

FEASIBILITY ASSESSMENT OF 3D NEUTRON FLUX RECONSTRUCTION FOR REACTOR PHYSICS AND RADIATION PROTECTION IN A GRAPHITE-MODERATED SUBCRITICAL ASSEMBLY CORE USING MULTI-MATERIAL SCINTILLATOR ARRAYS AND GEANT4

Ann Drakes
Ontario Tech University
Oshawa, Ontario
Program of Study: Masters in Nuclear Engineering

Co-Author
Kirk D. Atkinson, PhD
Professor, Ontario Tech University

Introduction

Neutrons exhibit energy dependent interactions that govern reactor physics, radiation transport, and neutron-induced reaction rates. Reactor neutron spectra includes fast fission energies to thermalized distributions shaped by scattering, moderation and absorption. Accurate spatial and energy characterization is essential for reactor design, neutronics model validation and radiation protection.

In subcritical assemblies, the neutron population is maintained by an external source, and spatial flux shapes depend strongly on source placement, fuel geometry, and moderator configuration. Measuring spatial flux distributions is therefore critical for validating Monte Carlo models, assessing subcritical multiplication, supporting reactor physics research and improving dose assessment and shielding evaluation.

Recent miniature scintillator-based detector systems demonstrate that compact arrays can provide high-resolution spatial flux mapping in strongly moderated environments with minimal core disruption. However, detector integration is limited by narrow moderator channels. Commonly used $^6\text{LiF:ZnS(Ag)}$ scintillators provide high thermal sensitivity but limited fast neutron response. This work addresses the need for an integrated, full-spectrum, spatially distributed neutron detection system for subcritical assembly research and radiation protection.

Methods

Simulations were performed using GEANT4 (GEometry AND Tracking), a Monte Carlo-based toolkit developed at CERN, to optimize detector geometry and assess feasibility for three-dimensional neutron flux mapping. GEANT4 was used to model nuclear interactions and optical photon transport, including scintillation light generation and SiPM detection thresholds. Detector configurations followed a lattice distribution to enable reconstruction of spatial flux profiles. The physics lists selected were QGSP_BIC_HP for High Precision

neutron transport below 20 MeV and optical physics for realistic scintillation photon modeling, including light yield, surface interactions and WLS fiber coupling.

The reactor core geometry was modeled using parameters from the proposed Ontario Tech University subcritical assembly. A 15×15 array of graphite column moderators with cutouts for fuel or control rods was constructed, with seventeen aluminum-clad natural uranium fuel rods placed in the central region. Narrow channels along each moderator face formed continuous pathways for WLS fibers and scintillators, with two thermal and two fast detectors positioned at varying axial locations to form an optimized neutron flux detection array.

For compact detector geometries, material selection is critical for effective fast neutron detection. Three scintillators were modeled; a moderated thermal detector (HDPE + $^6\text{LiF}:\text{ZnS}(\text{Ag})$) and two standalone fast neutron scintillators (EJ-276 and CLYC). Scintillators were directly coupled to SiPM output in simulation, while in practice WLS fibers would guide scintillation light to the photosensor.

Results

Detection efficiency and response to both thermal and fast neutrons were analyzed using GEANT4 Monte Carlo simulation, forming the basis for a three-dimensional neutron flux mapping system for graphite-moderated subcritical reactors. Deposited energy in each scintillator was converted to detectable light using material specific light output, optical transport efficiency, and SiPM photon detection efficiency, which directly linked neutron interactions to measurable signals.

Distinct spectral and pulse-height responses were observed for the evaluated scintillators. EJ-276 exhibited a broad fast neutron response dominated by neutron-proton elastic scattering, while CLYC showed pronounced energy dependent features extending to approximately 8 MeV, due to interaction channels such as $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{p})$. Thermal scintillators based on $^6\text{LiF}:\text{ZnS}$ displayed narrow capture peaks near 1.5-1.8 MeV, with HDPE + $^6\text{LiF}:\text{ZnS}$ showing slightly broader distributions due to minor elastic scattering contributions. EJ-276 produced a continuous recoil spectrum with comparatively low light yield, while CLYC demonstrated the broadest fast neutron sensitivity and highest count rate.

Reconstructed thermal and fast neutron flux distributions exhibited complementary spatial behavior. Fast neutrons showed a smooth centrally peaked distribution within the moderator array, while thermal neutrons exhibited localized maxima and greater spatial variation due to sensitivity to thermalization and lower capture rates in thin $^6\text{LiF}:\text{ZnS}$ screens. Together, these results demonstrate that the detector array captures both global and local flux features within a subcritical assembly.

