

## ■ 会議報告

International Forum on Detectors for Photon Science  
(IFDEPS 2018) 会議報告

今井康彦 (高輝度光科学研究センター)  
初井宇記 (理化学研究所)

IFDEPS は、放射光分野の検出器に関する議論を行うために、ESRF の Pablo Fajardo 博士、SLAC の Gabriela Carini 博士<sup>†</sup>、理研の初井の3名が Organizer となって立上げたワークショップであり、今回が2回目となる。第1回は、2016年2月28日-3月1日に富士山の麓である河口湖畔のホテルで開催された<sup>1)</sup>。このときは、日本では産業界を中心に可視光 CMOS イメージセンサの研究が盛んであることから、CMOS イメージセンサの X 線応用をハイライトトピックとして、X 線画像検出器で要求される高エネルギー光子検出、高ダイナミックレンジ、XFEL 用の積分型検出器などの画像検出器に関する集中的な議論が行われた。第2回の今回は、光子のエネルギーを検出できる固体検出器(エネルギー分散型検出器)をハイライトトピックに設定し、2018年3月11日-14日にフランスのアヌシー湖畔のホテル Les Trésoms で開催された。ワークショップは招待制で、施設長の推薦を受けた1施設1名の施設代表と招待講演者のみの参加となっている。世界各地の21の放射光施設を含む35の大学・研究機関から49名の参加があった。日本からは KEK の岸本俊二先生と筆者らが施設代表として、AIST の大久保雅隆先生が招待講演者として参加した。Fig. 1 に集合写真を示す。

プログラムは、ハイライトトピックであるエネルギー分散型検出器に加えて、新しい検出器を使った初めての実験結果、データ収集系で構成され、最終日には各セッションのチェアによるまとめと10年後の予測が行われた。セッションの構成は次の通りである。

Session 1: IFDEPS Opening

Session 2: Update on development activities at photon sources

Session 3: Semiconductor sensors for X-ray spectroscopy

Session 4: Readout architectures for high count rate energy dispersive detection systems

Session 5: Advanced multielement and position sensitive energy dispersive detectors

Session 6: Detection technologies for high resolution spectroscopy

Session 7: First operation experiences with new detectors

Session 8: Overview of DAQ general strategies at large facilities

Session 9: Technologies for high-throughput data acquisition

Session 10: Future of photon science detectors

アブストラクトと講演のスライドは web で公開されているので、詳細に興味がある方は、そちらも参照していただきたい<sup>2,3)</sup>。ここでは概要と主要なトピックスについて紹介する。

ESRF の M. Krisch 博士による Opening talk では、将来の光源を使った実験で必要となる検出器とヨーロッパにおける検出器開発の状況が紹介された。光源のアップグレードは ESRF だけでなく、多くの放射光施設で検討・実施されている。次世代光源では検出器に対する要求が厳しくなることに加え、多様な検出器が必要とされる。開発費の捻出を考えると施設を運営する立場からは悪夢(nightmare)だと述べ、この困難に立ち向かうには情報交換のレベルを超えたグローバルな共同開発が必要との主張であった。質疑応答では、グローバルな協力を実現する上での予算や研究遂行体制の課題について、主に米国の参加者からコメントが相次いだ。Opening の後は、Annecy の街のガイド付きツアーがあり、夕食が Annecy 旧市街のレストランで振る舞われた。

2日目は、15の施設の代表からの検出器の開発状況の紹介で始まった。持ち時間は一人3分間と短かったが、これで様々な検出器開発の状況がわかるように構成されていた。ヨーロッパでは、開発は施設単独ではなく、複数の研究機関による協力で行われることがほとんどであった。この活発なコラボレーションは、EU の研究開発予算がコラボレーションを前提としている、という理由にもよる。一方アメリカでは、DOE が研究所間を競わせるという土壤があるためか、研究所間の共同開発はそれほど多くない。また、ヨーロッパはスピンアウト企業による検出器の供給が一定の成功を収めており、ほとんどの研究所がスピンアウト企業を有しているのに対し、アメリカではスピンアウト企業は現時点でほとんどない。ただし、研究所間の契約によりヨーロッパの施設への導入例が出てきている

<sup>†</sup> Carini 博士は現在 Brookhaven 国立研究所に所属している。



Fig. 1 Group photo of the IFDEPS 2018 at Les Trésoms Hotel beside the Lake Annecy.

(Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) の fastCCD が EuroXFEL に採用されたなど)。

セッション3~9は、エネルギー分散型検出器、新しいタイプの検出器、データ収集 (data acquisition, DAQ) についてである。今回の研究会で改めて明らかになった新しい潮流は Ge の躍進である。筆者らから見て新しい応用の可能性を具体的に示していたのは Brookhaven National Laboratory (BNL) の A. K. Rumaiz 博士による Ge strip 検出器開発の発表で、strip 192個および strip 384個を有する検出器が NSLS-II や APS で順調に稼働していることが報告された。Strip それぞれが、Silicon Drift Detector のようにエネルギー分析できる。エネルギー分解能の実績としては 60 keV で 450 eV という結果が示されていた。粉末結晶構造解析用の 384 strip の検出器では、一つの strip が  $125\ \mu\text{m} \times 8\ \text{mm}$  で厚みは 3 mm あり、高エネルギー領域でも高い量子効率を実現できている。また、光子それぞれのエネルギーと到来時刻を保存できる信号処理用集積回路が搭載されている。同一光子由来の隣接したストリップにまたがった信号の強度比情報から、後処理によって strip の間隔を超える空間分解能を実現できる予備実験データも示された。筆者 (初井) の印象でしかないが、 $20\ \mu\text{m}$  以下の空間分解能も実現できそうである。Strip 検出器の場合、strip 1 本あたりの体積が小さいので信号処理回路当たりの暗電流が少ない。したがって、原理的には旧来の Ge 検出器に比べ高い動作温度でも同一性能を実現できる。彼らの検出器は、クローズドサイクル型の窒素冷凍機を接続す

る簡潔なシステムにまとめられていて、ゴニオメータにマウントして回転できていた。Ge は、 $\text{GeO}_2$  が不安定な化学状態であり、酸化膜による絶縁が困難であることがデバイスとしての弱点であった。Ge strip 検出器が実用化されたのは、酸化膜の代わりにエッチングで溝 (トレンチ) を掘り、真空中に絶縁層の役目をさせるという新技術の開発が背景にある。このトレンチ技術はドイツユーリッヒ研究所の T. Krings 博士らが開発したもので、BNL のプロジェクトに提供されている。Krings 博士のグループは検出器グレードの Ge 加工技術において最先端の研究開発を行っている。

次に、Krings 博士らと共同研究している Politecnico di Milano の A. Castoldi 博士から、Germanium drift detector (GeDD) の実用化に向けた取り組みが紹介された。これまでは Si に限られていた Drift detector を Ge で実現するものである。実用化されると、20 keV 以上のエネルギー領域において、広い面積・高いエネルギー分解能・高い計数率・より高温での動作が期待できる。Drift detector は小さなアノードに信号電荷が集まるようにセンサ内部の電界をテーラーメイドしなければならない。この電界構築のために必須なのが、多数の電極用 strip 間を絶縁する技術である。絶縁特性を評価するための試作品で、実用バイアス条件で strip 間の耐圧を 10 V 以上を確保することができたとの興味深いデータが示された。また、このデータに基づく詳細なシミュレーションから大面積 GeDD、マルチエレメント GeDD が可能であることが示された。

2018年2月からプロトタイプ GeDD を製造中とのことで、会場の多くの参加者から質問が相次いだ。コーヒープレイクでは、MIT の Lincoln Laboratory による Germanium CCD の開発<sup>4)</sup>も話題となり、筆者らは Ge 検出器のルネッサンスともいべき新しい潮流を強く感じた。

