

平成20年度

文部科学省 科学技術試験研究委託事業

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」  
(中性子イメージング・集光技術の開発と応用に  
関する研究)

成果報告書

平成21年3月

国立大学法人北海道大学

本報告書は、文部科学省の平成20年度科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人北海道大学が実施した平成20年度「中性子ビーム利用高度化技術の開発」（中性子イメージング・集光技術の開発と応用に関する研究）の成果を取りまとめたものです。

## 目次

|                         |   |
|-------------------------|---|
| 1. 委託業務の目的              | 1 |
| 2. 平成20年度（報告年度）の実施内容    | 1 |
| 2.1 実施計画                | 1 |
| 2.2 実施内容(成果)            | 1 |
| 2.2.1 中性子イメージング技術の開発と応用 | 1 |
| 2.2.1.1 性能評価用インジケータ     | 2 |
| 2.2.1.2 画像の取得           | 4 |
| 2.2.1.3 評価              | 4 |
| 2.2.2 中性子集光技術の開発と応用     | 6 |
| 2.3 成果の外部への発表           | 8 |
| 2.4 活動（運営委員会等の活動等）      | 8 |
| 2.5 実施体制                | 9 |

図一覧

|         |                                    |   |
|---------|------------------------------------|---|
| 図 1-1.  | カラーI. I. の評価試験状況                   | 2 |
| 図 1-2.  | ビーム純度計                             | 2 |
| 図 1-3.  | ビーム感度計                             | 2 |
| 図 1-4.  | 遅延時間 0msec から遅延時間 20msec を引いた結果    | 3 |
| 図 1-5.  | 遅延時間 2msec から遅延時間 20msec を引いた結果    | 3 |
| 図 1-6.  | 遅延時間 4msec から遅延時間 20msec を引いた結果    | 3 |
| 図 1-7.  | 遅延時間 6msec から遅延時間 20msec を引いた結果    | 3 |
| 図 1-8.  | ASTM 準拠 RISO インジケータと輝度測定場所         | 4 |
| 図 1-9.  | 各遅延時間から遅延時間 20msec を引いた結果のインジケータ輝度 | 5 |
| 図 1-10. | 各遅延時間から遅延時間 20msec を引いて求めた熱中性子割合   | 5 |
| 図 1-11. | 各遅延時間から遅延時間 20msec を引いて求めたガンマ線割合   | 5 |
| 図 1-12. | 各遅延時間の変化量から求めた中性子とガンマ線の割合変化        | 5 |
| 図 1-13. | 遅延時間 0msec から遅延時間 1msec を引いた結果     | 6 |
| 図 1-14. | 遅延時間 0msec から遅延時間 4msec を引いた結果     | 6 |
| 図 2-1.  | Si 中性子ミラーを湾曲化する装置の平面図              | 7 |
| 図 2-2.  | Si 中性子ミラーを湾曲化する装置の立面図              | 7 |
| 図 2-3.  | 中性子ミラーの湾曲化装置の写真                    | 8 |
| 図 2-4.  | 中性子ミラーからの中性子の反射データ                 | 8 |

## 1. 委託業務の目的

中性子偏極・集光・検出及びイメージングなどの中性子ビーム基盤技術研究を発展させ、その基盤技術をJ-PARC及びJRR-3の中性子科学研究施設の高角散乱、小角散乱、イメージングの実験装置に導入し、中性子ビームの高品質化、高輝度化、高精度化を実現することで、これまで出来なかったナノ領域からマイクロ領域の階層的な磁性、軽元素、構造歪み、ダイナミクスなどの高精度の中性子計測を可能にすることを目的とする。

このため、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学と共同で業務を行う。

国立大学法人北海道大学では、中性子イメージング・集光技術の開発と応用に関する研究を実施する。

## 2. 平成20年度（報告年度）の実施内容

### 2.1 実施計画

#### ①中性子イメージング技術の開発と応用

パルス中性子イメージングのための検出器システムを整備し、北海道大学の電子線ライナック施設において、性能評価に着手する。

#### ②中性子集光技術の開発と応用

ビーム集束・反射を基本としたビーム分岐、ビーム輸送、ビーム集束利用実験装置などの中性子の利用効率の高度化を目的として、ビーム集束・反射基本素子を開発し、中性子による性能評価に着手する。

