

5.4.2. Transmutation - ENTWURF 1223.02.2016 Drs/AG3-92Ab

Die Kommission hat das Verfahren der Transmutation als ein Thema identifiziert, dass hinsichtlich seiner Relevanz für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe einer weiteren Beobachtung bedarf, und hat zu den mit der Transmutation verbundenen Fragestellungen zwei Gutachten eingeholt<sup>1</sup>.

Transmutation zielt darauf ab, die beim Betrieb von Kernreaktoren entstehenden langlebigen Nuklide der Elemente Plutonium, Neptunium, Americium und Curium (sogenannte Transurane) nach vorheriger Abtrennung (Partitionierung) in stabile oder kurzlebige Nuklide umzuwandeln. Die Transmutation der im abgebrannten Brennstoff ebenfalls vorhandenen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte wird in der Forschung hingegen praktisch nicht verfolgt. In diesem Zusammenhang ist Transmutation ~~erscheint~~ auch für eine weitere Behandlung der bereits verglasten hoch radioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle durch Transmutation nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik nicht sinnvoll geeignet. Für Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren sind die heute diskutierten Verfahren ebenfalls nicht anwendbar, so dass sich die Anwendung des Verfahrens nur auf die Brennelemente aus Leistungsreaktoren bezieht.

~~Zu berücksichtigen ist, dass die~~ Transmutation kann zu einer Verringerung, im besten Fall zu einer Eliminierung des Anteils langlebiger Transurane am endzulagernden Radionuklidinventar führen. ~~Si-e ist aber~~ keine Entsorgungsoption zum langfristigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen darstellt, da auch bei optimistischen Annahmen hoch radioaktive bzw. langlebige Abfälle verbleiben, die einer Endlagerung, bedürfen.

5.4.2.1 Technologisches Gesamtsystem und technischer Entwicklungsstand

Die Umsetzung von "Partitionierung und Transmutation" (oder kurz "P&T") beinhaltet im Wesentlichen drei Schritte: Abtrennung (Partitionierung), Brennstofffertigung und Umwandlung (Transmutation).

Bei der Partitionierung (P) werden die abgebrannten Brennelemente in einer Wiederaufarbeitungsanlage chemisch aufgelöst und die enthaltenen radioaktiven Stoffe in verschiedenen Prozessschritten in mehrere Produktströme separiert. Dabei sind für die Abtrennung der Transurane zwei Verfahren zu unterscheiden. Aus der Wiederaufarbeitung stammt das für die Abtrennung von Uran und Plutonium aus abgebrannten Uranoxid-Brennelementen entwickelte hydrometallurgische PUREX-Verfahren. Um hiermit zukünftig auch die sog. Minoren Aktiniden (Neptunium, Americium, Curium) abtrennen zu können, ist eine erhebliche technische Weiterentwicklung erforderlich. Die Machbarkeit einer Abtrennung konnte gezeigt werden. Bisherige Versuche befinden sich aber noch im Labormaßstab. Ob eine großtechnische Umsetzung mit den erforderlichen Wiedergewinnungsfaktoren im Bereich von 99,9% gelingt, ist aus heutiger Sicht offen. In einem noch früheren Entwicklungsstadium befindet sich das Konzept der sog. pyrometallurgischen Verfahren, basierend auf elektrochemischen Methoden bei hohen Temperaturen und unter Ausschluss von Sauerstoff.

Aus den separierten Transuranen werden im nächsten Schritt frische Brennelemente gefertigt. Auch die Entwicklung von Brennstoffen, die neben Plutonium die Minoren Aktinide enthalten, befindet sich noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium – insbesondere für die uranfreien Brennstoffe zum Einsatz in beschleunigergetriebenen Reaktoren (s.u.). Eine Problematik bei Brennelementfertigung, -transport und -handhabung der Transmutations-Brennelemente

<sup>1</sup> vgl. Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ und Öko-Institut et.al. (2015) Gutachten "Transmutation"

stellen die hohe Gammastrahlung und die, insbesondere von Curium ausgehende, Neutronenstrahlung dar. Sie erfordern massive Abschirmungen und fernbediente Handhabung und führten bereits zu Überlegungen, auf Abtrennung und Transmutation der Curiumisotope zu verzichten. Für die uranfreien Brennstoffe existieren außerdem noch keine Verfahren zur Abtrennung der Spaltprodukte von der Matrix, so dass über die resultierenden Abfallprodukte hinsichtlich Volumen und Eigenschaften derzeit keine Aussagen möglich sind.

