

理研加速器駆動小型中性子源 RANS および RANS-II RIKEN ACCELERATOR-DRIVEN COMPACT NEUTRON SOURCE RANS AND RANS-II

小林知洋^{#, A)}, 大竹淑恵^{A)}, 池田翔太^{B)}, 池田裕二郎^{A)}, 岩本ちひろ^{B)}, 後藤誠^{A)}, 高梨宇宙^{B)}, 高村正人^{A)},
竹谷篤^{B)}, 橋口孝夫^{A)}, 藤田訓裕^{B)}, 松崎義夫^{A)}, 水田真紀^{B)}, 若林泰生^{A)}, Yan Mingfei^{B)}
Tomohiro Kobayashi^{#, A)}, Yoshie Otake^{A)}, Shota Ikeda^{A)}, Yujiro Ikeda^{A)}, Chihiro Iwamoto^{A)}, Makoto Goto^{A)}, Takaoki
Takanashi^{A)}, Masato Takamura^{A)}, Atsushi Taketani^{A)}, Takao Hashiguchi^{A)}, Kunihiro Fujita^{A)}, Yoshio Matsuzaki^{A)}, Maki
Mizuta^{A)}, Yasuo Wakabayashi^{A)}, Mingfei Yan^{A)}

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

Abstract

Accessible neutron sources are continuing to grow in importance for medical, scientific and industrial users. The RIKEN accelerator-driven compact neutron source (RANS) has been developed for use in simple and convenient measurement. By using neutrons from Be (p, n) reaction, we have succeeded in non-destructive inspection of bulk materials such as reinforcing steel in concrete. A compact mobile neutron source will be a powerful tool for deterioration survey of concrete constructs. Based on the experimental results at RANS, the project for developing the prototype of “transportable” neutron source (RANS-II) was started. By using Li (p, n) reaction with 2.5 MeV RFQ and simple ECR proton ion source, the use of neutrons is becoming more and more readily available.

1. はじめに

理研中性子ビーム技術開発チームでは 7 MeV 陽子線 LINAC(3.5 MeV RFQ および 3.5 MeV DTL の連結)とベリリウムターゲットによる理研小型中性子源システム(RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source, RANS)を 2013 年より稼働させ、インフラ基盤材料を中心に分析を行っている。解析例としては、コンクリート内部の非破壊観察[1](水の浸透、空隙の生成、鉄筋腐食、塩分量)、鋼板の腐食部分における水の挙動観察[2]、鋼板の応力下における集合組織の挙動解析[3]など実用バルク材料解析が中心となっている。これらの解析には飛行時間分析法(TOF)や後方散乱分析法[4](検出器を一旦通過したのちに散乱されて戻ってくる中性子を測定する)が用いられるため、中性子ビームのパルス化を行っている。

2. 可搬型プロトタイプ RANS-II 計画

放射光を利用した大型の X 線施設と実験室に収まるコンパクトな X 線装置は、物質分析において補完的な役割を果たしている。中性子源については、核破碎中性子源や原子炉が大型施設に相当するが、移動可能で十分な強度を持ち、かつパルス運転が可能な中性子源はこれまで開発されていない。そこで理研では、2016 年より移動設置可能な中性子源を開発する RANS-II プロジェクトが実施された[5]。持ち運び可能な中性子源としては、放射性同位元素(RI)が一般的に考えられる。しかし、その中性子発生強度は短時間での分析やイメージングには不十分である。DT 核融合反応を利用した中性子発生装置は市販されており、RI よりも高い中性子発生強度を得ることができるが、中性子のエネルギーが 14 MeV と非

常に高く、必要な遮蔽体が重くなりすぎるという問題がある。DD 核融合反応を利用した装置も検討されたが、パルス運転を行うには RI 同様中性子の量が不足するという結論に至った。結局、十分なパルス強度が得られ、遮蔽も軽量化できることから陽子線 LINAC(RFQ)とリチウムターゲットとの組み合わせが採用された。RANS で取得したデータをもとに、さらに少ない中性子量で測定を行うことを目指している。

3. RANS および RANS-II のパラメータ比較

${}^7\text{Li}$ (p, n) ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$ (p, n) ${}^9\text{B}$ 反応の閾値はそれぞれ 1.9 MeV, 2.1 MeV と大きくは変わらない[6]。しかし中性子発生収率は同一エネルギーの陽子ではリチウムがベリリウムを上回る。そのため、加速器や遮蔽の小型化を考える場合にはリチウムターゲットが有利となる。一方、融点はリチウムの 180.5 °C に対してベリリウムは 1287 °C と大幅に高いため、投入電力を大きくして中性子総量を稼ぐ場合はベリリウムが有利となる。以上が RANS と RANS-II で異なるターゲットを採用した理由である。RANS-II では加速器のエネルギー 2.5 MeV に抑え、中性子の最大エネルギーを低下させた。その結果遮蔽体の重量を大きく減少させることに成功した。発生中性子の総量は減少するものの、ターゲット-試料間の距離を小さくできるため、中性子利用効率は向上した。Table 1 に RANS および RANS-II のパラメータをまとめた。また Fig. 1 に RANS および RANS-II それぞれの構成を示す。

