

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」
技術テーマ事後評価報告書

総合評価 A

1. 総合所見

この技術テーマでは、産業利用の観点からも有効な分析・解析ツールである中性子線について、将来は企業レベルでも保有できることも視野に入れた小型中性子源のプロトタイプを提案するために、測定システムを構成する中性子線源、中性子制御、検出器・測定手法を基盤要素技術として捉え、その確立を図ることを目標としており、時宜を得たものである。

この技術テーマに対して応募された 38 件の研究課題の中から中性子線源関連 6 件、中性子制御関連 1 件、検出器・測定手法 3 件合計 10 件が採択されているが、その分野別バランスは適切である。

それぞれの研究課題の実施にあたって、サイトビジットや「産学共創の場」などで、「小型中性子源による分析システム」の一部を構成するものであることを強く意識させたことは、この技術テーマで成果を出す上で大変有効であった。また、PO とアドバイザーの助言に基づき実施計画の変更が行われた結果、優れた成果が複数得られており、上記と合わせて適切なマネジメントが行われたと言える。

研究課題ごとの最終評価結果 (S : 3 件、A : 4 件、B : 3 件) は概ね妥当である。

中性子線源としては、稼働している加速器駆動型 BNCT 装置に第 2 ビームラインを設置し中型レベルの中性子量の安定発生が確認されており、また、加速器の小型化にも精力的に取り組み、その成果が理研の RANS2、RANS3 へと展開が図られている。レーザー駆動型方式では 3 種の方式を精査し、それぞれでこれまでより高い中性子発生量が得られている。中でも軽元素核反応方式においては世界最高記録となる中性子発生量を記録し、並行して開発された高速中性子イメージャで 1 パルス撮像に成功したことはレーザー駆動型中性子源の実用化を明らかにした点で高く評価されるものである。可搬型中性子源を目指した直線型慣性静電閉じ込め (IEC) 方式では実用化への問題点の洗い出しを行って方向性が確認されている。

中性子制御 (ターゲット、モデレーター、集光ミラー) については小型中性子源に特化した標準仕様が作成された。

大型高分解能の中性子フラットパネル検出器を開発し小型中性子源において中性子デジタルラジオグラフィが可能であり 3 次元 CT すらも測定可能であることが示されたこと、従来の 10 5 倍の増倍率を持つアバランシェ光増幅パネルを開発してレーザー駆動中性子の 1 ショットでの撮像が行えたこと、また、中性子用シンチレータ LiCAF を使った球殻状配置多重円環中性子検出器の開発に

より小型中性子源においても粉末試料の回折像を取得することが可能であることを実証したことなど、検出器の開発では目覚ましい成果が挙げられている。

利用研究の例としては、マルチピンホールコリメータの利用で小型中性子源でも高分子系材料に対する小角散乱手法が適用可能であることが実証された。

このように、今回の技術テーマでは複数の駆動方式による可搬型から中型までの発生源、安定した中性子制御系、複数の検出器などで世界の最先端レベルのものを含む優れた成果が得られており、このプロジェクトのまとめとしてどのような小型中性子源システムが構築可能かについての具体的なシステムの提案を行うために十分な情報になっている。それぞれのシステムでのビーム特性、中性子発生量、どのような測定が行えるか等の特徴、建設にあたっての問題点、建設までのタイムスケールなどが整理されて提案されると分かりやすいであろう。また、将来的に企業がこのようなシステムを構築するとすればそのコストは数億円規模が目安と言われていることに鑑み、今回のプロジェクトの目的ではないものの、それぞれのシステムの建設費用の概算があれば参考になるであろう。その提案を、今回の技術テーマで共通認識を持つことができた「産学共創の場」のメンバーを中心とした組織や、すでに行われている中性子科学会と加速器学会、レーザー学会との連携検討会などに提示して更なる検討を行うことにより、具体的な小型中性子源システムの建設につながることを望まれる。

今回得られた小型中性子源システムの構成要素技術の成果は世界のトップを行くものと思われるので、今回の技術テーマのまとめに基づく実機が早期に建設され、この分野で世界をリードしていくことを期待する。

2. 技術テーマのねらい（目標）と課題の選考

小型中性子源といえども中性子発生、中性子制御、中性子検出・測定というから利用研究までを一つの研究グループが開発することは極めて困難である。その場合、それぞれの分野の専門家によるジョイントチームがトータルシステムを提案する方式と、それぞれの分野で最適の解を検討してもらいその結果に基づいてP0がシステム提案をする方式が考えられる。今回のプロジェクト提案は后者で、技術的な深堀がより可能になるものと思われる。

この目標に対して応募された提案に対して、プロジェクトの研究期間内に実現でき普及機の開発につながることを、他の要素技術との関連性が明確なものを採択するという方針は適切である。

アドバイザーは多様な採択課題の分野に対応して適切なメンバーが選定されている。ただし、中性子源の研究課題が過半数であることから（レーザー駆動も含めて）加速器の専門家がもう一人いた方がよかった。

