

陽子線加速器駆動理研小型中性子源 RANS 及び RANS2 計画

THE RIKEN ACCELERATOR-DRIVEN COMPACT NEUTRON SOURCE (RANS) AND RANS2 PROJECT

小林知洋^{#, A)}, 大竹淑恵^{A)}, 若林泰生^{A)}, 池田義雅^{A)}, 柳町信三^{A)}, 竹谷篤^{A)}, 橋口孝夫^{A)}, 高村正人^{A)},
須長秀行^{A)}, 池田裕二郎^{A)}, 林崎規託^{B)},

Tomohiro Kobayashi^{#, A)}, Yoshie Otake^{A)}, Yasuo Wakabayashi^{A)}, Yoshimasa Ikeda^{A)}, Atsushi Taketani^{A)}, Takao
Hashiguchi^{A)}, Masato Takamura^{A)}, Hideyuki Sunaga^{A)}, Yujiro Ikeda^{A)}, Noriyosu Hayashizaki^{B)},

^{A)} RIKEN Center for Advanced Photonics

^{B)} Laboratory for Advanced Nuclear Energy, Tokyo Institute of Technology

Abstract

The RIKEN accelerator-driven compact neutron source (RANS) was relocated in Jul. 2015 and resumed operation in Jan. 2016. By using pulsed neutrons from Be(p,n) reaction with 7 MeV proton, we have succeeded in measurements. Underfilm corrosion and movement of water in a steel plate was successfully visualized by neutron radiography. Non-destructive inspection reinforcing steel in concrete is also an important purpose for our project. Microscopic plastic deformation behavior of metal was observed by neutron diffraction. The results will be helpful in improvement of analysis precision of finite element simulation. A compact mobile neutron source for deterioration survey of concrete constructs will be a development object in the future. RANS2 project has been started with purpose of developing the prototype of transportable neutron source utilizing 2.49 MeV RFQ and Lithium target. The specification of RANS2 was discussed.

1. はじめに

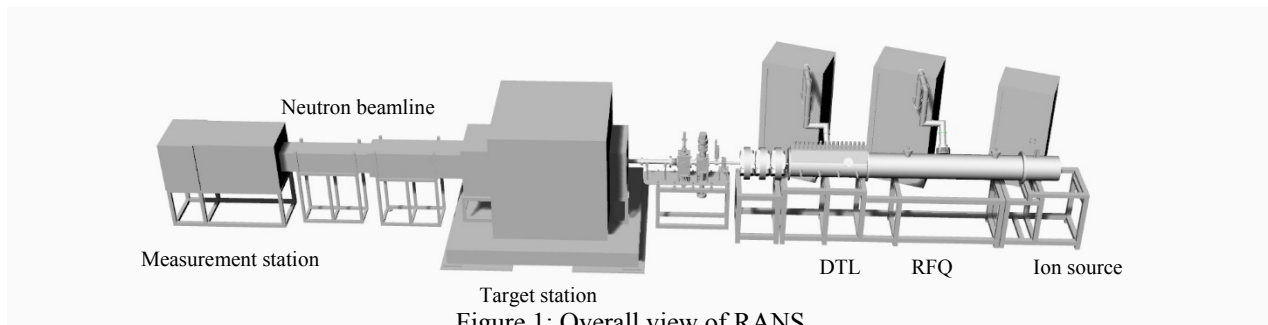
理研では現場で役に立つ中性子源開発に取り組んでおり、7MeV 陽子線加速器と Be ターゲットによる理研小型中性子源システム RANS[1]は稼働 3 年目となる。この間、大型施設の利用が限定されていたことから、国内では数少ない中性子照射施設として実験の機会を提供してきた。これまで陽子線の短パルス化などに取り組み、イメージングや回折実験を利用した産業応用、また高速中性子による大型構造物非破壊観察実験が実施されている。

一方、当チームでは中性子源の更なる小型軽量化のため 2.49 MeV 陽子線加速器および Li ターゲットを利用した RANS2 の立上げを開始した。高速中性子を用いたイメージング技術開発が主たる目的である。ターゲットステーションはガンマ線遮蔽材の大幅な減量が可能で、RANS(20t)の 1/20 以下を見込んでいる。加速器の小型化も含めてシステム全体の大幅な軽量化を実現し可搬型へ向けた実証実験を行う。

