

陽子線加速器駆動理研小型中性子源 RANS による中性子利用 THE NEUTRON APPLICATION WITH RIKEN ACCELERATOR-DRIVEN COMPACT NEUTRON SOURCE

*大竹淑恵, 小林知洋, 太田秀男, 山田雅子, 橋口孝夫, 柳町信三, 竹谷篤, 高村正人, 關義親, 池田義雅,
須長秀行, 王盛, 山形豊, 加藤純一

Yoshie Otake, Tomohiro Kobayashi, Hideo Ota, Masako Yamada, Takao Hashiguchi, Shinzo Yanagimachi,
Atsushi Taketani, Masato Takamura, Yoshichika Seki, Yoshimasa Ikeda, Hideyuki Sunaga, Sheng Wang,
Yutaka Yamagata, Jun-ichi Kato

RIKEN Center for Advanced Photonics (RAP), RIKEN

Abstract

Accessible neutron sources are continuing growth in importance both for scientific and industrial users. The RIKEN accelerator-driven compact neutron source (RANS) has been developed for practical use in simple and convenient measurement. By using neutrons from Be(p,n) reaction, we have already succeeded in several measurements. Under-film corrosion and movement of water in a steel plate was successfully visualized by neutron radiography. We have also succeeded to detect the number of steel bars in a 30cm thick concrete slab by non-destructive inspection. A compact mobile neutron source for deterioration survey of concrete constructs is our important development object. We have started the studies of following subjects, optimization of the shielding to minimize the leakage radiation, reduction in size and weight of the whole system, development of the efficient fast neutron detector, and diagnosis system for inhomogeneous objects.

1. はじめに

中性子による物質のキャラクタリゼーションは、以前より原子炉（研究炉）を用いて行われ、学術界あるいは産業界のユーザーによってその有用性が示されてきた。特に軽元素に対して高い感度を持つ中性子は、X線と相補的に利用することにより多くの情報を得ることが可能である。測定時間の短縮やS/N比の向上という要求に答えるべく、大強度陽子加速器施設(J-PARC)に物質・生命科学実験施設が建設され、現在19本のビームラインが稼働している。しかしながら東日本大震災後は研究用原子炉停止を余儀なくされ、国内にはそれ以外の大規模施設が存在せず、中性子利用の機会はさらに減少の一途をたどっている。小型加速器を用いた中性子源はこれから測定を始めるユーザーに対し、あるいは必ずしも高強度中性子束が必要でない計測対象物に対してアクセスが容易な測定環境を提供することが可能であり、世界的にも注目を集めており、今後開発設置が増加すると予想される。

2. 理研小型中性子システム(RANS)

当グループでは「手元で役に立つ中性子源開発」を目的に小型中性子源システム RANS (RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source)の設計、建設を行った。RANS はアクセスの手軽さを追求するとともに、将来中性子イメージングシステムの屋外

使用の可能性を検討する目的を持っている。そのため、システムの軽量化、ターゲットの長寿命化、メンテナンスの容易さ、ガンマ線の漏洩抑制などが並行して検討された。加速器は安定性が実証されている陽子線ライナック(7MeV)を採用した。ライナックは静電タイプの加速器に必要な絶縁ガスを封じる圧力容器が不要な分軽量化することが可能である。

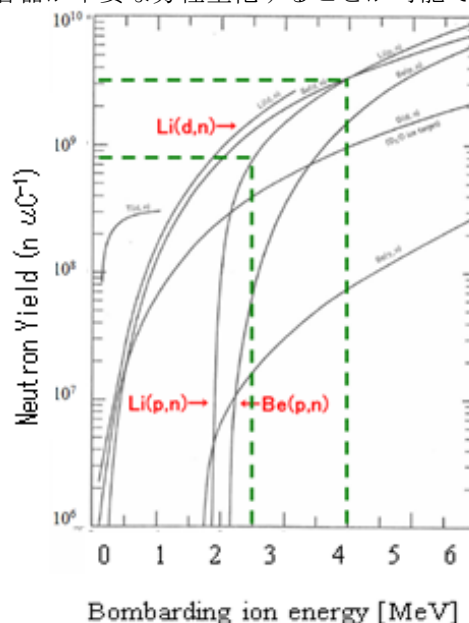


Figure 1: Total neutron yield for low-energy nuclear reactions calculated from experimental data^[1].