応募数が38件あったことはこの技術テーマに対する関心度が高いことを示している。その中から10件が採択されたことは、一つのプロジェクトの採択数としては多く総花的に見えるが、開発すべき要素技術が3テーマで構成されていることからやむを得ない。

本技術テーマの肝は中性子発生源なので、それに関連した研究課題が過半数の6件を占めるのは理解できる。加速器駆動型3件、レーザー駆動型2件、慣性静電閉じ込め型1件というバランスは妥当である。

既に中性子源として稼働実績のある加速器駆動型に関して安定した中性子源の運転を目指す提案（2件；01清水課題、04熊田課題）が採択されている。これらはいずれもBNCT用中性子源に新たな分析・解析用ビームラインを設置する提案であり、小型中性子源システムとして早期実現可能な提案である。ただ、この二つの提案の位置づけの違いや、既設の小型中性子源システムである理研のRANSとの関係は明らかではない。一方、08林崎課題はより小型の加速器駆動型小型中性子源を開発することにより、大学や企業が導入しやすくなることを念頭に置いてのものであり、小型中性子源の普及展開を図ろうとするP0の狙いに沿うものである。

中性子源として有望視されながら模索の続いているレーザー加速駆動型についての提案2件（02余語提案、10花山提案）は、現実的なレーザー駆動型システムを見据えている。ただ、前者がレーザー駆動型で可能な3方式について精査するところから始めるのに対し、後者はその内の一つの手法である軽元素核反応でシステムを構築する提案であることについての説明はない。

慣性静電閉じ込め型の提案（07長谷川提案）はさらに将来を見据えて超小型可搬型の発生源の可能性を探るための挑戦的な研究課題である。

冷中性子用ターゲット、モデレーター、ビーム輸送についてはこれまで原子炉型、加速器駆動型中性子源において多くの実績があるが、今回小型中性子源に特化した問題を解決する研究課題（06山形課題）が取り上げられた。

小型中性子源の強度不足を補うために高感度の検出器を開発することは重要であり、将来入手が困難になることが予想されるHe-3の代替としての一次元検出器（03瓜谷課題）や中性子フラットパネル型検出器（05高橋課題）は、開発の目途が立てば小型中性子源にとどまらず大型中性子源にとっても有効な研究課題である。

利用研究手法としては、産業利用の観点で重要な分析手法の中から、理研RANSで展開されている鉄鋼材料分析と一線を画して、P0が提案された高分子材料の分析にマッチした研究課題（09小泉課題）が採択されている。

今回の提案では、01清水課題では中性子源と透過撮像、02余語課題では中性子源と高速ラジオグラフィのように、複数のサブテーマに取り組んでいるものがあり、これらはP0が提案しているシステム全体を見通した研究という趣旨に合うものである。

3. 技術テーマのマネジメント

全ての課題実施者に対して、それぞれの研究課題が「小型中性子源による分析システム」の一部を構成するものであることを強く意識させたこと、またそのことを関連する企業にも産学共創の場などで理解を求めたことは、プロジェクトの方向性を明確にする上で大変有効であった。

平均年1回のサイトビジットおよび年1回の産学共創の場などでの発表を基にテーマの進捗状況の把握と意見交換をし、それに基づいてP0とアドバイザーが協議の上、研究計画の見直し・変更などの提言を行ってきたのは適切なマネジメントである。

02余語課題で高速中性子検出器の性能試験をレーザー中性子源の開発を待た

ずに理研RANSで行えるようにアレンジしたこと、03瓜谷課題で目指していた一次元検出器の開発を零次元検出器に変更する提案をしたこと、05高橋課題で当初計画のボロンコンバーターと電子増幅型ガスシンチレータに変えてZnSシンチレータと大容量受光素子パネルの組み合わせに変更することなどがその例で、プロジェクトの成果創出が加速された。また、08林崎課題では高周波電源の変更により予定されていなかった実証試験が行えるようになったことは評価できるが、アドバイザーに加速器の専門家がいればより早期に解決できたのではないと思われる。01清水課題は陽子加速器の不調のために中性子ビームラインの整備計画の一部を断念せざるを得ないとしたことは賢明な判断である。

研究課題の評価とそれに基づく指導は実質的にはサイトビジットと産学共創の場で行われ、有効に機能した。一方、プロジェクト内での評価は中間評価と事後評価で行われ、研究課題ごとの事後評価結果（S：3件、A：4件、B：3件）は概ね妥当と考える。ただ、中間評価のコメントがどのように生かされたかについて事後評価からは見えない研究課題も一部あった。

産学共創の場での各課題実施者とPO及びアドバイザーの間での意見交換はプロジェクト推進に有効であったものと推測される。このプロジェクトに関係している産業界の人達からのコメントとして、自分たちの技術がシステム全体のどの部分で使われているのかがわかってよかったという声があり、また、毎年の進捗状況を聞く機会を提供することによって産業界の利用者にシステム構築の期待感を大きくしたことも、産学共創の場が有効であったことを示している。また、システム構築についての情報の周知を継続していくことも望まれている。ただ、産業界からの意見がプロジェクト推進にどのように反映されたかについては不明である。

