

SPring-8 に於ける X 線検出器の開発計画

鈴木 昌世

(財)高輝度光科学研究センター・放射光研究所*

X-ray Detector R & D Projects at SPring-8

Masayo SUZUKI

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

The JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team has been conducting the six independent R & D projects, which are (1) the 1D position-sensitive Cd-Te detector project, (2) the imaging plate system project, (3) the X-ray image intensifier project, (4) the 2D microstrip gaseous detector project, (5) the proportional scintillation X-ray imaging chamber project, and (6) the multiple CCD X-ray detector project. The nature and the current status of these projects are reviewed as well as their ongoing applications at the third-generation synchrotron radiation facility, SPring-8.

1. はじめに

日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム（以下、共同チーム）は、平成2年度から第3世代の大型放射光施設 SPring-8 に於いて使用される X 線検出器の研究開発 (R & D) を進めてきた。初期には X 線検出器全般に関して調査を行い、既存の技術に立脚する検出器については信頼性を、また新技術に立脚する検出器については実現性を検討した。一連の調査を終え、共同チームは、平成4年度より、①一次元 CdTe 位置検出器、②イメージングプレート・システム、③ X 線イメージインテンシファイヤー、④二次元マイクロストリップガス検出器、⑤希ガス比例蛍光 X 線画像検出器、

以上5種類の X 線検出器に関して研究開発計画 (R & D Program) を始動させた¹⁻⁴⁾。

その後、共同チームは研究開発計画を推進する過程に於いて、平成5年度には、「二次元検出器に関する国際ワークショップ (International Workshop on Area Detectors)」を主催し、共同チームの研究開発計画を国際的に紹介すると共に、第3世代の大型放射光施設の求める X 線検出器に関して各国の放射光施設関係者と意見を交わした⁵⁾。さらに、共同チームは、ESRF、APS⁶⁾、SERC、SSRC⁷⁾に検出器グループを個別に訪ね、各施設に於いて進行中の検出器開発プロジェクトに関しても調査を行った。また、共同チームは、かねてより電荷結合型素子 (CCD) を応用した

* (財)高輝度光科学研究センター・放射光研究所 〒678-12 兵庫県赤穂郡上郡町 SPring-8
TEL 07915-8-1842 FAX 07915-8-0830
e-mail msyszk@sp8sun.spring8.or.jp

X線検出器に注目していたが、平成6年度末、SPring-8国際アドバイザー会議の指針を得て⁸⁾、平成7年度からは、⑥二次元電荷結合素子X線検出器の製作に着手した。本稿では、以上6種類の検出器に関する「研究開発計画」を紹介し、現状を報告する^{9,10)}。

2. 一次元CdTe位置検出器

CdTe半導体検出器は、(1)硬X線(60 keV~100 keV)に対する検出効率が高く、(2)X線受光面の大面積化が可能であり、加えて、(3)冷却温度も室温に近いなど、高エネルギー非弾性散乱実験(コンプトン散乱実験)にとって魅力ある特性を有する。SPring-8計画では、姫路工業大学の坂井信彦教授を中心とする研究グループが、島津製作所の協力を得て、多数のCdTe半導体検出器を基板上に配列した一次元CdTe位置検出器を製作し、実用化を進めている。姫路工業大学グループが製作したFull-Scale-Modelには、4096個から成るCdTe素子(大きさ:0.25 mm(幅)×8 mm(高)×0.8 mm(厚))が512行×8列の形に配列されている。各CdTe素子はPreamplifier, Low Level Discriminator, Counterから構成される読み出し系に接続されている。高エネルギー非弾性散乱実験に応用される場合には、検出されたX線は列毎に集計され、行方向の一次元位置情報に変換される。姫路工業大学グループは、既に、Full-Scale-Modelの1/4サイズの試作器を用いて、Alを試料とした実験をPFに於いて実行し¹¹⁾、SPring-8に於ける高エネルギー非弾性散乱実験に一次元CdTe位置検出器を導入する準備を整えつつある。その過程に於いて、姫路工業大学グループは、優れた高エネルギー分解能が近年脚光を浴びているCdZnTeセンサーの改善も検討している。

