

理研小型中性子源システム RANS-II の現状報告

PRESENT STATUS OF RIKEN ACCELERATOR-DRIVEN COMPACT NEUTRON SYSTEMS (RANS-II)

今城想平^{#, A)}, 草野広樹^{A)}, 福地知則^{A)}, 水田真紀^{A)}, 奥野泰希^{A)}, 高梨宇宙^{A)}, 小林知洋^{A)}, 大竹淑恵^{A)}
Sohei Imajo^{#, A)}, Hiroki Kusano^{A)}, Tomonori Fukuchi^{A)}, Maki Mizuta^{A)}, Yasuki Okuno^{A)}, Takaoki Takanashi^{A)},
Tomohiro Kobayashi^{A)}, Yoshie Otake^{A)}

^{A)} Neutron Beam Technology Team, RIKEN Center for Advanced Photonics

Abstract

The RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Systems (RANS) — a 7 MeV proton beam LINAC (RFQ+DTL) with a beryllium target — has been in operation since 2013. It was developed with the aim of a compact neutron source for non-destructive testing at manufacturing and infrastructure sites. Using this system, we have developed degradation-inspection methods for infrastructure objects and measurement techniques optimized for the characteristics of compact neutron sources, based on the needs of outdoor field sites. Since 2020, a smaller, higher-brightness source, RANS-II (a 2.49 MeV proton beam LINAC (RFQ) with a lithium target), has entered experimental services. RANS-II serves both as a prototype of mass-producible stationary small neutron systems and as a prototype of the portable compact neutron system RANS-III. RANS-II produces neutrons at the same energy as RANS-III and is currently used for fundamental data acquisition and device development toward the realization of RANS-III. In addition, research and development is underway for non-destructive visualization techniques for infrastructure deterioration for the field operation of RANS-III (e.g., bridges and highways). This paper reports an overview of RANS-II and the current status of developments for non-destructive inspection technologies for infrastructure.

1. はじめに

社会インフラを担うコンクリート構造物は、ひび割れなどから侵入する水分や塩分により劣化が進行する。さらに、建設時の施工不良等によって内部に空隙が生じると、そこに水分が滞留し劣化を促進させる原因となる。このような劣化の非破壊検査には中性子線の利用が有利である。中性子線は高い透過力を持つとともに、水素によって強く減速・散乱されるため、構造物内部に貯留した水分の検出に優れている。内部に空隙がある場合は、その部分で中性子減衰が周囲より弱まるため、空隙の検出も可能である。

これらの検出に主に寄与するのは速度約 2200 m/s の熱中性子である。中性子は物質中を原子と散乱を繰り返しながら進むため、熱中性子の平均速度はさらに低下し、マイクロ秒の時間分解能があれば数センチメートルの距離を判別できる。したがって、パルス中性子を用いて中性子照射からの中性子検出量の時間変化を解析することで、水分や空隙の 3 次元的存在位置を推定できる。さらに、熱中性子が ³⁵Cl に捕獲される際に放出される即発ガンマ線を検出することで、塩分の分布も把握可能である。

これら産業・土木の現場における非破壊検査需要に応えるため、理研中性子技術開発チームは小型加速器中性子源のさまざまな現場への導入を目指し、小型中性子源システム RANS (RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Systems) の開発・運用を行っている[1]。さらに、これらの RANS を用いて、小型中性子源が有する弱い中性子フラックス下でも実用的な非破壊計測を実

現するため、計測技術の高度化に取り組んでいる。我々は 2013 年に稼働させた初号機 RANS により、中性子非破壊検出の有効性を実証し、2020 年には装置をさらに小型化した可搬型プロトタイプ RANS-II の実験供用を開始して現場利用を前提とした研究開発を進めている [2]。現在は、2025 年秋の中性子発生を目標に、可搬型実機 RANS-III の構築・動作試験が最終段階に入っている (ポスター No. WEP023)。本稿では RANS-II の概要と、インフラ非破壊計測技術の現状について報告する。

