研究成果展開事業

研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)

「産業ニーズ対応タイプ」

技術テーマ

「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」

完了報告書

研究課題名「小型定常中性子線源を用いた中性子透過撮像」

令和元年 5 月 31 日 プロジェクトリーダー 機関名:国立大学法人 名古屋大学 氏 名:清水 裕彦

I.研究計画の概要

1. 研究の目標

小型中性子源を用いた中性子の透過撮像を実用化することで、産業応用上求められる即時利用性を追求する。

特に、利用目的を限定することで、実用性の確保を試みる。具体的には、燃料電池から排出される水が、安定的かつ継続的に排出されるような排水機構の設計に必要な、気液混合流の振る 舞いを実機レベルでの実用的な検査手法の開拓を目的とし、製品開発において随時利用可能な 中性子透過撮像システムの基礎の確立を目標とする。

低速中性子は、マクロスケールの被検体を透過する能力に優れるとともに、水分子によって強く 散乱を受けるため、燃料電池内部の水の挙動を直接観察する有効な手段である。しかし実際に 中性子を利用できる場所は、原子炉もしくは大型の加速器中性子源施設に限られており、製品開 発において重要な即時的フィードバックを実現するに至っていない。本課題では、加速器駆動型 中性子源を目的に応じて特化することで、製品開発に実用可能な最小限のシステムを構成し、そ の性能向上を試みる。さらに、現在計測するべきタイムスケールが未知であることから、ミリ秒ス ケールの変動事象を撮像する可能性を包含できるように定常中性子ビームを用いて開発研究を 実行し、各要素の先端技術を取り入れるための調査及び研究協力を推進してシステム構成に必 要な要素技術を網羅的に統合することで、研究終了後に最短期間で実用され得るシステムを構 成することを目指す。

目的を達成するために、次のような段階を踏む。

1.画像の定量的評価

この課題の中では、各画素の信号強度 N の雑音レベルが Δ N の時、画質を評価する指標として p=20log₁₀N/ Δ N と定義する。この p を中性子ビーム強度などで表現できれば、必要なビーム 特性や検出器性能が定量的に表現でき、目的に応じたシステム設計が定量的にできることに なる。従来の燃料電池検査では、画質が定量的に議論されていたわけではない。そこで本提 案に先立ち、経験者の印象をもとにすると、概ね p \geq 20dB に相当する画質が用いられてきた と推定している。これは 12 σ に相当するため、過剰になっている可能性があり、画像処理によ ってはもっと小さな p でも充分に利用可能である可能性がある。また人間が画像から対象物を 認知する条件は、単に各画素の信号強度だけでは決まらず、対象物の形状や周囲の雑音レ ベルのパターンに大きく依存する。そこで、燃料電池に特化して、必要な画質の定量的指標を 検討する段階を第一段階とする。

2.要素技術の調査検討及び実装研究

前段階で必要な画質を定義した後、各要素技術に求められる性能を定量化し、実装時の性能 評価を行う。雑音レベルは中性子計数の統計誤差が支配的であるという仮定のもとで考える。 また、燃料電池は平坦な形状をしているので、図 1 に示したように、被検体と検出器はほぼ密 着させて配置するものとし、要求される中性子ビーム強度を最小限にする。この時、前方に散 乱された中性子は透過中性子と同様に検出される。



図 1 透過撮像を実行する上で、各要素技術に要求される性能の必要条件を求める上で、想定する機器配置。被検体の直下流に検出器を置くものとする。

したがって、吸収されるか 90°以上の角度で散乱される場合に、検出器上の強度低下として 水の存在が認識される。そこで散乱断面積の半分と吸収断面積の和を実効的断面積 σ_{eff} とし て用いる。本課題では主に熱中性子を用いることを想定し、水の数密度を n として n σ_{eff} = 1.72[cm⁻¹]とする。すると、視認すべき水滴の最小のサイズを L×L×L とするとき、画質 p と中 性子フラックス φ(単位時間当たり単位面積に到達する中性子数)は

$$10^{p/10} = \epsilon \phi L^2 T \frac{(1 - e^{-n\sigma_{\rm eff}L})^2}{1 + e^{-n\sigma_{\rm eff}L}}$$
(1)

1[mm]、T≦60[s]を想定する。このとき、p≧20dB は $\epsilon \phi \ge 1.2 \times 10^4 \, [\mathrm{cm}^{-1} \, \mathrm{s}^{-1}]$ を与える。

これは、そが1に近い限り、kWクラス未満の小型中性子源で充分に達成可能な値であるが、実際には被検体には水以外の物質が存在するため、画質は式1よりも劣化する。また、一般に、 中性子場には[→]線が伴うため、雑音レベルも無視できない。そこで各要素の実装方法及び実 装時の各要素技術の性能を実験的に評価する。

3.冷中性子源を用いた高性能化

次の段階ではさらなる性能向上を試みる。理想値は、L≒0.1[mm]、T≒1[ms] 程度と推定され る。この性能向上の段階では、より大きな中性子フラックスが要求されるため、減速体表面に 近い場所で測定することが一つの解決策である。ただし、雑音レベルはより深刻な問題になる と予想され、各要素技術の抜本的な性能追求が必要となる。そこで、安定的に運用可能な冷 中性子源を開発して用いることで、水の像のコントラストを増加させることを目指す。水の断面 積は中性子エネルギーが低下するにつれて大きくなることが知られている。この時、一般に検 出器の検出効率も同時に改善するので、原理的には性能が向上する。ただし、水以外の物質 の断面積も増加する傾向にあるため、具体的な非検体に応じて熱中性子とは異なる最適化を 実行する。

以上の段階を経て、実用のための技術を集約し統合する。本提案においては、発想や技術の 独自性にこだわりすぎることなく、目的を達成するために有用と思われる先端技術を積極的に 取り込むことも重要であると我々は考えており、科学分野全般を広く概観しながら研究を進め る。さらに、各要素技術及び実装技術の研究は必要条件であるのだが、実際に計測を進め、 また将来想定される使用者の意見を反映させるというきめ細やかさが必要であると考えられる。

