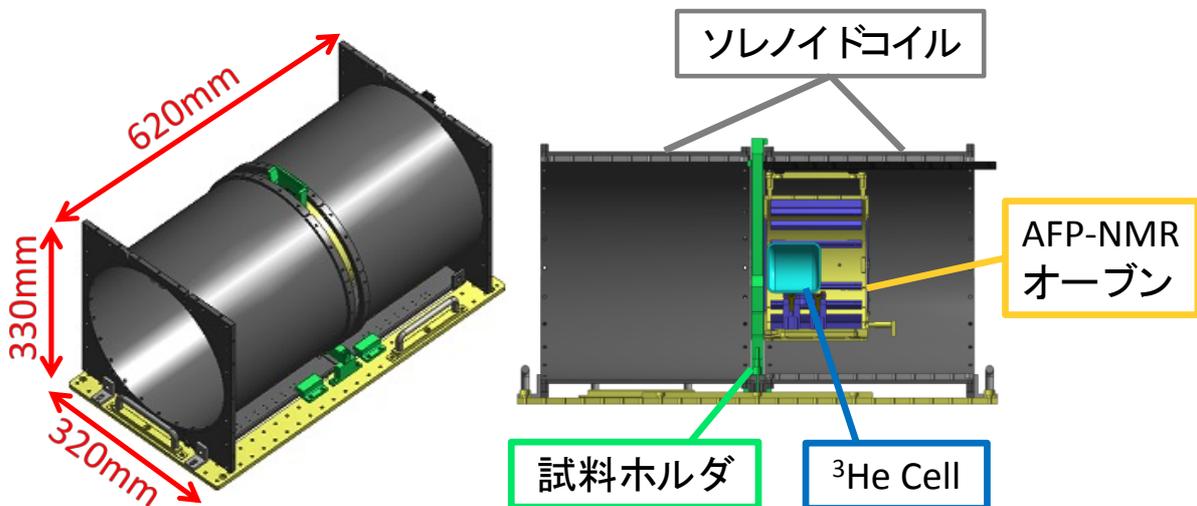


図 1 設計した Offline SEOP 方式 ^3He NSF アナライザーの模式図

U-Line コミッショニングの最新状況 The latest status of the U-Line commissioning

足立泰平¹、池戸豊¹、アンバダットパント¹、山内口宏¹、大石裕¹、中村惇平¹、
ストラッサーパトリック¹、伊藤孝²、髭本亘²、牧村俊助¹、河村成肇¹、
下村浩口郎¹、門野良典¹、三宅康博¹、鳥養映口³
1 KEK物構研、2 原研先端研、3 山梨口医学口学

超低速ミュオンは、表面や界面の物性を始めとし、多様な物理・化学・生命現象を探るプローブとなるものと期待されており、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学研究施設(MLF)に超低速ミュオンビームライン(U-Line)[1]が建設された。U-Line の構成要素は、約 4MeV の表面ミュオンを輸送するソレノイド、ミュオンを一旦止めてミュオニウムとして再放出するタングステン標的、ミュオニウムをイオン化する為のレーザー、ミュオニウムがイオン化してできた超低速ミュオンを輸送する為の静電オプティクスなどからなる。それぞれの構成要素は、超低速ミュオンを生成する前に、熱イオン化したりチウムの輸送実験や、水素をレーザーイオン化して輸送する試験などにより、チューニングを行ってきた[3,4]。また、ソレノイドについては、表面ミュオンの輸送効率や運動量の最適化などを行ってきた。

発表では、これら試験の最新の結果について報告する。また、MLF でのビーム運転が2月中旬に再開される予定であり、超低速ミュオンビームの生成実験などの結果についても報告する予定である。

本研究は文科省科研費 23108002 の助成を受けている。

- [1]. K. Shimomura et al., AIP Conf. Proc. 721, 346–349 (2004).
- [2]. T. Nagatomo et al., JPS Conf. Proc. 2, 010102 (2014).
- [3]. T. Adachi, et. al., JPS Conf. Proc. 8, 036017 (2015).
- [4]. T. Adachi, et. al., PoS NuFACT2014 097, (2015).

Transportation of ultra slow muon in U-line: measurement and simulation

A.D. Pant¹, T. Adachi¹, Y. Ikedo¹, K. Shimomura¹, J. Nakamura¹,
Y. Oishi¹, P. Strasser¹, W. Higemoto², R. Kadono¹, Y. Miyake¹ and
E. Torikai³

¹*Muon Science Laboratory, High Energy Accelerator Research
Organization (KEK),* ²*Advanced Science Research Center, Japan
Atomic Energy Agency, Tokai,* ³*Interdisciplinary Graduate School,
University of Yamanashi, Japan*

In order to transport ultra slow muons generated by laser resonant ionization of muonium [1] at Mu production chamber to experimental ports - U1A (ultra slow muon beam for surface and interface study with nm depth resolution) and U1B (muon micro beam for 3D imaging inside material with μm spatial resolution) in U-line, MLF, J-PARC [2], we use electrostatic SOA lens for acceleration and focus of beam, a magnetic bend for mass separation to remove background positrons, electric bends and electric quadrupoles for focusing and transportation of the beam. In the U1A line, high deceleration voltage (upto $\sim 30\text{kV}$) and Enzil lens are used to get the ultra slow muon beam ($20\text{ eV} \sim 20\text{ keV}$) of size $\sim\text{mm}$ at μSR spectrometer. In U1B line, there is re-acceleration of beam to several hundreds keV to get micro muon beam of size $\sim\mu\text{m}$.