2. RANS-II 現状

RANS-II は普及可能な据置型小型中性子源であり、可搬型中性子源 RANS-III の実現に向けた基礎データ取得を目的として開発された。そのため、中性子発生量およびエネルギーが RANS-III と同等となるように設計されている。RANS 各装置の外観、RANS-II ターゲット遮蔽体の構造、および初号機 RANS と RANS-II の主要パラメータ比較をそれぞれ Fig. 1、Fig. 2、Table 1 に示す。

RANS-II では装置の小型化と中性子の高輝度化を両立させるため、イオン源にデュオプラズマトロンよりも高輝度・高効率・長寿命である ECR イオン源を採用している。また、加速器および周辺装置の放射化管理を不要とするため、陽子の加速エネルギーは 2.5 MeV 未満 (2.49 MeV) となるよう設計している。

中性子発生には、2.5 MeV 陽子でも高効率に中性子を発生できるリチウム標的 (⁷Li(p, n)⁷Be 反応) を用いている[3]。標的は銅 (C1020) フランジ上に直径 40 mm、厚み 100 μm の天然リチウムを蒸着した構造で、表面は厚さ 1 μm の窒化クロム被膜により空気から保護されている。陽子ビームは ⁷Li(p, n)⁷Be 反応の閾値 (約 1.9 MeV) を下回る位置で銅フランジに到達し、除熱されるように設計さ

[#] sohei.imajo@riken.jp

れており、最大でも 100 μ A のビーム電流しか必要としないことから、長期運転においても融解や損傷が生じにくい構造となっている。

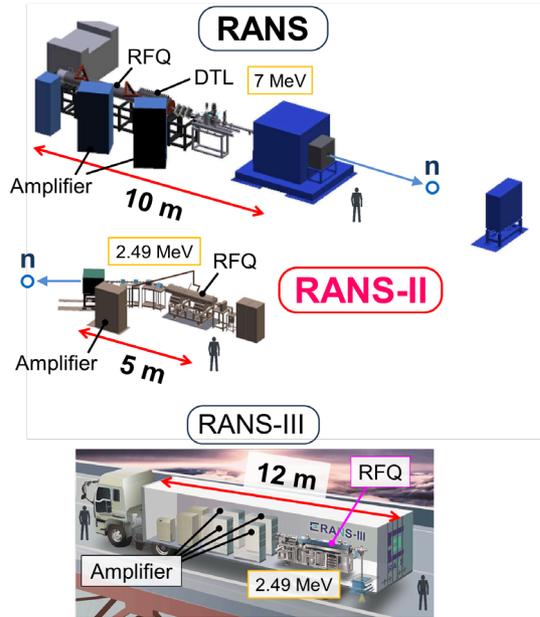


Figure 1: Overview of the RANS.

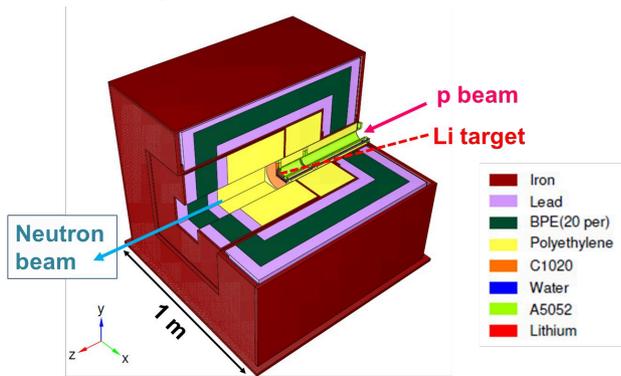


Figure 2: Structure of the neutron shield (target station) in RANS-II.

