www.oeko.de

Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Lösen „Neue Reaktorkonzepte“ das Proliferationsproblem?

Dr. Christoph Pistner

Carl Friedrich von Weizsäcker-Friedensvorlesung:
"Naturwissenschaftliche Friedens- und Konfliktforschung"

Hamburg, 18.12.2019

Agenda

0 Intro

1 Was heißt hier eigentlich „Proliferationsproblem“?

2 Proliferation heute

3 Und was sind jetzt „Neue Reaktorkonzepte“?

4 Die Lösung der Endlagerproblematik: Transmutation?

5 Fazit

0

Intro

Historische Prognosen zur Kernenergieentwicklung

Quelle: IPFM

Kernreaktoren weltweit 1954-2018

Quelle: WNISR 2018

Kernenergie heute

Ein wenig Statistik zum Einstieg:

- Weltweite Energieerzeugung 2017: 14.035 Mtoe
  - Fossile: 81,3%
  - Nuklear: 4,9% (etwa der 10% Elektrizitätserzeugung)
- 450 Kernkraftwerke „in Betrieb“ (z.T. seit Jahren im Stillstand)
- 399,7 GW elektrischer Nettoleistung installiert
- 31 Länder mit Reaktoren „in Betrieb“ (inkl. Taiwan)
  - Davon 21 mit weniger als 10 Reaktoren
- 95 Reaktoren älter als 40 Jahre
- Durchschnittsalter > 30 Jahre

Daten: IEA World Energy Balance 2019, IAEA PRIS

Kernenergie heute

- 52 Reaktoren „in Bau“
  - Vor allem China (10), Indien (7) und Russland (6)
  - Aber auch Einsteigerstaaten: Bangladesh (2), Türkei (1), Vereinigte Arabische Emirate (4), Weißrussland (2)
- Gebaut werden praktisch ausschließlich Leichtwasserreaktoren der II. und III. Generation
- → Neubauten alleine werden heutiges Niveau der Kernenergienutzung nicht aufrechterhalten
- → ohne massive Laufzeitverlängerungen und damit verbundenen Risiken wird Kernenergieerzeugung massiv zurückgehen
- → aber auch: es kommen „neue“ Staaten ins Spiel

Daten: IAEA PRIS

1

Was heißt hier eigentlich „Proliferationsproblem“?

Der nukleare Teil des Trinity-Versuchs

Quelle: DoE

Größe des Plutonium-Kerns der Nagasaki-Bombe

Source: IPPNW

Die Spaltstoffe – Uran

Uran

- kommt in der Natur vor
- besteht aber aus zwei Isotopen: U-235 und U-238
- nur U-235 in Kernwaffen spaltbar
- Abtrennung des „spaltbaren“ U-235 von U-238 notwendig
- beide sind chemisch identisch
- physikalische Trennung (Masseunterschied)

→ Anreicherung (technisch schwierig), siehe auch Vortrag M. Englert

Die Spaltstoffe – Plutonium

Plutonium

- kommt in der Natur (praktisch) nicht vor
- entsteht bei Neutroneneinfang in U-238 durch radioaktiven Zerfall
- wird in Kernreaktoren in großen Mengen gebildet
- chemische Abtrennung des Plutoniums aus dem Brennstoff möglich

→ Reaktoren, Wiederaufarbeitung

Plutoniumpfad zur Bombe
Reaktoren und Wiederaufarbeitung

Aus Uran entsteht Plutonium

Kernwaffenfähige Materialien

	(Reflektierte) Kritische Masse	Neutronenrate [n/ms]	Wärmerate [W]
Uran (HEU) 95% U-235	19,2 kg	< 0,04	-
Uran (LEU) 20% U-235	360 kg	7,2	-
Plutonium (WPu) 94% Pu-239	4,6 kg	246	11,6
Plutonium (RPu) 60% Pu-239	5,8 kg	1882	77,3

Radioaktivität von verschiedenen TRU-Mischungen

Figure 1.4 **Dose rate of a 4.4 kg container of various mixtures of separated transuranics compared to spent fuel.** Peak dose rates only approach the IAEA's self-protection standard (100 rem/hour at one meter distance) if high-activity fission products are included. Cesium-137, which has a half-life of 30 years, dominates the radiation field from spent fuel after ten years. (Weapon-grade plutonium [WPu], reactor-grade plutonium [RPu], neptunium [Np], americium [Am], transuranic waste [TRU], cesium [Cs] and strontium [Sr]).[17]