本稿では、現在までの RANS の成果に加え、新たな RANS2 計画について紹介する。

2. 小型中性子源 RANS の概要

RANS は理化学研究所和光地区の仁科加速器センター RIBF 棟から、同地区内に新規に建設された中性子工学施設へ 2015 年 7 月に移設され、変更許可、再調整を経て 2016 年 1 月より中性子発生を再開した。Figure 1 に RANS の装置構成を示す。イオン源および加速器は米国 Accsys 社のライナック PL-7 を使用している。デュオプラズマイオン源により発生した陽子は、RFQ および DTL により 7MeV まで加速される。集束、偏向の後、陽子はターゲットステーション中心に設置されたベリリウムターゲットに衝突する。 ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 反応による最高エネルギー約 5 MeV の発生中性子の一部を減速し、高速中性子と熱中性子を同時に得ている。ターゲットステーション内部はホウ素化ポリエチレンと鉛の多重構造となっており、中性子とガンマ線の遮蔽が効率的に行えるように設計されている。発生した中性子はビーム軸方向の開口部から射出され、中性子ビームラインを通過して距離 5 m の測定ステーション(カメラボックス)へと導かれる。5 m 位置における全中性子束は $10^4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダーである。



[#] t-koba@riken.jp

中性子ビームラインは断面が正方形の管を繋ぎ合わせた形状をしており、ポリエチレン板を挿入することによりビーム面積を自由に調整可能である。また測定ステーションを移動し、任意の測定機器を設置することも可能である。将来はターゲットステーションにビーム軸から90° 方向にも開口部を設け、2 ビームライン化を行うことや、モデレータを交換できるユニットを製作し短時間の作業で中性子エネルギー分布を変更可能とすることを計画している。

3. RANS における実験

RANS は、産業利用とインフラ構造物の非破壊測定を主な目的としている。当チームが主体となりこれらの目的で行われているテーマには以下のものがある。

3.1 鋼材内部の腐食と関連する水の動きの可視化

塗装した各種鋼材に、傷を付けて腐食を進行させ、乾燥過程における水分の動きを可視化した。普通鋼と合金鋼との間で明確な挙動の違いが判明している[2]。

3.2 鋼材の変更前後における金属集合組織(結晶粒の方向が特定方向に揃った組織)の変化観察

自動車用高張力鋼板(ハイテン)の引張り加工前後で特定の面方位ピークの増大が観察されている[3]。これは塑性加工の有限要素解析モデルの構築にあたって有用な情報となる。また、鋼中のオーステナイト(FCC)およびフェライト(BCC)の体積比を 1%以下の精度で測定することが可能であることが示され[4]、この点において大型施設に引けを取らないことが明らかになった。

3.3 コンクリート内の鋼材、空隙の観察

エネルギー約1MeV 以上の中性子線の高い透過能を利用した、橋梁等大型構造物非破壊観察用の高速中性子イメージング検出器を理研では開発している。この検出器を利用した初期実験においては、厚さ 30cm のコンクリートの内部に数本の鋼材を配置し、透過率の違いから重なる位置にある鋼材本数の見分け、同様のコンクリート後方の異なる位置に配置した 1cm 角鋼材の位置評価も可能である[5]。また床板内部の空隙に水が溜まった場合、中性子反射スペクトルからその位置の特定が可能である。

3.4 12MeV 以下陽子線利用中性子発生エネルギー角度分布関数の特定-Be(p,n)について-

コンパクトかつ高効率な加速器駆動中性子発生に適した Be(p,n)での中性子エネルギースペクトルおよび発生中性子の角度分布などの核データは未だに充足していない。そこで我々はこれまで核データや、RANS での経験を元にした陽子線 12MeV 以下の全断面積・角度分布・エネルギースペクトラムの実験データを再現するような、入射エネルギーを引数とした関数の作成に成功した。現在任意の厚さのターゲットに対応した輸送計算が可能となるコードを作成中である[6]。

3.1 および 3.2 については J-PARC/MLF の実験課題にも採択され、より詳細な結果を得る機会を得るとともに、新たに RANS/J-PARC 研究協力連携会議が発足し、小型、大型それぞれの利点を生かして協力していくことが確認された。このほか、RANS においては他研究機関および企業提案の共同研究が複数進行中である。

4. RANS2 プロジェクト

4.1 プロジェクト概要

RANS において構築されたインフラ診断技術を、実際のフィールドで使用可能かどうかを実証するため、現実に車載可能なサイズ・重量の加速器中性子源プロトタイプを製作するRANS2プロジェクトが2015年度からスタートした。Table 1 に RANS および RANS2 の諸元比較を示す。RANS2 は加速器を RFQ のみとし、エネルギーを 2.49 MeV に抑えることにより加速器重量、遮蔽体重量を抑制する。一方、ターゲットには中性子発生閾エネルギーのより小さいリチウムを用いることとした。

Table 1: Specification of RANS and RANS2

	RANS	RANS2
Particle	Proton	Proton
Energy	7 MeV	2.49 MeV
Current	100 μ A	100 μ A
Reaction	${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$	${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{B}$
Accelerator	RFQ + DTL	RFQ
Weight(Accelerator)	5 t	3 t
Weight(Target&Shield)	20 t	< 0.7 t
Length	15 m	< 5 m

