

日本の小型加速器中性子源施設 —中性子イメージング利用を中心に—

中性子科学の世界では、J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) に大型加速器中性子源施設 JSNS (Japan Spallation Neutron Source) が稼働を始め、新しい時代が始まった。その一方で、小型加速器中性子源は萌芽的研究やデバイス開発、小回りの利く測定などで大きな役割を果たしてきた。中性子をより有効に社会に役に立つようにするためには、身近で色々なことに使用できる小型中性子源が極めて重要である。このような背景の下、小型加速器を用いた中性子源が、日本で最近2施設建設されている。これらの施設の大きな柱の1つはイメージングであり、この2施設を含め研究所、大学に設置されている小型加速器中性子源施設の現状について紹介する。

(北海道大学工学研究院 鬼柳善明)

北大電子加速器中性子源 HUNS



鬼柳 善明
Kiyonagi Yoshiaki



木野 幸一
Kino Koichi

(北海道大学工学研究院)

1 加速器施設の特徴

北海道大学加速器中性子源 HUNS (Hokkaido University Neutron Source) は、“瞬間強力パルス状放射線発生装置研究室”の電子加速器に附置されている。この加速器は、1973年に完成したもので、以来40年間、中性子のみならずパルスラジオリシス(時間幅が非常に短いパルス状の放射線を物質に照射し、その後に物質中で生じる高速物理化学現象を分光により調べる方法)や照射など広い分野の実験に使用されて

きた。中性子科学の分野では、建設の当初から冷中性子(エネルギーの低い中性子)発生のための中性子減速材研究を進め、高性能のメタン減速材の開発に成功し、加速器中性子源として初めて冷中性子源が附置された施設となった。図1に加速器室の様子を示す。電子ビームの取り出し口は3か所あり、センターでは主として熱中性子実験とパルスラジオリシスあるいは照射実験などが行われている。レフトでは高速中性子実験が行われてきた。そこには、左側に20mの飛行路がある。ライトは冷中性子源が設置されており、冷中性子実験専用ポートとな

* 中性子応用専門委員会

っている。この加速器室の隣に中性子実験室があり、10 m 以上の飛行路長が取れる。

加速器及び中性子源の性能を表 1 に示す。最大加速エネルギーは 45 MeV であり、電子パル

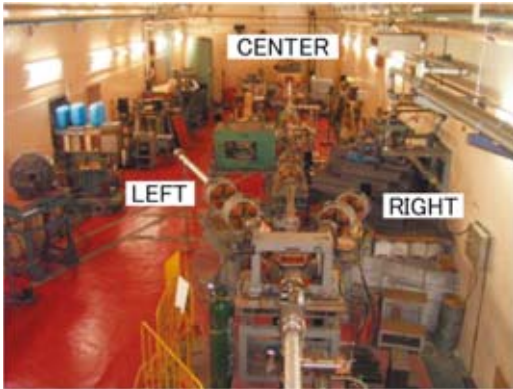


図 1 加速器室内の電子ビーム取り出しポート

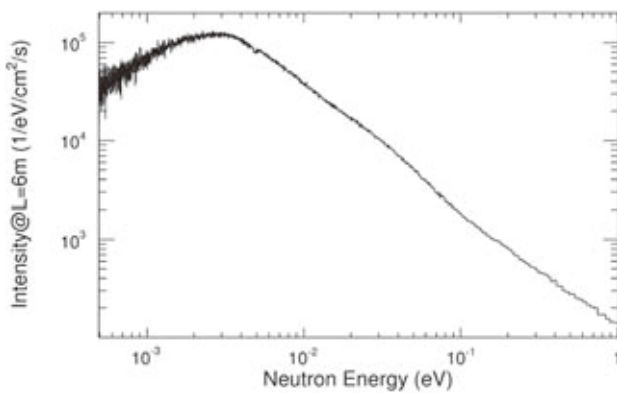


図 2 エネルギースペクトルの例

表 1 加速器と中性子源の特性

電子線形加速器の特性	
RF	s-band
最高エネルギー	45 MeV
最大電流	140 μ A
繰り返し	シングル~200 Hz
パルス幅	10 ns~3 μ s
中性子源の特性	
発生中性子強度	1.6×10^{12} n/s (35 MeV, 1 kW)
冷中性子強度 (5 meV 以下)	3.1×10^3 n/s/cm ² /kW (飛行距離 7 m)