そこで、使いやすさや維持管理を容易にするなどの現実的な問題に取り組む。

- 2. 研究実施予定表 非公開
- 3. 研究費 非公開

I.研究成果の創出状況

4. マイルストーンの達成状況

(1)熱中性子源が 1kW 以上のビームパワーで使用可能であること(平成 30 年度第 3 四半期) このマイルストーンは名古屋大学加速器の調整が遅れたために当初平成 28 年度末に達成予定 であったものが、平成 30 年度第 3 四半期に変更された。

〇達成状況

名古屋大学中性子源 NUANS は静電加速器からの 2.8MeV 陽子ビームを用いて、Be(p,n)反応 による中性子発生を行い、常温減速体によって連続熱中性子ビームを発生させる装置である。陽 子ビームの分岐及び輸送光学系の整備は、名古屋大学内部局間連携であるところの理工連携 放射線科学推進の下で、産学協同研究講座及び共同研究によって進められており、本課題と緊 密な連携を進めることで実現予定であった。陽子加速器は平成27年春に米国の製造工場での動 作試験合格後に日本に持ち込まれたのでその後の順調な調整を想定していたが、名古屋大学設 置後に加速タンク内での真空漏れやイオン源の不具合などにより、充分な加速電圧及び加速電 流が得られない状態が続いた。

中性子発生に関わる施設検査は平成 30 年 6 月 24 日に行われ合格となった。NUANS におい ては2本のビームライン(BL1,BL2)を有しており、本課題に関わる BL2(図1)に関してはこの施設検 査合格後から中性子発生試験を開始し、同年 7 月に中性子の発生を確認することができた。その 後も加速器の調整を行いながらも少しずつビーム強度を上昇させ、現状では加速器で 400 µ A の 2.8MeV 陽子を発生させ、中性子発生の試験を行っている。ビーム出力としては 1.1kW になってお り、これは日本で学術目的に利用されている陽子小型中性子源である、理研 RANS(700W)、京都 大学 KUANS(350W)を上回る陽子ビーム強度となっている。





図1. NUANS BL2 の全体像(左)上流より撮影 (右)下流より撮影 図1(左)手前から写真上部に向けて陽子ビームが進む。写真上部の箱の中に Be 箔中性子発生標的があり、発生した中性子は写真左手に出てくる。 図1(右)手前に中性子発生標的を設置した遮蔽体。1m 程度の大きさになっている。 中性子発生標的に関しては理研で開発され(特許 PCT/JP2013/056188)、RANS や KUANS で の使用実績のある中性子発生標的作製方法が採用されており、RANS や KAUNS に比して熱流入 が大きいので事前に除熱の計算を行い標的の健全性を評価した。Be 標的部に 4kW の熱量を加 えた際の標的部及び冷却水の温度をいくつかの冷却水流量で計算した結果を図 2 に示す。この 結果冷却水流量を 202/min にした場合、標的の最大温度は 146℃,冷却水の最大温度は 85℃と なった。流量を変化させた計算結果より最低流量は 172/min となり、これ以上の流量で運転すれ ば問題ないことが確認された。



図 2. 4kW 入熱時における Be 標的(左)、冷却水の温度分布(中)、及び流量との関係(右)

NUANS BL2 で利用されている Be 箔中性子標的が図3である。計算上は健全性が確認されているものであるが、実際の大強度照射によっても健全性の確認が必要であり、加速器調整によってビーム強度を上昇させている現段階では照射の都度標的の確認をして破損状況を見ている。これまでのところ破損の様子は見られず安定に機能していることが確認されている。



図 3. BL2 に導入された中性子発生用 Be 標的 (ビーム照射後の破損状況確認時のもの)

(2)熱中性子ビームが検出器位置で $\varepsilon \phi \ge 1.4 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ が満たされること(平成 30 年度第 3 四半期)

このマイルストーンは名古屋大学加速器の調整が遅れたために当初平成 29 年度第 2 四半期に 達成予定であったものが、平成 30 年度第 3 四半期に変更された。

〇達成状況

NUANS BL2においては、平成30年7月に中性子発生が確認され、その後は加速器の調整を

行いながら中性子ビーム強度を上げている。NUANS BL2 における熱中性子ビームは LiM 検出器 と言われる、リチウムガラスシンチレーターと光センサーを用いた中性子検出器を用いて評価され ている。この LiM 検出器をBL2 のカメラシステムの直上流に設置し、透過像を撮像しながら中性子 強度も同時に計測できる環境を構築している。平成 30 年 10 月の計測において中性子強度は約 1.7 × 10⁴n/cm²/s を達成している。LiM 検出器の検出効率は約 80%であるため、ε φ=1.4 × 10⁴cm⁻²s⁻¹が達成できている。今後の加速器調整によりさらなるビーム強度上昇が期待できる。

(3) IIT 型検出器が ε φ ≧ 1.4×10⁴ cm⁻² s⁻¹の強度下で 60 秒積分の静止画像が取得可能で あること(平成 28 年度末)

〇達成状況

産業応用上必要な中性子イメージング検出器の性能について関係者と議論を行い、適合 するデジタル撮像系について調査すると共に、その評価を行った。中性子イメージングに使 われているIIT型検出器の多くでは、これまで静的画像を得るために市販のデジタルー眼レフ カメラが用いられており、非常に高い画素数でIITの出力蛍光面を撮像することができていた。 しかしながら、市販のデジタルカメラでは、記録する輝度値に曲線の感度補正をかけて人間 の感ずるイメージに近い画像を得るという仕様になっており、線形の輝度値が必要な産業・科 学用途にはあまり適さない。カメラのフィルムを意識した長方形の撮像センサーも、IITの円形 の出力蛍光面にマッチしておらず、高画素が無駄になってしまっていた。さらに、オプションと して販売されている、ネットワーク経由の外部操作系は、細かい条件設定に適しておらず、静 的画像を時間分割で撮像するような用途にもあまり向かない。これらの状況を踏まえて、本 事業で目標の一つとするIITを利用した静止画撮像系には、IITの円形出力蛍光面に適合す るようイメージセンサーの一部を充分な画素数で切り出せて、線形の輝度値応答性を持つ、 外部制御前提のデジタルカメラが適当であるという結論に至った。