Quelle: IPFM RR 8, 2010

Nukleare Nichtverbreitung

- Zugriff auf spaltbare Materialien
  - Zentral hochangereichertes Uran und Plutonium, jedoch auch andere Spaltmaterialien (Np, Am?, Cm??, Mischungen)
  - Weitere Materialien für Fusionsteil (Tritium, Lithium, Deuterium …)
  - Überwachungsmaßnahmen der IAEO
  - Zugriffsbeschränkungen durch radiologische Barrieren (z.B. erhöhte Sicherungsmaßnahmen für abgetrennte Materialien)
- Technik und Know-How
  - Zugriff auf (ausgebildetes) Personal
  - Anlagen zur Anreicherung oder Reaktoren/Wiederaufarbeitung

Interdisziplinäre Fragestellungen zu Kernwaffen und Abrüstung

• Warum bauen Staaten Kernwaffen? Sollten Staaten Kernwaffen bauen?	Politikwissenschaft
• Wie bauen Staaten Kernwaffen?	Physik/Technologie
• Kann die Weiterverbreitung (Proliferation) kontrolliert werden?	Rüstungskontrolle und Überwachung – zivil-militärische Trennung, Policy, Politik und Institutionen
• Können wir Kernwaffen abschaffen, und wenn ja wie?	Friedensforschung

Quelle: M.Englert

Zwischenfazit I

- Uran mit hoher Anreicherung ist besonders günstig für Kernwaffenanwendungen, spielt aber in der Kernenergienutzung heute fast keine Rolle
- Plutonium praktisch jeder Zusammensetzung kann für Kernwaffen verwendet werden, manches Plutonium ist „besser“ als anderes
- Plutonium entsteht in Kernreaktoren und trägt dabei mit zur Energieerzeugung bei
- Auch andere Elemente (Np, Am, T …) dürfen nicht vergessen werden
- Sensitiv sind die Technologien zur
  - Anreicherung von Uran und zur
  - Abtrennung von Plutonium aus bestrahltem Brennstoff

2

Proliferation heute

Kontrolle der Kernenergienutzung

„[...] Personally I am haunted by the feeling that by 1970, unless we are successful, there may be 10 nuclear powers instead of four, and by 1975, 15 or 20.”

J.F. Kennedy, 52. Pressekonferenz, 21. März 1963

Nichtverbreitungsvertrag (NVV, NPT)

- Art. I: Offizielle KW-Staaten geben keine Kernwaffen weiter
- Art. II: Nichtkernwaffenstaaten erklären Verzicht auf Kernwaffen
- Art. III: Überwachung der zivilen Programme in Nichtkernwaffenstaaten
- Art. IV: Freie Entwicklung der zivilen Kernenergienutzung
- Art. VI: Verpflichtung zur (vollständigen) nuklearen Abrüstung

Internationale Atomenergiebehörde (IAEO)

- Gründung 1957, Organisation der Vereinten Nationen
- Rolle: Förderung und Kontrolle der zivilen Kernenergie
- Zentrale Aktivität: Durchführung internationaler Safeguards
- Ziel:
  → rechtzeitige („timely“) Detektion, nicht aber
  → Verhinderung der Abzweigung von nuklearem Material
- „Früher“ nur Kontrolle von „deklarierten“ Anlagen
- „Neu“: Zusatzprotokoll (INFCIRC/540)

- Siehe auch Vortrag I. Niemeyer

wikipedia

Urananbergbau

Nukleare Brennstoffspirale

wikipedia

Foto: Dr. Andreas Kronenberg, Los Alamos National Laboratory, USA

Nukleare Brennstoffspirale

Bild: Urenco

https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-14-24695

Nukleare
Brennstoffspirale

Image: Cameco

Brennelement-
fertigung

Urananbergbau

Urananreicherung

Uran-
bearbeitung

Nukleare Brennstoffspirale

Brennelement-
fertigung

Framatome/Siemens KWU
http://www.kernenergie-wissen.de/bildergalerie.html

Reaktoren
(LWR)

