

Transmutation radioaktiver Abfälle – Lösung der Endlagerproblematik?

Das Problem des Umgangs mit hochradioaktiven Abfällen ist bisher weltweit nicht endgültig gelöst. Als Alternative zur direkten Endlagerung im Untergrund über Jahrtausende wird in jüngerer Zeit eine weitere Option diskutiert: Der Begriff „Transmutation“ bezeichnet die gezielte Umwandlung langlebiger Nuklide durch Neutronenbeschuss. Dies könnte zu wesentlich verkürzten Zerfallszeiten führen. Ob die technische Umsetzung dieser Idee realistisch ist, wird kontrovers diskutiert.

Radioaktive Abfälle

Bei der Nutzung radioaktiver Stoffe in der Forschung, der Nuklearmedizin ebenso wie in Kernkraftwerken entstehen unweigerlich radioaktive Abfälle. Diese Rückstände lassen sich im Fall der Kraftwerks-Brennstäbe in zwei Sorten von Atomkernen (Nukliden) unterteilen: Spaltprodukte und Transurane. Ihre Natur und Herkunft wird aus einer Betrachtung der nuklearen Kettenreaktion verständlich: In Kernreaktoren werden Neutronen freigesetzt, die die schweren Atomkerne des Brennstoffs Uran zur Spaltung veranlassen. Diese werden so in mehrere leichtere Kerne („Spaltprodukte“) aufgespalten, die in vielen Fällen selbst wieder radioaktiv sind und über weitere Zwischenstufen schließlich in stabile (nicht mehr radioaktive) Endprodukte zerfallen. Transurane hingegen entstehen dann, wenn Urankerne durch Neutronen nicht gespalten werden, sondern diese einfangen und sich dadurch in noch schwerere Nuklide (wie Plutonium, Americium, Curium) umwandeln. Transurane sind wiederum radioaktiv und weisen oft besonders lange Zerfallszeiten auf. Bei den Zerfällen wird jeweils auch Energie in Form von Strahlung und Wärme freigesetzt. Die mittlere Dauer der Zerfallsprozesse variiert je nach Nuklid zwischen Sekundenbruchteilen und Jahrtausenden.

Nicht nur wegen der gesundheitsschädlichen Strahlung, sondern auch wegen der chemischen Toxizität der Schwermetalle müssen Spaltprodukte wie Transurane von der Biosphäre ferngehalten werden. Kurzlebige Nuklide können hier besonders problematisch sein, weil sie relativ große Strahlungsmengen in kürzerer Zeit abgeben. Umgekehrt stellen auch die sehr langlebigen Nuklide eine besondere Herausforderung dar, da die Sicherheit eines Endlagers über entsprechend lange Zeiträume gewährleistet werden muss. Die spezifische Gefahr, die für Mensch und Umwelt von den verschiedenen Abfallstoffen ausgeht, wird ebenso durch deren weitere Eigenschaften (Wasserlöslichkeit, Mobilität im Untergrund bzw. im Organismus) bestimmt.

Transmutation: Idee und Funktionsweise

Transmutation zielt darauf ab, die besonders toxischen Nuklide gezielt mit Neutronen zu bestrahlen und sie dadurch zur Umwandlung in kürzerlebige oder stabile Nuklide anzuregen. Im Erfolgsfalle könnte so eine signifikante Verkürzung der notwendigen Lagerungsdauer bzw. -menge erreicht werden. Allerdings könnte unter ungünstigen Umständen die Lebensdauer auch verlängert statt verkürzt werden. Die entsprechenden kernphysikalischen Prozesse sind für jedes Nuklid unterschiedlich. Es gilt daher, vor dem Neutronenbeschuss die Abfälle in die darin enthaltenen einzelnen Nuklide aufzuteilen (Separation, engl. „partitioning“) und gezielt nur diejenigen davon zu bestrahlen, deren Lebensdauer mit hoher Wahrscheinlichkeit verkürzt werden kann. Dies setzt die Kenntnis der Eigenschaften aller Nuklide und der entsprechenden Reaktionswahrscheinlichkeiten voraus. Technisch macht es zudem den intensiven Betrieb von Wiederaufarbeitungsanlagen erforderlich, in denen die zu transmutierenden Stoffe aus den Brennstäben herausgelöst und separiert werden.

Zur Realisierung könnten im Prinzip übliche Leichtwasserreaktoren verwendet werden. Hier würden relativ langsame Neutronen die Umwandlung zumindest von Spaltprodukten auslösen. Effektiver wäre die Transmutation jedoch mit schnelleren Neutronen. Daher wurde Ende der 1980er Jahre ein Konzept vorgeschlagen, das heute von den meisten Wissenschaftlern favorisiert wird („accelerator-driven subcritical system“ - ADS): Durch Beschuss mit einem Teilchenbeschleuniger werden zahlreiche Neutronen aus einem Material (Schwermetall-„target“) herausgeschlagen, die dann auf die umzuwandelnden Abfälle gelenkt werden. Diese sind in einem eigenen Reaktor angeordnet, in dem sich – ähnlich wie in einem Kernkraftwerk – wiederum eine Kettenreaktion einstellt. Diese erhält sich jedoch nur solange aufrecht, wie der vorgeschaltete Beschleuniger läuft („unterkritischer Reaktor“). Einige Konzepte sehen vor, diese Kettenreaktion auch zur Stromerzeugung zu nutzen und dadurch mehr Energie zu gewinnen, als der Beschleuniger verbraucht. Möglicherweise könnten durch die Umwandlungen sogar neue Kernbrennstoffe „erbrütet“ werden.