3. イメージングプレートシステム

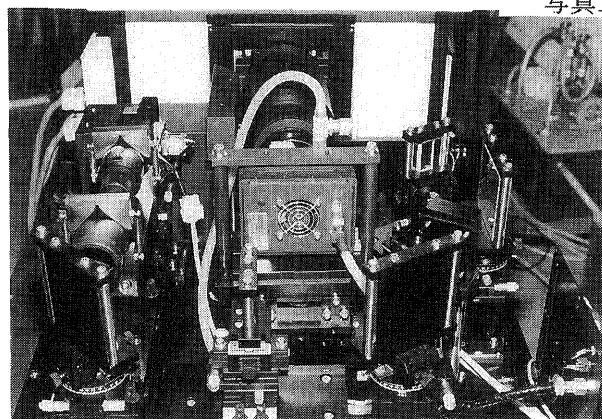
イメージングプレートは、製作可能なX線受

光面積及び固有のダイナミックレンジに関して優れたX線検出媒体としての位置を占める。SPring-8計画に於けるイメージングプレートシステムの研究開発は、理化学研究所の神谷信夫副主任研究員を中心とするR&Dグループが、Rigaku社、東京インスツルメント社、Kino-Meresgrio社と共同して進めてきた。高精度の蛋白質結晶構造解析が指向され、有効面積400 mm×500 mmを有するイメージングプレートを数分以内に読み出せるオンラインシステムが開発の対象とされている。同グループは、当初より、ブルーIP(フジフィルム、BAS-UR)に注目し、同IPを利用してダイナミックレンジ4桁以上、空間分解能 $53 \mu\text{m} \times 78 \mu\text{m}$ が達成可能であることを実験的に示した¹²⁾。ついで、線状化レーザー光、大口径の集光系、一次元CCDセンサーから構成される走査機構(写真1)を装備したプロトタイプを製作し、空間分解能 $112 \mu\text{m} \times 171 \mu\text{m}$ を達成した³⁾。今後、同グループは、プロトタイプを用いてデータ転送システムに関する最適化の作業を完了した後、生体高分子結晶構造解析共用ビームラインに実機を設置する段階に進む。

4. X線イメージンテンシファイヤー

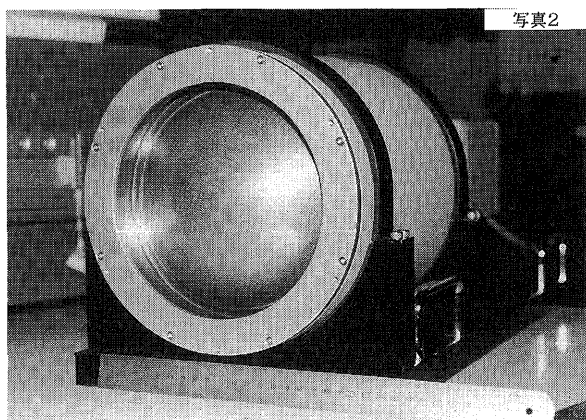
X線イメージンテンシファイヤーは時分

写真1



Photograph 1. Readout section of an imaging plate prototype detector, being composed of a line-shaped laser system, a large-numerical-aperture lens system, and a Peltier-cooled CCD system. Through the courtesy of Dr. N. Kamiya of RIKEN.

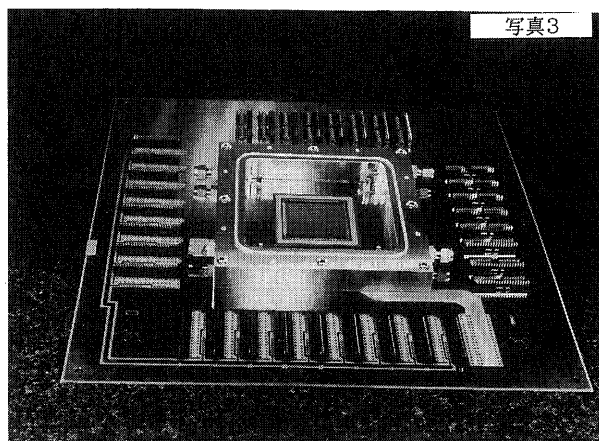
割 X 線小角散乱実験の分野に於いて有望視されている高感度 TV 型 X 線検出器の前段部分である (写真 2)。SPring-8 計画では、高エネルギー物理学研究所放射光施設の雨宮慶幸助教授 (現東京大学工学部助教授) の R & D グループが、浜松ホトニクス社と協力して、開発計画を推進してきた。同グループは医用 X 線イメージンテンシファイヤーの技術を基礎に、X 線入射窓をアルミニウム窓からベリリウム窓に置換し、且つ口径を 220 mm ϕ まで大面積化した。これまでの評価実験で、空間分解能は 300 μ m 以内、ダイナミックレンジは 5 桁以上、また検出量子効率はいメージングプレートに優るなどの性能も実証された。さらに、X 線画像に混入する外部磁場の影響を的確に補正・除去する手段として、On-Site で画像歪みを常時監視できるソフトウェアを構築するなど、同グループは X 線イメージンテンシファイヤーの実用化に向けて周到な準備を行っている。イメージンテンシファイヤーを前段部に用いるため十分な光強度得られ、CCD を冷却することなく 1/30 秒毎に鮮明な X 線画像が計測できるようになることは実用上大きな利点であると言えよう。既に、合成高分子の延伸中の時分割小角散乱実験、或いは収縮中の筋肉の時分割回折像実験等への応用が始まっている^{14,15)}。



Photograph 2. X-ray image intensifier with a beryllium window of 6 inches in diameter. Through the courtesy of Professor Y. Amemiya of PF/KEK (Tokyo University at present).