Die frischen Brennelemente werden letztlich in geeigneten Transmutationsreaktoren eingesetzt und dort bestrahlt, um die Transurane zu spalten. Für die Transmutationsreaktoren und deren Brennstoff werden international zwei Konzepte diskutiert. Zum einen sind dies "Schnelle Reaktoren" mit Mischoxid-Brennstoffen, die eine Weiterentwicklung der Schnellen Brüter darstellen. In Frankreich existiert derzeit ein Konzept für einen Prototypreaktor (sog. ASTRID-Reaktor) als Schneller Brüter mit Optimierung für die Transmutation. Zum anderen werden beschleunigergetriebene Reaktoren mit uranfreien Brennstoffen diskutiert, die durch eine externe Neutronenquelle angefahren und gesteuert werden. Solche Anlagen existieren bisher nur als Konzeptstudien. Ein erster beschleunigergetriebener Versuchsreaktor (MYRRHA) soll mit wesentlicher Förderung durch die Europäische Union in Belgien errichtet werden. Daneben besteht ein Konzept für einen europäischen Prototypen (sog. EFIT-Reaktor).

Die Transmutations-Brennelemente müssten nach erfolgter Transmutation zurück zur Partitionierung arbeiten, um danach den Zyklus erneut zu durchlaufen. Da in jedem Durchlauf nur ein Teil der Transurane umgewandelt werden kann, ergibt würde sich daraus eine Vielzahl von lichen Umläufen ergeben. Zwischen den verschiedenen Schritten sind zudem Zwischenlagerorte verschiedener radioaktiver Stoffe erforderlich. Da der Prozess nicht zu einer vollständigen Transmutation der langlebigen Minoren Aktiniden führt, sind im Ergebnis wären nach wie vor radioaktive sowie erhebliche Mengen schwach- und mittlradioaktive (Sekundär-)Abfälle zu entsorgen.

#### 5.4.2.2 Zeitrahmen und Kosten

Aufgrund des noch sehr frühen Entwicklungsstadiums erscheinen für die Entwicklung aller notwendigen P&T-Technologien bis zur industriellen Reife aus heutiger Sicht zunächst mindestens vier bis fünf Jahrzehnte erforderlich, ggf. auch deutlich mehr.

Bezogen auf das in Deutschland nach Beendigung der Kernenergienutzung vorhandene Inventar abgebrannter Brennelemente und bei einer angestrebten Reduzierung der darin enthaltenen 140 t Transurane auf 10 % des Ausgangswerts müssten anschließend durchschnittlich zwischen fünf und sieben Transmutations-Reaktoren sowie die erforderliche Infrastruktur zur Wiederaufarbeitung (Partitionierung) kontinuierlich über 150 Jahre in Betrieb sein. Anfänglich könnten aufgrund der großen Menge an Transuranen auch 16 Reaktoren erforderlich werden, nach 100 Jahren noch etwa 3 bis 4 Reaktoren. Gesamt-Betriebszeiten unter 100 Jahren lassen sich theoretisch nur mit deutlich mehr Reaktoren bzw. höheren Reaktorleistungen oder unter der optimistischen Annahme eines höheren Transmutationsanteils pro Zyklus erreichen. Unterstellt man geringere Reaktorleistungen können sich auch Betriebszeiten von 200 bis 300 Jahren ergeben.

Über die Kosten eines P&T-Systems sind derzeit nur sehr grobe Abschätzungen mit großen Bandbreiten möglich. Je nach Konzept wären für Forschung und Entwicklung 25 bis 60 Milliarden Euro zu veranschlagen, für die Bereitstellung der erforderlichen Anlagen weitere 40 bis 350 Milliarden Euro. Die mit Transmutationsanlagen erzeugbare elektrische Energie kann hierzu lediglich einen Deckungsbeitrag liefern.