### 2.2 実施内容(成果)

#### 2.2.1 中性子イメージング技術の開発と応用

加速器を利用したパルス中性子源を用いるパルス中性子イメージングでは、イメージングのための高空間分解能の2次元中性子検出と同時に、中性子パルスの時間構造を利用できるように高速の動作が可能な検出器システムが必要とされる。特に加速器中性子源の特性を活かす後者については、我が国の新しい大型加速器中性子源であるJSNSが25Hzで繰り返し中性子パルスを出すことから、この場合には25Hzでの繰り返し動作と長時間積算が必要になる。それに加えて、中性子パルスを利用する飛行時間測定により中性子エネルギー毎のイメージを取得するとなると、マイクロ秒オーダーのシャッター開放の繰り返しを連続して数1000チャンネル分動作させなければならない。もちろんこの繰り返しは中性子のパルス毎に時間チャンネルに分けて積算する必要がある。このように非常に厳しい時間条件下で中性子のエネルギー依存透過画像を2次元で取得するという測定には、これまでいくつかの種類を検出器がテストされてきた。しかしながら、中性子の検出効率、さらにはダイレクトビーム位置に置かれるために必要な高い検出レートといった要因が検出器の適性に影響する。現在のところ検出効率や検出レートを比較的満足し、飛行時間法にも耐えられる速い動作速度を持つ2次元位置敏感型の検出器としては、シンチレータをアレイ型のマルチ光電子増倍ユニットに直接装着した形式の6Liガラスシンチレータ直結型検出器しかない。この検出器は現在8×8もしくは16×16ピクセルの2次元位置を検出でき、これまでにJSNSにおけるパル

ス中性子イメージングで実績を積んでいるが、問題なのは空間分解能で、1ピクセルが2×2mm程度の分解能になってしまう。現在中性子の利用が期待される工業分野ではサブmmの空間分解能はもちろん、場合によっては1 $\mu$ m領域の空間分解能を要求されることから、パルス中性子イメージングでも数10～数100 $\mu$ mの空間分解能で飛行時間分析できる検出器のあることが望ましい。そこでここではシンチレータ面に受けた放射線の発光をイメージンテンスファイアにて増幅してスクリーンに投影し、その投影像を光学的にカメラでイメージとして記録する形式の検出器システムを導入することとした。この場合、時間的な要因としてはシンチレータ光の減衰時間と記録カメラの速度になる。また、空間分解能的にもX線の場合で10 $\mu$ mを切る能力があるため、パルス中性子イメージングには適当な検出器システムとなる。今回導入した中性子イメージンテンスファイアは検出器径が4インチ、シンチレータにはGdを利用した(n, $\gamma$ )タイプの中性子カラーI.I.<sup>TM</sup>(Ultimage<sup>TM</sup>-n $\gamma$ -04)である(図1-1)。このカラーI.I.とは、シンチレーターをX線や中性子線の強度に応じて赤・緑・青の3色で発光させることにより、感度の異なるR・G・B信号に変換してダイナミックレンジを広げるものである。

### 2. 2. 1. 1 性能評価用インジケータ

平成20年度に着手した検出器システムの性能評価では、北海道大学工学部瞬間強力パルス状放射線発生装置研究室の45MeV電子線ライナックに付置されている冷中性子源を用いて、ASTM準拠RIS0サンプル等の中性子透過画像測定を行った。このASTM(米国材料試験協会)規格に準拠しているインジケータは中性子ラジ