ス幅は 10 ns から 3 μ s まで変えることができる。また、電子パルスの繰返しは、1 発ずつ任意に撃てるシングルから毎秒 200 パルスまで、任意に設定できる。現在は、毎秒 50 パルスまでの運転を行っている。中性子発生は 35 MeV の電子エネルギーで鉛をターゲットとした場合、加速器パワー 1 kW で毎秒 1.6×10^{12} 個の中性子が発生する。

メタン減速材からの中性子のエネルギースペクトルを図 2 に示す。

2 応用研究

北大では冷中性子源開発において世界をリードする研究を行ってきた。結合型液体水素減速材は、ハイパワー中性子源における最高効率の冷中性子減速材であり、イギリスやアメリカの中・大型加速器中性子源で使用され、ヨーロッパの将来計画でも採用が検討されている。中性子デバイス開発として、磁場による集束に世界で初めて成功、また、検出器の開発などにも使われてきた。イメージング関係では、特にパルス中性子源の特徴である飛行時間で中性子のエネルギーを決定する飛行時間法と 2 次元検出器を組み合わせ、物質の透過エネルギースペクトルを得、その解析から結晶組織構造や磁場情報などを 2 次元空間でマッピング (画像化) する手法を開発している。結晶構造、結晶子サイズ、選択配向、歪などの情報が得られる。図 3 に

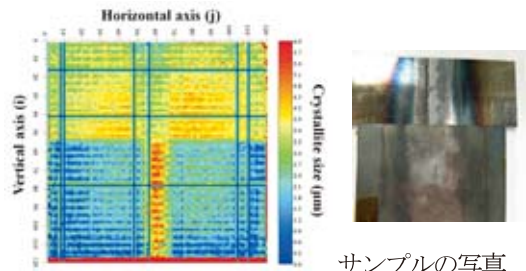


図 3 溶接鉄の結晶子サイズの空間分布

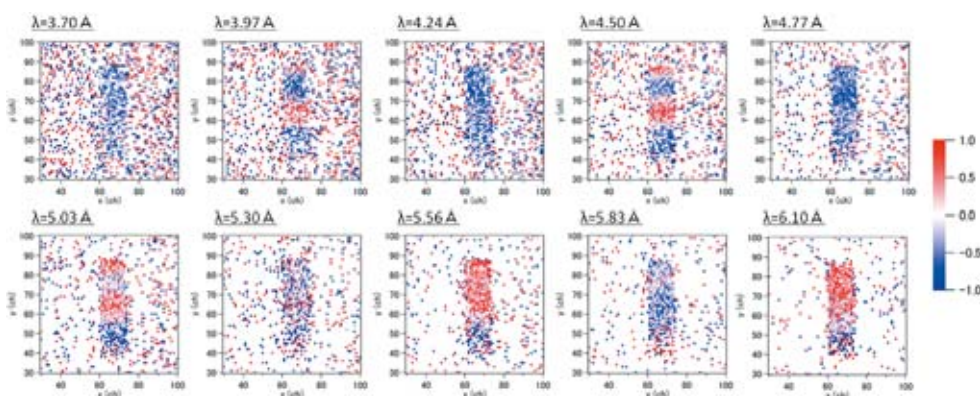


図4 コイル磁場による中性子偏極率分布

一例として中心部を溶接した2つの鉄サンプル(右側写真の上:高炭素鋼,下:鉄)の結晶子サイズの大きさ分布を示す。この例では,二試料の中央溶接部で,上のサンプルは結晶子サイズが小さく,下では大きくなっているのが分かる。縦横の青い直線はデッドピクセルである。