Conclusion

This study evaluated compact scintillator neutron detectors for reconstructing flux distributions within a graphite-moderated subcritical assembly. GEANT4 simulations showed that detector material strongly governs energy sensitivity and scintillation behavior. The thermal detector $^6\text{LiF:ZnS}$ produced the expected $^6\text{Li}(n,\alpha)t$ capture signature, while EJ-276 provided fast neutron sensitivity through neutron-proton recoil with limited resolution. CLYC demonstrated the most effective dual energy performance, exhibiting clear thermal capture peaks and strong MeV-scale features from $^{35}\text{Cl}(n,p)$ interactions. These results confirm that a combined thermal and fast detector lattice incorporating $^6\text{LiF:ZnS}$ and CLYC is well suited for three-dimensional flux mapping and spectral characterization in subcritical assemblies.

Future work will incorporate pulse-shape timing to enable neutron-gamma discrimination and refine detector placement for improved energy coverage. Experimental work will include constructing WLS fiber-coupled SiPM prototypes for deployment within the proposed subcritical assembly.

ÉVALUATION DE LA FAISABILITÉ DE LA RECONSTRUCTION DU FLUX NEUTRONIQUE EN 3D POUR LA PHYSIQUE DES RÉACTEURS ET LA RADIOPROTECTION DANS LE CŒUR D'UN ASSEMBLAGE SOUS-CRITIQUE MODÉRÉ AU GRAPHITE À L'AIDE DE RÉSEAUX DE SCINTILLATEURS À MATÉRIAUX MULTIPLES ET GEANT4

Ann Drakes
Université Ontario Tech
Oshawa, Ontario
Programme d'études : Maîtrise en génie nucléaire

Co-auteur
Kirk D. Atkinson, Ph. D.
Professeur, Université Ontario Tech

Introduction

Les neutrons démontrent des interactions dépendantes de l'énergie qui régissent la physique des réacteurs, le transport des rayonnements et les vitesses de réaction induites par les neutrons. Les spectres neutroniques des réacteurs comprennent des énergies de fission rapides jusqu'à des distributions thermiques façonnées par la diffusion, la modération et l'absorption. Une caractérisation spatiale et énergétique est essentielle pour la conception du réacteur, la validation du modèle neutronique et la radioprotection.

Dans les assemblages sous-critiques, la population neutronique est maintenue par une source externe et les formes spatiales du flux dépendent fortement de l'emplacement de la source, de la géométrie du combustible et de la configuration du modérateur. La mesure des distributions spatiales du flux est donc essentielle pour valider les modèles Monte-Carlo, évaluer la multiplication sous-critique, soutenir la recherche en physique des réacteurs et améliorer l'évaluation des doses et du blindage.

De récents systèmes de détection miniatures basés sur les scintillateurs démontrent que les réseaux compacts peuvent fournir une cartographie spatiale du flux à haute résolution dans des environnements fortement modérés, avec une perturbation minimale du cœur. Cependant, l'intégration du détecteur est limitée par l'étroitesse des canaux du modérateur. Les scintillateurs ${}^6\text{LiF:ZnS(Ag)}$ couramment utilisés offrent une sensibilité thermique élevée, mais une réponse limitée aux neutrons rapides. Ces travaux répondent aux besoins d'un système de détection des neutrons intégré, à large spectre et réparti dans l'espace pour la recherche sur un assemblage sous-critique et la radioprotection.

Méthodes

Des simulations ont été effectuées à l'aide de GEANT4 (GEometry ANd Tracking), une boîte à outils basée sur la méthode de Monte-Carlo développée au CERN afin d'optimiser la géométrie du détecteur et évaluer la faisabilité d'une cartographie tridimensionnelle du

flux de neutrons. GEANT4 a été utilisé pour modéliser les interactions nucléaires et le transport des photons optiques, y compris la génération de lumière de scintillation et les seuils de détection des SiPM (photomultiplicateurs au silicium). Les configurations des détecteurs suivaient une distribution en réseau afin de permettre la reconstruction des profils de flux spatiaux. Les listes des paramètres physiques sélectionnés étaient QGSP_BIC_HP pour le transport des neutrons de haute précision sous 20 MeV et la physique optique pour la modélisation réaliste des photons de scintillation, incluant le rendement lumineux, les interactions de surface et le couplage de fibres à décalage de longueur d'onde.