#### 5.4.2.3 Auswirkungen auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland

Die Einflüsse einer umfassenden P&T-Strategie auf die Endlagerung können derzeit höchstens qualitativ benannt werden. So könnten das Volumen, das Radionuklidinventar und die Radiotoxizität der hoch radioaktiven Abfälle reduziert werden. Der Flächenbedarf für ein entsprechendes Endlager könnte sich ebenfalls reduzieren, wobei aber das Endlagerkonzept und die Wärmeleistung der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung einen größeren Einfluss auf den Flächenbedarf ausüben als der Anteil der transmutierbaren Radionuklide. Um eine nennenswerte Reduzierung der Wärmeleistung zu erreichen, müssten die durch P&T entstehenden Spaltprodukte nach der Transmutation noch etwa 300 Jahre in einem obertägigen Zwischenlager abklingen.

Der erforderliche Isolationszeitraum für die Endlagerung wird sich nicht verringern, da die potenzielle Dosis, die langfristig aus der Endlagerung resultiert, nicht durch die Transurane sondern durch die für P&T nicht zugänglichen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte bestimmt wird. Die Transurane gelten unter Endlagerbedingungen als weitgehend immobil. Die insgesamt vorhandene Spaltproduktmasse würde sich hingegen erhöhen, je nach Transmutationskonzept sogar in etwa verdoppeln. Daneben ist wesentlich, dass die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Form verglasteter Abfallprodukte das langlebige Aktivitätsinventar des Endlagers bestimmen und einer Transmutation aus heutiger Sicht nicht zugänglich sind. Für bestimmte Szenarien des menschlichen Eindringens oder schneller Freisetzung nach unwahrscheinlichen Entwicklungen kann die durch P&T verringerte Aktivität des endgelagerten Inventars zur Verringerung potentieller Dosisleistungen führen.

Die Menge der schwach- und mittelfradioaktiven Abfälle vergrößert sich durch die bei P&T anfallenden Sekundärabfälle (z.B. Betriebs- und Rückbauabfälle) erheblich um schätzungsweise 150.000 – 170.000 m<sup>3</sup>. Diese Abfälle besitzen jedoch vergleichsweise geringe Halbwertszeiten. Im aktuellen Nationalen Entsorgungsprogramm Deutschlands gibt es hierfür keinen Endlagerpfad.

Der Zeitpunkt für den Verschluss eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle würde sich deutlich in die Zukunft verschieben, sei es durch eine spätere Inbetriebnahme oder eine längere Offenhaltung. Verbunden wäre dies mit sicherheitstechnischen Konsequenzen und Auswirkungen für die Sicherung.

#### 5.4.2.4 Sicherheit und Proliferationsrisiken

Die Entwicklung von Transmutationsreaktoren mit gegenüber heutigen Leistungsreaktoren erhöhter Sicherheit stellt eines der Kernziele der aktuellen internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet dar. Allerdings weisen Transmutationsreaktoren spezifische Störfallrisiken auf, die aus dem speziellen radioaktiven Inventar in den Anlagen, den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Transmutationsbrennstoffe sowie den Eigenschaften der zur Kühlung vorgesehenen Flüssigmetalle resultieren. Ob eine erhöhte Sicherheit der Transmutationsreaktoren gegenüber heutigen Kernkraftwerken daher tatsächlich erreicht werden kann ist aus heutiger Sicht offen.

Aufgrund der höheren Wärmeentwicklung, der hohen Dosisleistung und der Kritikalitätssicherheit ergeben sich bei P&T teils deutlich höhere Anforderungen an den Transport und die Zwischenlagerung der radioaktiven Materialien. Im Verhältnis zur eingesetzten Tonne Schwermetall wäre im Vergleich zur heutigen Praxis mit einem Vielfachen an Brennelement-Transporten und Handhabungsschritten zu rechnen, verbunden mit erheblichen Anforderungen an den Strahlenschutz insbesondere des Personals.

Im Falle der großtechnischen Umsetzung einer P&T-Strategie in Deutschland würde während der Betriebszeit mit einigen Tonnen abgetrennter Transurane jährlich umgegangen werden, von

denen insbesondere Plutonium, aber in geringerem Maße auch Neptunium und Americium zum Bau von Kernwaffen missbräuchlich verwendet werden könnten. Bei den Anlagen zur Wiederaufarbeitung und Brennstoffherstellung, bei denen diese Stoffe separiert gehandhabt werden, bestünden über mehrere hundert Jahre (s.o.) kontinuierlich hohe Anforderungen an die Spaltmaterialkontrollen, aber auch an die Anlagensicherung. Aus diesem Grunde geht die Entwicklung in Richtung einer gemeinsamen Abtrennung der Minoren Aktiniden. Insgesamt würde nach erfolgter Transmutation das Risiko einer Proliferation entsprechend reduziert bzw. ausgeschlossen.