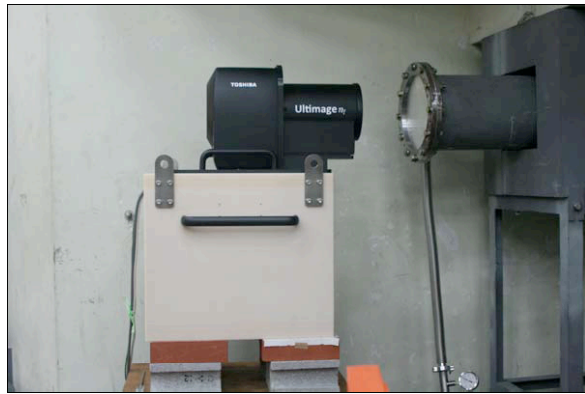


図1-1. カラーI.I.の評価試験状況。黒い装置がカラーI.I.、右側の円筒が冷中性子ビームガイド。

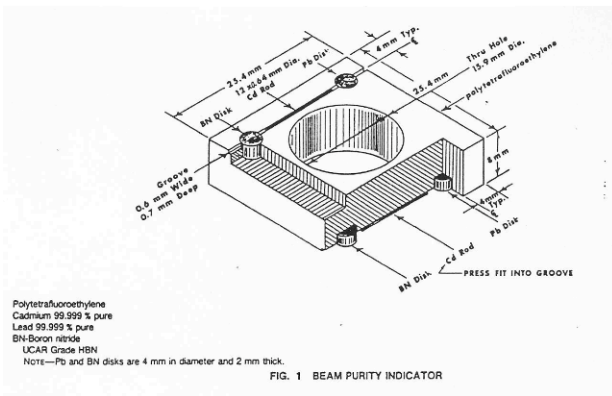


図1-2. ビーム純度計。

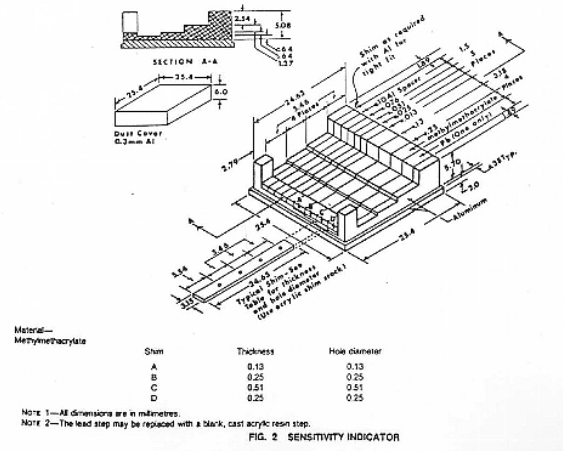


図1-3. ビーム感度計。

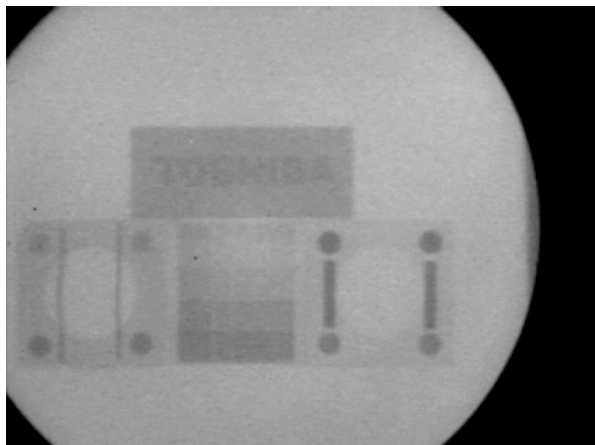


図 1-4. 遅延時間 0msec から遅延時間 20msec を引いた結果。

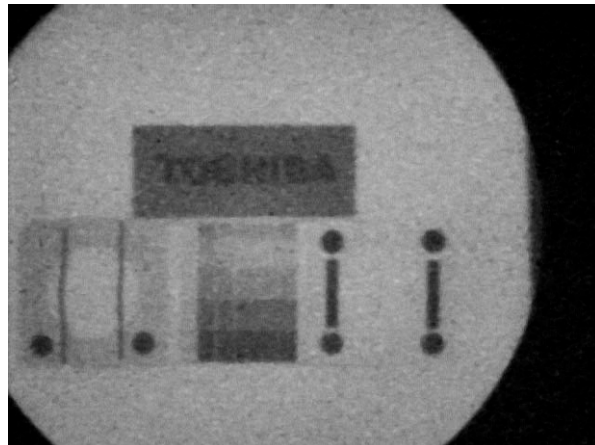


図 1-5. 遅延時間 2msec から遅延時間 20msec を引いた結果。

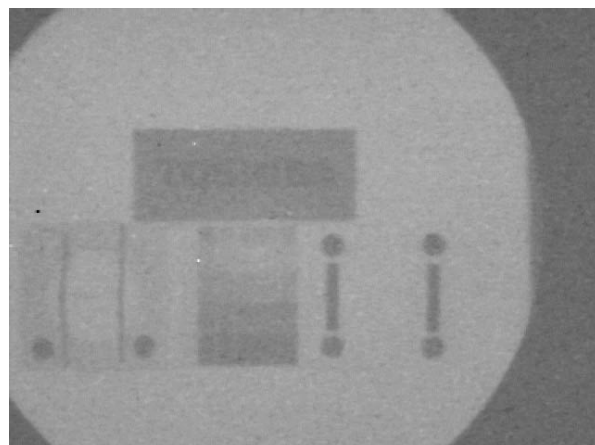


図 1-6. 遅延時間 4msec から遅延時間 20msec を引いた結果。

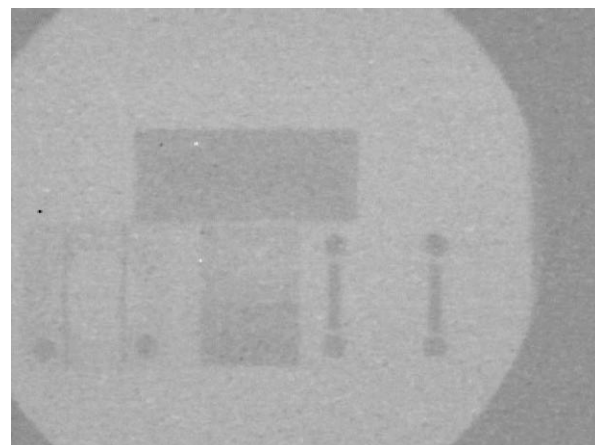


図 1-7. 遅延時間 6msec から遅延時間 20msec を引いた結果。

オグラフィのフィルム法で用いられているものである。ASTMの撮影基準については、1975年にASTM Designation: E545 “Standard Method for Determining Image Quality in Direct Neutron Radiographic Examination”として標準的な方法が記載され、最新版として2005年にE545-05が示されている。一方、欧州では1979年に結成された中性子ラジオグラフィのワーキンググループが、1982年にRiso-M-2356 RisoNational Laboratory (1982) “Standardization Activities of Euratom Neutron Radiography Working Group”を公表し、ASTM規格のインジケータに加えて核燃料に関するインジケータを追加した。RISO-M-2356の中で説明されている中性子ラジオグラフィの像質判定に使われるビーム純度計(BPI)と感度計(SI)インジケータはASTM準拠との記載がある。これらインジケータ類は、様々な中性子照射環境下で測定した結果を共通の基準で評価する際に必要なものである。ここでは、このRISOのインジケータを用いて像質の判定を行った。

図1-2にビーム純度計、図1-3にビーム感度計の詳細を示す。このうち、ビーム純度計は像質の定量的決定のために使われる。これは、2つの窒化ホウ素(BN)ディスクと2つの鉛(Pb)ディスク、2つのカドミウム(Cd)ロッドを含んだポリ四フッ化エチレ