Urananbergbau

Uran-
bearbeitung

Urananreicherung

Nukleare Brennstoffspirale

Blick auf die Lademaschine während der Beladung des Reaktors

Framatome/Siemens KWU
http://www.kernenergie-wissen.de/bildergalerie.html

Brennelement-
fertigung
Reaktoren
(LWR)
Urananbergbau
Urananreicherung
Uran-
bearbeitung
Abgebrannte
Brennelemente
Nukleare
Brennstoffspirale
Framatome/Siemens KWU
http://www.kernenergie-wissen.de/bildergalerie.html

Oben: US DoE
Unten: HAZ-de Quelle: dpa

aktoren
(LWR)

Abgebrannte
Brennelemente

Zwischenlagerung

Nukleare Brennstoffspirale

Nukleare Brennstoffspirale

Nukleare Brennstoffspirale

Nukleare Brennstoffspirale

Bestände separiertes ziviles Plutonium

Quelle: IPFM 2015

Probleme?

Quelle: Frankfurter Rundschau

Mohamed ElBaradei (ehem. IAEA-General director)

„Some estimates indicate that *40 countries or more now have the know how to produce nuclear weapons*. (…) We are relying primarily on the continued good intentions of these countries, which … could … be subject to rapid change.“

„Information and expertise on how to produce nuclear weapons has become more accessible. This places extra emphasis on the importance of controlling access to weapon-usable nuclear material.“

„And under the current regime, there is nothing illicit for a non-nuclear state to conduct uranium-enrichment activities … or even to possess military-grade nuclear material.“

IAEO-Konferenz 20.9.2004, Speech UN-GA 3.11.2003, Interview in Le Monde 31.10.2003

Zwischenfazit II

- In der heutigen Kernenergienutzung
  - wird Uran aus Erz gewonnen und angereichert
  - entsteht in bestrahltem Brennstoff Plutonium
- Uranbrennstoff hat eine niedrige Anreicherung, sensitiv sind hier vor allem die Technologien und Anlagen zu Anreicherung
- Abgebrannte Brennelemente aus Leistungsrektoren
  - Enthalten ca. 1% Plutonium
  - Sind schwer (~500 kg)
  - Sind sehr stark radioaktiv (Handhabung nur unter massiven Schutzmaßnahmen möglich)
- Bei der Wiederaufarbeitung fällt Plutonium in separierter Form an und wird längerfristig zwischengelagert und dann weiterverarbeitet

3

Und was sind jetzt „Neue Reaktorkonzepte“?

Druckwasserreaktor (DWR)

Primärkreislauf
1 Brennelemente
2 Reaktordruckbehälter
3 Steuerstäbe
4 Druckhalter
5 Hauptkühlmittelpumpe

Sekundärkreislauf
6 Dampferzeuger
7 Frischdampf
8a Hochdruckteil der Turbine
8b Niederdruckteil der Turbine
9 Kondensator
10 Speisewasserpumpe
11 Speisewasser

Kühlkreislauf
12 Hauptkühlwasserpumpe
13 Fluss/Meer/Kühlturm

Sonstiges
14 Sicherheitsbehälter (Stahl)
15 Reaktorgebäude (Betonkuppel)
16 Generator
17 Maschinenhaus

Variationen

- Moderation:
  - Ja: Wasser (Leicht, Schwer), Graphit …
  - Nein: „Schnelle“ Reaktoren
- Kühlung:
  - Wasser (Leicht, Schwer), Gas (Helium, CO_2), Flüssigmetalle (Natrium, Blei)
- Brennstoff:
  - Natururan, angereichertes Uran, Uran/Plutonium (MOX), Thorium/Uran …
  - Fest (Brennstäbe, Platten, Kugeln …)
  - Flüssig (Salzschmelzen)
- Typen: DWR, SWR, CANDU, MAGNOX, AGR, RBMK, SFR …

Zukunft der Atomkraft – Neue Reaktoren der GEN IV?