図 4. 正方イメージカメラ (DU657MC, 東芝テリー)

この基準を基にデジタルカメラを調査したところ、産業用カメラに適当と考えられる性能を 持つカメラがあることが分かった。今年度、IIT と組み合わせて試験したカメラ(DU657MC、東 芝テリー)を図4に示す。このカメラはインターフェースとしてUSB3を持ち、ロジックをハードウ ェア回路とすることで高速化されているという特徴を持つ。輝度値の応答性も線形であること から、本事業の目的に適当であると考えられた。ただし、画素数は650万画素と、市販のデジ タルー眼レフカメラの数分の1となるが、イメージセンサーが正方なのでIITの円形出力蛍光 面を撮影するには無駄な領域をなくすことができ、IITとの組み合わせで数百µmの解像度が 充分に期待できる。さらに、撮像制御用のソフトウェアから詳細なカメラ制御が可能で、外部ト リガを用いて一定間隔の撮像により時間依存の現象を記録できることから、定常線源を用いた産業利用に適すると考えられる。



図 5. DU657MCとX線用 IIT を組み合わせた撮像テスト 結果の例。中央の橙色正方イメージが撮像の結果である。

図 5 に DU657MC に X 線用 IIT を組み合わせて撮像テストをした結果を示す。IIT の円形 の出力面の直径に正方イメージセンサーの対角が合うように光学系を組むことで、イメージセ ンサー領域が無駄なく撮像に使われていることがわかる。撮影対象は、AI 円柱内に複数太さ の Pb 細線をセットした物体であり、明瞭に Pb 線の存在が確認できる。この中で最小の Pb 線 太さが 0.1 mmであり、その存在もはっきり写っていることから、サブ mm を超える分解能が達成 できていると考えられる。



図 6. DU657MC の長時間通電時における画質変化。それぞれ、(A)は電源入直後、(B)は 5 時間以上経過後の撮像イメージ。下図は試験時のカメラと外気温の変化である。

中性子の測定では、線源強度の問題からしばしば長時間測定を行って統計精度をあげる ことが必要となる。カメラの性能上今回の課題で目標値とした 60 秒の撮像はすでに達成して いるために、さらにそれより長い条件での撮像が可能かどうかの評価を進めた。特に小型の 線源では長時間測定が必須となる可能性があるため、本研究ではデジタルカメラの長時間 安定性についても評価した。デジタルカメラではセンサー(DU657MC では CMOS 型)に電気ノ イズが取り込まれることから、長時間測定ではそれにより画像の白化が生じる場合があり、シ グナルの強度によってはノイズの中に画像が埋もれてしまう状況が生じてしまう。そこで、ここ では DU657MC に電源を長時間入れたまま駆動・放置し、その間数回カラーチャートを同条件 で撮像することによって、記録される画像にどのような差異が生ずるか観測した。図 6 に結果 の例を示す。図中(A)はカメラの起動直後、(B)は5時間以上経過した後の画像である。このと きのカメラの温度変化と室温の変化についても併せて示した。画像(A)と(B)を比較すると、明 らかにカメラ起動直後の画像が明るく、長時間経過後の画像が暗くなっている。他のデジタル カメラでは、このような試験で撮像していると、長時間経過後の方が白化した画像になること が多い。それは図3の下図にあるように、カメラの温度が高くなるにつれて CMOS センサーの 感じる電気ノイズが多くなるため、バックグラウンドが高くなってくることから生じる。通常この ようなノイズは、測定時に適当なタイミングでカメラに光が入らないようにして取得した画像を 元に補正するが、そのためにも温度が安定する必要がある。一方、この DU657MC では温度 が高くなると逆に画像が暗くなっている。これは独自のノイズ対策を組み込んでいるためと考えら れるが、このままではバックグラウンド評価が難しい。このようなカメラノイズの対策としては、カメ ラを常にある温度以下に保つような冷却機構を導入して、長時間でも同じ条件下で撮像ができる 体系とすることが考えられる。

そこで冷却機構を装着したカメラと IIT デバイスを組み合わせた画像検出器を試作して北海道

大学加速器中性子源 HUNS を利用して評価した。測定においては ASTM 規格に準拠した BPI インジケータと SI インジケータを使用した。

図7は、図1と同じ測定条件でカメラの温度を10℃から39℃まで変化させることによる画像の 輝度変化である。SIインジケータの鉛ステップ部にROIを設定し、ステップ部の輝度変化を求めた。 図7右図は、視野内で試料がある位置の外側の領域で1に規格化したROIの輝度で、鉛ステップ に対応して階段状に輝度値が変化している。さらに温度が変化すると、この輝度値全体が少しず つ変化していることがわかる。カメラの温度12℃を基準にこの輝度値全体の変化を計算すると、 カメラ温度が15℃以下の場合、変化は1%未満になるが、温度を上げるにつれて25℃で1.3%、 39℃で3.8%と変化量が増加する。つまり、カメラ温度はある温度(この場合は15℃以下)に保持す る必要があることになる。

図8には、カメラ温度を12°Cに制御しながら16ビット輝度値で50分間インターバル測定していったときの輝度値変化の結果を示す。この測定における変動量は50分積算時の平均輝度 30302.5に対して16ビット輝度値は±195であると確認され、1.3%の変動内で概ね安定した測定が可能であることがわかる。この変動には、カメラ自体の温度変化に加え中性子源自体の変動と 冷却機構の温度制御による変動も含まれており、加速器中性子源の不安定性(約1~2%程度)を 考慮すると、十分に安定した測定が行われていると評価できる。



図 7. カメラの温度を変えた時の輝度値の変化。左図は ROI の位置を示す。



図 8. 温度制御したカメラの安定性

(4) 冷中性子源が 1kW 以上のビームパワーで使用可能であること(平成 30 年 4 月)