研究費の配分の詳細は不明であるが、追加配分・削減は計画の見直しに沿って適切かつ柔軟に行われたように見受けられる。

4. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況

10課題の進捗状況には差があるが、全体としては概ね順調に成果を達成できたといえる。要素技術として設定した中性子源、中性子制御、中性子検出・測定の3つの分野のすべてで良好な成果が得られたことは小型中性子システム全体を構築し提案するうえで優れた材料が得られたことになる。

加速器駆動型中性子源では、既存のBNCT加速器を用いてJ-PARCに次ぐ $5 \times 10^{13} \text{ n/sec}$ の中性子を安定的に発生できるようになったことは有効な成果である（04熊田課題）。この装置は中型に属するが、既存の装置が有効に活用できることを示したものである。

同様にBNCT用中性子源を用いて分析・解析用ビームラインの構築を目指していた01清水課題は、計画通り進捗していれば中性子の発生から資料測定までを行うシステムが完成することになり、このプロジェクトの目指すイメージを具体化するものと期待されていただけに、加速器の不調で計画を縮小せざるを得なくなったことは残念である。大学レベルにおいて小型中性子源の維持・管理・開発を継続していくことに対しての難しさがあるのかもしれない。

より小型の加速器駆動中性子源を目指す提案（08林崎課題）については、PO

とアドバイザーの提言により中性子発生までを行うことになり、1011n/secの中性子の発生の目途がつき、理研の小型据え置き型RANS2、可搬型RANS3への展開が図られていることは高く評価できる。

レーザー駆動による中性子発生については02余語課題において3 種の中性子発生方式(光核反応、イオンビーム核融合反応、軽元素核反応)の実証実験によりいずれの発生方式においても最適化が進められた。特に軽元素核反応方式においては、世界最高記録となる中性子発生数10¹¹ n/shotを記録した。このビームを使って、並行して開発された高速中性子イメージャを用いて1shot 撮像に成功したことはレーザー駆動型中性子の実用化を明らかにした点で高く評価されるものである。さらに、同時に開発されたモデレーターシステムにより、レーザー駆動による冷中性子の発生が世界で初めて行われたことも大きく評価できる。

軽元素核反応による中性子発生は10花山課題でも取り上げられたが、研究期間内に十分な中性子量が得られるに至らなかったのは残念な結果である。

可搬型中性子源を目指した07長谷川課題では実用に耐える10⁹ n/sの中性子発生率を達成するための直線型慣性静電閉じ込め(IEC)方式小型中性子発生源の小型化・高出力化を図ったものの研究期間内には目標値の3桁低い収量しか得られなかったことは残念であるが、実用化への問題点の洗い出しを行って方向性は確認できている

06山形課題では、小型中性子源専用の低放射化・長寿命ターゲットおよび冷中性子源の開発に取り組み、製作された実機が小型中性子源に実装されたことにより、今後標準機として使える目途がついた。また、小角散乱を念頭に置いたスーパーミラーの開発に成功したことも利用の観点から高く評価される。

検出器については大きな成果が得られている。

03瓜谷課題ではHe-3位置敏感型検出器に代わる検出器として、わが国で開発された中性子用シンチレータLiCAFを使った球殻状配置多重円環中性子検出器を開発し、小型中性子源の中でも比較的中性子強度の低いKUANSにおいても粉末試料の回折像を取得することが可能であることを実証したのは小型中性子源の利用拡大につながる大きな成果である。

05高橋課題では、ZnS(Li)シンチレータと大面積受光素子パネルを組合せた受光領域 30cm×25.6cmサイズかつ空間分解能 200umの中性子フラットパネル検出器を開発し、J-PARCなどの大型施設を含む複数の中性子施設で性能評価を繰り返し、小型中性子源において中性子デジタルラジオグラフィが可能であり、3次元 CTすらも測定可能であることを実証したことは小型中性子の利用の観点から極めて大きな成果である。

02余語課題では高速中性子検出器の開発を目指したが、当初用意した検出器では大幅に感度を下回ることが分かったのでアバランシェフォトダイオードを応用したアバランシェ光増幅パネルを開発して 10 5倍の増倍率を上げることに成功し、レーザー駆動型中性子の1パルスでの撮像に成功したことはレーザー駆動型中性子の実用化を明らかにした点で大きな功績である。

利用研究の例として採択された09小泉課題では、マルチピンホールコリメータで集光することにより小型中性子源において高分子系材料に対する小角散乱手法が適用可能であることを実証した事が高く評価される。

小型中性子源による分析・解析システムを構築するにあたってはそれを構成する要素技術の機器を再現性良く且安定に制作する必要があるが、そのためには企業との共同研究は必須のものになる。今回の10提案のうち4提案（03瓜谷課題、04熊田課題、05高橋課題、07長谷川課題）で共同研究が進んでおり、また、1提案（06山形課題）では開発した技術を企業に指導・提供している。企業側から見ると、今回開発された機器が実機として製作するレベルであると判断したものと思われ、将来小型中性子源システムが建設されることになれば質の高いシステムが迅速にできるものと期待される。

以上