

話 題

商用陽子加速器を利用した小型中性子源の構築

広田 克也*・山形 豊・大竹 淑恵

Construction of Small Neutron Source using Commercial-based Proton Accelerator

Katsuya HIROTA*, Yutaka YAMAGATA, Yoshie OTAKE

Abstract

Recent advances in accelerator technology and neutronics have made possible the construction of small scale accelerator-driven neutron sources that will be able to play a significant role in future advancements in neutron science and technology. A commercial-based proton linac of 7MeV and Be target system are under construction at RIKEN. This opens up new opportunities for industrial field using neutron beam.

1. はじめに

理化学研究所ではものづくり産業界への新たな測定手法の提案として、商用の陽子加速器を利用した小型中性子源 (RANS: RIKEN Accelerator-driven Neutron Source) の利用を提唱し建設を進めている。現在建設第1フェーズが終了し、熱中性子の発生が確認された段階である。今後は中性子ビームの評価をしつつラジオグラフィ測定などを行い、同時に建設第2フェーズのための冷中性子源作製を進める予定である。

陽子線加速器を用いた小型中性子源の建設は2003年頃に米国インディアナ大学で始められた^{1,2)}。当時米国では大型中性子施設 SNS の計画が進められており、この中性子源で使われる中性子減速材の評価ができる施設が必要であったために、インディアナ大学に陽子加速器を設置し評価測定を行った。同様の取り組みは日本でも行われ、J-PARC 物質・生命実験施設 (MLF) での中性子減速材評価には北海道大学工学部の既設の電子線加速器が利用された。また欧州においても現在スウェーデンに建設中の ESS (The European Spallation Source) 施設のテスト実験用としてスペイン北部の Bilbao³⁾ に加速器実験施設が建設されている。

学術目的の利用としては京都大学物理学教室に

において 3.5 MeV 陽子線加速器を用いた小型中性子線源が作られ、中国清華大学においても 13 MeV の陽子加速器を用いた中性子源の建設が進むなどしている。さらに BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) を目的とする小中型中性子源の計画も各地で進められており⁴⁾、特にアジア地域において加速器駆動小型中性子源計画は盛んに議論されている状況である。

小型中性子源という時の小型がどのサイズを指すかという点に対して明確な定義は無いようであるが、おおむね陽子線加速器では Be 標的を利用した時にトリチウムが発生しない 13.5 MeV 以下、電子線加速器においては巨大共鳴現象で放出される核反応を利用する 50 MeV 程度までと考えられ、本内容もこのエネルギー領域での議論を中心に進める。小型中性子源は入射粒子のエネルギーが低いため発生する放射線のエネルギーも下がり、使用する遮蔽体量を減らすことが可能である。入射エネルギーが下がることで中性子の生成効率は悪くなるために、これを極力補うように入射ビームの電流値を上げる。現在検討されている小型中性子源はどれも平均加速電流値が 0.1 ~ 1 mA という大電流を利用するものとなっておりビーム強度にしておよそ数 kW クラスとなる。なお BNCT 用の中性子源は学術利用や産業利用よりも大きな中性子強度を要求するため 10 kW

* E-mail: hirota@phi.phys.nagoya-u.ac.jp

を超えるビーム出力となるようである。

2. 中性子測定と X 線測定

中性子ビームを使用した測定はラジオグラフィ、小角散乱、結晶・粉末散乱、反射率測定などがあり、デバイスの違いはあるが放射光施設での X 線利用とほぼ同じような測定が行われる。X 線では対象試料との相互作用の強さは、試料の格子構造による影響もあるが、原子番号で記述される部分が多いので、一般的には原子番号の大きな試料ほど散乱振幅が大きく X 線の透過率が小さくなる。その一方で中性子ビームにおいては、測定試料との相互作用は原子核反応により記述されるので原子番号の大きさは無関係になる。従って X 線では見えにくい、原子番号の大きなものの中に含まれる小さな原子番号の挙動などは中性子においては測定がしやすくなる。