〇達成状況

冷中性子源を設計するにおいて Be 箔の中性子発生標的に関しての条件はマイルストーン1と 同じになる。それに加えて中性子発生標的からの発生熱量が冷中性子減速体に熱負荷を及ぼす のでこの影響を評価する必要がある。中性子発生標的からの熱負荷は 2.8MeV、1kW のビーム強 度の場合およそ 0.5W と放射線シミュレーションにより見積もられる。そこで、実際に使われると想 定される冷却バーにおける熱負荷の計算をすすめた。放射線の遮蔽を向上させるために全体をL 字型に折り曲げた真空ダクトとラディエーションシールド、冷却バーを想定しシミュレーションを行っ た。



図9 冷却シミュレーションモデル



図 10. 冷却シミュレーション結果(左:クライオバー、右:ラディエーションシールド)

図9にシミュレーションに用いた形状及び条件を記し、図10にシミュレーション結果を示す。シミュレーションの結果から、クライオバー、ラディエーションシールドそれぞれの温度上昇および熱負荷は、0.9K, 12.3K および1.06W, 19.9Wと推定された。冷中性子減速体であるメシチレンを冷却させているクライオバーに注目すると約1Wの熱流入が見込まれ、中性子発生標的からの放射線による熱流入0.5Wと合わせて、合計約1.5Wの熱流入と計算される。そこで現在想定しているような20K10W 程度の冷凍機を用いることで、冷中性子源のメシチレン冷却は可能であることが確認された。

(5) 冷中性子ビームがシミュレーション計算で検出器位置で ε φ ≧ 1.4 × 10⁴ cm⁻² s⁻¹ が満たさ れる設計であること(平成 29 年度末)

〇達成状況

冷中性子源の構築を進めるための冷中性子シミュレーションを進めた。減速材としてメシチレン を用い、散乱カーネルを用いて冷中性子のスペクトルの計算を行っている。熱中性子ビームが既 に実用の域に到達しているのでその配置と同じ遮蔽体配置とした上で、図 11 のように熱中性子 減速体の位置に冷凍機用のアルミ製キャビティ及びメシチレン冷中性子減速体を配置して PHITS 計算を行なった。

陽子ビーム 1mA を照射したと仮定し、メシチレンの温度を 20K とした際の検出器位置での冷中 性子(1-10meV)強度を計算してみると 4x10⁴n/cm²/s の中性子強度となった。計算の確認のため に全く同じセットアップでメシチレンの温度のみを 300K に設定して再計算を行うと中性子強度 (1-10meV)は 1x10⁴n/cm²/s となり、確かに冷却による中性子発生の効果が確認でき、且つ目標と した 1.4x10⁴n/cm²/s を上回っていることが確認できた。

両者のエネルギースペクトルを比較したのが図 12 である。300K の計算において見えている熱 中性子のピークが 20K の計算ではなくなり、低エネルギー側の中性子強度が上昇していることが 確認できる。



図 11. NUANS BL2 にメシチレン減速体を設置した場合の配置図



図 12. 検出器位置での中性子のエネルギースペクトル

(6) 視認度が p≧6db を満たす画像を取得すること(平成 30 年度第 3 四半期)

〇達成状況

NUANS や RANS、京都大学研究用原子炉 KUR を用いて計測した燃料電池電極の透過画像を 用いて視認度の評価を行った。統計的な議論を行うためには撮像システムで用いている CCD 画 像の輝度値を検出中性子数に変換する必要がある。また、中性子強度は視野全体に対して一様 ではなく分布を持っている。したがって、測定試料を置かない状況での計測(ダイレクトビーム計 測)を行い、また CCD の暗電流や読み出しノイズ評価のために中性子を照射しない条件での計測 (バックグランド計測)を行った。これらの計測とび実際に燃料電池試料をおいた計測(FC 計測)の3 種の取得画像を用いて評価を行っている。

各ピクセルにおいて、ダイレクトビーム計測の輝度値、バックグランド計測の輝度値、FC 計測の 輝度値をそれぞれ、N₀,N_b,N_{FC}とし平均中性子強度を I_0 [n/cm2/s]、1ピクセルの面積 S_p[cm]、検出 効率 ε をもちいると、それぞれのピクセルにおける検出中性子個数は以下の式で表現できる。

$$N_n = \frac{N_{FC} - N_b}{N_0 - N_b} I_0 S_p \epsilon$$

この式を利用して各施設で取得した画像から、燃料電池の水路がある領域での検出中性子数を見積もり、画像の視認度を評価する。

中性子検出数が N_nで、その統計誤差ΔN=√N_nで評価される時の視認度 p は p=20log₁₀N/ΔN で評価することができる。まずは取得した画像から視認度を確認する。



図10. KUR E2 での1分照射の画像。CCD の本来のピクセル画像



図11. KUR E2 での1分照射の画像を1ピクセル 200 µm になるように足し合わせる



図12. KUR E2 での1分照射の画像を1ピクセル 1mm になるように足し合わせる

図 10 から図 12 は KUR E2 ポートで燃料電池電極を1分間照射した時の画像及びピクセルの足 し合わせを行った際の画像である。KUR E2 の平均中性子強度(1MW 時)は約 8×10⁴ n/cm²/s で ある。KURで用いているカメラシステムでは CCD 本来の1ピクセルがシンチレーターを見込む面積 は 42.7 µm×43.5 µm と推定される。図 10 においては燃料電池電極内に存在する水路(想定幅 300 µm 程度)がうっすらと確認できる。この時の平均的なピクセルあたりの検出中性子数は約 17 個であり視認度は P=12db となる。図 11.では図 10 のピクセルを複数個合算して、ピクセルサイズ が一辺 200 µmになるようにした時の画像である。ピクセルあたりの検出中性子数が増えて、水路 の画像も明瞭になってくるこの時の視認度 p=20db である。図 12 ではさらにピクセルを合算して、 ー片が 1mmになるようにした。この場合、ピクセルあたりの検出中性子数は増えるものの、画像と してはすでに水路幅よりも太くなるために実際の画像としては不鮮明となる。このように人間が画 像として認識している場合は見たい対象物の大きさとピクセルサイズを合わせることで明瞭な画 像を得ることができ、これまでのイメージングでもよく行われてきている。