ン樹脂ブロックから構成される。画像解析の重要な特徴は、その画像が本来持つ像質情報を視覚的に分析を行うことである。画像の濃度測定により、透過画像のコントラスト、低エネルギーの光子の寄与、電子対生成の寄与、像の非鮮明さ、フィルム及び処理の質に関する

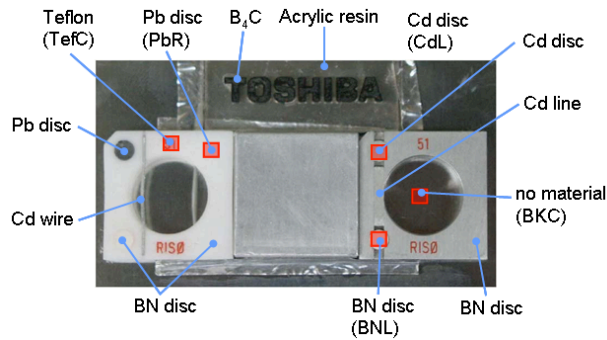


図 1-8. ASTM 準拠 RISO インジケータと輝度測定場所。

情報について定量的な決定を行うことができる。一方、ビーム感度計は、既知の寸法のギャップ及び空孔を含む階段状のくさびから構成されており、その画像の目視検査により、階段状ブロック材に関する全体的な透過画像感度について本来的に持っている情報、 $\gamma$ 線照射の有害レベルに関する情報が得られる。

### 2. 2. 1. 2 画像の取得

評価試験では、カメラのシャッター開放値を16msに固定して撮像した。北大ライナックの中性子源はパルス状に中性子が出るため、ライナックのマスタートリガーから信号をパルスジェネレータに入力し、パルスジェネレータでカメラのシャッター開放信号をタイミング調整してカメラに伝達する。今回使用したカメラはNTSC方式であるので最大繰り返し周波数が30Hzまで対応可能であるが、今回の測定ではノイズの問題からライナックを20Hz周期で運転した。I. I. の位置は線源から7mである。

パルス中性子源の強度から測定を画像として取得するには長時間の積算が必要である。このため、画像データには長時間の積算によるカメラの熱雑音がノイズの成分に含まれることになる。このようなバックグラウンド成分を差し引きにより除くため、カメラシャッター開放の遅延時間を充分遅く(20ms)して撮影した画像をバックグラウンドとして各撮像データから減算した。また、さらに画像を判定しやすくするためにそのエンハンス処理も行った。測定画像を図1-4~7に示す。ここでは感度の一番高いR(赤)成分を示した。

### 2. 2. 1. 3 評価

ビーム純度計画像から得られる各測定パラメータの輝度値から、熱中性子割合(NC)と $\gamma$ 線割合( $\gamma$ )を、以下の簡略式から計算した。ここで使用する各パラメータの測定位置は図1-8に示される。

$$(1) \text{ 有効熱中性子割合 (NC) : } NC = (D_{BKC} - D_{BNL}) / D_{BKC} \times 100$$

$$(2) \text{ 有効 } \gamma \text{ 線割合 } (\gamma) : \gamma = (D_{TefC} - D_{CdL}) / D_{BKC} \times 100$$