*yotake@riken.jp

中性子発生ターゲットにはベリリウムを採用し低エネルギー核反応 $\text{Be}(p,n)$ による中性子を利用することとした。種々の低エネルギー核反応による中性子発生量を Fig.1 に示す

$\text{Be}(p,n)$ 反応に比べ、 $\text{Li}(p,n)$, $\text{Li}(d,n)$, $\text{Be}(\alpha,n)$ 反応の方が閾値、断面積ともに有利であるが、北大電子線ライナック小型中性子源 HUNS におけるターゲット回り中性子発生量 10^{12} 個/秒と同等、かつ陽子線ライナックの安定性と重量、リチウムの反応性の高さ、加速器の放射化（重水素）等を総合的に検討した結果、RANS では陽子ビームベリリウムターゲットの組み合わせが採用された。

理研において開発された長寿命ベリリウムターゲット²⁾はベリリウムターゲットの厚さを陽子の飛程より薄くし、ターゲットの背面には水素の拡散係数が比較的大きいバナジウムの板がバックリングとして設置されている。バナジウムの中性子吸収によって生成される ^{52}V は半減期が 3.7m と短く、メンテナンスが必要な際の冷却時間が短くて済む利点がある。中性子発生を開始してから約 2 年が経過し、装置の移設を機にターゲットを取り出して検証を行ったところ、ビーム照射された表面は若干変色していたものの、変形、ブリストリング等は全く見られず健全であった。ターゲットステーションはポリエチレン（減速材）、グラファイト（反射材）、ホウ素化ポリエチレン（遮蔽材）、鉛（ガンマ線遮蔽材）で構成され、その配置は PHITS コードによるモンテカルロ計算によって最適化されている(Fig.2)。

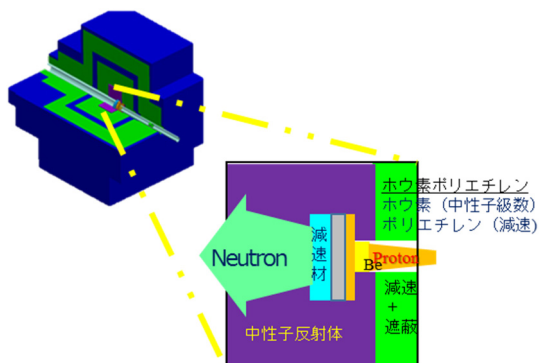


Figure 2: Cross-sectional view of the RANS target station.

ターゲット表面から 5m 離れた位置における中性子エネルギースペクトル（陽子の平均加速電流を 100uA とした場合）を PHITS コードによって評価した結果を Fig.3 に示す。1MeV 付近にピークを持つ高速中性子と、50meV 付近にピークを持つ熱中性子がそれぞれ測定部に到達することが分かる。いずれの成分もイメージングに利用することが可能で、特に高速中性子は 30cm 以上の厚さのコンクリートを透過する能力を持っていることから、後述のインフラ非破壊測定におけるプローブとして利用可能である。

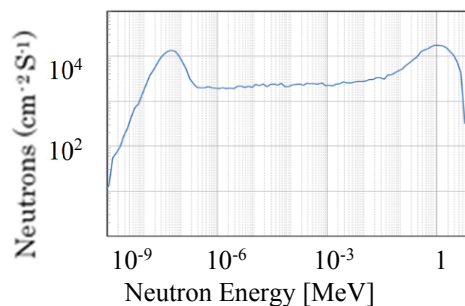


Figure 3: Neutron energy spectrum of RANS at a distance of 5m from the Be target simulated with PHITS code.