	視認度 p		
42.7x43.5 μ m	12db		
200x200 μ m	21db		
500x500 μ m	34db		
1000x1000 μ m	40db		

KUR E2 で計測した際の視認度を表1にまとめる。

表 1. KUR E2 での1分照射時における視認度 p

次に同様の計測を NUANS で行った場合を示す(図 13、図 14)。NUANS では15分照射と1 分照 射を行っている。画像取得した際の平均中性子強度は約 4000n/cm²/s である。NUANS において は元画像(図13)で水路の様子がうっすらと見える程度であり、事前に水路があることを認識して いなければ明確な確認は難しい画質である。検出中性子数はおおよそ KUR E2 と同じ程度であ る。

	視認度 p	
46.3x46.3 μ m	14db	
200x200 μ m	29db	
$500 \mathrm{x} 500 \mu$ m	36db	

表 2. NUANS BL2 での15 分照射時における視認度 p



図13. NUANS BL2 での15 分照射の画像



図14. NUANS BL2 での15 分照射の画像を1ピクセル 200 µm に足し合わせたもの

図 15 は NUANS での燃料電池電極画像を1分照射で取得したものである。

画像としてはほぼ燃料電池電極が見えておらず、図 13、図 14と比較することで、中央部上部に リング状の影がうっすらと見える程度である。1分照射における視認度を表3にまとめる。マイルス トーンで目標とした 6db を達成している。



図15. NUANS BL2 での1分照射の画像

	視認度 p		
46.3x46.3 μ m	8.6db		
500x500 μ m	30db		
$1000 x 1000 \mu$ m	30db		

表 2. NUANS BL2 での 1 分照射時における視認度 p

5. 研究計画全体の進捗状況

本研究においては小型中性子源を用いた中性子の透過撮像を実用化することで、産業応用上求められる即時利用性を追求する。

特に、利用目的を限定することで、実用性の確保を試みる。具体的には、燃料電池から排出され る水が、安定的かつ継続的に排出されるような排水機構の設計に必要な、気液混合流の振る舞 いを実機レベルでの実用的な検査手法の開拓を目的とし、製品開発において随時利用可能な中 性子透過撮像システムの基礎の確立を目標とする。

本研究において、NUANS BL2 において熱中性子源及び撮像システムを構築し、産業利用できる中性子透過画像取得システムを構築することができ、中性子透過画像の取得を始めた。

取得した画像に対して、水の存在を確認するための評価を以下のように行った。

燃料電池の電極画像に対して、図 16 で示したように、各画像に対して水路がある領域と水路の ない領域に分けて、それぞれの領域の検出中性子数を求めた。そして両者の比を取ることでその 領域での水路部分の中性子透過率を計算する。もし計算する領域に水が存在しなければ両者 の値は一致するため、比は1に近い値をとる。実際にいくつかの計測施設及び積分領域でこ の透過率を計算した結果が表 2 のようになる。



図 16. 透過率計算を行う場合の領域の場合分け

この結果を見ると、画像として水路が認識できなかった NUANS での1分照射のデータにおいて も透過率を計算することで水の存在が確認できることが確認できた。このように小型中性子源の ような大型装置に比べて中性子強度の弱い施設においても、計測目的を明確にして(今回の解析 では水の視認)その目的に応じて評価をすることで、これまで画像を見ただけでは判断できなかっ た状況を定量的に判断することが可能となることが確認された。今回用いた資料は産業分野でも これからの発展が期待できる燃料電池部材であり、今後の産業界での利用が期待される。

	透過率	視認度	
KUR 3x3cm の領域	96.3±0.1%	p=62db	
KUR 1x1cm の領域	96.1±0.2%	p=53db	
NUANS 15 分照射 3x3cm の領域	97.7±0.1%	p=63db	
NUANS 15 分照射 1x1cm の領域	98.5±0.2%	p=17db	
NUANS 1 分照射 3x3cm の領域	97.9±0.1%	p=58db	
NUANS 1 分照射 1x1cm の領域	85.7±0.4%	p=48db	
NUANS 1 分照射 0.5x0.5cm の領域	84.9±0.7%	p=42db	
NUANS 1 分照射 0.1x0.1cm の領域	85.1±1.8%	p=33db	

表2. 透過率を計算した際の積分領域と、透過率、視認度

また画像を定量的に評価できるように画像表示ソフトウェアを製作した。これまでの画像 表示ソフトウェアは XY の2次元に対して、CCD の輝度値(これは検出器面での中性子強 度に相当する)を表示するものが一般的であるが、小型中性子源を使った中性子透過像 測定において中性子強度が低い場合、画像に統計的な揺らぎが現れるので画像が不鮮 明になる。そのため不鮮明な画像からでも必要な情報を抜き出せるような画像評価プログ ラムが必要となる。検出した中性子数から統計誤差を評価し、統計誤差を単位としてどの 程度の精度で画像が取得できているか、注目している部分が統計精度でどの程度優位か を評価するソフトウェアを作成した。これは鮮明な画像を得るための手法ではなく、画像取 得の際に見たい目的物を明確に定義した上で、その対象物のあるなしを統計的に評価す る手法となっている。