図1-9に測定画像から各パラメータをインジケータの輝度値として求め、遅延時間のパラメータとしてプロットした結果を示す。この結果はバックグラウンドでインジケータのない場所の輝度を1に規格化してまとめたものである。遅延時間0msecではCdL(Cdディスクの透過量)が一番暗く、続いてBNL(酸化ボロンディスク)とPbR(鉛ディスク)がほぼ同じ、TefC(テフロン樹脂)が明るくなっている。遅延時間1msecになると鉛が急激に明るくなっている。これらの値を基に有効熱中性子割合(NC)を求めたのが図1-10、有効 $\gamma$ 線割合( $\gamma$ )を求めたのが図1-11である。NCは遅延時間増加



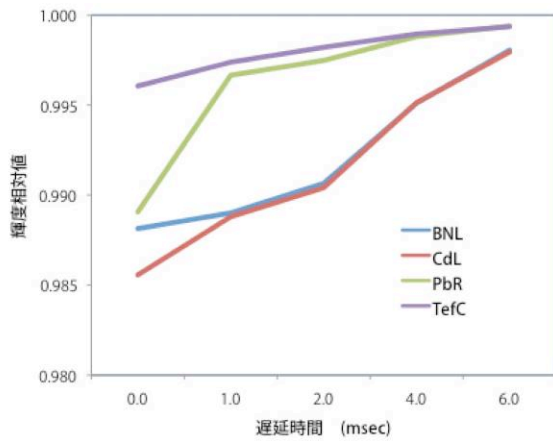


図 1-9. 各遅延時間から遅延時間 20msec を引いた結果のインジケータ輝度。

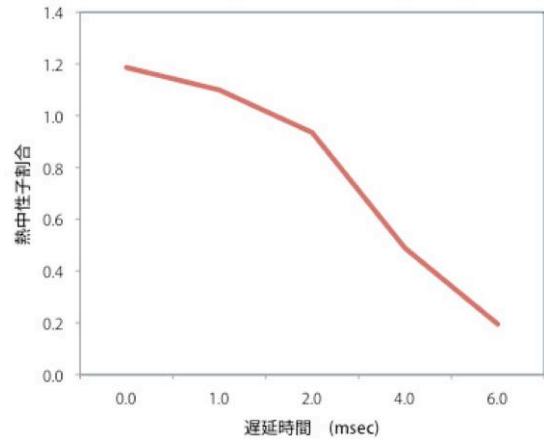


図 1-10. 各遅延時間から遅延時間 20msec を引いて求めた熱中性子割合。

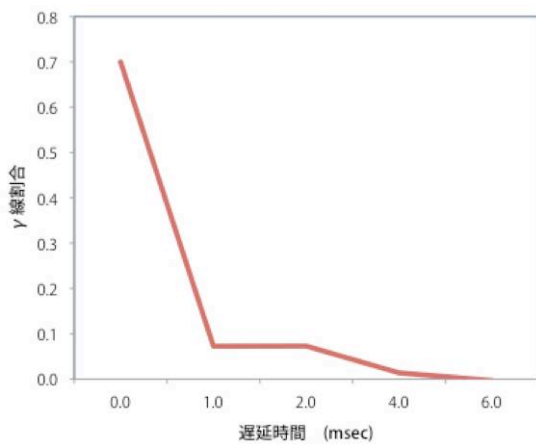


図 1-11. 各遅延時間から遅延時間 20msec を引いて求めたガンマ線割合。

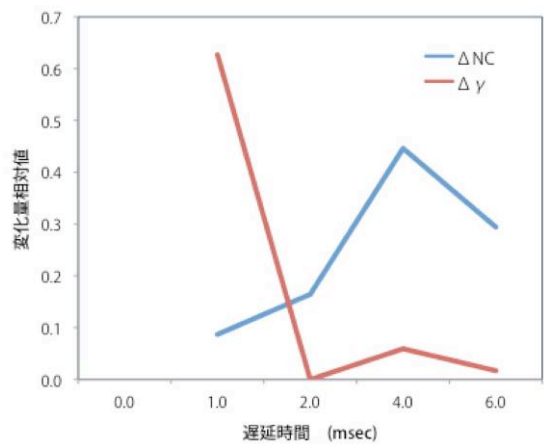


図 1-12. 各遅延時間の変化量から求めた中性子とガンマ線の割合変化。

に伴って徐々に少なくなるのに対し、 $\gamma$  は1msec後には急に減衰していることがわかる。このパルス発生直後の $\gamma$ 線による影響は図1-10のNCの結果にも表れていると考えられる。