Was die Medien davon halten

- „in 15 bis 25 Jahren“ am Markt verfügbar
- „10.000 mal weniger Abfälle“ wie gängige Kernkraftwerke
- diese Abfälle bereits „nach 1.000 Jahren“ ungefährlich
- Stromproduktion „so billig, dass sich sogar Schwellenländer die Technik leisten können“
- Reaktoren „inhärent sicher“, schwere Unfälle somit unmöglich
- aufgrund des verwendeten Thoriums als Brennstoff bieten solche Reaktoren „keine Möglichkeit, Waffen herzustellen“

Quelle: verschiedene schweizerische Zeitungen in 2016

Was der Spiegel dazu schreibt

Quelle: Der Spiegel, Nr. 51 / 14.12.2019

Was der Spiegel dazu schreibt

- „Der Reaktorkern wird fast vollständig mit Atommüll gefüllt, das ist praktisch, so kommt der auch gleich weg.“
- „US-Westküsten-Hybris paart sich hier mit Technikoptimismus und märchenhafter Finanzkraft.“
- „So warnen die Experten davor, existierende Reaktoren ‚vorschnell‘ abzuschalten.“
- „Sie [Schnelle Brüter] sind … in der Lage, Uran aus abgebrannten Kernbrennstäben zu spalten, eine mögliche Lösung für das Atommüllproblem. Auch Atombombenrohstoffe wir Uran 235 oder Plutonium könnten in den Anlagen verbrannt werden – ein Beitrag zur Abrüstung.“
- „Während des Brutprozesses entsteht sogar neuer Kernbrennstoff, der wiederum verbrannt werden kann.“

Quelle: Der Spiegel, Nr. 51 / 14.12.2019

Was sind „Neue Reaktorkonzepte“?

- In 2000 Gründung des „Generation IV International Forum“

Generation I

Early Prototype Reactors

- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Commercial Power Reactors

- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- AGR

Generation III

Advanced LWRs

- ABWR
- System 80+

Generation III +

Evolutionary Designs Offering Improved Economics for Near-Term Deployment

Generation IV

- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant

Source: GIF 2002

Gen IV „Neue Reaktorkonzepte“

- Sodium-cooled Fast Reactor (SFR, Natriumgekühlter schneller Brüter)
  - Das einzige als „kommerziell verfügbar“ eingestufte Konzept
- (Very) High Temperature Reactor – ((V)HTR, Hochtemperaturreaktor)
  - Gegenwärtig in Entwicklung vor allem in China
- Gas-cooled Fast Reactor (GFR, gasgekühlter Schneller Brüter)
- Molten Salt Reactors, (MSR, Salzschmelzereaktor)
  - Einziges Reaktorkonzept mit flüssigem Brennstoff
- Lead-cooled Fast Reactor (LFR, bleigekühlter Schneller Brüter)
- SuperCritical Water-cooled Reactor (SCWR)

Gen IV Goals (2002)

- Sustainability 1: "… meets clean air objectives and … effective fuel utilization …"
- Sustainability 2: "… reduce the long-term stewardship burden …"
- Economics 1+2: "… clear life-cycle cost advantage … level of financial risk comparable to other energy projects …"
- Safety 1+2+3: "… very low likelihood and degree of reactor core damage. … will eliminate the need for offsite emergency response"
- Proliferation Resistance: "… least desirable route for diversion or theft of weapons-usable materials, and provide increased physical protection against acts of terrorism"

Source: GIF 2002 (Highlighting by C. Pistner)

Gen IV Goals (2018)

- "Gen IV concepts complement existing and evolutionary Gen III/III+ reactors, which will be deployed throughout the century, by providing additional options and applications, such as:
  - optimisation of resource utilisation
  - multi-recycling of fissile materials/used fuel and reduction of the footprint of geological repositories for high-level waste; …"
- "…promotion of synergy between non-proliferation, physical protection and a robust safety design, thus strengthening a safety culture that is aimed at optimal integration of safety, security and safeguards for advanced fuel cycles and reactor concepts in order to achieve greater public acceptance."
- The time perspective is a readiness for commercial fleet deployment by around 2045 (for the first systems).

