

特集 広がる加速器の利用 中性子

加速器中性子源の利用

小型中性子源により広がる応用－理研 RANS－

大竹 淑恵*

Compact Neutron Systems Expand in Applications – RIKEN RANS –

Yoshie OTAKE*

Abstract

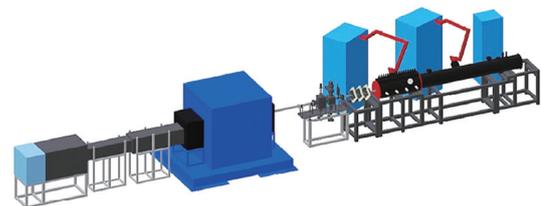
RIKEN accelerator-driven compact neutron source (RANS) has been developed and provided neutrons for industrial use. The proton linac of 7 MeV with the maximum average current 100 μ A, pulse width 10-180 μ s, repetition frequency 20-200 Hz is used with long-life Be target for such practical use in the field of manufacturing. Corrosion in the painted steels are visualized, neutron imaging and neutron diffraction technique have developed with compact neutron source. Non-destructive visualization inside thick concrete slab has been realized for the social infrastructure safety with compact neutron source system.

1. はじめに

中性子線の現場利用を目指した開発を理化学研究所では進めている。中性子線は、金属などに対して高い透過能を有し、水素やホウ素、リチウムなど軽元素との相互作用の大きなことが特徴と知られており、電子線やX線がサンプルの表面を詳細に観察するのに対し、中性子線は数ミリから数センチ厚サンプル全体からの散乱や回折、また透過イメージングによる分析が可能である。また放射化分析や即発 γ 線による微量元素分析など、『材料をバルクで「傷めることなく」観察できる中性子線は、特に鉄鋼材料を調べることに最も適していることはこれまでも知られていたが』¹⁾、中性子源施設数が限られているため利用できる機会が少ない。このため、鉄鋼材料はじめ構造材料の評価分析手法としての普及が難しい状況にある。

この現状を打破し、現場のニーズに応える強度を有し、手軽に安全に利用可能な中性子線システムの実現へ向けた中性子源の開発と応用例を紹介する。理研小型中性子源システム RANS (ランズ、

RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source)²⁾ (図1参照) は比較的コンパクトな陽



(a)



(b)

図1 理研小型中性子源システム RANS. (a) 3D 図. (b) 実験ホール内の RANS 写真. 中央ターゲットステーションボックスを挟んで右奥が陽子線ライナック、左手前がサンプル検出器ボックス。

* 国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究領域 RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN (E-mail: yotake@riken.jp)

子線加速器をベースにしている。まず、RANS 装置の概要、次に低エネルギー中性子を利用した産業利用計測例、最後に高速中性子線を利用したインフラ非破壊観察へ向けた高速中性子イメージング技術例を中心に紹介する。

2. 理研小型中性子源システム RANS

加速器駆動中性子源は近年世界で大型中性子施設が発展を見せている。北海道大学においては2013年に40周年を迎えた電子線ライナックを用いた小型中性子源 HUNS (Hokkaido University accelerator-driven Neutron Source) は代表的存在であり、加速器駆動中性子源として世界初の冷中性子源が構築されたばかりではなく、数種類の減速材パフォーマンステスト³⁾が行われるなど、新たなパルス中性子線の特性を最大限に生かした計測手法が研究開発されている。これらの小型中性子源発のユニークな計測技術の多くが高エネルギー加速器研究機構の中性子科学研究施設 (KENS) で実証され、さらに世界をリードする J-PARC に現在生かされ、最先端中性子線利用へと発展している。

理研の小型中性子源 RANS を簡単に説明する。

図1 (a) 右側の陽子線加速器 (7 MeV) で加速された陽子は長寿命ベリリウムターゲットシステム⁴⁾において Be(p,n)核反応を起こし、中性子線を発生する。ターゲットステーションから下流の中性子線ビームラインは取り外し自由であり、実験の種類やサンプルの大きさ、利用検出器により、ターゲットステーション直下から、ターゲットから約5 m 下流のサンプル検出器ボックス (最左側の箱) まで、飛行距離を選ぶことができる。