図 17 は作成した画像表示ソフトウェアを用いて、FC 電極の透過像を示したものである。 計測例として京大原子炉 E2 で1MW60 秒照射した時の画像を用いている。測定時に 1.中 性子ビームなし(CCD 暗電流計測)、2.試料なし(中性子強度計測)、3. 水を含めた FC 電極 の透過像、の3種類の画像を計測し、中性子強度計測から得られる各画素の検出中性子 数の統計的揺らぎに対して、透過像がどの程度強度変化しているかを揺らぎの幅 σを単 位にして表示している。白黒の画像は CCD カメラの取得画像を示しており、そこに上書き する様に青点で中性子透過率の低い領域を表示している。図 3a)においては CCD の画素 を 10x10 ピクセルで足し合わせた処理をしており、通常の計測で生じる統計的揺らぎに対 して 14.5 σ以上離れている場所が青色で示されている。10x10 ピクセルはおよそ 400 ミクロ ン程度の画素サイズになり、ほぼ計測の位置分解能に相当する画素サイズでの画像解析 となっている。この時に、中性子強度の揺らぎに対して 14.5 σ離れた輝度になっているピク セルを青色で表示している。図 3b)においては 50x50 ピクセルを足し合わせた画像を作っ ており、画素サイズとしては 2mm 程度となっており、統計的揺らぎに対して 75.3 σ離れた 場所を青くしている。この様に、足し合わせる画素サイズや色をつける統計的誤差の範囲 を簡単に調整できる様にしてあり、弱い中性子強度の計測でも中性子強度が変化した領 域を簡単に見いだすことができる様な画像表示ソフトウェアとなっている。



図 17. 作成した画像表示ソフトウェアの表示画面 a). 10x10 ピクセルの足合せ



図 17. 作成した画像表示ソフトウェアの表示画面 b). 50x50 ピクセルの足合せ

作成した画像表示ソフトウェアを利用して、FC 電極周辺の水の動きを模擬した透過画像を 評価した。

FC 電極で観測できる水の模擬的なものとして、アルミ板に幅 1mm 深さ 1mm の切れ込みをいれ、そこに水を注入して太さ1mm の水の筋を作った。このアルミ板試料を駆動装置に取り付け、 移動させながら中性子照射し、露光時間 1 秒での撮影を行った。



図 18.1 秒露光での動画像撮影

取得した画像に対して、画像表示ソフトウェアを用いて示したのが図 18 である。この図にお いては 10x10 ピクセルを足し合わせて画素サイズを約 400 ミクロンとした上で、中性子強度に 対して 3.5 σ以上離れた領域を青色で表示している。この画像を見ると幅 1mm の水の領域が 画面中央部の上から下に移動しているのが見て取れる。検出中性子の統計的な揺らぎがあ るために青色表示は実際の水の存在箇所以外にも見えているが、連続撮影画像として、画 像全体を通して眺めることで、実際にどの領域に水があることが確からしいのか、閾値や足 合せるピクセル数を変えながら画像を調整することで判断が容易となる。

これを利用することで、FC 電極内の水の移動を視覚的に確認することができる様になる。

6. 研究実施状況

本課題を実行する上では、名古屋大学理工連携放射線科学推進委員会の下で工学研究科との協力によって名古屋大学産学協同研究講座において名古屋大学加速器駆動中性子源 (NUANS)を立ち上げた。その上では理化学研究所の中性子標的開発研究及び減速体設計研究 の成果を取り入れた。また画像検出器は北海道大学の検出器技術を基準として、実用的画像検 出器の性能を評価しつつ進めた。また画像データの評価については、日本中性子科学会基礎基 盤部会において中性子ビームの特性を取り扱う論理的枠組みを取り入れて、定量的に画像を表 現する一般的な定式化の確立の基礎をなした。これは日本中性子科学会基礎基盤部会と放射線 協会との協力で編纂された中性子イメージングハンドブックに集約された各データに適用して、実 用レベルでの定量的表現に利用する。燃料電池の撮像については、トヨタ自動車計測技術部と理 学研究科の共同研究に基づいて進められた。

燃料電池の計測や中性子検出器の評価などは、NUANS だけにとどまらず、北大 HUNS, 理研 RANS, 京大 KUANS などの各小型中性子源や京大原子炉 KUR などを利用した。こうした計測や 研究遂行のプランニングの際には、日本における加速器駆動中性子源の研究グループネットワ ークである JCANS を利用しての協力体制が作られ活発な議論や情報共有が行われた。また、世 界的な小型中性子源研究者の集まりである UCANS においても情報発信や情報共有が行われた。 特にヨーロッパにおいては研究用原子炉の閉鎖計画に伴って、中小型の加速器駆動中性子源に 注目が集まっており、NUANS をはじめとする JCANS 参加研究者のネットワークを元にした情報共 有や各装置開発にも注目が集まっている。本課題はこうした JCANS や UCANS 活動を利用して研 究協力や情報共有を進めることができた。

JACANS: Japan Collaboration on Accelerator-driven Neutron Sources UCANS: Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources

7. 産学の対話の活用状況

産学共創の場に参加された企業と中性子検出器に関しての意見交換が進んだ。そのうち 1 社からは実際に中性子検出器の評価用デモ機を借用して、小型中性子源の中性子ビームを利用しての性能評価を行った。評価結果は企業と情報共有するとともに、学会や研究会で発表を行い、 関係する研究者と情報の共有を行った。

また別の企業とも学会の場において意見交換したことをきっかけとして、中性子検出器のサンプ ルを借用して研究用原子炉を利用して検出器の性能評価を行った。これに関しても評価結果を企 業と情報共有するとともに、中性子イメージングの研究会で評価結果の報告を行い、研究者間の 情報共有を行うことができた。



図.評価した中性子検出器と取得した画像
 (上段)コーンズテクノロジー MiniPIX 検出器
 (下段)浜松ホトニクス FPMT アレイ: H13974-03

8. 創出された研究成果(企業との共同研究、特許、論文など)のリスト

①企業との共同研究等(共同研究、サンプル・ノウハウの提供など) 非公開

②-1論文·著書(査読付き)

(国内)

- 1. 広田克也, 波紋 28(2018)29(日本中性子科学会誌), 2018/2/1
- 2. 清水裕彦, 波紋 29(2019)41(日本中性子科学会誌), 2019/2/1

(海外)

- 1. S. Imajo et al., PTEP (2016)013C012, 2016/6/1.
- 2. I. Ito et al., PoS(KMI2017)(2017)068, 2017/5/1.
- 3. K. Hirota et al., PoS(KMI2017)(2017)025, 2017/5/1.
- 4. Y.Tsuchikawa. et.al., JPS Conf. Proc. 22, 011024(2018) pp1-4