一方、図1-10, 11ではシャッター開放時間16msecの積算輝度をとっていることになるが、1msec毎の変化を明らかにするためNCと $\gamma$ の相対的な変化分をプロットしたのが図1-12である。これによると熱中性子の割合は2~4msecの間でピークになるように増加していることがわかる。これらの結果を基に再度画像を差し引きした結果を図1-13および図1-14に示す。図1-13は遅延時間0msecから1msecを差し引きしたもので $\gamma$ 線による画像と考えられるが、実際樹脂やボロンは見られなくなっている一方、鉛やカドミウムのような重い元素が移っている。図1-14は遅延時間2msecから4msecを引いたもので中性子による画像と考えられるが、中性子の吸収が少ない鉛が写らずに樹脂や窒化ボロン、カドミウムが写っている。

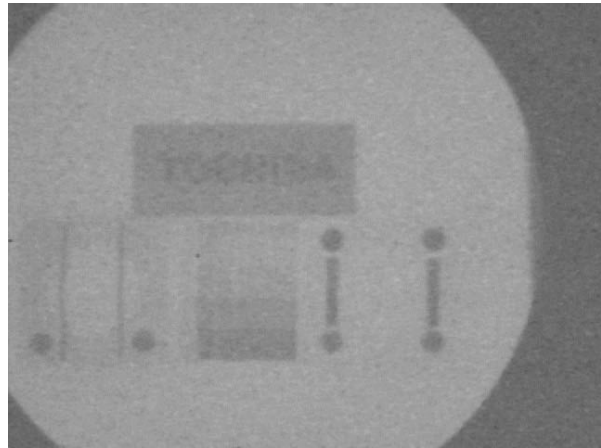
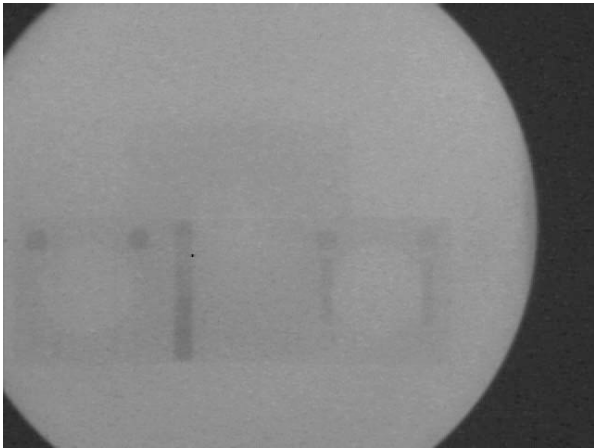


図 1-13. 遅延時間 0msec から遅延時間 1msec を引いた結果。 図 1-14. 遅延時間 2msec から遅延時間 4msec を引いた結果。

以上の結果から、今回評価した検出器システムで中性子による画像およびガンマ線による画像が取得できることが確認された。この結果は加速器中性子源の1パルスの中に含まれているガンマ線と中性子をそれぞれ時間的に分離して測定できることを示したものである。

## 2. 2. 2 中性子集光技術の開発と応用

中性子を用いた実験が始まって以来、中性子の光学素子は限られた種類のものが使われて来ているに過ぎない。その中で最も重要なものは、中性子の黎明期から用いられて来ている、中性子を単色化あるいはエネルギー解析するためのモノクロメータであろう。次に、中性子ガイド管という概念が生まれ、ビームの発散角を大きくすることでビーム強度を上げることが出来るようになった。更に中性子偏極技術が生まれ、中性子スピンエコー法という革新的な技術が生まれた。その後この分野には長い間それほど目覚ましい発展は無かったが、最近になって、Si単結晶を用いたいわゆるsolid state bender、monochromator、polarizer、更にはlobster-eye型の集束素子等が生まれている。その後日本で中性子制御グループが立ち上がり、また、中性子光学素子開発 (NOP) グループが立ち上がり、様々な新しいデバイスが開発され、大きな発展をすることになった。これにより、磁気、あるいは物質のレンズ・プリズム、曲面型ミラー、各種の新しい中性子検出器、臨界角がこれまでに比べ倍程度有るような、6Qcに及ぶスーパーミラー等々の新しい光学素等々が開発されて来た。このような光学素子の発展の中から、中性子小角散乱装置にレンズを用いた集束素子を取り付けることで、これまでに比べ約1桁小さい $Q$ まで測定が可能にする技術が発展して来た。最近では幾つもの中性子小角散乱装置に取り付けられるようになって来ている。もう一つの発展は、比較的小さな回転楕円体型の中性子ミラーを用いることにより、従来と同じような $Q$ 領域を遥かに小型の装置で実現出来るという、小型集束型の中性子小角散乱装置という概念である。これは我々が提案して開発して来ているものである。このように、中性子光学素子の発展は新しい中性子実験装置の開発に直結する重要な開発研究課題であることが再認識されて来ている。