RANS は、実用化に必要な中性子強度は北大 HUNS の実績をもとにターゲット周りでの中性子発生個数 10^{12}s^{-1} とした。中性子発生効率が高く、かつ加速器の放射化が低い陽子線を利用し、そのエネルギーを 7 MeV, 最高平均電流 $100 \mu\text{A}$ とした。図1 右側に図示する 7 MeV 陽子線加速器では、まずディオプラズマイオン源から 30 kV で引き出された陽子は 425 MHz の高周波四重極 (RFQ) リニアックに続いてドリフトチューブリニアック (DTL) により 7 MeV まで加速される。ここでパルス幅は現在 10-180 μs , 繰り返し周波数は約 10 Hz から 200 Hz まで可変であり、

最大平均電流 $100 \mu\text{A}$ である。その後集光磁石等により調整された陽子を Be ターゲットに衝突させ中性子線を発生している。

パルス中性子源 RANS では、飛行時間 (TOF) 法によるエネルギー分解能計測が可能であり、ニーズに合わせた陽子線のパルス幅、電流強度を調整し中性子線の分解能を選択している。中性子線パルス幅は減速材及び反射材の構造にも依存している。RANS 第1期のターゲット周りの構造を図2に示す。

減速材・反射材のデザインだが、イメージング実験を初期目的と設定し、減速材 (図2 (b) 中央) は、厚さ 4 cm 直径 18 cm のターゲット冷却キャビティーと 1 体型構造とした。図3は、5 m 下流位置での RANS 中性子スペクトルを示しており、約 50 meV を中心とした低エネルギー中性子強度は約 $10^4 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ である。RANS の中性子ビームラインは入射陽子線と同じ高さ、同じ方向に取

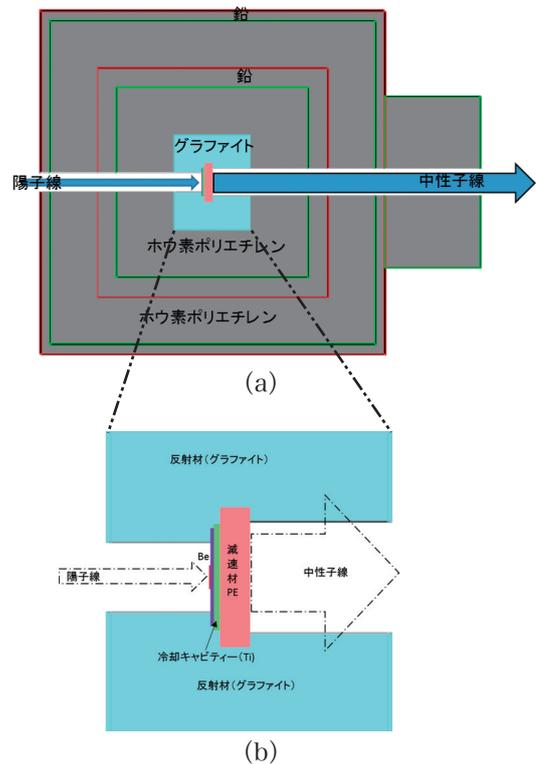


図2 RANS ターゲットステーション内部。(a) ターゲットステーション内部 2D 図。右側から陽子線を入射し Be ターゲットに衝突。遮蔽はホウ素ポリエチレンと鉛の複相構造となっている。(b) ターゲット周辺図。ターゲットの冷却キャビティー (Ti) の下流に減速材 (ポリエチレン) を設置し、周りを反射材 (グラファイト) が囲む構造。