中性子ビームは放射光に比べるとビームとしての粒子の個数が少ないため測定の統計精度で考えるとどうしても精密測定が難しくなり、中性子ビーム強度を稼ぐためには J-PARC のような大規模中性子源が必要になっている。その一方で大型施設に中性子測定ユーザーが集まってくる状況はマシタイムの確保の点からは厳しいものになり、産業界の製品開発のペースに乗せられるような頻繁な利用は難しくなる。基礎研究においては精密測定が必要な場合も多いが、製品設計や生産工程の場面での測定においては必ずしも精密測定が必要にならない場合も多い。こうした状況から産業界でも利用できるような小型で気軽に利用できる小型中性子源の実用化が求められてきた。特に中性子ラジオグラフィに限って言えば 1970 年代から 80 年代にかけて国内の 10 程度の施設で研究用原子炉やバンデグラフ、リニアックなどを用いたイメージング測定が行われ産業応用にも利用された⁵⁾。残念ながらこの当時は中性子検出媒体としてはフィルムが使われていたこともあって検出効率が悪く、長時間露光しなければ撮影できなかったために利用範囲が限定され、産業界に普及するまでには至らなかった。

近年のデジタルカメラをはじめとする光撮像素子の発展はこうした状況を覆すことが可能なほどであり、弱い強度の中性子ビームを用いても実用的な程度に撮像可能となってきている。そこで小

型中性子源構築前に日本原子力機構の研究用原子炉 JRR-3 及び京都大学の研究用原子炉 KUR を用いての予備実験を行い、弱い中性子強度でのイメージングが産業利用に適用可能かどうかの評価を行った。また北海道大学においても弱中性子ビームを利用した小中角散乱の実行可能性評価が行われた。その結果イメージング測定においては動画測定を行うにはまだ厳しい状況ではあるが、CT 再構築を行う程度の測定であれば一晩程度の測定で可能であることが確認された。得られた結果をいくつかの産業分野の製造企業に示して議論したところ、充分利用価値があるとのコメントもたらされた。そこで産業界でも利用可能な加速器駆動小型中性子源の構築を理研で行い、その利用可能性を探るプロジェクトを進める事となった。

3. 構成

小型中性子源は大きく 1. 加速器, 2. 陽子ビームライン, 3. 熱中性子標的 (TTS: thermal target station), 4. 熱中性子ビームライン, 5. 検出器周辺, の 5 つのパーツに分けることができる。全体の構成は図 1 の通りである。この図において中央右側に陽子加速器が配置され、ビームは右から左に流れる (図 2)。

加速器の選定に関しては今回商用の陽子加速器を用いる事とし、加速器開発を行わなかった。小型中性子源を構築するうえで大電流かつ小型で扱いやすい陽子加速器は開発項目の一つと考えているが、加速器開発にかかるコストおよび年数を評価した場合、現時点での優先順位は高くなく今後の目標とした。小型中性子源に利用できるビームの種類としては、陽子、重陽子、電子の 3 種類が候補となるが、電子は施設の遮蔽体が陽子利用に比べて大きくなる事から除外した。また陽子および重陽子加速器で比較した場合、入射エネルギーを低くできる事から重陽子ビームが最も小型化しやすい選択肢ではあるが、加速管周辺の放射化の可能性を考え、よりメンテナンスが容易と思われる陽子線加速器を選択する事とした。加速器の種類としてはベビーサイクロトロン、直線加速器、静電加速器等が候補となるが、本プロジェクトにおいては、可搬型中性子源の構築も想定されているので、トレーラーに積み込んで運転可能な加速器であること、中性子の飛行時間 (TOF) 解析によ

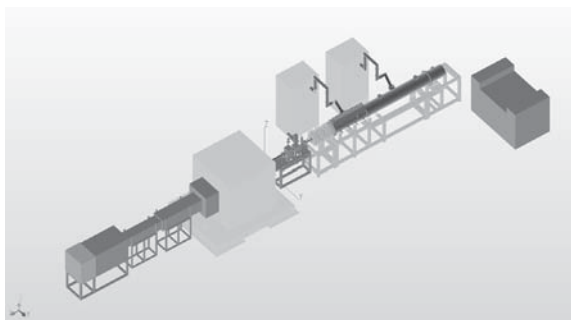


図1 RANS 加速器模式図, 中央右が陽子加速器, 左隅がカメラボックス



図2 RANS 全景写真, 右奥が加速器

りエネルギー識別できる事を考慮し, 陽子線形加速器を第一の候補と考え機種選定を行った。

陽子直線加速器はPET 診療のためのRI 製造用として, あるいはがん治療用陽子加速器の入射器として利用が広がっており, 商用の加速器を入手可能である。特に医療用で用いられる加速器は安定性が非常に重要視されており, メンテナンスのし易さ, 加速器パラメーターの調整のしやすさなどで非常に使い勝手が良い。今回のプロジェクトにおいては日立 AccSYS 社製の PL-7 を購入設置した。