中性子は磁気モーメントを持っており,空間磁場,物質内磁場と相互作用する。それを解析することによって磁場の強さ,向きの分布が得

られる。図4にコイル磁場による波長の違う中性子の偏極率分布を示す。中央のコイル部で偏極率分布が波長で変化しており,これから磁場情報が得られる。

3 まとめ

北大は加速器が長期に有効に使える好例である。イメージングだけでなく,新しい分野でも成果が期待できる施設である。

京大陽子加速器中性子源 KUANS



田崎 誠司
Tasaki Seiji

(京都大学大学院工学研究科)



永江 知文
Nagae Tomohumi

(京都大学大学院理学研究科)

京都大学理学部では,これまで使用してきたタンデム・バンデグラーフ加速器実験施設にお

いて,小型陽子加速器を利用した小型中性子源の開発を行ってきている。この加速器施設は図

1に示されるように加速器本体室と測定器室からなり、その測定器室部分に新たに小型中性子源を設置したものである。

小型陽子加速器としては、加速エネルギー 3.5 MeV の陽子リニアック ((株)日立ハイテクノロジーズ; 米国 AccSys 社製) を導入した。全長約 3.7 m であり、ビームパルス幅 30~120 μ s, ビーム繰り返し 20~120 Hz, 定格平均ビーム電流 100 μ A である。中性子の発生には ${}^9\text{Be}(p, n)$ 反応を用いる。標的は 50 μ m 厚の Be であり Nb のバックングを通じて水冷されている。図 2 に、標的周りの設置途中段階の様子を示す。Be 標的の後ろに置いた減速材には、10 \times 10 \times 10 cm^3 のポリエチレン・ブロック (図中白色部)、これを取り囲む反射材には、グラファイト・ブロック (図中黒色部) を積んで 40 \times 35 \times 30 cm^3 の体積を覆っている。

陽子ビームから見て 90 度右方向に 10 \times 10 cm^2 の穴をグラファイト・ブロック (50 cm 長さまで) とホウ素入りポリエチレン・ブロック (図中丸印部分) により形成し、約 1.2 m 先に熱中性子を導いている (図 3)。

小型中性子源の運転中は、中性子測定室に立ち入ることはできない。陽子リニアックの制御も制御計測室からネットワークを介して行っている。

利用できる中性子検出器は、 ${}^3\text{He}$ ガスカウンター及び中性子簡易モニター (HeM 及び LiM (株) 日本中性子光学), ZnS シンチレータ + PSPMT (浜松ホトニクス(株)), これにデータ読み出し系を加えて RPMT と呼ぶ) があり、実験によって適した検出器を選ぶことができる。

図 4 に飛行距離 1.24 m の位置で LiM によって測定した中性子飛行時間スペクトルを示す。飛行時間 600 μ s 付近のピークは熱中性子による Maxwell ピークであり、100 μ s 付近のピー

理学部5号館北棟(旧タンデム加速器実験棟)