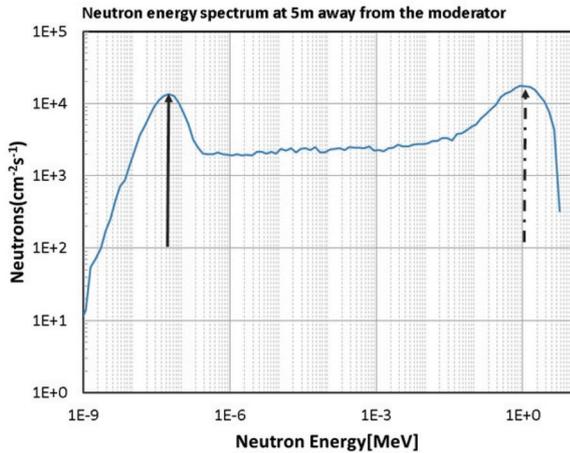


図3 RANS 中性子線エネルギースペクトル (ターゲット 5 m 下流)放射線輸送計算. 中性子線エネルギー(横軸), 中性子個数(縦軸)ともに指数表示. エネルギーは 1 meV から 5 MeV までの範囲を示している. 実線矢印は, 低エネルギー中性子強度ピークを示しており, 約 50 meV (波長 0.127 nm) が最大強度. 右側の高エネルギー側ピークは一点鎖線で示されており, その最大中性子強度は約 1 MeV である.

り出しているが, これは同時に MeV のエネルギーを有する透過能の高い高速中性子を得るためである. 高速中性子線は 30 cm から 60 cm の厚さのコンクリート内部非破壊観察が可能な透過能と感度を有しており, 我々は橋梁床版非破壊観察などのインフラ非破壊観察技術開発に利用している. なお, 本エネルギー分布は, 放射線輸送計算 GEANT4 を中性子発生から 5 m 位置までの計算に用いており, RANS ベリリウムターゲットで発生される中性子線のエネルギー角度分布は, 理研で開発した解析関数をもとに陽子線エネルギー 7 MeV の結果を用いている⁵⁾.

3. 小型中性子源 RANS による中性子回折

構造材料の軽量化, 高強度化は喫緊の課題であるが, 軽量材料として用いられている複合材料やマグネシウム合金などは, その価格が鉄鋼材料に比べて 30 倍と高価であり, 自動車ボディーなどには広く鉄鋼材料が利用されている. 高強度と高靱性は従来トレードオフの関係にあり, 新たな両立可能な材料の開発や, 加工法開発が待たれている. 新たな構造材料, 金属材料開発には, 本来数ミリ厚のバルク材料全体の加工前後の組織変化観察が必要であるが, X線や電子線では表面数十 μm の観察のみ可能である.

一方, 数 cm 以上透過可能な中性子線を利用すると, バルク材料全体平均組織変化が観察可能であることは研究用原子炉や大型施設により示されてきたが, その低い利用頻度によりなかなか開発現場と直結することが困難であった. そこで, 現場ニーズに応える小型中性子源による中性子回折法を用いた鉄鋼, 金属組織変化, さらに, 高張力鋼板高度化開発現場においてニーズの高いオーステナイト相分率の評価技術開発の現状⁶⁾を説明する.

10 mm³ のフェライト鋼の RANS による中性子回折パターンを図 4 (a) に, 一般的冷延鋼板を用いて, 予変形として 20% の引張ひずみを与えた前後での内部結晶組織変化の測定結果を図 4 (b) に示す. (110) ピークは 2 倍以上増加変化を示す一方, (211) は約 5 割減少している. さらに複相鋼モデルサンプルの回折を計測し, オーステナイト相分率評価を図 4 (c) に示す⁶⁾. これは FCC と BCC 結晶が混在する鋼材サンプル全体のそれぞれの相分率評価である. 本解析により得られた相分率 $17.0 \pm 3.5\%$ は, 実際の体積分率 19.1% と誤差範囲内で一致しており, 小型中性子源が十分材料評価に利用可能であることを示している.

このように塑性変形加工前後での鉄鋼組織の変化や複相材料の相分率を材料全体バルク平均評価はパルス小型中性子源により十分可能であることを示しており, さらに高分解能化へ向けたターゲット冷却キャビティー減速材・反射材の改造による高度化を行っている.

4. 塗膜下鋼材の内部腐食と, 腐食に関与した水の動きの可視化の取り組み

理研では神戸製鋼所らとの共同研究⁷⁾により塗膜鋼材内部腐食ならびに同鋼材を水に浸潤させた後のバルク中性子イメージング, さらに腐食に関する水の定量化に取り組んでいる⁸⁾.