また、5年ほど前にホットトピックであった CdTe 画像検出器は、結晶を製造しているアクロラド社の結晶の質が向上したこと、およびセンサの実装方法を各研究所が蓄積してきたことがあり、これを利用した検出器が各施設で順調に立ち上がってきている。更に新しい可能性としては、STFC Rutherford Appleton Laboratory の M. C. Veale 博士が講演の中で議論を行った、高精細なサブピクセル分解能の画像取得（ $\sim 10 \mu\text{m}$  レベルと推定）がある。

英国 Surrey 大学の Paul Sellin 博士は、Ge 以外の重原子センサ材料についてレビュー講演を行った。20 keV 以上の硬 X 線検出用の新しい半導体材料（CdZnTe, CdTe, Ge, GaAs 以外）が、核物質の検出と同定を目的とした安全保障分野で多く研究開発されている。しかし、安全保障向けでは、放射光利用実験で重要な X 線照射耐性や高計数率能力は要求されない。したがって、これらの基礎データはまだ蓄積されていない。筆者らの印象では、放射光用途の実用的な重元素新材料はまだこれからというところであった。

また、BNL の D. P. Siddons 博士からは、Si フォトダイオードを384個集積した Maia detector system の発表があった。中心に穴の空いたセンサで、ちょうど背面 Laue 写真を撮影するようにして用いる蛍光 X 線検出器である。広い立体角が見込め、検出器とスキャン用モータがシステムとして同期動作するように作り込まれており、Australian Synchrotron, PETRA-III, DESY, NSLS-II, CHESS といった放射光施設だけでなく X 線発生装置とも組み合わせるべく用いられるようになってきている。Maia 検出器のエネルギー分解能は200 eV FWHM より悪く、技術的には改善の余地がある。しかし、実際の微小ビームを使うアプリケーションでは微量元素の濃度が相対的に高くなるので、エネルギー分解能よりも実効的なスループット等のほうが性能指標として重要であるとの見解を示していた。また、蛍光 X 線の放出角度と強度の関係から、元素の深さ情報についてもマッピングが可能であることが示されていた。

AIST の大久保雅隆先生は、超伝導検出器の一つである超伝導トンネル接合検出 (Superconducting tunnel junction: STJ) と超伝導細線検出器 (superconducting nanostripline detector: SSLD) の最近の進展について、原理と応用例についての報告をされた。STJ 検出器については100素子のシステムが開発されており、400 eV の光子エネルギーにおいて高計数率 (200 kcps) と10 eV 以下のエネルギー分解能が実現されている。今後1 eV 程度の分解能、1000素子までのアップグレードを進めるとのことであっ

た。STJ 検出器では、クーパー対が高速に STJ 部に移動し電流信号に変換される。このため、後述する TES や MMC といったカロリメータに比べ素子当たりの計数率が約1000倍高い。利用例として、放射光での微量元素の蛍光収量軟 X 線吸収分光の例が示された。また、SSLD は超伝導状態が X 線光子によって壊れることを利用した光子検出方法で、エネルギー分解能はないものの、1次元方向のみではあるが CCD 検出器よりも高い  $1 \mu\text{m}$  以下の空間分解能が得られる。超高分解能軟 X 線非弾性散乱分光器に向けて台湾 TPS との共同開発に着手したとの報告があった。CCD では表面の不感層により軟 X 線領域で感度が低下するが、SSLD では原理的に感度100%を達成できるなどの特徴も併せ持つことが利点であるなどの議論が展開された。

