

# ■ パルス中性子の そのままイメージング



パルス中性子イメージング研究グループ ■片 桐 政 樹■

## 1. 発端

本研究グループの研究目標は、原研の中性子科学センターが計画している大型陽子加速器を用いた中性子散乱研究施設、米国のSNS (Spallation Neutron Sources) 計画、ESS (European Spallation neutron Sources) 計画などで使用される2次元中性子イメージング検出器の開発である。現在、これから5年間の研究の方向づけができた段階であるので、そのベースとなる考え方及び研究方針を示す。

研究の発端となる大型陽子加速器を用いて発生する中性子がどのような特長を持っているかを下記にまとめる。

- 1) 一定間隔で短時間にパルス状に中性子が出てくる。
- 2) 非常に強度が強い。
- 3) 広範囲なエネルギーの中性子群からなる。
- 4) 飛行時間法によりエネルギー弁別が可能である。
- 5) 経済的にみれば非常に高価な中性子ビームである。

## 2. 背景

パルス中性子を利用し中性子散乱によりこれまでにない研究を進めようとしている固体物理学、構造生物学等の研究分野で要求される中性子イメージング検出器の性能を平成10年9月に米国ブルックヘブン国立研究所で開催された核破砕中性子源 (Spallation

Neutron Sources) 用中性子検出器に関するワークショップでの資料に基づいてまとめると大きく分けて2つに分類される。1つは単結晶散乱、小角散乱、透過測定等に使用されるイメージング検出器であり、検出面積が比較的小さく、ピクセル分解が $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 以下と小さくかつ検出器全体への中性子入射率が $10^6 \text{ n/s}$ 以上の検出器である。もう1つは粉体散乱、非結晶、非弾性散乱等に使用されるイメージング検出器であり、検出面積が $1 \text{ m}^2$ 以上と大きく、ピクセル分解能も $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 以上となりかつ検出器全体への中性子入射率が $10^4 \text{ n} - 10^6 \text{ n/s}$ 程度の検出器である。

2つの方法に共通している要求性能は、大強度のパルス中性子に対応してこれまでにない高計数率の検出を必要とすること、かつ中性子エネルギーを飛行時間 (TOF: Time Of Flight) 法で精度良く選択するため短時間の時間分解能 ( $1 \mu\text{s} - 1 \text{ ms}$ ) を必要とすることである。

ここで、原子炉からの中性子を用いた中性子散乱研究に使用されてきた代表的な中性子イメージング検出器としてガス封入型マルチワイヤ中性子検出器を検討する。2次元の位置決定は、1次元を多数のワイヤを等間隔に並べて得、もう1つをワイヤに抵抗特性を持たせ両端で検出されるチャージ量を基に入射位置を決定する。高い入射率で中性子が入ると電氣的に信号を取り出しているため検出器が飽和し計数不能となることや位置決定法に限界があり、従来のままでは高計数率化することはなかなか困難である。

もうひとつの代表的な中性子イメージング検出器は、最近開発された中性子イメージングプレートであ

る。X線用イメージングプレートの検出媒体である輝尽性蛍光体に中性子を電離放射線に変換する中性子コンバータ（Gd,  $^6\text{Li}$ 等を含む材料）を混合することにより中性子に有感な検出器としている。大面積、高位置分解能かつ高ダイナミックレンジの2次元中性子イメージングが可能である。しかし、積分型のため高い入射率の中性子イメージングに十分適応できる反面、時間分解能がないため、パルス中性子の最大の利点である中性子エネルギーのTOF法による弁別の恩恵を受けることができない。

### 3. 提案

以上のように、タイトルの「パルス中性子のそのままイメージング」を実現するには、従来の中性子イメージング検出器からブレイクスルーすることが不可欠である。

「パルス中性子のそのままイメージング」の課題は、高位置分解能で、パルスの高強度の中性子が入射しても検出器を飽和させることなく、短時間毎に、中性子イメージを検出可能とすることである。