図 1 京大小型中性子源の設置図

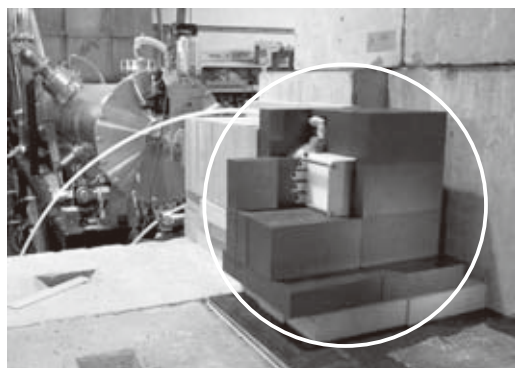


図 2 中性子発生標的と減速材、反射材部分

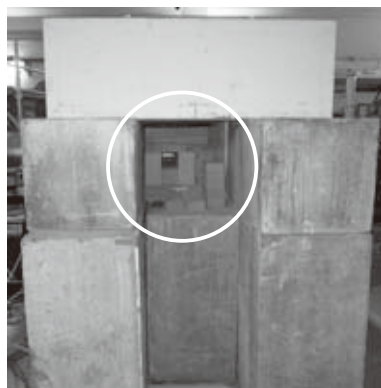


図 3 熱中性子取り出し部分

クはあまり減速されていない高速中性子の成分である。LiM で使ったガラスシンチレータは

0.3 mm と薄く高速成分中性子に対する感度が低いため、100 μs 付近のピークが比較的低くなっている。

KUANS ではプロトンビーム電流をモニター

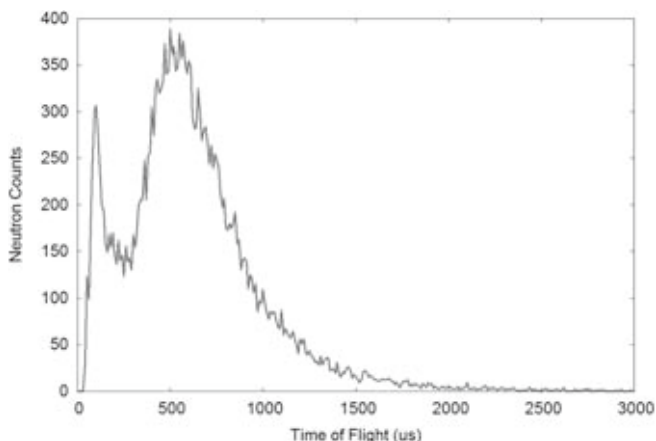


図4 典型的な KUANS の中性子スペクトル

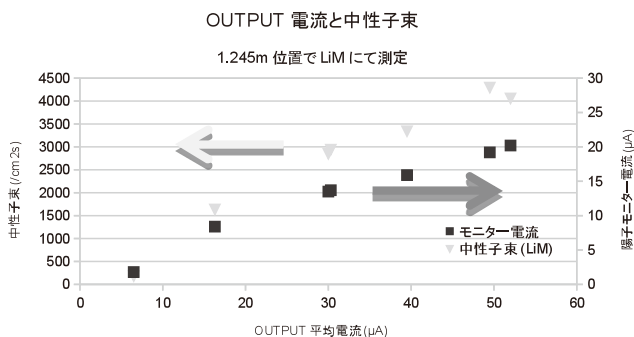


図5 RFQ Output 電流に対するモニター電流及び熱・冷中性子強度の関係

するために、陽子リニアックに備えられている RFQ Output Monitor 以外にターゲット系に導線をつなぎ、そこに流れる電流値（モニター電流）を測定している。RFQ Output 電流を変化させたときの熱・冷中性子束とモニター電流の関係を図5に示す。

検出器は LiM で、飛行距離は 1.24 m である。LiM の場合、中性子計数を 20 倍すると中性子束になることから、中性子束を導出した。この結果によると、RFQ Output 電流とモニター電流は値は一致しないものの、線形に対応しており、また、中性子フラックスも電流に従って増えることが分かる。

図6に RPMT を使って中性子の波長別のラジオグラフィを測定した結果を示す。被写体は簡易発電機を内蔵したハンディタイプの懐中電灯であり、RFQ Output の平均電流値で 50 μA で、700 秒測定した結果である。画像の向かって左には厚さ 1 mm の Cd 遮蔽体を貼ってあるが、図6の一番左の高速中性子のラジオグラフィでは写っていない。また、像のコントラストも中性子の波長が長くなるほどはっきりしてきていることが分かる。

現在、KUANS の利用のために、中性子反射率計などを設計している。

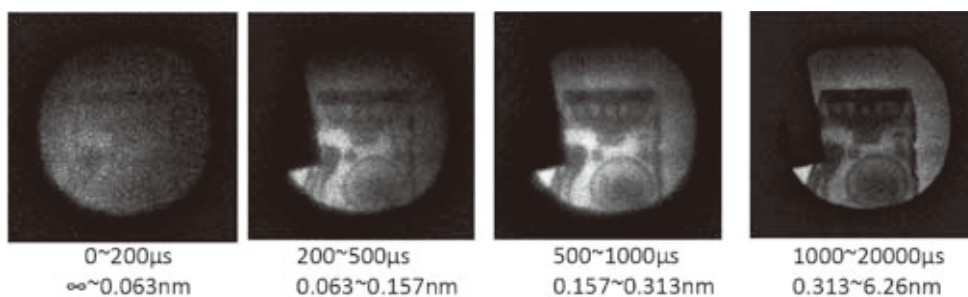


図6 KUANS で測定した波長別の中性子ラジオグラフィ
数値は上段が TOF チャンネルで、下段が中性子の波長域である

理研陽子加速器中性子源 RANS



広田 克也
Hirota Katsuya
(名古屋大学理学研究科)