Source: GIF 2018 (Highlighting by C. Pistner)

Zwischenfazit III

- „Neue Reaktorkonzepte“ werden heutige Reaktoren auf absehbare Zeit nicht ersetzen, sondern höchstens ergänzen
- Die mit den heutigen Reaktoren verbundenen Proliferationsrisiken bleiben bei anhaltender Kernenergienutzung daher längerfristig bestehen

Proliferationsaspekte

GIF:

- geringe Attraktivität des Gesamtsystems für die Abzweigung oder den Diebstahl kernwaffenfähiger Materialien

Leitfrage:

- Erschwert die Brennstoffver- und –Entsorgung neuer Reaktor-konzepte einen Zugriff auf kernwaffenfähiges Material?

Sodium Cooled Fast Reactors, (SFR, Schnelle Brüter)

Quelle: GIF 2002

SFR – Überblick

- Erste Ansätze bereits 1940er Jahre; Ziel: erbrüten von Plutonium aus Uran, dass als „rar“ betrachtet wurde
- Admiral Hyman Rickover (1956): „expensive to build, complex to operate, susceptible to prolonged shutdown as a result of even minor malfunctions, and difficult and time-consuming to repair.”
- Prognose CEA, Dezember 1976:
  - Bis 2000: 540 Schnelle Brüter
  - Bis 2025: 2744 Schnelle Brüter
- Heute: 3 in Betrieb
- Weltweite Bestände an separiertem zivilem Plutonium > 200 t

Angaben aus: IPFM, RR 8,2010

SFR – Historie und Gegenwart

	MWe	MWt	Operation
France			
Rapsodie		40	1967–83
Phénix	250		1973–2009
Superphénix	1240		1985–98
India			
FBTR		40	1985–
PFBR	500		2010?
Japan			
Joyo		140	1977–
Monju	280		1994–95, 2010?
USSR/Russia			
BR-5		5	1959–2004
BOR-60	12		1969–

	MWe	MWt	Operation
USSR/Russia (cont.)			
BN-350 (Kazakhstan)	350		1972–99
BN-600	600		1980–
BN-800	800		2014?
United Kingdom			
DFR	15		1959–77
PFR	250		1974–94
United States			
EBR-I	0.2		1951–63
EBR-II	20		1963–94
Fermi 1	66		1963–72
SEFOR		20	1969–72
Fast Flux Test Facility		400	1980–93

Quelle: IPFM, RR 8, 2010, Table 1.1

SFR Timelines (2002/2014)

Source: GIF 2002, GIF 2014

SFR und Proliferation

- Primäres Ziel:
  Ressourcenausnutzung → Plutoniumproduktion
- Daher:
  Wiederaufarbeitung und Plutonium- oder Aktinidenabtrennung
- In Brutbereichen besonders isotopenreines Plutonium erzeugbar

Angaben aus: IPFM, Fast Breeder History 2010

SFR – Schlussfolgerungen

- Status:
  über 20 Prototypen und mehr als 400 Jahre Betriebserfahrung in über 70 Jahren F&E, immer noch kein kommerziell konkurrenzfähiges System verfügbar
- Brennstoffausnutzung:
  Fundamentaler Nutzen des Erbrütens von neuem Spaltstoff in der vorhersehbaren Zukunft nicht notwendig; aber zentrales Entwicklungsinteresse bei Schnellen Brütern
- Proliferation:
  Potenziell erhebliche Nachteile, da große Mengen qualitativ hochwertigen Spaltmaterials erzeugt werden (sollen), aber starke Abhängigkeit von konkreter technischer Auslegung

→ Entwicklungskriterien stehen in starkem Spannungsfeld!

(Very) High Temperature Reactors ((V)HTR)

HTR-PM

Schematische Darstellung der Brennstoff-kugel des Kugelhaufen-Reaktors

Quelle: GIF 2018, Kölzer 2011

(V)HTR Timelines (2002/2014)

Source: GIF 2002, GIF 2014

Kernreaktionen (→ Thorium)

s: Aus Uran entsteht Plutonium

Exkurs – Thorium

- Thorium-Uran-Brennstoff: Uran-233 als Spaltstoff
  - geringe kritische Masse im Bereich von 15-30 kg
  - geringer Anteil an Spontanspaltungen
  - lange Halbwertszeit
  - SQ: 8 kg
- Problematisch: Uran-232
  - Halbwertszeit von 69 Jahren
  - sehr harte Gammastrahler (Gammaenergie von 2,6 MeV)
  - bei frisch abgetrenntem Uran noch gering, Gleichgewicht nach einigen Jahren
  - Detektierbarkeit, Handhabung nur abgeschirmt