Since the simulation study helps to tune the beam for its transportation by providing optimized values of magnetic and electric components, here, a simulation study of the transportation and tuning of ultra slow muon beam to U1A is presented by using Monte Carlo simulation based code – musrSim [3] and, hopefully, its comparison to measurement. For the transportation of muons using musrSim code, the laser ionized slow muons are transported to experimental port U1A by tuning the components - SOA lens, a magnetic bend, 12 electric quadrupoles, 3 electric bends and an electric deflector. Three-dimensional static electric and magnetic field maps used in musrSim are calculated using (OPERA-3D) [4]. The comparative study between measurement and simulation of beam profile at different focusing points in the beam line and finally at μSR spectrometer in U1A area will be presented.

[1] K. Nagamine et al., Phys. Rev. Lett. **74**,4811 (1995)

[2] Y. Miyake et al., JPS Conf. Proc. **2**, 010101 (2014)

[3] K. Sedlak, et al., Manual of musrSim, <http://lmu.web.psi.ch/simulation/index.html>

[4] T. Nagatomo et al., JPS Conf. Proc. **2**, 010102 (2014)

高輝度真空紫外軟 X 線ビームライン PF BL-13 の現状 Present Status of High-Brilliance Vacuum Ultraviolet and Soft-X-Ray Beamline PF BL-13

○豊島章雄¹、田中宏和¹、菊地貴司¹、武市泰男¹、雨宮健太^{1,2}、間瀬一彦^{1,2}
¹KEK-PF、²総研大物質構造科学専攻

PF の高輝度真空紫外軟 X 線ビームライン BL-13A は、2009 年に建設され [1]、共同利用と並行して光学素子の炭素汚染除去[2]、および光エネルギー分解能と光量の改善を行なってきた。さらに、2013 年春に光電子分光用光学系 (BL-13B) を建設して、分岐に Cr コート、Ni コート、Au コートの 3 種のミラーを設置することにより、BL-13B の高次光を効率的に除去した (図) [3]。2015 年 2 月には挿入光源を APPLE-II 型可変偏光アンジュレーターに更新し、48~1,600 eV の水平直線偏光、102~1,600 eV の垂直直線偏光、74~700 eV の左右円偏光、59~1,600 eV の左右楕円偏光を利用できるようにした。本発表では、BL-13B で導入した高次光除去ミラーの性能評価、炭素汚染除去、可変偏光アンジュレーター導入後の BL-13A/B の性能評価結果について報告する。