大竹 淑恵
Otake Yoshie
(独)理化学研究所)



山形 豊
Yamagata Yutaka
(独)理化学研究所)



王 盛
Wang Sheng
(独)理化学研究所)

1 はじめに

中性子線は電氣的に中性であるために物質に対する透過力が強く、X線と比較しても多くの利点を持つことが知られている。理化学研究所では平成20年頃より、放射線測定を専門とする物理系研究室と機械加工での精密測定を行う工学系研究室が連携して非破壊検査測定の一部としての中性子ラジオグラフィの評価を行ってきた。

過去においては1970~80年代にかけて国内の10前後の施設で加速器や研究用小型原子炉を利用した中性子イメージング測定が行われており、産業利用への取り組みも進められてきたが、残念ながら当時は中性子検出媒体としてフィルムが使われていたために検出効率が悪く長時間露光の必要があり、利用範囲が限定されて産業界に普及するまでには至らなかった。その後こうした研究用原子炉や加速器施設の多くは閉鎖され、学術的研究のための中性子イメージングが主流となって産業界ではロケットや航空機部品検査などのごく限られた利用となっていた。

近年になってデジタルカメラなどの光撮像素子が急激に発達した結果こうした状況を覆すことが可能なほどになってきている。かつてフィルムやイメージングプレートを利用して数十分かけて撮影していたものが、高感度CCDを利用すると1分前後で同等の画像が得られるよう

になり、ノイズフィルターによる画像の明瞭化、CTによる3次元再構成などの技術も進んできた。こうした技術発展をうまく利用して中性子イメージングの産業利用を再度検討してみるのが理研の取り組みである。

産業界の技術者の方々とも多くの議論を行い、実際に多くのイメージング画像を取得した結果、大強度中性子源で行うような精密測定や動画測定は難しいが、小型中性子源でも最新の検出器や光学素子と組み合わせることで、十分利用可能であることが確認された。そこでその実証試験として小型中性子源RANS (Riken Accelerator-driven compact Neutron Source) を建設し評価することとなった。

2 RANS 建設

建設は大きく2つのフェーズに分けた。第1フェーズでは熱中性子ビームラインを作製することとし、極力開発要素を減らすことでプロジェクト開始から中性子ビーム発生までの時間を短縮化し、実証試験に短期間で取り組めるように心掛けた。この熱中性子ビームラインでは中性子イメージングが主目的となる。第2フェーズでは開発要素が含まれる冷中性子ビームラインを作製し、小角散乱などの測定を目指している。建設作業は順調に進み2013年1月に熱中性子ビームの発生が確認され、現在中性子イメージングの測定や、企業との共同研究による測

定が進んでいる。

RANS では商用の陽子線形加速器（日立 Accsys 社製 PL-7）を用いて陽子ビームを 7 MeV まで加速させ ${}^9\text{Be}(p, n)$ 反応により中性子を発生させる。PL-7 では陽子の平均電流が最大 100 μA であり、その際に発生する総中性子量は 10^{12} n/秒程度と見積もられる。発生した中性子はポリエチレンブロックを利用した減速体で熱中性子ビームとして