RANS 中性子線により評価した供試材 (神戸製鋼所) は鋼材内部腐食を有する塗膜鋼材普通鋼と防食合金鋼 (図 5 (a) (b) 中央上部写真) それぞれを水浸潤し, その直後と 2 時間エアブローで乾燥させた. 写真の鋼材中央には人工傷を起点とした鋼材内部腐食が見える. 図 5 (a) は塗膜普通鋼腐食サンプルを水に浸潤させた直後, 図 5 (b)

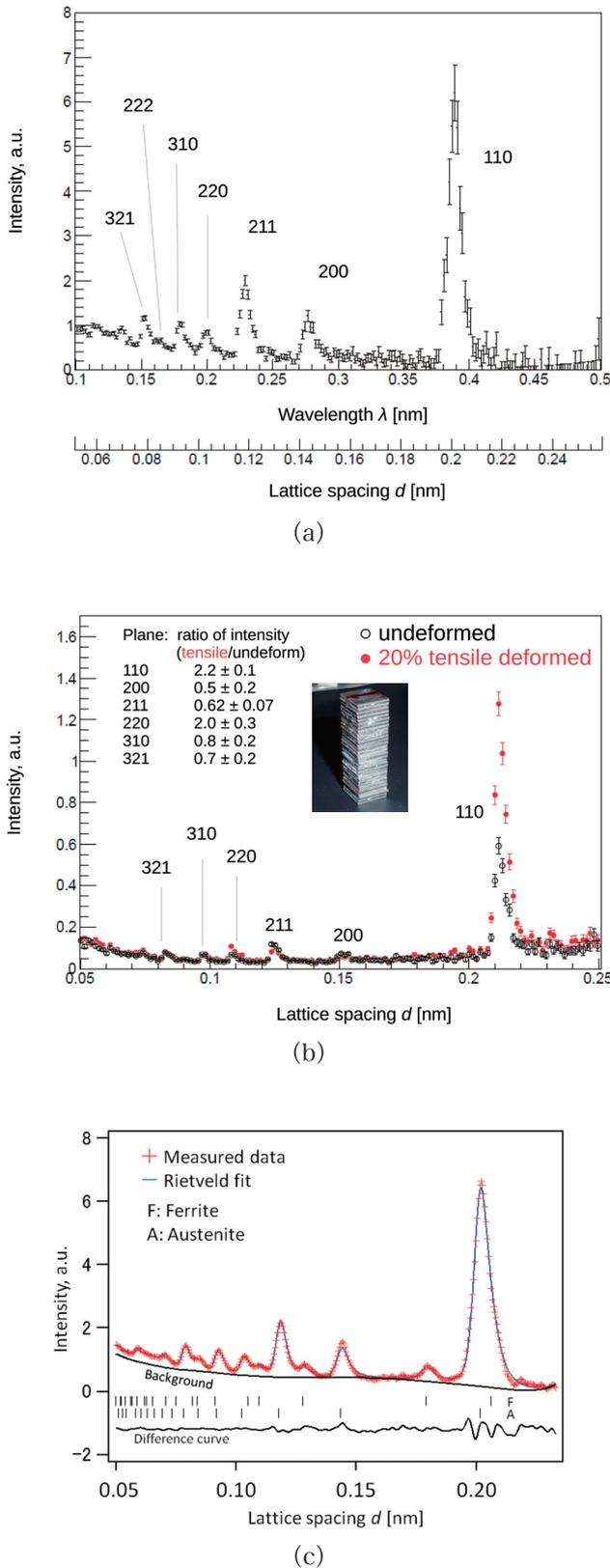


図4 理研小型中性子源システム RANS による中性子回折及び解析結果⁶⁾。(a) フェライト鋼。(b) 冷延鋼板(中央写真)変形前, 20%引張変形後, 回折パターン変化。(c) 複相鋼サンプル回折パターンと BCC, FCC 相分率解析図。