実現には2つの方法があり、1つは中性子イメージングプレートなどの積分型検出器を用いることである。この場合、TOF法に必要な時間分解能を得るために実時間で高速に中性子イメージを読み取る方法の開発が成功の鍵をにぎる。1つは、ガスの電離あるいはシンチレーション等を用いた中性子イメージング検出器の高計数率化であり、中性子が入射し信号を発生する際、その信号を飽和せずに超高速に読み出しかつ位置分解能を上げることの可能な信号読み出し法の開発が成功の鍵となる。

本研究グループの現時点におけるブレイクスルーの解答は、表1の最右側に示す2つの2次元イメージング検出法である。1つは実時間イメージングプレート（IP）読み出し法であり上記説明の前者を実現する。1つは高速光信号読み出し法であり上記説明の後者を実現する。

### 4. そのままイメージング 1

実時間IP読み出し法（特許申請中）の概念を図1をもとに説明する。実時間読み出しに必要な高速化

を、従来一点一点イメージングプレートの画素をレーザービームで走査し2次元イメージを得ていた方式を、イメージングプレートの横幅の画素を一度にパラレルで読み取る方式にすることにより実現する。

中性子イメージングプレートは中性子を照射した状態にある。レーザーと光ファイバを用いて、イメージングプレートの横幅の長さでかつ読み取る位置分解能（縦軸）に相当する幅の励起光を作成する。この励起光をミラーを操作しイメージングプレートの前面に照射して上から下まで走査する。励起光の照射によりイメージングプレートの後面から放出された輝尽性蛍光は光学フィルタを通過した後、面状に並べた波長シフト光ファイバ束に入射する。この光ファイバの直径がイメージングプレートの横軸の位置分解能に相当する。輝尽性蛍光が入射し波長シフトした蛍光はストリーク管に入る。ストリーク管の時間軸（縦軸）をミラーに同期して掃引させることによって、ストリーク管の蛍光面にストリーク像を得る。この像をCCDカメラで撮像し、信号処理装置により読み出しデジタル化して再構成することにより中性子イメージを得ることができる。

以上の動作を繰り返すことにより連続的に「パルス中性子のそのままイメージング」を実現できる。連続的に中性子イメージングができるということは、高価な中性子を無駄なく使うことができるという大きな意味を持つ。なお、時間分解能は中性子イメージングプレートの全面を走査する時間である。

以上で原理を述べたがこれを実現するために以下の

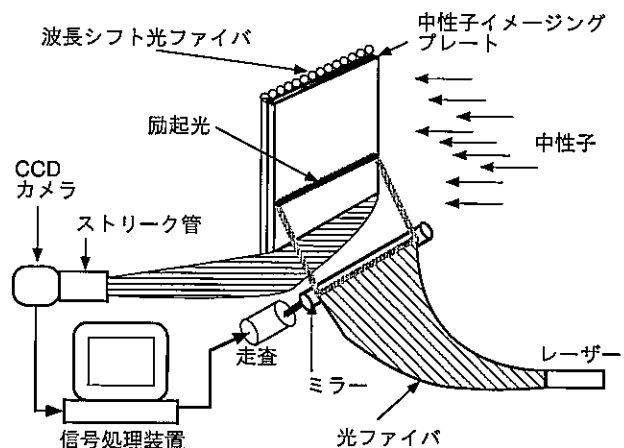


図1 実時間イメージングプレート読み出し法

2つの研究を行う。

1つは実時間読み出し用中性子イメージングプレートの開発研究であり、その課題は時間分解能の短時間化、 $\gamma$ 線バックグラウンドの低下、即発発光バックグラウンドの低下等であり、短い寿命の軽元素から構成した輝尽性蛍光体の探索、中性子コンバータの最適化及び蛍光メカニズムの研究などにより目的を達成する。いずれにしても、輝尽性蛍光体の研究が主体となる。