陽子ビームラインは加速器から出た陽子ビームを TTS に導く部分である。TTS 部において発生する中性子はいくらか角度依存性があるものの, ほぼすべての方向に放出される。陽子ビームライン部には遮蔽体を置くことができないために中性子発生ターゲットからの中性子は陽子ビームライン方向の遮蔽が最も弱くなり, 中性子が放出される。そのため加速器が中性子によって放射化されないよう, 偏向電磁石を用いて陽子ビームを曲げておくことが望ましい。今回は建設時間短縮のために偏向電磁石を入れずに直線状のビームラインとした。直線ビームラインでもやはりビーム位置調整

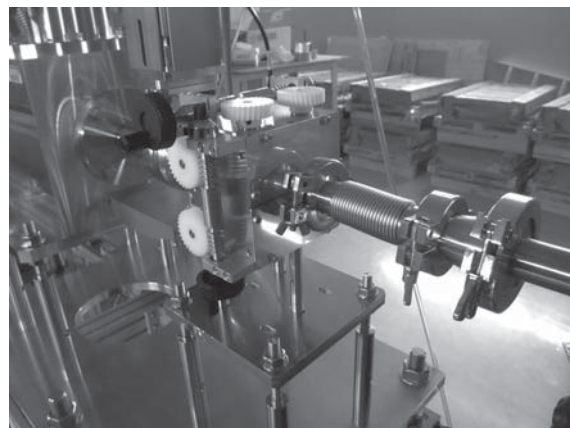


図3 永久磁石を利用したステアリングマグネット

は必要と考え, ステアリング磁石(図3)を設置した。この際, ターゲット位置である約3 mの距離を数 cm 程度の範囲でビーム位置調整できれば良い事, エネルギー固定の為, 一度磁場を設定すればその後はほぼ調整不要な事から, 永久磁石で作製した小型のステアリング磁石を設計し設置した。

TTS 部は今回の構築において最も設計に時間を必要とした部分である。陽子ビームを利用した小型中性子源において中性子発生ターゲットの候補となるのは Li および Be である。 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応の閾値は 1.88 MeV, ${}^9\text{Be}(p,n)$ は 2.06 MeV で若干 ${}^7\text{Li}$ の方が低く, 反応断面積も ${}^7\text{Li}$ の方が大きい⁶⁾ ので中性子の収率からは Li 標的の方が有利である。化学的な性質を考慮すると Li は融点が 180°C と低くアルカリ金属で非常に活性が高いため除熱技術の開発に困難さがあるのに対して Be の融点は 1290°C 程度で安定であることからターゲット作製の点では Be が有利である。そこで今回は Be ターゲットを採用した。また陽子は水素原子核であるから金属中で陽子ビームを止めた場合, その金属は水素脆化により破壊されやすい。先行するインディアナ大学においては当初 Be ターゲットの水素脆化によると思われる破壊が生じたため Be 板を薄くしたが, Be 板で真空を止める構造としていたため 1 インチ程度の面積となり除熱が難しくターゲットの寿命が短くなっているようである。こうした経験を踏まえ理研では Be 箔の厚さを陽子の飛程よりも薄くし, 水素拡散性の高い V (バナジウム) をバックリング板として両者を銀蝨付けした(図4)。この Be ターゲットがどの程度の耐久性を持つか現在も評価中であるが, 数か月程度の耐久性はあるものとして利用

を進めている。Be ターゲットは水冷とし V バックキングの下流側に冷却水を流している。この冷却水はわずかながらプリモデレーターの役目を果たし、中性子を少し減速させるので配置としても無駄がない。モデレーターとしてはポリエチレンを利用し、熱中性子を生成している。

ターゲット周辺はグラファイトブロックを配置し反射体として利用し、その外側にはホウ素入りポリエチレン(BPE)、鉛、BPE、鉛と2種の遮蔽材料を交互に配置している。ターゲットから発生する高速中性子を効率的に遮蔽するためにはまずポリエチレンのような水素成分の多い材質で減速させるのが有効であり、減速した中性子がホウ素と反応しガンマ線に置き換わる。この際に478 keVのガンマ線が放出されるのでこれを遮蔽するために鉛を用いる。内側にBPEを配置し外側に鉛を配置するのが構造も簡単で合理的に思えるが、この場合密度の大きな鉛が外側に配置されることで遮蔽体全体が非常に重くなる。BPE鉛の複層構造とすることで効率的な遮蔽と重量の削減を実現することが可能となっている。遮蔽に関してはPHITS⁷⁾を用いて計算を行い、配置を決めた。BPE鉛の単層構造と複層構造でそれぞれ計算してみると前者はおよそ30トン、後者は20トンの重量でほぼ同程度の遮蔽能力となった。そこで今回は複層構造を採用する事とした。