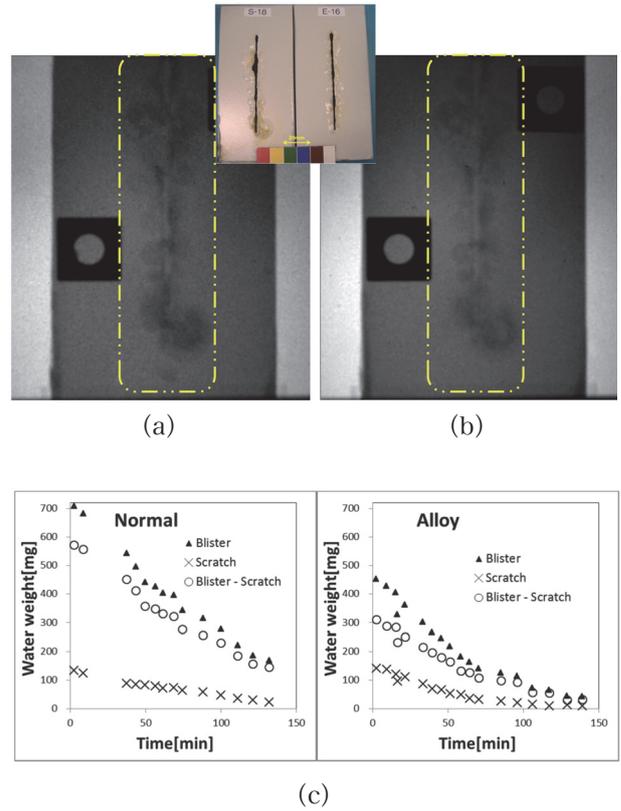


図5 塗膜鋼材内部腐食と腐食に関係する水の動きの中性子線による評価⁸⁾。(a) 塗膜普通鋼浸潤直後の中性子透過画像。(b) 同サンプルを2時間乾燥させた後の中性子透過画像。上部は塗膜普通鋼及び合金鋼写真。(c) 中性子による塗膜下水の動きの時間変化定量評価。

は室内環境乾燥状態の中性子透過画像である。中央二点鎖線で囲まれた領域内の濃く暗い部分が人工傷を起点とした腐食ならびに水の影であり、水により陰影が濃くなっていることがわかる。さらに、塗膜の破れた部分、膨れた部分に分けて画像データと2時間間の水重量の変化を比較し、合金鋼と普通鋼における、鋼材内部腐食と水の動きの違いを定量化したものが図5(c)である。合金鋼内部の水分減衰が普通鋼より早く、耐食性の証明につながる中性子線により非破壊で示された世界初の結果である。

5. インフラ非破壊観察 — 反射中性子線イメージング —

トンネル崩落事故に代表されるように、世界的に社会インフラ劣化は喫緊の課題となっているが、厚さのあるコンクリート構造物内部を非破壊で観察するには限界があり、コンクリート劣化の