②-2論文·著書(査読無し)

(国内)

1. 広田克也、清水裕彦、岩下芳久、内藤富士雄、「日本加速器学会と日本中性子科学会の連携 に関して」加速器 15(2018) 69

(海外) 該当なし

③学会発表(招待講演含む)

(国内)

- 伊藤維久弥、清水裕彦、北口雅暁、広田克也、市川豪、土川雄介他,名古屋大学加速器中 性子源(NUANS)のビームライン設計,日本物理学会秋季大会,宮崎大学2016年9月24日 (口頭)
- 広田克也、清水裕彦、市川豪、北口雅暁、山形豊他, 複合核状態における時間反転対称性の破れ デバイス開発の現場と今後, 日本物理学会秋季大会, 宮崎大学, 2016年9月24日(口頭)
- 3. 北口雅暁、広田克也、清水裕彦、市川豪、山形豊他,中性子電気双極子モーメント探索実験 のための中性子波長幅圧縮法の開発,日本物理学会秋季大会,宮崎大学,2016年9月24 日(口頭)
- 伊藤維久弥、清水裕彦、北口雅暁、広田克也、市川豪、土川雄介、山形豊他,名古屋大学加速器中性子源(NUANS)のビームライン設計,日本物理学会秋季大会,宮崎大学,2016年9月24日(口頭)

- 5. 清水裕彦, 中性子科学の基礎と基盤について,名古屋大学, 日本中性子科学会, 2016 年 12 月1日(口頭)
- 11. 土川雄介、広田克也、清水裕彦、鬼柳善明、瓜谷章、土田一輝,名古屋大学加速器駆動小型中性子源 NUANS 2nd ビームラインの建設,中性子イメージング研究会,京大原子炉研究所,2017年1月5日(ロ頭)
- 広田克也、清水裕彦、市川豪、北口雅暁他, 複合核状態における時間反転対称性の破れ
 一 検出器開発, 日本物理学会年会, 大阪大学, 2017 年 3 月 18 日(口頭)
- 8. 北口雅暁、清水裕彦、広田克也、市川豪他, 複合核状態における時間反転対称性の破れ探 索実験計画, 日本物理学会年会, 大阪大学, 2017 年 3 月 18 日(口頭)
- 清水裕彦, 複合核状態における離散的対称性の破れ, 日本物理学会年会,大阪大学, 2017 年3月18日(口頭)
- 10. 清水裕彦, V. Gudkov, W.M. Snow, J.D. Bowman, 北口雅暁, 広田克也, 山形豊他, 複合核共 鳴を用いた時間反転対称性の破れの探索のための偏極核標的内での中性子偏極度の挙動 について, 日本物理学会年会, 大阪大学, 2017 年 3 月 20 日(口頭)
- 11. 広田克也, 名古屋大学加速器中性子源 NUANS の構築, 日本加速器学会, 北海道大学, 2017 年 8 月 1-3 日(ロ頭)
- 12. 北口雅暁, 複合核状態における時間反転対称性の破れ探索実験計画, 日本物理学会秋季 大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 12 日(口頭)
- 13. 土川雄介, 名古屋大学加速器駆動小型中性子源 NUANS 2nd ビームラインの建設, 日本物 理学会秋季大会, 宇都宮大学,2017 年 9 月 12 日(口頭)
- 奥平琢也, 複合核状態に おける時間反転対称性の破れ 139La(n, γ)反応のγ線角分布
 の高精度測定:実験と解析, 日本物理学会秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 13 日(口頭)
- 15. 山本知樹, 複合核状態における時間反転対称性の破れ 探索のための偏極中性子を用いた 空間反転対称性の破れ測定, 日本物理学会秋季大会, 宇都宮大学, 2017年9月13日(ロ頭)
- 16. 遠藤駿典, 複合核状態における時間反転対称性の破れ 一 時間反転対称性の破れ測定の ための高計数率検出器の開発, 日本物理学会秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 13 日(口 頭)
- 17. 清水裕彦,複合核共鳴を用いた時間反転対称性の破れの探索のための偏極標的 に対する 要請について,日本物理学会秋季大会,宇都宮大学,2017年9月13日(口頭)
- C.C.Hadock, "Mesurement of neutron scattering from noble gas to search for a short -range unknown force at J-PARC, Overview and Simulation Result",日本物理学会秋季大会, 宇都 宮大学, 2017 年 9 月 13 日(口頭)
- 19. 大井法子, J-PARC BL05 における中性子一希ガス散乱を用いた未知探索実験,日本物理学 会秋季大会,宇都宮大学,2017 年 9 月 13 日 (口頭)
- 20. 伊藤維久弥,名古屋大学加速器駆動中性子源 2nd ビームラインの設計, 日本中性子科学会, 名古屋大学, 2016 年 12 月 1 日 (ポスター)

- 21. 土川雄介、市川豪、広田克也、清水裕彦、鬼柳善明、瓜谷章、土田一輝,名古屋大学加速器 駆動中性子源 NUANS の建設,量子ビームサイエンスフェスタ,エポカルつくば,2017年3月 14日(ポスター)
- 22. 広田克也, 名古屋大学中性子源 NUANS2nd Baemline の構築(ポスター), 日本中性子科学 会, 福岡大学, 2017 年 12 月 2-3 日 (ポスター)
- 23. 赤木佑、清水裕彦、北口雅暁、広田克也、他,中性子2次元シンチレーション検出器の評価測 定,日本物理学会年会,東京理科大,2018年3月22-25日(ポスター)
- 24. 広田克也、 ["]小型・中型・大型中性子源の役割とその連携に関して",日本中性子科学会第 18 回年会,水戸,2018 年 12 月
- 25. 粟野省吾、市川豪,今城想平,岩下芳久,瓜谷章,北口雅暁,鬼柳善明,清水裕彦,土川雄介,土田一輝,釣田幸雄,広田克也,三和田靖彦,山形豊,山崎淳,吉橋幸子,渡辺賢一, "名古屋大学加速器中性子源 NUANS におけるイメージングポートの構築", 日本中性子科 学会第 18 回年会,水戸,2018 年 12 月
- 26. 粟野省吾、"名古屋大学加速器中性子源 NUANS におけるイメージングポートの構築", 日本 物理学会第 74 回年会,九州大学,2019 年 3 月(ポスター)