3. RANS における研究例

以下に RANS を使用して行われている研究の概要を紹介する。

3.1 異種鋼材塗膜下における腐食・水の出入りの可視化

鋼材の腐食は、水が繰り返し出入りすることにより進行すると考えられているが、これを非破壊で観察した例はこれまでにない。鋼材による挙動の違いを見るため、普通鋼板(JIS-SM400 相当)と 0.8Cu-0.4Ni-0.05Ti(mass%)を主成分とする塗装用合金鋼板に対して、変性エポキシ樹脂塗料を用いて塗装後、切込み傷を付与して耐食性試験（加速試験）を行った。試験後通常乾燥状態の試料を十分含水させた後、乾燥措置を行い塗膜下鋼材内部腐食および水の出入りを中性子イメージング両鋼腐食の違いの観察に成功し^{3,4)}、水の動きの可視化に成功した(Fig.4)。普通鋼に比べ塗装用合金鋼は塗装欠陥からの水の浸透が少なく、また乾燥も早いことが明らかになった。

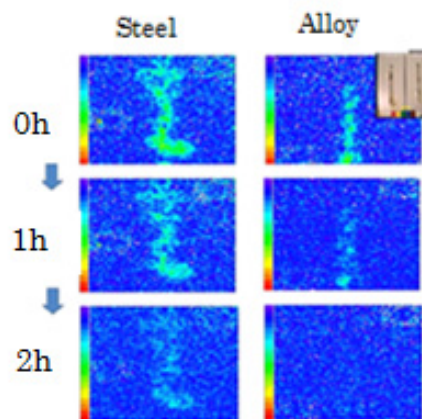


Figure 4: Movement of water at locally-corroded steel plates. Water movement visualization under the film in the normal steel (left) and alloy (right) steel after image treatment. Water distribution of wet condition are shown in the top line. Lower two lines are 1 hour and 2 hours later water distribution, respectively.

4. インフラ保全への応用

4.1 非破壊検査用可搬型中性子源

全国に長さ 15m 以上の橋梁は約 15 万箇所あり、そのうちの多くは今後 20 年以内に設計寿命と言われる 60 年を迎える。現在、国土交通省が管理する道路橋は近接目視による定期点検が行われている。しかし、コンクリート内部で進行する鉄筋の腐食や、割れの拡大については目視によって診断することが困難であり、非破壊検査による測定の実用化が望まれる。既存の非破壊検査法では表面から十数センチ程度までの深さしか計測することが出来ず、例えば橋脚などの厚いコンクリート内部に何層にも渡って配置された鉄筋の情報を得ることは難しい。当グループでは中性子ラジオグラフィによる内部測定によって情報を得る事が可能と考え、可搬型中性子源の実用化を見据えて以下に挙げる開発と課題調査を行っている。

4.2 環境放射線低減のための遮蔽開発

現在の RANS は放射線管理区域内に設置されているが、将来はトラックに小型中性子源非破壊検査システムを搭載し移動測定を行うことを念頭に遮蔽システムの開発を行っている。鉛およびホウ素化ポリエチレンを用いた現在の遮蔽システムによって、周囲の安全性が十分確保できる見通しである。さらに万が一の衝突・横転時にも放射性物質の飛散を回避する対策が必要となる。

4.3 軽量化の検討

法令で定められている橋梁等の非破壊検査に利用できる加速器は 4MeV 未満である。これに必要なターゲットステーションの重量をシミュレーションによって見積もった結果、500kg 程度と軽量であることが明らかになった。また、検出器や解析システムの高度化により中性子の出力を抑えることが出来れば、さらなる軽量化が可能である。