STJ 検出器ではセンサ部を厚くすると、STJ 部に伝搬する前にクーパー対が壊れてしまう。したがって、硬 X 線で高い感度を実現するには限界がある。現時点では1 keV 程度までの利用にめどが立っている。一方、厚いセンサ部を構築でき高エネルギー X 線検出が原理的に可能なものに、X 線光子が吸収されたときのセンサ部の温度上昇を測定する検出器がある (カロリメータ)。温度上昇によって超伝導状態が壊れる現象を利用し温度変化を高感度に検出するのが超伝導転位端センサ (transition edge sensor: TES) で、NIST の Douglas Bennett 博士が報告を行った。TES 検出器は、エネルギー分解能は素子の熱容量に依存する。高エネルギー X 線を高感度に検出しようとすると、素子が大きく (熱容量が大きく) なるのでエネルギー分解能が悪くなる。したがって、ターゲットの X 線エネルギーごとに素子サイズを最適化することが一般に行われる。また、超伝導転移温度よりやや低い温度 (100 mK 程度) の極低温に保つ必要がある。この10年でクライオスタット技術は進歩し、今ではスイッチを入れるだけで検出器を確実に冷却できるが、試料周りからの熱流入には注意が必要とのことであった。実測で、2.1 eV @ 5.9 keV, 1.0 eV @ 500 eV のエネルギー分解能が得られていた。この NIST で開発された TES 検出器は、SLAC などに提供されて利用が始まっている<sup>5)</sup>。素子温度と超伝導状態が壊れることによる電流変化の物理的な関係は複雑である。したがって、この検出器は光子エネルギーと出力信号が非線形で複雑な関係であること、TES 部の温度変化によるエネルギー位置のドリフトなどにも注意が必要である。NIST が作成したデータ補正等を行うソフトウェアはよくできているものの検出器の専門家向けであり、ビームラインへのインテグレーション時に苦労があったとのことであった。ユーザーコミュニティ全体でデータ補正を行う宇宙分野と放射光の文化の違いが一因とのコメントもあった。

Heidelberg 大学の Andreas Fleischmann 博士は、磁性体の磁場変化の測定で X 線による温度上昇を検出する

Magnetic Micro-Calorimeters (MMC) について講演を行った。比較的新しい技術であるが、X線光子エネルギーと出力信号に直線性があること、多素子化が比較的容易であることが TES に比した優位点である。2021年に1000素子を目指しているとのことであった。放射光のようにセンサ面積と計数率が必要なアプリケーションでは MMC の将来の発展も期待される。

セッション6の最後には、Helsinki 大学の Simo Huotari 博士が分光器による X 線光子エネルギー検出について丁寧なレビューを行った。結晶分光器の高次反射が重なる場合などで TES, MMC 等のカロリメータが有効ではないか、等の議論が展開された。

セッション9では、高エネルギー物理の分野の DAQ について講演があった。技術的な細部について参考になる部分もあったが、ここでは割愛する。全体として、高エネルギー物理実験の例は参考になることがあったとしてもそれほど多くはなく、高エネルギー物理の分野で独自の DAQ 開発が行われてきたように、放射光分野でもコミュニティの要求に答える DAQ の戦略的な開発が必要とされていると改めて認識した。

最終日に行われたセッション10では、各セッションのチェアによるレビューと10年後の予測が発表された。主なところを紹介する。検出器の較正の重要性に関して、S. Gruner 博士 (CHESS) の言葉が紹介された。“Your detector is only as good as your calibration” 検出器の性能はどれだけ良く較正できたかで決まる、という言葉である。逆に言うと、適切に較正されなければ、本来の性能は発揮されないことを意味する。XFEL 用の画像検出器、特に米国 LCLS の CSPAD 検出器は複雑な補正計算を必要とするため、LCLS のユーザーを中心に補正の重要性が認識されている。LCLS や EuXFEL では、ユーザータイム中にユーザーが検出器補正データを取得する前提となっており、ユーザーコミュニティへ検出器のより深い理解を促すワークショップやソフトウェア群の整備が行われている。ユーザグループにそれぞれ検出器補正の「担当者」がいて実験を遂行するイメージである。検出器の補正は検出器を学ぶ良い入り口で、ユーザーの工夫により、時として検出器開発者が想像もできないような高い精度が得られる場合もあるが、検出器の内部アーキテクチャを理解しなければ検出器が全く利用できないというのもコミュニティとして効率が悪い。初井らが SACLA で整備した MPCCD 検出器では、ビームライン担当者・ユーザーコミュニティの検出器補正作業を不要とするために各種エンジニアリング・技術選択を行った。しかし、今後先鋭的な検出器性能が求められてくると、検出器補正の容易さと性能の両立が困難な局面が出てくる。今後施設側の運用体制を含め、検出器システムとしての先端性と汎用性のバランスをよく考えていく必要があると感じた。