中性子遮蔽体は、初号機 RANS, RANS-II ともに中性子吸収材(水素・ホウ素)とガンマ線遮蔽材(鉛)を交互に配置した多層構造とすることで遮蔽効率を高めている[4]。さらに、RANS-II で発生する中性子の最大エネルギーが約 0.7 MeV であるため、中性子遮蔽体は一辺約 1 m に収まり、大幅な小型・軽量化が実現している。中性子ターゲットから遮蔽体出口までの距離は約 500 mm と短い、Fig. 3 および Table 2 に示すように、遮蔽体出口に内径 50 mm 以下、長さ 400 mm 以上のポリエチレン製コリメーターを挿入することで、半値幅の発散半角が 60 mrad 以下の、比較的コリメートされた熱中性子および熱外中性子ビームを得られることを ^3He 位置感应型検出器(PSD)により確認した。

運転実績として中性子ターゲットの積算陽子電流量を Fig. 4 に示す。電流値は Fig. 2 に示した C1020 製フランジおよび A5052 製ダクトを一体としてファラデーカップ代わりに用い、そこから算出したものである。RANS-II では

2024 年にイオン源周辺装置の改良および運転パラメータの最適化を行い、陽子ビーム電流が大幅に向上した。現在はターゲット電流が平均約 30 μ A の安定したビームを得ており、これを用いて多数の実験を実施している。

Table 1: Parameter Comparison Between RANS and RANS-II

	RANS	RANS-II
Particle	proton	proton
Energy	7 MeV	2.49 MeV
Current	100 μ A	100 μ A
Reaction	$^9\text{Be}(p, n)^9\text{B}$	$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$
Accelerator	RFQ + DTL	RFQ
Weight (Accelerator)	5 t	3 t
Weight (Target & Shield)	20 t	< 2 t
Length (Ion source - target)	10 m	5 m
Ion source	Duoplasmatron	ECR plasma
Drive mode	Pulse	Pulse
Maximum neutron energy	5 MeV	0.7 MeV
Neutron Yield	$\sim 10^{12} \text{ sec}^{-1}$	$\sim 10^{11} \text{ sec}^{-1}$

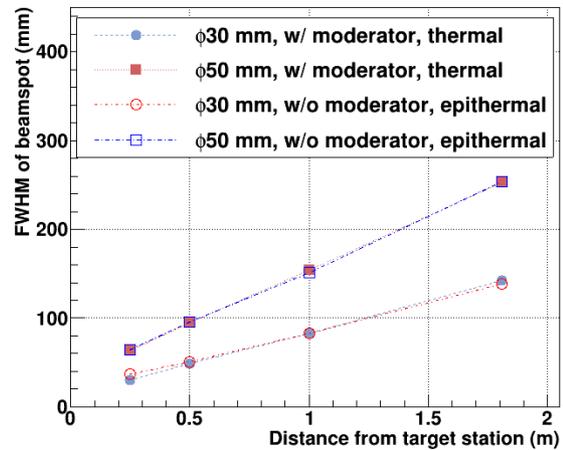


Figure 3: Increase in RANS-II neutron beam spot width with respect to measurement distance. The collimator length for measurements with a 40-mm-thick polyethylene moderator is 400 mm, and the collimator length for measurements without a moderator is 500 mm.

Table 2: Divergence Angle (half-angle) of Neutron Beam in RANS-II Calculated from Fig. 3

Collimator	Divergence (mrad, with moderator)	Divergence (mrad, without moderator)
$\phi 30$ -mm hole	35.10 ± 0.01	33.37 ± 0.06
$\phi 50$ -mm hole	59.99 ± 0.01	58.33 ± 0.07

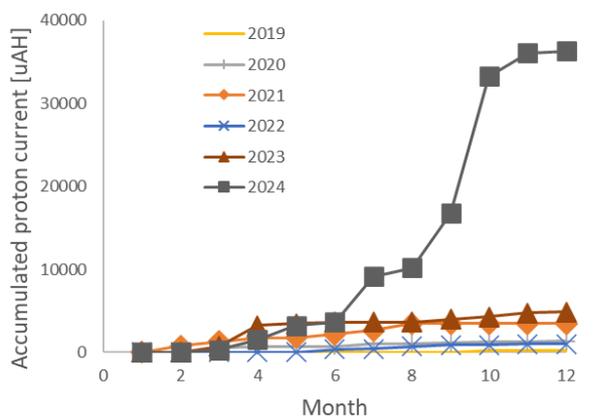


Figure 4: Accumulated proton current for each year of RANS-II.