1つは実時間読み出し法自体の開発研究であり、その課題は、励起光源と照射方法、波長シフト光ファイバとストリークカメラによる高速光検出系及び画像データ処理を含めた実時間読み出しシステムの最適化であり、多くの光学系の要素技術を蓄積し目的を達成する。

当然、両方の研究は有機的につながっており並行して進める。

## 5. そのままイメージングー 2

高速光信号読み出し法（特許申請中）は、検出媒体としてシンチレータ、蛍光体あるいはガスシンチレーション等の発光を用いた2次元中性子イメージング検出器において中性子が入射し発生する光信号を高速に読み出すことにより大面積の中性子イメージを高計数率で位置精度良く得ることを狙った方法である。

例として、検出媒体としてシンチレータを用いた場合の高速光信号読み出し法の概念を図2をもとに説明する。中性子イメージング検出器は、図に示すように多数の中性子シンチレータと、各シンチレータの4つの側面に接するように横方向と縦方向に格子状に配置した多数の波長シフトファイバからなる2つの光ファイバ束から構成される。横方向と縦方向の光ファイバ束の一端を並べてストリーク管に接続し、シンチレータ内での発光により波長シフトファイバ内に生じた光信号を計測する。高速に時間掃引することにより得たストリーク像をCCDカメラで撮像し、信号処理装置で読み出しデジタル化し横方向と縦方向の各チャンネルの光信号波高の時間分布を得る。光信号の形状が精度良く得られれば、シンチレータに中性子が高い入射率で入ってきても、パイルアップしたパルス波形を分解し、それぞれの入射時間信号を求めることがで

きる。この時間信号等をもとに検出器の1つのシンチレータ内で発光した光が、格子に対応する横方向の2本の光ファイバと縦方向の2本の光ファイバにより同時に検出されることを利用して、高計数率の中性子を位置精度良く検出することが可能となる。つまり、「パルス中性子のそのままイメージング」が可能となる。

高速光信号読み出し法の開発研究の課題は、蛍光寿命が短く量子効率の高い中性子検出媒体、波長シフト光ファイバとストリークカメラによる高速光検出系及び高位置分解能信号処理を含めた高速光信号読み出しシステムの最適化などであり、検出媒体と光学系の要素技術を結合することにより目的を達成する。

## 6. これから

しばらくは、2つの測定法の実現に向けて研究を進めるが、その他にも色々な「そのままイメージング」の芽があり並行してフィージビリティ研究を進める。

最終目標に到達するには、いくつかのトンネルや壁を乗り越えなければならないと思われるが、越えるごとにあたりをよく見回し、中性子に止まらずより幅広く放射線検出に用いることができる新しい検出手法を生み出してゆくことも目標にしており、トンネルの先には光が見えると期待している。

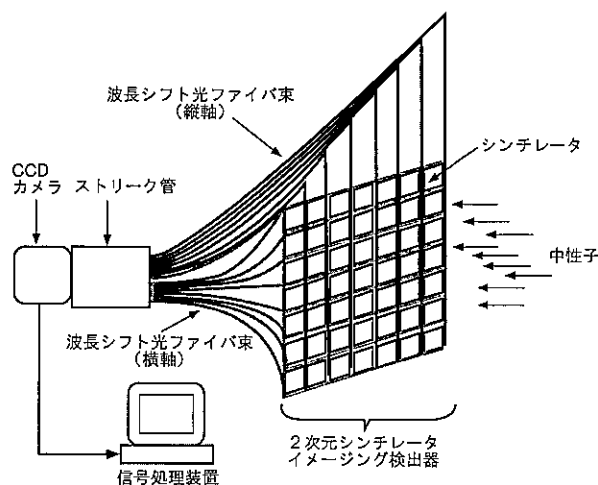


図2 2次元シンチレータイメージング検出器の光信号高速読み出し法