小型中性子源の利点として発生する放射線量が少ないために放射化物が出来難い事がある。頻繁にターゲットや減速材の交換が可能であり減速材設計に利用しやすい点は最初に述べたとおりであるが、全く放射化しないわけではないので構造体

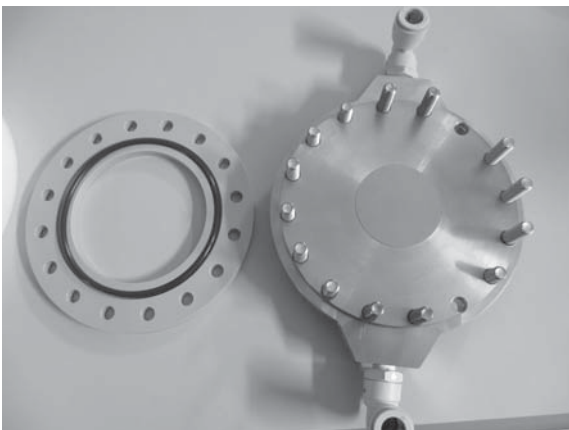


図4 Vバックキングに載せられたBeターゲットと絶縁リング

は放射化しない様に配慮した材料設定をする必要がある。今回ターゲット周辺のビームダクトにはアルミを使い、ボルト類はチタン合金とした。絶縁体にはPEEK材を採用した。アルミやチタンは中性子照射による放射化の半減期がどちらも数分程度と短いために、ビーム停止後数時間で放射線レベルは充分低い値になりターゲット周辺へのアクセスが可能となる。

熱中性子ビームラインは周辺をBPEで遮蔽してある。近年の冷中性子ビームラインではスーパーミラーを用いた中性子導管を用いるのが一般的であるが、RANSでは熱中性子ビームラインのためスーパーミラーの採用は見送っている。検出器部分はイメージング用にZnS⁶⁾/LiFシンチレーターと4008×2764ピクセルの冷却CCDを配置している。検出器周辺機器は京都大学KURで測定利用していたものと同様のシステムを導入した。また試料設置スペースにPMTを利用した検出器系を配置する事で、中性子飛行時間測定が可能となっている。

4. 測 定

現在RANSは年末に施設検査を行い、年始より中性子を出しながら各種ビーム評価を続けている。図5はシンチレーターとPMTを組み合わせたRPMT検出器⁸⁾によってTOF測定した結果である。加速器の入射をスタートとし、約4m下流に設置した検出器での検出時刻を測定している。中性子は質量を持つのでTOFを測定することで中性子のエネルギーを知ることができる。図5(a)のように検出器前にホウ素入りの遮蔽体およびCd板をおいてその透過の様子が確認できるようにしている。得られたTOF結果は図5(b)である。加速器からのビーム入射時には高速中性子およびガンマ線が発生し検出器に飛来すると想定される。0.5ミリ秒までの画像を見ると図5(c)のようになっている。Cd板は完全に透過し、ホウ素入り遮蔽体の影がわずかながら見えている。

これは高速中性子およびガンマ線が検出されていることで説明がつく。その後1.5ミリ秒のところに熱中性子検出のピークが見られ、減速材によってきちんと熱中性子が生成されていることが確認できている。図5(d)は1ミリ秒から1.5ミリ秒までを画像化したものであり、Cd板によ