RANS-II のターゲット遮蔽体は Fig. 2 に示すような多層構造となっている。大きさは異なるが、RANS も同様な構成である。上下方向、側方に発生した中性子はポリエチレンで減速され、水素またはホウ素に吸収される。このときガンマ線が放出されるので、これを鉛で遮蔽する。鉛を最外層のみに配置すると総重量が大きくなりすぎるため、多層構造にして鉛の総量を抑えている。本図では示

[#]t-koba@riken.jp

していないが、通常はターゲットの延長線上に減速材（ポリエチレン板など）を配置している。反射体として黒鉛を設置し、中性子の利用効率を上げる場合もある。可搬型加速器中性子源は、技術面はもちろん、安全面、法律面で解決しなければならない多くの課題があるものの、利用範囲は非常に広い。車載型のパルス中性子源があれば、X線や超音波検査では困難な厚さ数十 cm のコンクリート内部の劣化（鉄筋破断や土砂化）を診断することが可能となる。その他、工場での原料・製品の品質検査、コンテナ外部からの核物質検査、廃炉現場における燃料デブリ・その他金属の選別など、様々なアイデアが提案されている。

Table 1: Parameters of RANS and RANS-II

	RANS	RANS-II
加速器	RFQ+DTL	RFQ
加速粒子	陽子	陽子
加速エネルギー	7 MeV	2.5 MeV
最大加速電流	100 μ A	100 μ A
中性子発生反応	${}^9\text{Be} (p, n) {}^9\text{B}$	${}^7\text{Li} (p, n) {}^7\text{Be}$
最大中性子エネルギー	5.1 MeV	0.76 MeV
中性子発生率	10^{12} s^{-1}	10^{11} s^{-1}
加速器重量	5 t	2.5 t
遮蔽体重量	20 t	3.5 t
全長	10 m + 5 m	5 m

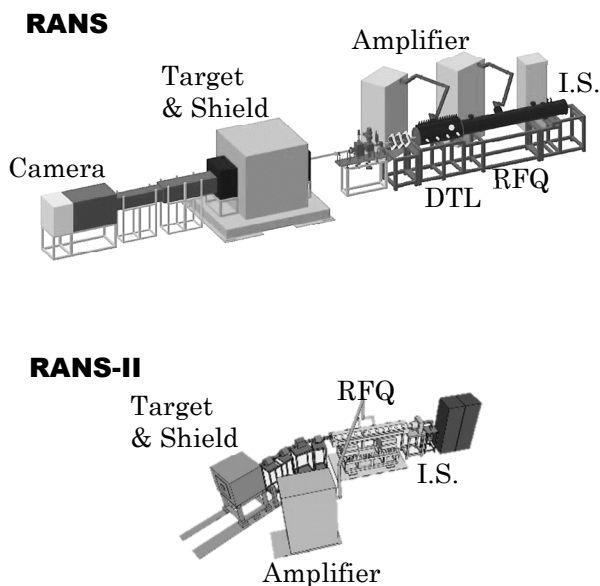


Figure 1: Configurations of RANS and RANS-II.

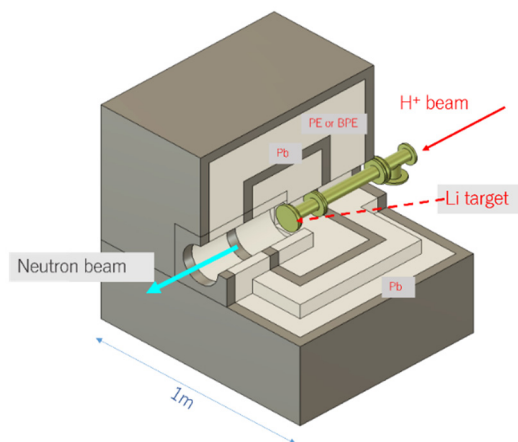


Figure 2: Target station of RANS-II.

4. 運転状況

RANS、RANS-II ともに運転は平日日中に限定されており、概ね 10 時から 17 時頃までがビームタイムとなっている。Fig. 3 に RANS の年間積算ビームタイムを示す。

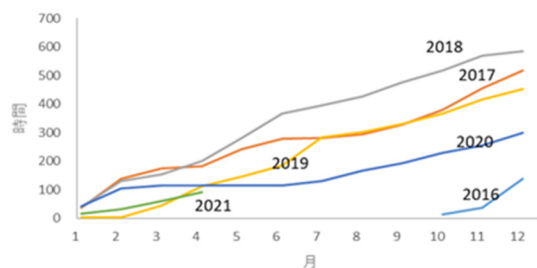


Figure 3: Total operating time of RANS.

社会情勢と装置状態に依存するものの、概ね年間 500 時間程度のビームタイムを確保している。RANS-II については 2019 年度後半に中性子発生、2020 年度より実験供用を開始した。現在はマシンスタディと中性子利用実験の割合がそれぞれ半々程度である。

参考文献

- [1] Y. Otake *et al.*, J. Disaster Res.12(3) 585 (2017).
- [2] A. Taketani *et al.*, ISIJ Int., 57(1), 155 (2017).
- [3] Y. Ikeda *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A 833, 61 (2016).
- [4] Y. Ikeda *et al.*, J. Adv. Concrete Technol. 15(10), 603 (2017).
- [5] T. Kobayashi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A 994, 165091 (2021).
- [6] M.R. Hawkesworth, Atomic Energy Rev. 15, 169 (1977).