

Activation Neutronics for the Swiss Nuclear Power Plants

Doctoral Thesis

Author(s):

Pantelias Garcés, Manuel

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010206697>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 21623

ACTIVATION NEUTRONICS FOR THE SWISS NUCLEAR POWER PLANTS

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Manuel Pantelias Garcés

MSc ETH EPF in Nuclear Engineering

born June 3, 1986

citizen of Greece and Spain

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H.-M. Prasser, ETH Zurich

Prof. Dr. A. Pautz, EPFL

apl. Prof. Dr.-Ing. P.-W. Phlippen, RWTH Aachen (DE)

Dr. S.W. Mosher, ORNL (USA)

2013

Abstract

With an installed capacity of over 3.2 GW_e , the four Swiss Nuclear Power Plants (NPPs) currently supply 40% of the Swiss electricity demand. In view of future decommissioning liabilities, the nuclear utilities are required by law to ensure that adequate financial resources will be available in order to cover the arising costs (“polluter pays principle”).

In this context, the Swiss National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra) periodically performs and updates cost studies relevant to NPP decommissioning and radioactive waste management. An integral aspect of these studies is the radiological characterization of the NPPs and, more specifically, the calculation of the nuclear activation in reactor components induced by their exposure to neutron radiation. The resulting radiological inventory has a direct effect on the planning of the NPP dismantling and the relevant waste management considerations.

Towards this end, this work presents the results of a Nagra - ETH Zurich collaboration for the *development, implementation and validation* of a state-of-the-art activation neutronics scheme. More specifically, given the latest developments in neutron transport codes and the access to increased computational power, 3D Monte Carlo (MC) and hybrid methods linked to modern activation codes are used in order to yield the most reliable NPP activation estimates to date.

The last NPP activation study, conducted approximately 10 years ago, was based on 1D deterministic neutron transport calculations. Bound to the methods and computer power limitations of the time, the aforementioned study resulted, in some cases, in the underestimation of the effects of neutron streaming in areas outside of the pressure vessel (up to factors of 100s in the residual neutron induced activities). In other cases, over-conservative extrapolations from the 1D results led to the overestimation

of the resulting activities. With the scheme proposed in this thesis, neutron streaming effects are accurately taken into account, hence avoiding the underestimation/overestimation of results.

The following issues are addressed in the context of this thesis:

- The suitability, effectiveness and efficiency of MC, deterministic and hybrid neutron transport methods for NPP activation studies.
- The development of 3D MC NPP-specific models for all Swiss NPPs.
- The performance of different variance reduction (VR) methods for accelerating the MC calculations.
- The suitability of state-of-the-art activation codes for reactor ex-core activation calculations.
- The validation/calibration of the simulation results, through the setup and analysis of foil activation campaigns within the NPPs.

More specifically, as a result of this work, a modeling approach based on the MCNP5 code is developed and implemented for the modeling of each of the Swiss NPPs. The benchmarking between MC and hybrid VR methods shows that hybrid codes (e.g. ADVANTG) outperform the MC VR methods for accelerating the computationally demanding MCNP5 calculations. In fact, the hybrid methods result in speedups of the order of a factor of 10 when compared to the best performing MC VR. Additionally, investigations on the use of deterministic calculations for the scope of the NPP activation analysis, show that purely deterministic runs are prohibitively expensive in terms of both computer and memory requirements. Hybrid calculations aimed at global VR parameter optimization result in the sought after “global” results with smaller computational expense.

The performance of activation codes is also examined. Activation codes with the capability of multi-group flux-weighted update of the cross-section data (e.g. ORIGEN-S) are necessary for ex-core activation calculations. ORIGEN-S with a 44-group energy structure is shown to be the best option in terms of the overall computational cost/benefit of the proposed scheme.

A fundamental part of the activation neutronics scheme presented in this work is the validation of the calculations by full-cycle foil irradiation campaigns. The first campaign completed in the Goesgen Pressurized Water Reactor (PWR) is, therefore, presented. The calculation-to-measurement comparisons indicate a good agreement (within a factor of 2 for most of the foils). Given that the modeling approach aims to capture the “representative” neutron flux distribution within the facility over the NPP lifetime (not cycle-specific) and that the total neutron flux drop from the core to the foil positions is up to the order of $1E+11$, the comparison results confirm the validity of the proposed scheme.

With the activation neutronics scheme presented in this work, Nagra and ETH Zurich demonstrate that 3D MC/hybrid neutron transport simulations and validation/calibration with foil activation measurements have the potential to become the industry-standard approach for the reliable NPP decommissioning planning.

Zusammenfassung

Mit einer installierten Leistung von ca. 3.2 GWe liefern die fünf Schweizer Kernkraftwerke (KKW) an ihren vier Standorten ca. 40% der gesamten Stromproduktion. Im Hinblick auf die künftige Stilllegung der Anlagen sind die KKW-Betreiber gesetzlich verpflichtet, ausreichende finanzielle Mittel für die anfallenden Stilllegungskosten bereitzustellen (Verursacherprinzip).

In diesem Zusammenhang ist die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) an periodischen Studien über die Kosten der KKW-Stilllegung und die Entsorgung radioaktiver Abfälle beteiligt. Wesentlicher Bestandteil dieser Kostenstudien ist die radiologische Charakterisierung der KKW, insbesondere die Berechnung der nuklearen Aktivierung der Reaktorkomponenten durch die Neutronenstrahlung. Das resultierende radiologische Inventar hat einen direkten Einfluss auf die Planung des KKW-Rückbaus sowie auf die Überlegungen zur Entsorgung der anfallenden Abfälle.