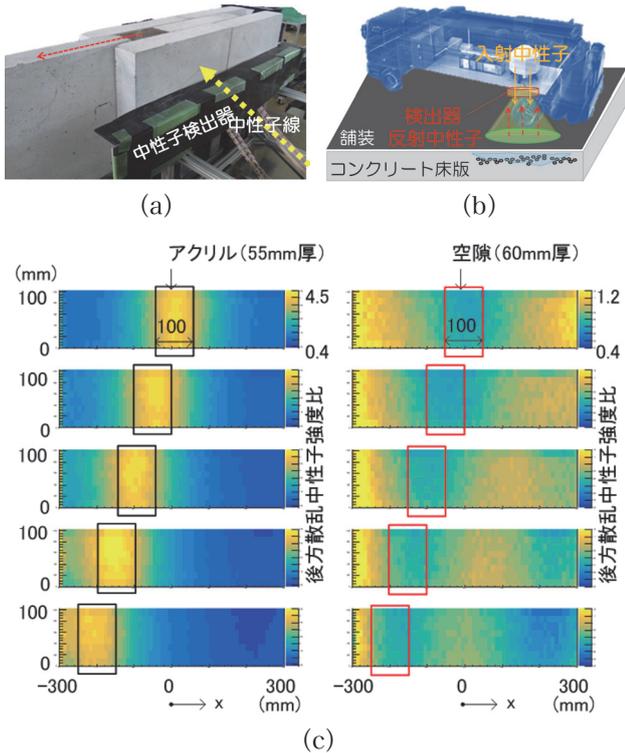


図6 反射中性子線によるコンクリート内部非破壊観察。(a) 内部に空隙，アクリルを有するコンクリート表面に検出器を設置。(b) 将来の可搬非破壊検査システムイメージ図。(c) アクリル，空隙の反射中性子画像。

大きな要因である「コンクリート内部に染み入り停滞する水」の存在を見つける技術はこれまで無かった。検出器で挟み込めない路面下や空港滑走路の劣化原因となる水や空隙を，表面から観察できる新たな技術の開発に成功した。対象となる路面や滑走路の構造は，通常3層構造になっており，表層は5 cm から 10 cm 厚のコンクリート等だが中間層が劣化し，陥没事故や崩落事故につながる。

図6 (b) は将来の非破壊検査システムイメージであり，路面上から高速中性子線を入射し反射中性子線を TOF 検出するシステムである。図6 (a) が実証実験の様子。数十センチ厚コンクリート表面に位置する検出器は，背後から入射した中性子線の後方散乱により図6 (c) に示すように内部の水の位置，空隙の位置のイメージング画像を得る⁹⁾。

以上，理研小型中性子源システム RANS の最新の取り組みを中心に紹介した。中性子源のみの開発ではなく，ニーズに即した線源と計測手法の開発が重要であり，まだまだ応用先は広がっていくと期待されている。

6. 謝 辞

この研究の一部は，文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」，日本鉄鋼協会研究会1「小型中性子源による鉄鋼組織解析法」(2014-2016)，SPS KAKENHI Grant Numbers 25289265，Grant Numbers 25420078，総合科学技術・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)「異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発」によって実施されました。

参考文献

- 1) 小松原道郎，“中性子線での宝の山巡り—鉄鋼業界から期待—”，波紋，19 (2009) pp.246-250.
- 2) Y. Otake (as a partial author), M. Uesaka, H. Kobayashi, “Compact Neutron Sources for Energy and Security”, Reviews of Accelerator-Science and Technology ‘Accelerator Applications in Energy and Security’ Vol. 08 (2015) pp.196-198.
- 3) Y. Kiyonagi, “Experimental studies on neutronic performance of various cold-neutron moderators for the pulsed neutron sources”, Nucl. Instr. Meth. A 562 (2006) pp.561-564.
- 4) Y. Yamagata, K. Hirota, J. Ju, S. Wang, S. Morita, J. Kato, Y. Otake, A. Taketani, Y. Seki, M. Yamada, H. Ota, U. Bautista and Q. Jia, “Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams”, J. Radioanal. Nucl. Chem. Vol. 305, 3 (2015) p.787.
- 5) Y. Wakabayashi, A. Taketani, Y. Ikeda, T. Hashiguchi, T. Kobayashi, S. Wang, M. 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”, JAEA-Conf 2016-004, p.135.
- 6) Y. Ikeda, et al., “Prospect for application of compact accelerator-based neutron source to neutron engineering diffraction”, Nucl. Instr. Meth. A 833 (2016) pp.61-67.
- 7) 日本鉄鋼協会 評価・分析・解析部会 1型研究会「コンパクト中性子源を利用した新鉄鋼組織解析法FS」(H 25年度)，同研究会I「小型中性子源による鉄鋼組織解析法」(大竹淑恵主査，H 26-28年度)。
- 8) A. Taketani, et al., “Visualization of water in corroded region of painted steels at a compact neutron source”, ISIJ International Vol. 57, No. 1 (2017).
- 9) 池田義雅，大竹淑恵，柳町信三，橋口孝夫，水田真紀，“小型中性子源による床版内部の水・空隙非破壊観察技術”，土木学会第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集 (2016) pp.93-98.