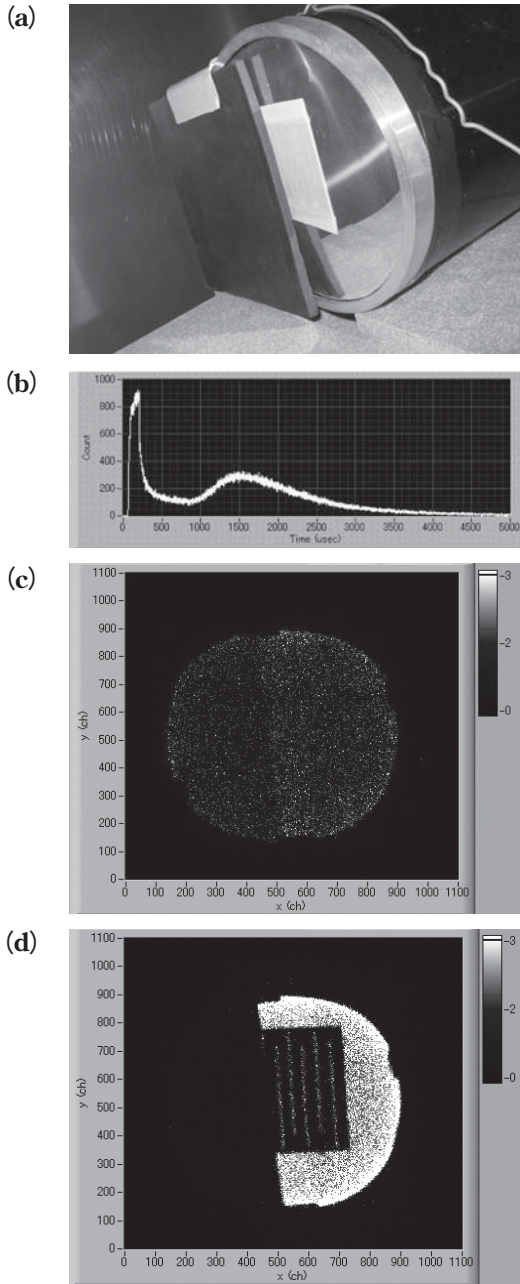


図5 中性子飛行時間測定. (a) 中性子検出器とスリット (b) TOF測定スペクトル (c) 0～0.5ミリ秒の画像 (d) 1～1.5ミリ秒の画像

る影がはっきりと見えていることからこの時間領域が熱中性子であると確認できる。

5. おわりに

今回の小型中性子源構築においてプロジェクトの正式発足から、加速器の購入、設置、中性子ビーム発生まで2年弱という非常に短期間の作業で行った。もっとも装置自体はまだ完成ではなく、

第2フェーズの冷中性子源構築までさらに作業を進める予定である。こうした短期間で中性子源の構築が行えたのは、既存の商用加速器の入手が可能であった事、これまでの関係研究機関で培われた技術や発生した問題点の共有ができたため、最低限の開発項目のみに重点をおいて作業できたことなどが大きい。

小型中性子源構築のネットワークは国際的にはUCANS (Union for Compact Accelerator-driven Neutron Source) として、米国インディアナ大を中心に、日本、中国(北京大、清華大、中山大)、欧州(ESS Bilbao, INFN)を中心メンバーとして活動し年1回の会合で議論を進めている。また国内においてはJCANS (Japan Collaboration on Accelerator-driven Neutron Source) として、北海道大学を中心に、KEK、理研、名古屋大、京大が参加している。JCANSでは情報交換はもとより共同での実験なども行うことで、一つの研究室では足りない技術や人材の不足をお互いに補い合う体制を構築している。

医療用加速器は人命優先のため極めて高い安定性が求められている一方でメンテナンス体制を維持するための費用が高くなる側面がある。工業利用においては安定性も重要であるが同時にコストパフォーマンスも求められ、両者を高いレベルでどうバランスを取っていくか課題も多い。本器はまだ初期の小型中性子源であるが、今後本格的に産業界に普及させるためには、より小型で、より安定で使いやすく、さらにコストパフォーマンスにも優れた加速の出現を強く期待している。

本稿を加速器学会誌に投稿するにあたって、加速器開発に関わるみなさんにもぜひこうした取り組みを知ってもらい、加速器利用の裾野を広げる活動に協力していただければと考えます。

参考文献

- 1) D. V. Baxter, et al., Proceedings of ICANS-XVII
- 2) <http://www.indiana.edu/~lens/>
- 3) <http://essbilbao.org/>
- 4) 吉岡正和, 他, 加速器 9 (2012) p229 など
- 5) 小林久夫, Radioisotopes, 56 (2007) 207
- 6) M. R. Hawkesworth, Atom. Ener. Rev. 15 2 (1977) p169
- 7) K. Niita, et.al., JAEA-DATA/Code 2010-022 (2010) <http://www.phits.go.jp/>
- 8) K. Hirota, et.al., PCCP 7 (2005) 1836