



Actinides induced irradiation damage and swelling effect in irradiated Zircaloy-4 after 30 years of storage

Mara Marchetti¹, Michel Herm¹, Tobias König¹, Simone Manenti^{2,3}, and Volker Metz¹

¹Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Nuclear Waste Disposal,
P.O. Box 3640, 76021 Karlsruhe, Germany

²Department of Physics, University of Milan, Via Celoria 16, 20133 Milano, Italy

³Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA), Department of Physics,
University of Milan and INFN-Milan, Via F.lli Cervi 201, 20090 Segrate, Italy

Correspondence: Mara Marchetti (mara.marchetti@kit.edu)

Published: 10 November 2021

Abstract. After several years in the reactor core, irradiated nuclear fuel is handled and subsequently stored for a few years under water next to the core, to achieve thermal cooling and decay of very short-lived radionuclides. Thereafter, it might be sent to dry-cask interim storage before final disposal in a deep geological repository.

Here, the spent nuclear fuel (SNF) is subject to a series of physicochemical phenomena which are of concern for the integrity of the nuclear fuel cladding. After moving the SNF from wet to dry storage, the temperature increases, then slowly decreases, leading the hydrogen in solid solution in the cladding to precipitate radially with consequent hydride growth and cladding embrittlement (Kim, 2020).

Another phenomenon affecting the physical properties of the cladding during interim dry storage is the irradiation damage produced in the inner surface of the cladding by the alpha decay of the actinides present at the periphery of the pellet, particularly when the burnup at discharge is high.

SNF pellets with high average burnup present larger fuel volumes at the end of their useful life due to accumulation of insoluble solid fission products and noble gases, which leads to disappearance of the as-fabricated pellet–clad gap. Further swelling is expected as a consequence of actinide decay and the accumulation of helium. This leads to larger cladding hoop stress and larger alpha decay damage.

The present work first investigates the variation in diameter caused by pellet swelling in an irradiated Zircaloy-4 cladding after chemical digestion of the uranium oxide (UO_x) pellet. Second, the irradiation damage produced during the 30 years elapsed since the end of irradiation in terms of displacements per atom (dpa) is studied by means of the FLUKA Monte Carlo code. The irradiation damage produced by the decay of actinides in the inner surface of the cladding extends for less than 3 % in depth.

The considered cladded UO_x pellet was extracted from a pressurized water reactor (PWR) fuel rod consisting of five segments, with an average burnup at discharge of $50.4 \text{ GWd}(\text{tHM})^{-1}$.

Kurzfassung. Nach mehreren Jahren im Reaktorkern wird abgebrannter Kernbrennstoff umgelagert und anschließend für einige Jahre unter Wasser neben dem Kern aufbewahrt, um eine thermische Abkühlung und den Zerfall sehr kurzlebiger Radionuklide zu ermöglichen. Anschließend wird er gegebenenfalls in Trockenbehältern zwischengelagert, bevor er in einem geologischen Tiefenlager endgelagert wird.

Hier ist der abgebrannte Kernbrennstoff (SNF) einer Reihe von physikalisch-chemischen Prozessen ausgesetzt, die problematisch sind, weil sie die Brennstabhülle angreifen. Nach der Umlagerung der abgebrannten Brennstäbe von der Nass- in die Trockenlagerung steigt die Temperatur erst an und sinkt anschließend langsam ab, was dazu führt, dass der Wasserstoff, der in fester Lösung gebunden ist, in der Hülle in radialer Richtung ausfällt, was zu Hydridwachstum und einer Versprödung der Hülle führt.

Ein weiteres Phänomen, das sich auf die physikalischen Eigenschaften des Hüllrohrs während der trockenen Zwischenlagerung auswirkt, sind die Strahlenschäden, die an der inneren Oberfläche des Hüllrohrs durch die Al-

phazerfälle der am Rand des Pellets vorhandenen Aktinoiden entstehen, insbesondere wenn der Entladeabbrand hoch ist.

SNF-Pellets mit einem hohen durchschnittlichen Abbrand weisen am Ende ihrer Nutzungsdauer aufgrund der Anreicherung unlöslicher fester Spaltprodukte und Edelgase ein größeres Brennstoffvolumen auf, was dazu führt, dass der im Auslieferungszustand bestehende Spalt zwischen Pellet und Hülle verschwindet. Als Folge des Aktinoiden-Zerfalls und der Anreicherung von Helium ist ein weiteres Aufquellen zu erwarten. Dies führt zu einer größeren Ringspannung in der Hülle und zu größeren Schäden durch Alphazerfälle.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst die durch das Aufquellen der Pellets verursachte Durchmesseränderung in einer bestrahlten Zirkalloy-4-Hülle nach dem chemischen Aufschluss des Uranoxid (UO_x)-Pellets untersucht. Danach werden die Strahlenschäden, die im Laufe der dreißig Jahre nach der Entnahme des Brennstabs entstanden sind, in Form von Verschiebungen pro Atom (dpa) mit dem FLUKA Monte-Carlo-Code betrachtet. Die durch den Zerfall der Aktinoide in der Innenfläche der Umhüllung erzeugten Strahlenschäden reichen weniger als 3 % in die Tiefe.

Das betrachtete umhüllte UO_x -Pellet wurde aus einem aus fünf Segmenten bestehenden Druckwasserreaktor (DWR)-Brennstab mit einem durchschnittlichen Entladeabbrand von $50,4 \text{ GWd (tSM)}^{-1}$ entnommen.

References

Kim, K.-T.: The effect of peak cladding temperature occurring during interim-dry storage on transport-induced cladding embrittlement, *Nucl. Eng. Technol.*, 52, 1486–1494, 2020.