Zu diesem Zweck stellt diese Arbeit die Ergebnisse einer Zusammenarbeit zwischen Nagra und der ETH Zürich, über die *Entwicklung, Implementierung* und *Validierung* einer dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden Rechenmethodik für die KKW-Neutronenaktivierung dar. Mit den neusten Entwicklungen in den Neutronentransportcodes sowie der Verfügbarkeit von erhöhten Rechenleistungen können 3D-Monte-Carlo (MC) und Hybridmethoden, gekoppelt mit modernen Aktivierungs-codes, eingesetzt werden, um zuverlässige Aktivitätsverteilungen innerhalb eines KKW zu erhalten.

Die letzte KKW-Aktivierungsstudie vor ca. 10 Jahren basierte auf deterministischen 1D-Neutronentransport-Berechnungen. Bedingt durch die damaligen verfügbaren Methoden und die begrenzte Rechenleistung führte die Aktivierungsstudie in bestimmten Fällen zu einer Unterschätzung der Ef-

efekte der Neutronenströmung in Bereichen ausserhalb des Druckbehälters (in Einzelfällen bis zu einem Faktor von 100 für die neutroneninduzierten spezifischen Aktivitäten). In anderen Fällen führten überkonservative Extrapolationen aus den 1D-Resultaten zur Überschätzung der Aktivitäten. Mit der in dieser Doktorarbeit vorgeschlagenen Methodik werden Neutronenströmungseffekte korrekt berücksichtigt, wodurch einerseits eine Unterschätzung der Resultate vermieden und andererseits überkonservative Approximationen ausgeschlossen werden können.

Die folgenden Aspekte werden im Rahmen dieser Arbeit angesprochen:

- Die Eignung, Wirksamkeit und Effizienz von MC, deterministischen und hybriden Neutronentransportmethoden für KKW-Aktivierungsstudien.
- Die Entwicklung von 3D-KKW-MC-Modellen für jedes KKW in der Schweiz.
- Die Durchführung von verschiedenen Methoden zur Varianzreduktion (VR), die der Beschleunigung der MC-Berechnungen dienen.
- Die Eignung aktueller Aktivierungscodes für Aktivierungsberechnungen in Bereichen ausserhalb des Reaktorkerns.
- Die Validierung/Kalibrierung der Simulationsergebnisse durch die Analyse von Folienaktivierungskampagnen in den KKW.

Konkret wird in dieser Arbeit ein Modellierungsansatz basierend auf dem MCNP5-Code entwickelt und für die Modellierung der einzelnen KKW's eingesetzt. Das Benchmarking zwischen MC und hybriden VR-Methoden zeigt, dass die Hybridcodes (z.B. ADVANTG) im Hinblick auf die Beschleunigung der rechenintensiven MCNP5-Berechnungen besser abschneiden als die MC-VR-Methoden. Im Vergleich zu den leistungsfähigsten MC-VR-Methoden führen die Hybridmethoden in der Tat zu Beschleunigungen von bis zu einem Faktor 10. Zudem zeigen Untersuchungen, dass die Verwendung rein deterministischer Berechnungen sehr anspruchsvoll sind in Bezug auf sowohl Computer- als auch Speicherbedarf. Hybridberechnungen, die zu einer vergleichbaren globalen Optimierung der VR-Parameter führen, benötigen weniger Rechenaufwand für die "globale" Lösung.

Zusätzlich wird die Eignung verschiedener Aktivierungs-codes innerhalb der KKW Aktivierungsmethodik untersucht. Aktivierungs-codes mit der Möglichkeit für Viel-Gruppen Neutronenflussgewichtete Aktualisierung der Wirkungsquerschnittsdaten (z.B. ORIGEN-S) sind notwendig für die Aktivierungsberechnungen ausserhalb des Reaktorkernbereichs. ORIGEN-S mit einer Energiestruktur von 44 Gruppen stellt sich als optimale Lösung in Bezug auf Gesamtrechenaufwand und Leistung für die vorgeschlagene Methodik heraus.

Wesentlicher Aspekt der in dieser Arbeit dargestellten KKW-Neutronenaktivierungsmethodik ist die Validierung der Berechnungen durch entsprechende Neutronenfolien-Bestrahlungen über einen vollen Reaktorzyklus. Die erste Bestrahlungskampagne im Druckwasserreaktor (DWR) Gösgen wird diskutiert. Der Vergleich zwischen Berechnungen und Messungen zeigt eine gute Über-einstimmung (innerhalb eines Faktors 2) für die meisten Folien. Vor dem Hintergrund, dass das Ziel des KKW-Modellierungsansatzes in der Erfassung der “repräsentativen” Neutronenflussverteilung für die Anlage über die ganze Betriebsdauer (d.h. nicht zyklusspezifisch) besteht und das ferner der Abfall des totalen Neutronenflusses zwischen Reaktorkern und Folienpositionen bis zu elf Grössenordnungen sein kann, ist die Validierung der Methodik in vernünftigen Grenzen nachgewiesen.

Mit der in dieser Arbeit dargestellten KKW-Neutronenaktivierungsmethodik zeigen die Nagra und die ETH Zürich, dass Monte Carlo und hybride Neutronentransport-Simulationen sowie die Validierung und Kalibrierung mit Folienaktivierungsmessungen das Potenzial haben, ein Standard für die zuverlässige KKW-Stillegungsplanung zu werden.