5. 二次元マイクロストリップ・ガス検出器

マルチワイヤー比例計数型ガス検出器 (MWPC) では静電気力による歪みの問題によりワイヤー間隔を 1 mm 以下にすることは困難であったが、マイクロストリップガス検出器 (MSGC) は絶縁薄膜基板上に LSI の作成等で用いられるリソグラフィ技術を用いて金属細線をプリントすることにより、ストリップ間隔を 200 μ m 以下にすることが可能である。これにより原理的には 30 μ m 以下の空間分解能と 10^7 (photons/mm²/sec) 程度の非常に高い X 線入射許容量が可能で、X 線の高計数率が問題となる第三世代の大型放射光施設に於いては次世代のガス検出器として注目されている。また、ガス増幅の特性から、シリコンストリップ検出器では検出できなかった 1 keV 程度の低エネルギーの X 線も測定可能である。SPring-8 計画では、東京工業大学の谷森達助教授を中心とする R & D グループが、MSGC の二次元位置読み出しの研究開発を推進してきた。これまでの MSGC は薄膜の一面のみにアノード及びカソードストリップを有する一次元の位置検出器であった。東工大グループは、薄膜の裏面にアノードと直交する関係にバックストリップを加えることにより二次元読み出しを行う二次元 MSGC の開発研究を行ってきており、プロトタイプとして有効面積 50 mm \times 50 mm の検出器が既に完成している。バックストリップ側に十分に高い信号を得るためには、極薄でかつ絶縁性の良い薄膜を用いる必要があるが、ここでは厚さ 17 μ m のポリイミド膜が用いられている。アノードストリップ、カソードストリップ、バックストリップ (材質はいずれも厚さ 1 μ m の金) の幅はそれぞれ、7, 63, 150 μ m で 200 μ m 間隔に配置されており、出力信号の荷重平均をとることにより約 60 μ m の空間分解能が達成されている¹⁶⁾。また、充填ガスにはアルゴン 80% + C₂H₆ 20% の混合ガスが用いられている。



Photograph 3. Microstrip structure being enveloped with a gas vessel on a motherprinted board. Through the courtesy of Professor T. Tanimori of Tokyo Institute of Technology.

検出器プレートからは526本の信号線が取り出されるが、約600ピンの出力を持つLSIパッケージ化が実現しており(写真3)、信号処理系との接続が容易に行えるようになっている。このプロトタイプ検出器を用いて、正イオンが絶縁物表面への付着蓄積することによるゲインの変動や印加電圧と放電との関係の最適条件が得られており、高X線強度(10^7 photons/mm²/sec)照射下に於ける二次元マイクロストリップ・ガス検出器の長時間ゲイン安定性などの試験が進行中である。現在、実機(有効面積100 mm×100 mm)の製作及び高速多チャンネル読み出し系の開発が行われており、構造生物学研究理研ビームラインIに於いて小角散乱実験に用いられることになっている。

6. 希ガス比例蛍光X線画像検出器

大強度・高輝度なX線ビームが語られる時、ガス検出器は空間電荷効果による限界を常に指摘されてきた。その対策として、正イオンの高速収集を目指して電極構造の微細化が提唱され、上に述べた二次元マイクロストリップガス検出器、或いは Daresbury Laboratory の検出器グループが取り組んでいるマイクロギャップガス検出器等が

開発されてきた。他方、シンチレーション(蛍光)が空間電荷効果とはかなり独立である点に注目して、入射X線の二次元位置情報を蛍光画像として取得する形式のガス検出器に高い空間電荷効果耐性を期待することもできる。こうした考え方にとり、SPring-8計画では筆者らが中心となって、平行平板電子雪崩検出器(Parallel Plate Avalanche Counter)とイメージンテンシファイヤーから構成される希ガス比例蛍光X線画像検出器の研究開発を行ってきた。受光面積200 mm×200 mmを有するプロトタイプが製作され、アルゴン(95%)+トリエチルアミン(5%)混合ガス中に於いて、入射X線の誘導する希ガス比例蛍光の二次元分布を実時間画像として読み出すことに成功している¹⁷⁾。プロトタイプは、既にPFに於いて、コレステロールのラウエ回折像計測、或いは、12.4 keVのダイレクトビームの実時間画像計測等の実験を繰り返し、第三世代の放射光施設に於ける実験的研究への応用を模索している¹⁸⁾。