4.2 RANS2 中性子スペクトルの評価

Hawkesworth[7]によれば、十分な厚さを持つターゲットを想定した場合、RANS の条件である 7 MeV 陽子による ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 反応の中性子収率は約 $10^{10} \mu\text{C}^{-1}$ である。RANS2 で想定している 2.49MeV 陽子による ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{B}$ 反応の中性子収率は約 $10^9 \mu\text{C}^{-1}$ と一桁小さいことから、中性子束が測定に十分な量が検討する必要がある。一方、RANS2 では検出器位置がターゲットから 1 m 以内と RANS に比べて近いことと、このエネルギー領域における中性子発生が等方的でなく前方に偏っていることが有利な条件である。Figure 2 は、2.49 MeV 陽子が 80 μm 厚の Li ターゲットに衝突した際に放出される中性子の前方 1m 位置におけるエネルギー分布を PHITS コード [8](Ver2.82, ENDF/B-VII.1 の断面積を使用)により計算した結果である。モデレータ無しの場合、中性子の最大エネルギーは約 700 keV、平均エネルギーは約 600 keV となる。RANS2 で予定されている定格電流(100 μ A)を考

慮すると前方 1 m 位置における全中性子束は $1.65 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ となり、高速中性子イメージングに関しては十分に実行可能な量であると判断される。今後、静電加速器ペレットを用いた実ターゲット照射試験により本データの定量性を検証した後、交換型モデレータやガンマ線遮蔽体の詳細設計に移行し、2017 年度中のビームテストを目標にプロジェクトが進行している。

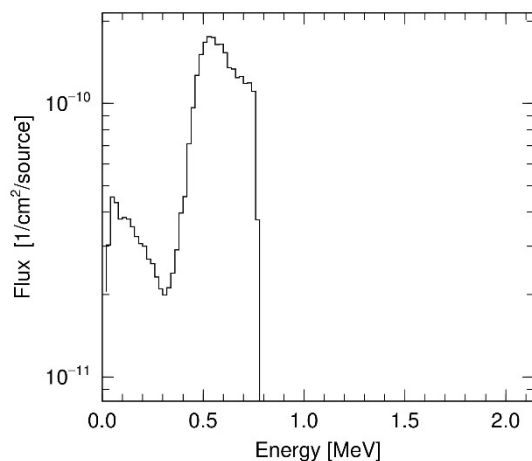


Figure 2: Energy distribution of neutrons formed by 2.49 MeV proton with Lithium target at a distance of 1 m calculated using PHITS code.

5. 結言

本稿では RANS の紹介ならびに進行中の RANS 実験の内容と、今後構築予定の RANS2 の諸元について記した。当チームではこの両中性子源を活用し、インフラ診断やもの作りの現場において使用可能な中性子源開発と測定技術開発を2つの大きな柱として研究開発活動を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Y.Otake (partial author), M. Uesaka and H. Kobayashi: Compact neutron source. In A.W.Chao, W.Chou (Eds.) Reviews of Accelerator-Science and Technology, New Jersey: World Scientific, 8 (2016), 181.
- [2] 山田 雅子、大竹 淑恵、竹谷 篤、須長 秀行、山形 豊、若林 琢巳、河野 研二、中山 武典、“小型中性子源 RANS を使った塗膜下腐食鋼材の非破壊イメージング観察”、日本鉄鋼協会学会誌 鉄と鋼、vol.100、No.3 P.429-431 (2014).
- [3] Y. Ikeda, M. Takamura, A. Taketani, H. Sunaga, Y. Otake, H. Suzuki, M. Kumagai, Y. Oba and T. Hama: “Measurement of neutron diffraction with compact neutron source RANS”, IL NUOVO CIMENTO, 38C (2015) 177.
- [4] Y. Ikeda, M. Takamura, A. Taketani, H. Sunaga, Y. Otake, H. Suzuki, M. Kumagai, Y. Oba: “Prospect for application of compact accelerator-based neutron source to neutron engineering diffraction”, Nucl. Instr. Meth. A833 (2016) 61-

- 67.
- [5] Y.Otake, “Fast Neutron Imaging for Non-Destructive Inspection for Social Infrastructures: 高速中性子の応用 - インフラ予防保全 - “レーザー学会誌 レーザー研究 Vol.43 No.2, p.71-76 (2015) The Review of Laser Engineering Vol.43 No.2 p. 71-76 (2015).
- [6] Y.Wakabayashi, A.Taketani, Y.Ikeda, T.Hashiguchi, S.Wang, M.F.Yan, M.Harada, Y.Ikeda, and Y.Otake「A function formation of source neutron production by the $9\text{Be} + p$ reaction at 7 MeV at RANS」2015 年度核データ研究会 Proceedings in Print.
- [7] M.R. Hawkesworth, Atomic Energy Review 15, 169-220(1977).
- [8] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).