(V)HTR – Übersicht

- Status:
  60 Jahre Entwicklung, verschiedene ambitionierte F&E Programme (U.S., Deutschland, Südafrika) sind gescheitert
- Proliferation:
  wesentliches Argument ist die Nutzung von Thorium; hier aber kein eindeutiger Vorteil eines Th/U-Brennstoffs gegenüber einem U/Pu-Brennstoff

Molten Salt Reactors, MSR

Quelle: GIF 2002, AEC 1972

MSR Timelines (2002/2014)

Source: GIF 2002, GIF 2014

MSR – Überblick

- Status:
  Erhebliche Anstrengungen zwischen 1940 und 1970, Revival nach 2000, kommerziell konkurrenzfähiges System nicht vor 2060
- Proliferation:
  besondere Problemstellung aufgrund der Notwendigkeit/Möglichkeit einer „on-line“ Wiederaufarbeitung
  - 2002: MSR-Konzept vor allem als thermischer Reaktor in seiner Funktion als Aktiniden-„Brenner“; hier keine kontinuierliche Wiederaufarbeitung
  - 2014: seit 2005 dagegen vor allem Anwendungen eines MSR als schneller Brutreaktor (MSFR)
    - in einer eigenen Brut-Salzschmelze wird neues Spaltmaterial erbrütet
    - in Vor-Ort-Wiederaufarbeitungsanlage abgetrennt und
    - der Brennstoff-Salzschmelze zugeführt

MSR – Diskussion I

- Als exemplarisches Reaktorkonzept Analyse von Proliferations-risiken eines MSFR durchgeführt (GIF 2011b):
- Referenzszenario
  - Thorium-Uran-Brennstoff
  - Zum Start : entweder Uran-233 aus anderen MSFR oder Plutonium/Aktiniden aus wiederaufgearbeitetem Brennstoff existierender LWR
  - Bei 3 GW thermischer Leistung:
    - 4,7 Tonnen Uran-233
    - 62% im Gesamturan (ergibt kritische Masse von ca. 25 kg)
    - Uran-232 Anteil im Gleichgewicht bei 1700 ppm
  - Brut-Salzschmelze für kontinuierliche Versorgung mit Spaltstoff

MSR – Diskussion II

- Aus Brennstoff-Salzschmelze
  - drei Verarbeitungsschritte: 1) Uran, Neptunium und 90% des Plutoniums; 2) verbleibende Aktinide zusammen mit Protactinium 3) Thorium von den Lanthaniden trennen und weiterverwenden
- Aus der Brut-Salzschmelze
  - Inventar von 61,3 kg Uran-233
  - Anteil von 99% im Gesamturan
  - 600 ppm Uran-232
- Schlussfolgerungen in (GIF 2011b): in MSFR-Konzepten auf Brutmantel verzichten, um damit verbundene Proliferationsgefahren auszuschließen

MSR – Schlussfolgerungen

- Proliferation:
  - besondere Problemstellung aufgrund der Notwendigkeit/Möglichkeit einer „on-line“ Wiederaufarbeitung
  - Deutliche Abhängigkeit vom gewählten Design

→ Entwicklungskriterien („Ressourcennutzung“ vs. „Proliferationsresistenz“) stehen wiederum in starkem Spannungsfeld!

Zwischenfazit IV

- „Neue Reaktorkonzepte“ sind alt
- Wesentliches Ziel vieler Konzepte ist das Erbrüten neuen Spaltstoffs, um Kernenergie sehr langfristig nutzbar zu machen
- Das Ziel, neue Spaltstoffe zu erzeugen, steht in direkter Konkurrenz zum Ziel, die zukünftige Kernenergienutzung weniger Proliferationsrelevant zu gestalten
- Ein Thorium/Uran-Brennstoff ist nicht per se proliferationsresistener als ein Uran/Plutonium-Brennstoff

4

Die Lösung der Endlagerproblematik: Transmutation?