7. 二次元電荷結合素子X線検出器

電荷結合型素子(CCD)を応用したX線検出器は、蛋白結晶構造解析の分野に於いて、目下、最も注目されている二次元X線画像検出器である。SPring-8計画では、理化学研究所の植木龍夫主任研究員を中心とする放射光構造生物学研究推進グループが英国EEV社と協力して、二次元電荷結合型素子X線検出器(MCCDX)の開発計画を推進してきた。MCCDXは、X線受光面として200 mm×200 mmのGd₂O₂S(Eu)シンチレーションスクリーンを有する。Gd₂O₂S(Eu)シンチレーションスクリーン上のX線イメージは、ファイバー・オプティクス・テーパーを介して25%に縮小され、4×4マトリックスに配列された16台の科学計測用CCDを用いて計測される。科学計測用CCDは、1000×1000の画素構成を持ち、雑音軽減のため0℃に冷却される。蛋白質

結晶の回折像は、ダイナミックレンジ13ビット以上で計測され、デジタル化されてワーク・ステーションに転送される¹⁷⁾。MCCDXは構造生物学研究用ビームラインIに導入され、蛋白質結晶構造解析用2次元X線検出器システムとして活躍するものと期待される。

8. 再び「はじめに」

以上、第3世代の大型放射光施設 SPring-8 に於いて開発されつつある X 線検出器を紹介してきた。現段階では、いずれの開発計画も順調と言える。しかし、SPring-8 で実績を蓄積しない限り、真に開発計画の完遂とは言えない。SPring-8 稼働以降、仮に「SPring-8 に於ける X 線検出器」という報告を執筆する機会に恵まれたなら、その報告の冒頭には、本稿の要約が書かれることであろう。SPring-8 に於いて使用される X 線検出器の開発計画は、その意味に於いて、依然始動期であることを肝に銘じたい。これまで、SPring-8 のために X 線検出器の開発計画を推進してこられた方々に深く御礼申し上げると共に、今後もご尽力賜りたく切にお願い申し上げる次第である。

文献

- 1) 日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム, 「昭和63年～平成4年 SPring-8 利用系 R & D 成果報告書」, 平成5年4月.
- 2) 日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム, 「平成4年度 SPring-8 研究開発成果報告会発表要旨」, 平成5年1月25～27日, 神田学士会館.
- 3) JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team, “Pring-8 Project, Research and Development of Experimental Facilities, 1988～1992,” April, 1993.
- 4) 日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム, 「平成5年度 SPring-8 利用系研究開発成果報告会発表要旨」, 平成6年2月7～9日, 理化学研究所・鈴木梅太郎ホール.
- 5) SPring-8 Project Team, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, “Report of the International Workshop on Area Detectors,” November 24–26, 1993, Center for Advanced Science and Technology, Hyogo, Japan.
- 6) Advanced Photon Source, “Workshop on Detectors for Third-Generation Synchrotron Sources,” February 14–15, 1994, Argonne National Laboratory.
- 7) Masayo Suzuki and Yoshiyuki Amemiya, “Gaseous X-ray Detectors at Siberian Synchrotron Radiation Center Budker Institute of Nuclear Physics,” November 11, 1994.
- 8) International Advisory Committee of the SPring-8 Project, “Report of the Fourth Meeting of the International Advisory Committee of the SPring-8 Project,” January 18–20, 1995, Center for Advanced Science and Technology, Hyogo, Japan.
- 9) M. Suzuki and T. Ueki: SPring-8 Ann. Rep. '94, p. 54, 1994.
- 10) M. Suzuki and T. Ueki: SPring-8 Ann. Rep. '95, p. 44, 1995.
- 11) N. Sakai et al.: Proceeding of “Second International Workshop on Compton Scattering and Fermiology,” p. 89, August 28–31, 1995, Tokyo, Japan.
- 12) M. Yamamoto et al.: SPring-8 Ann. Rep '94, p. 176, 1994.
- 13) 河野能顕, 神谷信夫: 日本生物物理学会, 第33回年会講演予稿集, p. S147, 1995年9月23日～25日, 北海道大学, 札幌.
- 14) Y. Amemiya et al.: “The Development of X-ray television detectors at the Photon Factory,” in Synchrotron Radiation in the Biosciences (Oxford Science Publication), p. 395, 1994.
- 15) Y. Amemiya et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**(2), 2290 (1995).
- 16) T. Tanimori et al.: Nucl. Instrum and Meth. (in press), INS Report, INS-Rep.-1143, May 1996.
- 17) M. Suzuki et al.: Nucl. Instrum and Meth. **A348**, 280 (1994).
- 18) M. Suzuki et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**(2), 2336 (1995).