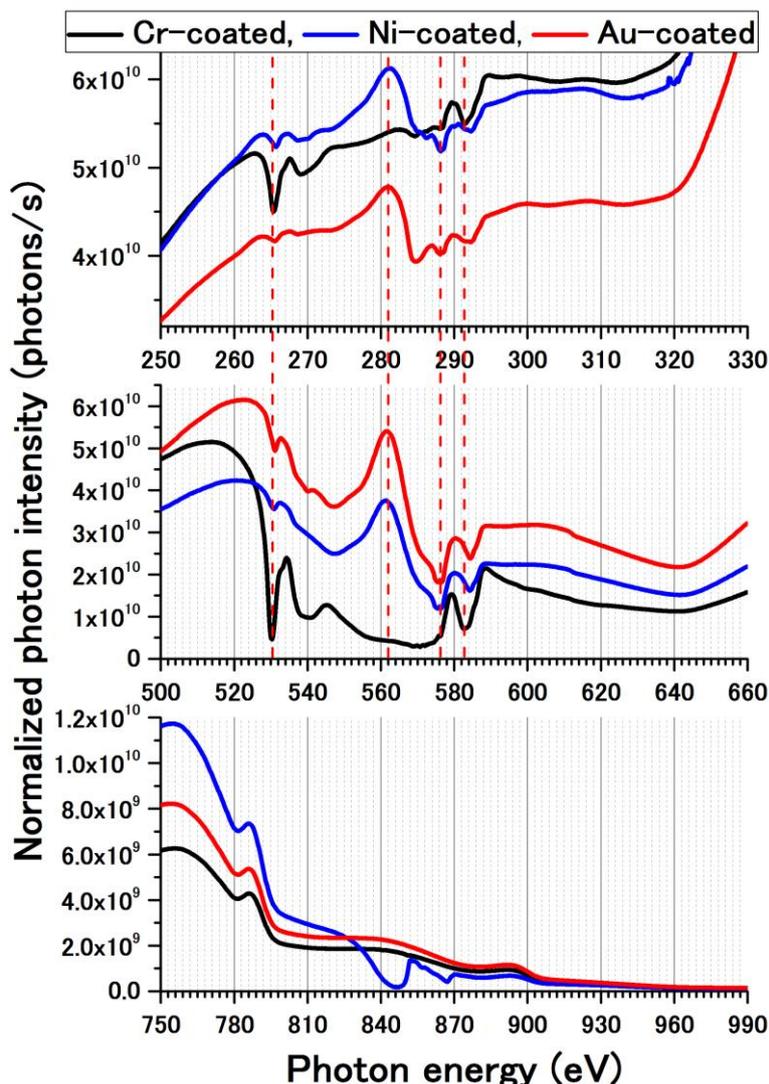


図. BL-13B の光量スペクトル[3]。Cr ミラーを用いると炭素 K 吸収端で高次光を除去できる。本発表では、BL-13B で導入した高次光除去ミラーの性能評価、炭素汚染除去、可変偏光アンジュレーター導入後の BL-13A/B の性能評価結果について報告する。

参考文献 [1] A. Toyoshima *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn. **54**, 580 (2011).
[2] A. Toyoshima *et al.*, J. Synchrotron Rad. **19**, 722 (2012).
[3] A. Toyoshima *et al.*, J. Synchrotron Rad. **22**, 1359 (2015).

STARS と様々なシステムへの応用例 STARS and Its Various Applications

小菅隆¹、仁谷浩明¹、渡邊一樹²

1 Photon Factory、2 三菱電機システムサービス

高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory (以下 KEK-PF) では多くのビームラインにビームライン制御や計測のためのシステムとして STARS(Simple Transmission and Retrieval System)が導入されている。

STARSはTCP/IP Socketとテキストベースのメッセージ送受を行う大変シンプルなシステムであるとともに大きな拡張性も備えている。STARSのサーバはWindowsやMacintosh、Linuxといった様々なOS上で動作可能であるため、様々なシステムへの応用が可能である。また、プログラム自体も小さく、組み込み用のLinuxなどが動作するワンボードマイコンなどでも十分なパフォーマンスを得る事ができる。

以上のようなことから、STARSはビームライン制御以外にも様々なシステムに有効であり、実際に我々は「ビームラインインターロック集中管理システム」、「ビームラインインターロックシステム」(図1)、「入室管理システム」、「キー管理システム」等へ応用してきた。ここではSTARSの概要及び新タイプのビームラインインターロックシステムをはじめとするSTARS応用例を紹介する。

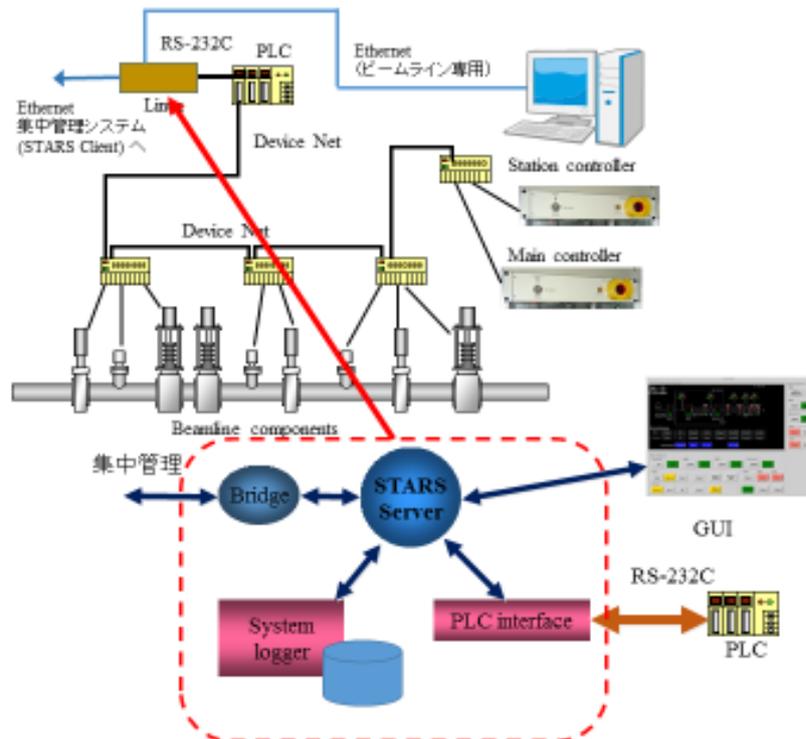


図1. ビームラインインターロックシステムへの応用例