3. 実験状況

RANS-II では現在、RANS-III と同等のエネルギーおよびフラックスを有する中性子ビームを用い、RANS-III 搭載装置の開発や現場導入を想定した計測技術の開発を進めている。以下に主な実験例を示す。

3.1 アスファルト舗装の層間剥離検出実験

アスファルト舗装は通常 2~3 層構造で施工される。経年劣化により舗装の路面側または地盤側に微細なひび割れが生じると、そこから水分が層間に侵入・滞留し層間剥離が進行すると考えられている。これを早期発見して路面陥没などを未然に防ぐため、我々は金沢工業大学と共同で RANS-III を用いた路面上からの内部水分非破壊検出技術の開発を、RANS-II で進めている。

実験セットアップを Fig. 5 に示す。実験では高速静電チョッパー（ポスターNo. WEP027）を用い、パルス幅約 8 μ s、繰り返し 750 Hz、電流値約 40 μ A の陽子ビームを照射し中性子を生成した。各測定は 900 秒間行った。生成中性子は内径 30 mm、長さ 500 mm のポリエチレン製コリメーターおよび中性子遮蔽ゴムを通して高速中性子ビームとして取り出し、300 mm \times 300 mm \times 50 mm のアスファルト 3 枚を重ねた試料に対して、中性子検出器を貫通する形で照射した。

1 層目と 2 層目の間(深さ 50 mm)には、水の水素密度 (0.11 g/cm³) に近いアクリル (0.09 g/cm³) を模擬滞水として設置し、その厚さを 5 mm、2 mm、1 mm に変えて測定した。アクリルの面積は試料と同じ 300 mm \times 300 mm とした。中性子検出器には PSD を用い、入射面に密着させて後方散乱中性子を測定した。その結果、アスファルト中心の 200 mm \times 200 mm の領域において、Fig. 6 に示すように滞水厚さに比例した後方散乱中性子の増加が明瞭に確認され、手法の有効性が示された。

3.2 斜張橋ケーブル内の滞水検出実験

国内の多くの斜張橋は建設後 30 年以上が経過して老朽化が進行しており、ケーブルカバー内部に侵入した水分が定着部に滞留して鋼線を腐食させるリスクが懸念されている。しかし、ケーブル定着部は防水カバーや厚い緩衝材・鋼管で覆われているため、目視や既存の非

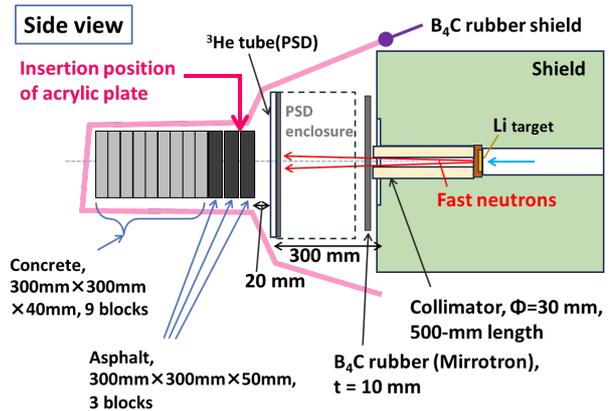


Figure 5: Schematic diagram of the experimental setup for a water layer detection experiment in asphalt.