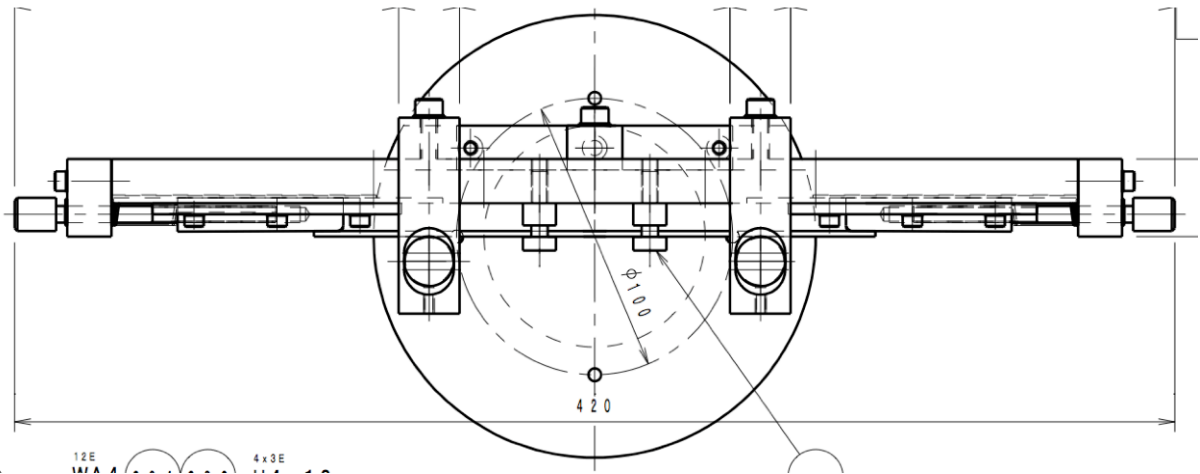


図 2-1. Si 中性子ミラーを湾曲化する装置の平面図。両側に楔状のものがああり、これを押し込むことでミラーを湾曲化させる構造になっている。

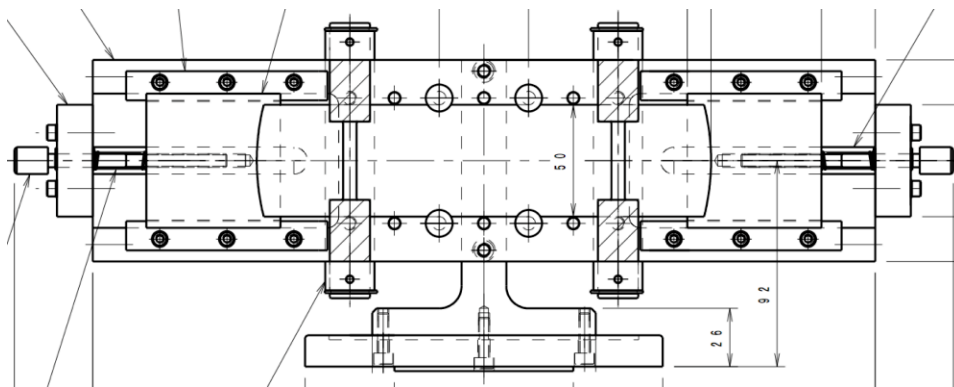


図 2-2. Si 中性子ミラーを湾曲化する装置の立面図。中央付近に Si ミラーを差し込み、これを湾曲化する構造になっている。

そのような中で、中性子ビームを集束する技術そのもの、およびその利用の仕方にはまだまだ開発要素があると我々は考えている。集束素子を製作するには、ガラスあるいはSi基盤を3次的に精密加工する方法があるが、短い平面状、あるいは円筒形状中性子ミラーを多層に重ねて実現することもできる。Siのような完全結晶を湾曲化し、集束する手法も有るが、この場合には単色中性子を用いることになる。例えば日本原子力研究開発機構（JAEA）のグループは精密加工した小型ミラーを用い、中性子をサブmmの領域まで集束することが出来ることを証明している。