La géométrie du cœur du réacteur a été modélisée en utilisant les paramètres de l'assemblage sous-critique proposé à l'Université Ontario Tech. Un réseau de 15×15 modérateurs à colonnes de graphite, comportant des découpes pour des tiges de combustible ou de contrôle, a été construit avec dix-sept tiges de combustible d'uranium naturel gainées d'aluminium placées dans la région centrale. Des canaux étroits le long de chaque face du modérateur formaient des voies continues pour les fibres à décalage de longueur d'onde et les scintillateurs, avec deux détecteurs thermiques et deux détecteurs rapides positionnés à différents emplacements axiaux afin de former un réseau optimisé de détection du flux neutronique.

Pour les géométries de détecteurs compactes, le choix des matériaux est déterminant pour la détection efficace de neutrons rapides. Trois scintillateurs ont été modélisés : un détecteur thermique modéré (PEHD + $^6\text{LiF:ZnS(Ag)}$) et deux scintillateurs autonomes pour neutrons rapides (EJ-276 et CLYC). Les scintillateurs étaient directement couplés à la sortie d'un SiPM lors des simulations alors qu'en réalité les fibres à décalage de longueur d'onde guideraient la lumière de scintillation au photodétecteur.

Résultats

L'efficacité de détection et la réponse aux neutrons thermiques et rapides ont été analysées à l'aide d'une simulation Monte-Carlo GEANT4, jetant les bases à un système de cartographie tridimensionnelle de flux neutronique pour des réacteurs sous-critiques modérés au graphite. L'énergie déposée dans chaque scintillateur a été convertie en lumière détectable en utilisant le rendement lumineux spécifique au matériau, l'efficacité de transport optique et l'efficacité de détection des photons du SiPM, ce qui a permis d'établir un lien direct entre les interactions neutroniques et les signaux mesurables.

Des réponses spectrales et en hauteur d'impulsion distinctes ont été observées pour les scintillateurs évalués. Le scintillateur EJ-276 a démontré une large réponse aux neutrons rapides, dominée par la diffusion élastique neutron-proton, tandis que le CLYC a montré des caractéristiques marquées dépendantes de l'énergie s'étendant jusqu'à environ 8 MeV, en raison des canaux d'interaction tels que $^{35}\text{Cl}(n,p)$. Les scintillateurs thermiques à base

de $^6\text{LiF:ZnS}$ présentaient des pics de capture étroits près de 1,5 à 1,8 MeV, avec le PEHD + $^6\text{LiF:ZnS}$ affichant des distributions légèrement plus larges en raison de contributions mineures de la diffusion élastique. Le scintillateur EJ-276 produisait un spectre de recul continu avec un rendement lumineux relativement faible, tandis que le CLYC présentait la sensibilité aux neutrons rapides la plus large et le taux de comptage le plus élevé.

Les distributions reconstituées des flux de neutrons thermiques et rapides ont présenté un comportement spatial complémentaire. Les neutrons rapides ont montré une distribution régulière avec un pic central au sein du réseau de modérateurs, alors que les neutrons thermiques ont démontré des maxima localisés et une variation spatiale plus grande en raison de leur sensibilité à la thermalisation et à la vitesse de capture plus faible dans les écrans de $^6\text{LiF:ZnS}$ minces. Ensemble, ces résultats démontrent que le réseau de détecteurs capture à la fois les caractéristiques de flux globales et locales au sein d'un assemblage sous-critique.

Conclusion

Cette étude a évalué des détecteurs à neutrons à scintillateurs compacts pour reconstituer les distributions de flux au sein d'un assemblage sous-critique modéré au graphite. Les simulations GEANT4 ont démontré que le matériau du détecteur régit grandement la sensibilité énergétique et le comportement de scintillation. Le détecteur thermique $^6\text{LiF:ZnS}$ a produit la signature de capture $^6\text{Li}(n,\alpha)t$ attendue, alors que le scintillateur EJ-276 a permis de détecter des neutrons rapides grâce au recul neutron-proton, avec une résolution limitée. Le CLYC a démontré les meilleures performances pour les deux énergies, présentant des pics de capture thermique nets et des caractéristiques marquées de l'ordre des MeV issues des interactions $^{35}\text{Cl}(n,p)$. Ces résultats confirment qu'un réseau de détecteurs thermiques et rapides combinés intégrant du $^6\text{LiF:ZnS}$ et le CLYC est bien adapté pour la cartographie tridimensionnelle du flux et la caractérisation spectrale dans les assemblages sous-critiques.

Les travaux futurs intégreront la synchronisation de la forme d'impulsion afin de permettre la discrimination entre les neutrons et les rayons gamma et d'affiner l'emplacement des détecteurs pour améliorer la couverture énergétique. Les travaux expérimentaux comprendront la construction de prototypes de SiPM couplés à des fibres à décalage de longueur d'onde destinés à être déployés au sein de l'assemblage sous-critique proposé.