取り出される。中性子発生ターゲットから約 5 m 下流にカメラボックスを設置して中性子の測定を行っている。カメラボックスには冷却 CCD を用いたイメージング測定器を常設して利用している。この冷却 CCD ではパルス中性子の飛行時間（TOF）測定は不可能なため、中性子波長の違いによる画像を見たい場合には光電子増倍管とシンチレーターを組み合わせた 2 次元検出器を用いて TOF 測定を行いながら 2 次元画像を取得している。またビーム強度測定用として ${}^3\text{He}$ ガス検出器やシンチレーターを利用したビームモニター検出器なども導入しており、測定によって検出器の使い分けが可能なる環境を構築しつつある。図 1, 2 に RANS の全体図及び全景写真を示す。両者とも手前左側にカメラボックス、右奥側に加速器の配置となっている。中性子発生ターゲット部で最も放射線が発生するのでその部分の遮蔽が大きくなっている。

3 中性子測定

理研での小型中性子源を利用した活動は平成 25 年度より光量子工学研究領域において光量子技術基盤開発グループ中性子ビーム技術開発チームが発足し、大竹淑恵チームリーダーの下、単に中性子の利用を進めるだけでなくレーザーやテラヘルツ光測定など、ほかの測定手法

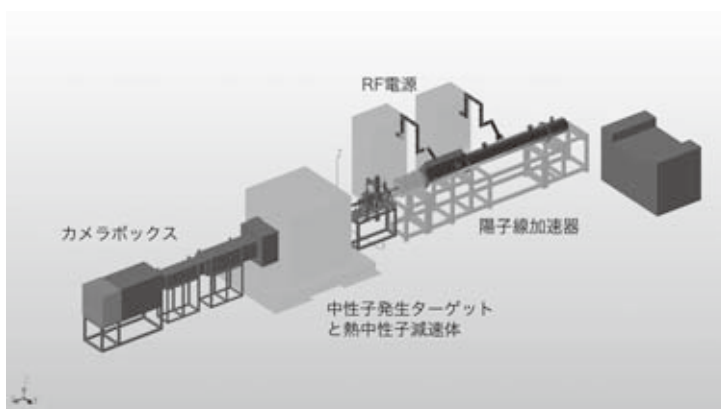


図 1 3D-CAD による RANS 全体図



図 2 RANS 全景写真

とも連携しながらの研究開発を進めることが可能となる体制ができ上がった。こうした活動の中での企業と連携した測定として、塗膜下腐食並びに水の出入りの様子を世界で初めて非破壊で測定することに成功するなどの成果も既に出始めている。

4 まとめと今後の展開

RANS はまだ第 1 フェーズの建設が終わったところであり、今後も第 2 フェーズの建設を進めつつ同時に大学や企業と協力しながらの測定を進めていく予定である。

中性子線は、X 線と比較してみても様々な利点を持っているが、現在まで広範囲に利用され

るような状況ではなかった。理研で構築を進めている小型中性子源 RANS はこうした現状を打破するよい例題となるべくプロジェクトを進めている。このような小型中性子源が普及すれ

ば、大規模研究機関だけでなく、大学、企業、公設試などでも中性子利用が展開可能となり、これを用いた産業利用、教育、学術研究の推進に貢献するものと期待している。

京大原子炉実験所電子加速器中性子源



堀 順一

Hori Jun-ichi

(京都大学原子炉実験所)



佐野 忠史

Sano Tadahisa

(京都大学原子炉実験所)



高橋 佳之

Takahashi Yoshiyuki

(京都大学原子炉実験所)

京都大学原子炉実験所電子ライナックは、原子炉中性子源と対照的かつ相補的なパルス状中性子源として、1965年に建設された米国 ARCO 社製 L-1512G 型電子線型加速器である。本装置は、2本の進行波型加速管を持ち、Lバンド (1.3 GHz) の大電力マイクロ波で電子を加速する装置である。最大加速エネルギーは 46 MeV、最高出力は 6 kW であり、汎用小型ライナックとしては国内最高レベルの大電流が得られる。本装置はパルス幅によって2つの運転モードを選択できる。1つはパルス幅が 0.1~4.5 μ s のロングモードであり、大電流を必要とする実験に用いられる。もう1つはパルス幅 2~100 ns のショートモードであり、微細なパルス構造を必要とする実験に用いられる。繰り返し周波数はロングモードで最大 100 Hz、ショートモードで最大 300 Hz まで選択できる。加速した電子ビームは水冷式タンタルターゲットに照射することにより、ターゲット内で生じる制動 X 線を用いて光中性子を発生させる。タ