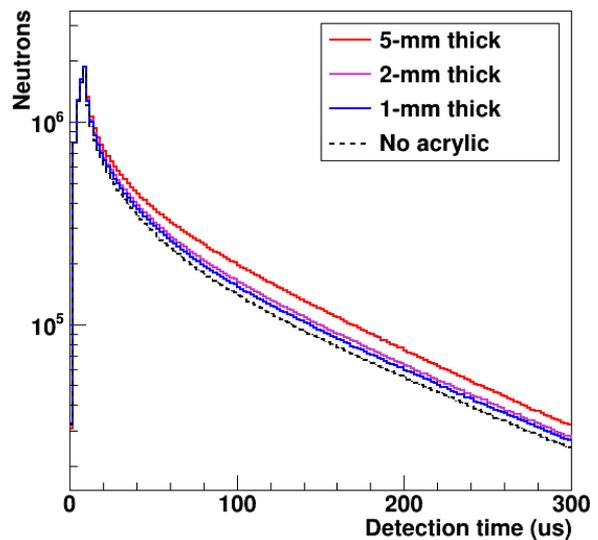


Figure 6: Increase in the number of backscattered neutrons with respect to the thickness of the water layer.

破壊検査では内部の水分検知が困難である。

そこで我々は NEXCO 中日本と共同で、RANS-III の中性子線を用いた定着部内部滞水の非破壊的可視化技術を、RANS-II を用いて開発している [5, 6]。Figure 7 に基礎実験のセットアップと結果を示す。実験では高速中性子ビームを用い、高速中性子が鋼線深部まで到達するか、ならびに水分の可視化挙動を評価するため、ビームを直径 160 mm の鋼線束の断面方向から入射した。水分は鋼線束の検出器側外縁部に直径 15 mm のアクリル棒を挿入して模擬した。アクリル有り/無しの測定結果を比較することで水分位置の可視化に成功した。現在は、定着部を模擬した試料に対してより現実的な斜入射条件でのビーム照射による水分検出法の開発を進めている。

3.3 RANS-III 搭載用 PSD 開発

3.1, 3.2 のような中性子を用いた欠陥検出では、PSD による検出位置と検出時間の多次元解析が必要である。我々は RANS-III 搭載を前提とした PSD の開発を進めている。



(a) Photos of the experimental setup.

(b) Visualization of stagnant water.

Figure 7: Setup and a result of the visualization experiment of stagnant water in the cable of a cable-stayed bridge. These figures are reproduced from Ref. 6 (press release).

構造物深部の欠陥検出では、欠陥から検出器までの間で中性子が散乱して像が不明瞭化するため、約 10 mm の位置分解能があれば最低限の測定が可能である。開発中 PSD の ^3He 管 1 本に、カドミウム製コリメーターでスポット幅 1 mm 以下の熱中性子ビームを照射し、正規分布でフィッティングした結果、半値幅 9.4 ± 0.1 mm を得た。この値は実用上十分であるが、3.1 および 3.2 で使用した既存 PSD に比べ分解能が約 2 倍低いことが判明し、原因が電気ノイズであることが特定されたため、装置改修を進めている。

RANS-II では上記のほか、太陽電池を利用した中性子束モニターの開発、中性子イメージング、NEXCO 総研と共同で進める高架橋内部 PC 鋼材劣化の非破壊検査技術の開発など、多数の研究開発が進行中・予定されている。

4. まとめ

我々は産業・土木分野の非破壊検査需要に応えるため、小型加速器中性子源システム RANS の開発・運用

と、低フラックス中性子に対応した計測技術の高度化を進めてきた。RANS-II は 2024 年より本格運用を開始し、平均約 $30 \mu\text{A}$ の安定したビームを用いた実験が可能となった。現在は可搬型中性子源 RANS-III の現場導入を前提とした複数の非破壊検査技術開発をはじめ、多様な研究開発が計画・進行中である。

参考文献

- [1] Y. Otake, J. Neutron Res. **23**, no. 2-3, 119-125 (2021).
- [2] T. Kobayashi *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **994**, 165091 (2021).
- [3] V. Soukeras *et al.*, EPJ Web Conf. **252**, 06002 (2021).
- [4] 小林知洋ほか, 第 18 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 590-591 (2021).
- [5] 福地知則ほか, 日本材料学会コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集 **24**, 565-570 (2024).
- [6] C-NEXCO (2024.4.25) “橋梁内部の可視化により予防保全へ”, プレスリリース, https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/6042.html