Dem gegenüber steht das Szenario einer Wiedergewinnung kernwaffenfähiger Stoffe aus einem Endlager. Dies erfordert die Rückholung oder Bergung der Abfälle und die daran anschließende Abtrennung der gewünschten Spaltstoffe. Diese Maßnahmen sind mit erheblichem Aufwand verbunden, dürften für subnationale Akteure undurchführbar sein und würden durch Maßnahmen der Spaltmaterialüberwachung detektiert werden.

Die Risiken aus der Umsetzung einer P&T-Strategie in einem Zeitraum von ca. 150 – 300 Jahren sind gegenüber einer möglichen Reduzierung potenzieller Risiken in der Langzeitsicherheit eines geologischen Endlagers abzuwägen.

#### 5.4.2.5 Gesellschaftliche und soziale Randbedingungen für die praktische Umsetzung

Die Nutzung einer P&T Strategie erfordert für die kommenden Jahrhunderte stabile staatliche Verhältnisse inklusive einer entsprechenden Infrastruktur für Wissenserhalt, Ausbildung, Betrieb, Forschung und Entwicklung. Damit würde eine P&T-Strategie die Verantwortung für Behandlung und Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle weitgehend auf die zukünftigen Generationen verlagern.

Eine Entscheidung für die Umsetzung von P&T setzt eine entsprechende Akzeptanz der Bevölkerung voraus, die aufgrund der erforderlichen Zeitdauern für die technische Verwirklichung auch von zukünftigen Generationen getragen werden müsste. Der heutige gesellschaftliche Konsens zum Verzicht auf die Kernenergienutzung den Betrieb großmaßstäblicher kerntechnischer Anlagen müsste aufgehoben werden. Die rechtlichen Rahmenbedingungen im Atomgesetz müssten angepasst und untergeordnete Regelwerke geschaffen werden, um die mit einer P&T-Strategie verbundene großtechnische Plutoniumnutzung in dem oben beschriebenen technologischen Ausmaß zu ermöglichen. Des Weiteren wäre eine Verständigung bezüglich der Finanzierung erforderlich, sowohl im Hinblick auf eine zügige Entwicklung als auch auf eine spätere Umsetzung der Technologien. Selbst eine wie auch immer geartete Beteiligung europäischer Partnerländer wäre mit erheblichen politischen, gesellschaftlichen und regulatorischen Anpassungen verbunden. Im europäischen Raum werden bisher nur in Frankreich und durch die EURATOM konkrete Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten verfolgt.

Transmutation auf der Grundlage beschleunigergetriebener Anlagen stellt keine unter endlagerungspunkten verfolgbare Strategie dar. Die Alternative über Generation IV – Anlagen zur Verbrennung der langlebigen Minoren Aktiniden sind wegen des Exportverbots von Brennelementen zur Wiederaufarbeitung gegenwärtig nicht zugänglich.

#### 5.4.2.6 Fazit

Die Kommission ist unter Würdigung der oben beschriebenen Aspekte der Auffassung, dass sich aus der von der Kommission bearbeiteten Endlagerthematik unter Zugrundelegung des Verbots des Exports der Brennelemente zur Wiederaufarbeitung keine Argumente für eine Entwicklung einer Transmutationstechnologie ableiten lassen. Die Kommission sieht in dieser Technologie unter den in Deutschland geltenden Randbedingungen keine Vorteile für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Daher wird aus heutiger Sicht eine aktive Verfolgung einer P&T-Strategie nicht empfohlen.

| 1 |  
2

- 1    Verwendete Literatur
- 2    Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ im Auftrag der Kom-
- 3    mission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 45
- 4    Öko-Institut e.V., UHH-ZNF (2015). Gutachten "Transmutation" im Auftrag der Kommission
- 5    Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 48
- 6
- 7