ーゲットから発生する中性子は蒸発スペクトルを持った高速中性子であるが、ターゲット周りに様々な形状の減速材を配置することにより、熱~MeV 領域までの白色中性子 (連続的な中性子スペクトル) を得ることができる。一例としてターゲットと軽水減速材を設置した様子を図 1 に示す。建屋の配置を図 2 に示す。電子ビーム入射方向に対して 90° と 135° 方向には中性



図 1 中性子発生ターゲットと軽水減速材の様子

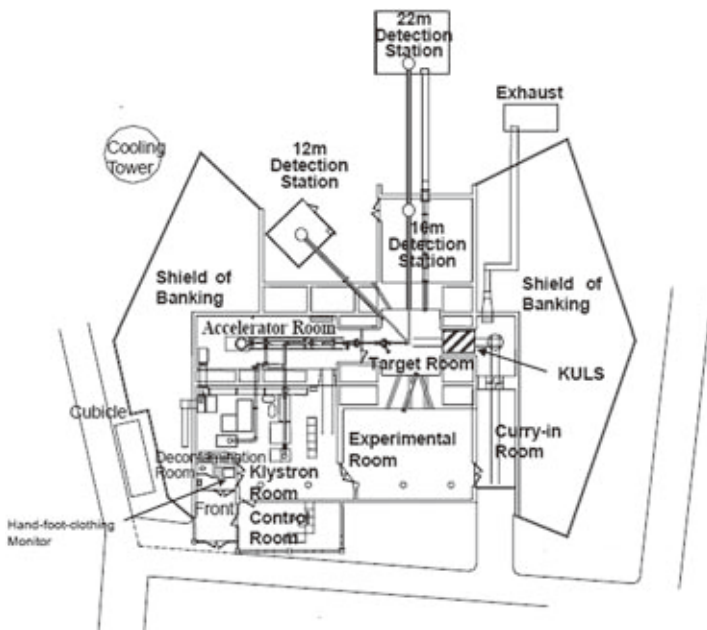


図2 京大炉ライナック建屋の配置図

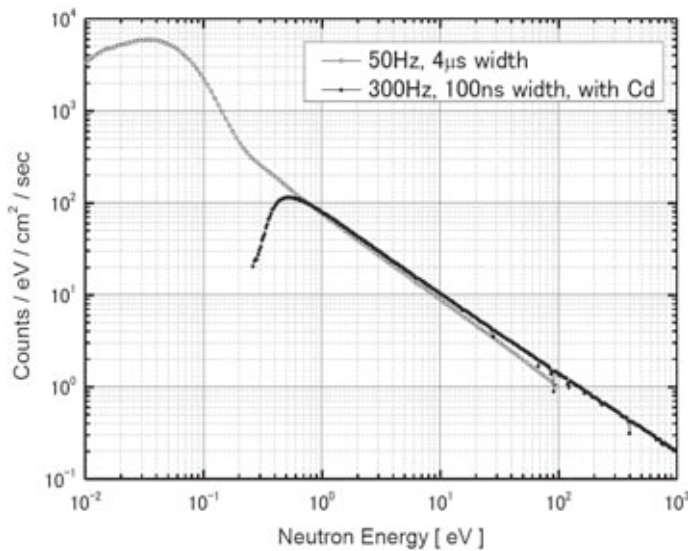


図3 ロングモード、ショートモード運転における中性子フラックス分布の比較

子飛行時間 (TOF) 分析用ビームラインが設けられている。中性子飛行距離 10, 12, 22 m の位置には3つの測定室があり、TOF実験のための検出器を設置できる。飛行距離 12.7 m の