(海外)

- 清水裕彦、W.M.Snow, V.Gudkov, "Discrete Symmetry Tests In Neutron-induced Compound States", International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide, Austraria, 2016 年 9 月 16 日(口頭)
- 広田克也, "Experiment of (n, γ) reaction of discrete symmetry", International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide, Australia 2016 年 9 月 16 日(口頭)
- 北口雅暁、岩下芳久、清水裕彦, "Feasibility Study Of Neutron Wavelength Compressor For EDM Measurement", International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide, Australia 2016 年 9 月 16 日(口頭)
- 清水裕彦, "Study of Discrete Symmetry Breaking Effects in Neutron-induced Compound States", 22nd International Spin Symposium (SPIN2016), Illinois, US, 2016 年 9 月 27 日(口頭)
- 清水裕彦, "Study of Discrete Symmetry Breaking Effects in Neutron-induced Compound States", Physics of fundamental Symmetries and Interactions (PSI2016), Paul Scherer Institute, Switzerland, 2016 年 10 月 18 日(口頭)
- 広田克也, "Design of Nagoya University Accelerator -driven Neutron Source(NUANS) 2nd beamline", Union of compact Accelerator-driven Neutron Source (UCANS-VI), 西安交通大 学、中国,2016 年 10 月 25 日(口頭)
- 北口雅暁, "Search for unknown interaction with neutrons", The 3rd KMI International Symposium on "Quest for the Origin of Particles and the Universe" (KMI2017), 名古屋大学, 2017 年 1 月 5 日(口頭)

- 8. 広田克也, "R&D for Neutron Physics", The 3rd KMI International Symposium on "Quest for the Origin of Particles and the Universe" (KMI2017), 名古屋大学, 2017 年 1 月 6 日(口頭)
- 9. 広田克也, "Compact accelerator-driven Neutron Source in Japan", Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD2017), 蘭州、中国, 2017 年 1 月 16 日(口頭)
- 10. 土川雄介、市川豪、清水裕彦, "New neutron moderator/reflector materials: Data analysis", CONS-II, 茨城県東海村, 2017 年 3 月 7 日(口頭)
- 11. Katsuya Hirota, "Development of Accelerator-driven compact neutron source in Japan", Asian Forum for Accelerators and Detectors(AFAD2018), 韓国 Daejeon, 2018 年 1 月 28-31 日(口頭)
- 12. H. M. Shimizu, "An Effort to Improve the Terminology for neutron Beam Users", Union of compact Accelerator-driven Neutron Source (UCANS-VII), Bariloche, Argentina, 2018 年 3 月 12-15 日(口頭)
- 13. 市川豪,鬼柳善明,土田一輝,瓜谷章,渡辺賢一,広田克也,清水裕彦, "The design for BNCT facility based on radiation dose estimation", (17th International Congress on Neutron Capture Therapy), Missouri, USA, 2016 年 10 月 3 日 (ポスター)
- 14. Katsuya Hirota , "Development of Accelerator-driven compact neutron sources", International Particle Accelerator Conference (iPAC17), コペンハーゲン, 2017 年 5 月 14-19 日(ポスター)
- 15. S.Endo, H.M.Shimizu, M.kitaguchi, K.Hirota, et.al., "Developments of the high counting rate neutron detector for CP-violation", International Conference on Neutron Optics (NOP2017) 奈良, 2017 年 7 月 5-8 日(ポスター)
- 16. Y. Tsuchikawa、K. Hirota, Y. Kiyanagi, H.M. Shimizu, et.al., "Construction of Nagoya University Accelerator-driven Neutron Source (NUANS)2nd beamline", International Conference on Neutron Optics (NOP2017), 奈良, 2017 年 7 月 5-8 日(ポスター)
- 17. Sohei Imajo, "First neutron generation in the nagoya University Accelerator-driven Neutron Source(NUANS)", AFAD2019, IUAC, Newdelhi, India, 2019 年 2 月

④知的財産(特許権、実用新案権など)

- (i)特許出願(国内)(海外)該当なし
- (ii)特許登録 (国内)(海外) 該当なし

⑤他制度への展開 非公開

⑥その他(受賞、新聞報道、招待講演、展示会等の出展など) 広田克也,中性子を用いた透過像測定,平成 29 年度中部地区 医療・バイオ系シーズ発表会, 名古屋吹上ホール、2017 年 12 月 6-7 日(ポスターブース展示)

Ⅲ. 今後の展開

9. 成果の今後の展開

本課題により中性子イメージング分野において、小型中性子源を用いて画像の定量的評価を 行う指針を持ち込むことができた。このように、小型中性子源は大強度の大型施設とは異なる中 性子利用を提案することができる能力を持ちうる。また大型施設のように日本に 1.2 台しかない施 設を全国全世界から利用に行って精密測定を行うだけではなく、企業の近くに、可能であれば各 企業が自社で所有できるような小型中性子源があることが望ましい。その一方で現状においては 小型になる程中性子強度が弱くなり、適用可能範囲が狭くなるのも実情である。そのためには小 型中性子源のさらなる高度化と並んで進めるべきものは、現状の小型中性子源よりも1-2桁中 性子強度が高く、計測適用範囲は広がるけれども、大規模中性子施設程大きくないような施設を 構築し、複数の企業が共同で利用できるような中性子源を構築することである。このような中性子 源を大都市近傍に建設することは「なんとか日帰りで中性子計測を行うことができる」環境を提供 することにつながるので、企業としても自社で管理する製品を計測に行ってその日に持ち帰れる ような施設となり、有意義になると考える。

我々は現在このような施設を「地域中性子源」と名付けて、今後の展開の柱とすることを考えている。

以上のように

・小型中性子源のさらなる高度化

・地域中性子源の構築

の2点が今後の展開の柱と考えている。