4.4 大面積全天候型高速中性子検出器の開発

透過能が高い MeV オーダーの高速中性子の検出には、従来は高圧電源の必要な光電子増倍管と可燃性の液体シンチレータの組み合わせが採用されてきた。当チームでは社会インフラ用屋外使用を前提とするために安全性と温度変化への耐性を考慮し、プラスチックシンチレータと低電圧で動作可能なマルチピクセルフォトンカウンター(MPPC)の組み合わせによる高速中性子検出器を開発することとした。

試作 1 号機である 4 チャンネル高速中性子検出器による 30cm 厚コンクリート内部に鋼材の有無、また本数の違いの観察に成功した様子が Fig.5 である。ここで赤い点は検出器のみ、青い点は検出器の前に γ 線遮蔽として鉛ブロックを設置して計測した透過率を示している。

現在は一辺が 1m、チャンネル数 1024 の全天候型(防水型)の大面積全天候型高速中性子検出器が完

成し、実証試験を控えている。

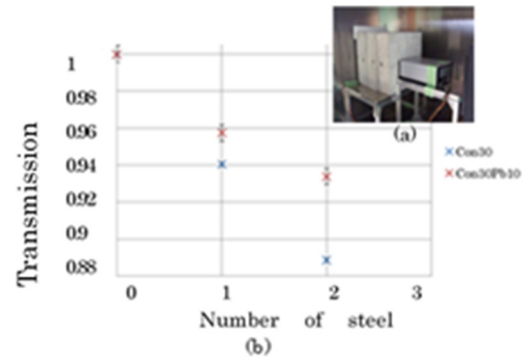


Figure 5: Observation of different numbers of steel bar in 30cm thick concrete slab (a) Experimental set-up with 30cm thick concrete. (b) The transmission probability in terms of different number of steel bars which inserts in the 30cm thick concrete which is shown in right figure.

4.4 診断システムの開発

内部欠陥や不均一な物性が混在する事例では、一般には統計的手法による健全性評価が試行されている。理研では X 線 CT イメージングのデータをもとに、粗骨材、セメントコンクリート部、鉄筋部材、空洞の各部を考慮した 3 次元モデルを作成し、荷重下での応力分布シミュレーションを行っている。このシステムを中性子イメージングデータへ適用することにより、健全性評価を計算力学的手法によって行う可能性を検討している。

5. おわりに

陽子線加速器を利用した小型中性子源の研究開発は現在世界的な注目を集めている。開発の方向性は現在 2 つあり、一つは医療用、すなわち中性子ホウ素捕捉療法(BNCT)であり大電流型中性子源、もう一つが、「いつでも、どこでも中性子利用」を実現するここで紹介した可搬化への開発を睨んだシステム全体としてコンパクトな小型中性子源である。公社は従来の大型施設の簡易版としての役割にとどまらず、インフラの非破壊検査装置として新しい役割を担うことが可能となる。屋外での測定が可能となれば新しい分野への展開が予想され、中性子応用研究全般への大きく寄与することが期待される。

この研究の一部は日本鐵鋼協会研究会 I、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」、合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人 JST) によって実施されました。

参考文献

- [1] M.R. Hawkesworth, Atomic Energy Review 15(1977)169-220.

- [2] Y.Yamagata, K.Hirota, J.Ju, S.Wang, S.Morita, J.Kato, Y.Otake, A.Taketani, Y.Seki, M.Yamada, H.Ota, U.Bautista, Q.Jia, J. Radioanal Nucl. Chem.vol.304 (2015) No.1 DOI 10.1007/s10967-015-4059-8.
- [3] 山田雅子、大竹淑恵、竹谷篤、須長秀行、山形豊、若林琢己、河野研二、中山武典 鉄と鋼 Vol.100 No.3 (2014) 429-431.
- [4] 大竹淑恵、山田雅子、竹谷篤、須長秀行、中山武典: Isotope News No. 722 (2014) p. 8-p. 13.