位置で測定した典型的な中性子フラックス分布を図3に示す。ロングモード運転では低エネルギー中性子のオーバーラップを抑制するために周波数を 50 Hz とし、ショートモード運転では周波数を 300 Hz にする代わりにオーバーラップフィルターとして厚さ 0.5 mm の Cd 板を挿入した。パルス幅を狭くしたショートモード運転においても、パルス当たりのピーク電流値及び繰り返し周波数を増加させることによって、熱外中性子領域ではロングモード運転の場合と同等のフラックスが得られていることが図3より分かる。このことは、熱外領域の共鳴イメージングに適した中性子場を高い時間分解能で提供できることを示している。また、本施設では核燃料物質や放射性同位元素を使用することができる。

本施設のこれらの特長を生かし、最近では福島第一原子力発電所の溶融燃料分析や核セキュリティのための核物質検認を目的として、核種固有の共鳴吸収を利用した核種識別型中性子イメージングに向けた研究に着手している。本稿では京大炉ライナックで初めて行った中性子イメージング実験の概要を紹介する。透過中性子を可視化する装置としては、(株)東芝製中性子カラー I.I. (イメージインテンシファイア)^{1,2)}を用いた。入力反応面は、炭化濃縮ホウ素 ($^{10}\text{B}_4\text{C}$) をアルミニウム基板に蒸着し、更にその上にヨウ化セシウム (CsI) を形成している。また、出力蛍光面には残光時

間の短い(約 $5 \mu\text{s}$) 珪酸イットリウム (Y_2SiO_5) を用い、共鳴エネルギーに相当する短い時間幅



図4 測定室に設置した中性子 I.I. の様子

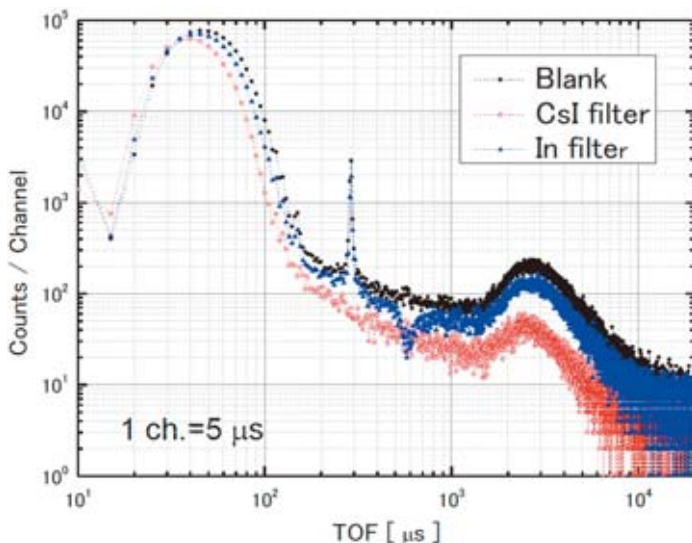


図5 中性子カラー I.I. からの PMT 出力の TOF スペクトル

に対して高速でスイッチング(又はブランキング)撮影が可能である。中性子カラー I.I. は中性子飛行距離 10 m のビーム軸上に設置した。装置を設置した様子を図4に示す。中性子カラー I.I. の撮像カメラ部分を光電子増倍管に付け変えることにより、TOF測定を行った。測定は検出器前面に何も置かない場合、In 箔、CsI を置いた場合の3通りについてロングモード運転で30分ずつ行った。TOFスペクトルを図5に示す。200 μs 以下に見られる盛り上がりは制動X線によるものと思われる。290 μs 付近には発光体であるCsI中の ^{133}Cs の5.86 eV共鳴によるピーク、570 μs 付近には ^{115}In の1.457 eV共鳴による谷間が観測された。今回はピクセル当たりの中性子数が少なかったため、共鳴吸収イメージングの鮮明な画像は得られなかったが、撮像に必要な中性子フラックスを定量的に評価することができた。今後は飛行距離5 mのビームラインを増設し、減速材を最適化することによって中性子フラックスの増強を図る予定である。

参考文献

- 1) Nittoh, K., Konagai, C., Noji, T., and Miyabe, K., *Nucl. Instrum. Meth.*, **A605**, 107-110 (2009)
- 2) 日塔光一, 日本中性子科学会誌「波紋」, **22**(4), 322-328 (2012)