また、講演者からは検出器のビームラインへのインテグ

レーションの課題についての話はあまりなかったが、実際にはいろいろな苦労があるはずである。例えば、Diamond Light Source では PILATUS のインテグレーションに2年かかったそうだ。これは長すぎたと言われていたが、ビームラインを見ている立場からすると、実感として良く分かる。新しい検出器の最高性能を発揮できるようになるまでに数年かかることは珍しくない。10年後には、このような検出器のビームラインへの導入が痛みなし (painless) で簡単にできるようになって欲しい、という希望が語られた。そのためには、検出器の較正をビームラインと同じような環境の下でしっかりと行い、データ収集系や機器との取り合いについてもビームラインのシステムとの十分なすり合わせを行うことが必要だと思われる。

このワークショップは、2年ごとに開催していく計画であり、次回は New York で2020年の予定とアナウンスされた。

### 【おわりに】

新しい検出器の開発には、一般に5年程度、場合によっては10年程度の長い時間が必要となる。いわゆる第3世代放射光施設が稼働し始めたばかりの20数年前は、市販の検出器をうまく組み合わせるか、少し手を加える程度の工夫で最先端の実験が可能であったように思われる。一方、中規模低エミッタンスの放射光施設が各地で稼働し始め、更に開発ベースの検出器の利用も始まっている今日では、既存の施設において市販の検出器に頼っているだけでは競争に勝つことは容易ではない。諸外国では大きな研究目標の達成のため、新規の検出器開発を含むビームライン・エンドステーションの総合的な研究開発を戦略的に進めている、という状況を肌で感じる事が出来た。コラボレーションに関しては、国や地域によって特徴があるようで、ヨーロッパとアメリカにおける状況は前述のとおりである。ブラジルや台湾、オーストラリアも国際的なコラボが比較的活発になってきている。一方、善し悪しは別として、日本の放射光施設における先端検出器の導入は、スパコンアウト企業から代理店を通して購入という形が一般的である。すくなくとも今後は、開発段階からの開発者との関係構築と早期導入を検討していく必要があるだろう。より詳しい議論は、JSR2018の企画講演4『放射光における検出器開発』の会議報告<sup>6)</sup>でも報告させていただいているので参照していただきたい。

### 【あとがき】

ワークショップはフランスのアヌシーで開催されるにも関わらず、集合場所は隣国スイスのジュネーブ駅前となっていた。会場のホテルへは、貸し切りバスで国境を越えて向かった。また、会議後のバスもジュネーブ空港へと直行した。シェンゲン協定のあるヨーロッパならではの。会場は、第1回、第2回共に山間にある湖畔のホテルが選

ばれた。アヌシー湖は周長約38 kmのフランス第2の湖で、初日の夕方に行われたツアーでは、外周はフルマラソンと同程度の距離なので、一周走る人もいるとの紹介されていた。2年後に予定されている第3回はNSLS-IIが担当である。ニューヨークのロングアイランドには、これらのように大きな湖や山はないようだ。さて、彼らはどこを開催場所として選ぶのだろうか？

#### 参考文献

- 1) <http://xfel.riken.jp/IFDEPS2016/home.html>
- 2) <http://www.esrf.eu/home/events/conferences/2018/ifdeps-2018/programme.html>
- 3) <http://www.esrf.eu/home/events/conferences/2018/ifdeps-2018/presentations.html>
- 4) 初期の結果は次の論文で発表されている。C. Leitz *et al.*: JINST **12**, C05014 (2017).
- 5) W. B. Doriese, P. Abbamonte *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **88**, 053108 (2017).
- 6) 初井宇記, 岸本俊二: 放射光 **31**, 136 (2018).