これに対し、もし、一般的に手に入るSiもしくはガラス基板の上に製膜されたスーパーミラーを単に湾曲化させることで、集束が出来るのであれば、そもそも表面粗さの小さな基盤から出発出来、かなり表面粗さの少ないミラーをかなり簡便に作る事が出来る可能性がある。200mmの長さのミラーで楕円の短径が20mm程度の楕円柱ミラーを作ろうとすると、ミラーの端の部分で数十 $\mu\text{m}$ の変形になる。これを機械的なデバイスで湾曲することを考えた。過去の例であるが、別の予算で、精密に加工したAl板の上に、10 $\mu\text{m}$ のSUSのリボンを複数枚重ね、その上にSi基盤を押し付けることで楕円形状を模擬するような湾曲化装置を作成し、試験してみたことがある。

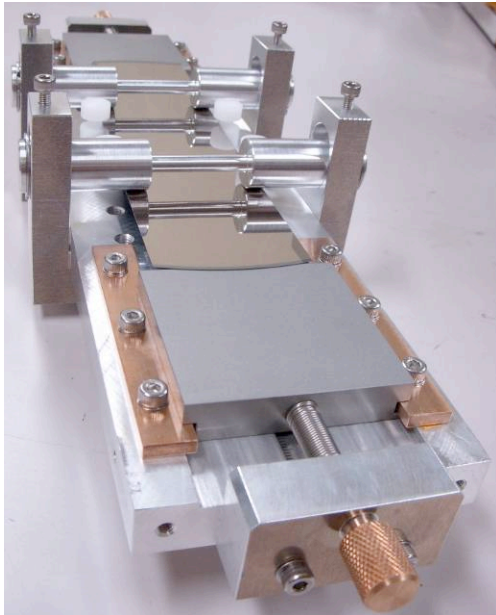


図 2-3. 中性子ミラーの湾曲化装置の写真。手前と奥側のアルミニウムのブロックが楔状になっていて、中央付近のシリコン製のミラーをわずかに湾曲化させる構造となっている。中央付近の 2 本のロッドはミラーを固定し、湾曲化させるためのものである。

ことにより、Si基板の両端を数十 $\mu\text{m}$ 曲げ、かなり目的の曲面に近づけることが出来るようになった。また、このミラーの写真を図2-3に示した。

このようなデバイスを用い、中性子による評価を行うために、北海道大学工学研究科にある45MeV電子ライナックを基としたパルス冷中性子源において中性子反射実験に着手した。図2-4に示したように、中性子の反射は確認したが、今後、Si基板の曲げ量に対し、どのように中性子が集束されるかを測定する予定である。

### 2.3 成果の外部への発表

本年度は、特に外部への成果発表は無い。

### 2.4 活動（運営委員会等の活動等）

本年度は、特に分担機関としての各種会合開催は無い。

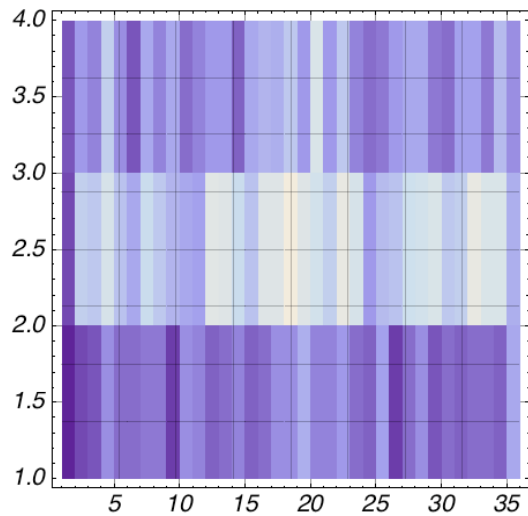


図 2-4. 中性子ミラーからの中性子の反射データ。

残念ながら基盤を押さえるためのビスの周辺で歪みが生じ、綺麗な中性子の集束を得ることは出来なかった。

そこで、今回の開発では、基板の両側から、精密なくさび形の金属板を押し込むことで基板を湾曲ささせることとした。その製作図面の一部を図2-1, 2-2に示す。これにより、両端に見えるつまみを回転させる

## 2. 5 実施体制

| 研究項目  | 担当機関等   | 研究担当者   |
|---|---|---|
| 1. 中性子イメージング・集光技術の開発と応用に関する研究<br>(1) 中性子イメージング技術の開発と応用<br><br>(2) 中性子集光技術の開発と応用 | 北海道大学大学院工学研究科<br><br>北海道大学大学院工学研究科<br><br>北海道大学大学院工学研究科 | ○鬼柳善明<br><br>加美山隆<br>平賀富士夫<br><br>古坂道弘<br>藤田文行<br>本間彰 |

注1. ◎:課題代表者、○:サブテーマ代表者

注2. 本業務に携わっている方は、全て記入。