Als relevante Spaltprodukte können Technetium (Tc-99), Iod (I-129), Cäsium (Cs-135, Cs-137) und Strontium (Sr-90) betrachtet werden. Vor allem Tc-99 und I-129 wären Kandidaten für eine Transmutation; sie machen ca. 95% der langlebigen Spaltprodukte aus und stellen wegen ihrer Wasserlöslichkeit eine potenzielle Gefahr für die Umwelt dar. Die anderen o.g. Spaltprodukte scheiden wegen schwieriger Separation oder zu geringer Wechselwirkung mit Neutronen als Ziele für die Transmutation vermutlich aus. Im Falle der Transurane würde eine Transmutation fast immer zu kürzerlebigen Produkten führen. Sie sind als Ziele auch interessant, weil sie sehr toxisch (doch wenig wasserlöslich) sind sowie dominant zur langfristigen Radioaktivität der Abfälle beitragen.

Vorteile und Nachteile

Generell würde durch Transmutation immer nur ein gewisser Anteil der eingebrachten Abfälle „entschärft“. Der Rest müsste in einen neuen Zyklus von Wiederaufarbeitung und Transmutation eingebracht, ein Teil aber schließlich endgelagert werden. Ein Endlager bliebe deshalb erforderlich. Befürworter der Transmutation bezeichnen die ADS-Anordnung als besonders sicheren Kernreaktor-Typ, da die durch den Beschleuniger gesteuerte Kettenreaktion nicht durchbrennen kann. Technisch setzt die präzise Kontrolle eines subkritischen Reaktors, der nahe an der Grenze zu einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion arbeitet, allerdings eine genaue Kenntnis der Reaktionsseigenschaften aller Nuklide voraus. Diese müssten teils zunächst noch erforscht werden. Wenn Plutonium-Bestände transmutiert würden, könnten dadurch auch Proliferations-Gefahren vermindert werden. Kritiker sehen umgekehrt in der zu entwickelnden Wiederaufarbeitungs-Technologie, die auch für die Produktion von Waffen-Material relevant ist, ein gesteigertes Proliferations-Risiko.

Perspektiven, Forschungsbedarf und Zeithorizont

Der Bau und der sichere Betrieb einer ADS-Anlage setzen noch intensive Forschung voraus. So müsste der genaue Aufbau der Transmutations-Brennstäbe sowie ihre optimale Anordnung im Reaktor geklärt werden, damit ein hinreichend großer Durchsatz und eine hohe Umwandlungsrate erzielt werden können. Auch die Technologie der Neutronenquelle (Beschleuniger und Target) muss optimiert werden. Schließlich sind neue Verfahren für die Wiederaufarbeitung und Separation zu entwickeln. Grundlagenforschung hierzu wird auch in Deutschland und Europa geleistet und mit staatlichen Mitteln gefördert. Eine EU-Arbeitsgruppe hat 2001 eine „Roadmap“ für die Realisierung einer ADS-Anlage erstellt. Diese sieht einen Prototyp etwa ab dem Jahr 2030, den Beginn der industriellen Anwendung für den Zeitraum 2040-2045 vor. Ein Bericht des US-Energieministeriums von 1999 veranschlagt Kosten von 280 Mrd. \$ für die Behandlung des in den existierenden Reaktoren anfallenden Abfalls, wovon ein Teil durch Elektrizitätsproduktion gedeckt werden könnte.

Quellen

- Berliner Zeitung (2008). Atommüll unter Beschuss. Artikel vom 25.06.2008, Autorin Uta Deffke.
- Bowman, C.D. und Koautoren (1992). Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research, Bd. A320, S. 336–367.
- Committee on Separation and Transmutation (1996). Nuclear Wastes. Washington: National Academy Press.
- DOE – Department of Energy, USA (1999). A Roadmap for Developing Accelerator Transmutation of Waste (ATW) Technology. Report to Congress DOE/RW-0519: <http://www.wipp.energy.gov/science/adtf/ATW.pdf>
- IAEA – Internationale Atomenergieorganisation (2004). Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management. Report No. 435: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS435%5Fweb.pdf>
- Zeriffi, Hisham; Makhijani, Annie (2000). The Nuclear Alchemy Gamble - An Assessment of Transmutation as a Nuclear Waste Management Strategy: <http://www.ieer.org/reports/transm/summary.html>.
- European Working Group (2001). Roadmap for ADS Nuclear Waste Incineration: <http://www.fzk.de/ads-roadmap.pdf>
- Bundestags-Drucksachen 16/9509, 14/4022, 14/3855, 14/3148, 14/2938.