Kernreaktionen (→ Transmutation)

Bekanntester Prozess: Aus Uran entsteht Plutonium

Transmutation – Das Gesamtsystem

Quelle: Acatech 2014

Transmutationsreaktoren – Konzepte

Beschleunigergetriebene Systeme

MYRRHA
Quelle: http://www.accelerators-for-society.org/prospects/index.php?id=10

EFIT – European Facility for Industrial Transmutation
Inerte Matrix

Schnelle Reaktoren

ASTRID
Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration (French)
MOX Brennstoff

Wiederaufarbeitung (→ Partitionierung)

- Extraktion von Plutonium und Uran.

Figure 3: Principle of Cogema's continuous rotary dissolver

Quelle: http://www.ricin.com/nuke/bg/lahague.html

Quelle: http://kernfragen.de/lexikon/purex-verfahren

Partitionierung – Weitere Abtrennung

- Extraktion der minoren Aktiniden

Selective ActiNide Extraction – SANEX
DIAMide Extraction – DIAMEX

Diamide is DMDBTDMA
dimethyl-dibutyl-tetradecyl malonamide

Anlage zur Durchführung von hydrometallurgischen Trennprozessen im Labormaßstab in einer Heißen Zelle am JRC-ITU (Institut für Transurane)

Transmutation in Deutschland

Abgebrannte Brennelemente (Ende 2022):

- 10.500 t Schwermetall (SM), darin
- Ca. 140 t Plutonium und minore Aktinide (Transurane, TRU)
- Ca. 430 t Spaltprodukte

Transmutation in Deutschland

Transmutationsschritte

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

EFIT	
Anfangsinventar	Ca. 4.4 t Transurane
Nach einem Einsatz im Reaktor für 3 Jahre	10% Anfangsinventar Transurane verbrannt
Wiederaufarbeitung	Ca. 9-10 t Transurane
Reduktion Transurane nach 150 Jahren	Von 140 t auf ca. 5 t
Spaltproduktaufkommen	135 t zusätzlich

Transmutation in Deutschland

- 5-6 Reaktoren (400 MW thermische Leistung)
- 1 große Wiederaufarbeitungsanlage
- 1 Fabrik zu Brennstofffertigung
- 150 Jahre Betrieb
- Aus 140 t TRU werden ca. 5 t
- Aus 430 t Spaltprodukte werden ca. 565 t
- ca. 100.000 t zusätzliche schwach- und mittelradioaktive Stoffe fallen an

Nukleare Nichtverbreitung bei direkter Endlagerung – das Beispiel Deutschlands

- Zugriff auf spaltbare Materialien
  - 140 t TRU verbleiben dauerhaft in abgebranntem Brennstoff
  - Nach ca. 50-100 Jahren werden TRU Bestände in Endlager verbracht
  - Nach ca. 300 Jahren nimmt Selbstschutz durch Strahlungsbarriere ab, d.h. potenziell vereinfachter Zugriff auf spaltbares Material im Endlager denkbar
  - Überwachung des Endlagers (Safeguards) notwendig
- Technik und Know-How
  - Nach Beendigung der Kernenergienutzung Notwendigkeit für kerntechnisches Personal (Forschung, Industrie, Medizin)
  - Keine Anlagen zur Anreicherung oder Wiederaufarbeitung (Ausnahme ggf. Forschungsreaktoren)

Nukleare Nichtverbreitung bei P&T Endlagerung – das Beispiel Deutschlands

- Zugriff auf spaltbare Materialien
  - Für 150 Jahre werden ca. 20 – 2 t TRU pro Jahr abgetrennt und verarbeitet
  - Nach ca. 150-200 Jahren werden 14 t TRU in ein Endlager verbracht (plus ca. 18 t TRU aus WWER und Forschungsreaktoren)
  - Nach ca. 100-300 Jahren nimmt Selbstschutz durch Strahlungsbarriere ab, d.h. potenziell Zugriff auf spaltbares Material im Endlager denkbar
- Technik und Know-How
  - Für 150 Jahre Notwendigkeit für ausgebildetes kerntechnisches Personal (Reaktorbetrieb, Wiederaufarbeitung, Brennstofffertigung)
  - Für 150 Jahr mind. eine Anlage zur Wiederaufarbeitung und eine Anlage zur Brennstofffertigung

Zwischenfazit V

- Einerseits:
  - Reduzierung des Plutoniuminventars im Endlager (von > 120 t auf < 5 t)
  - Aber: ca. 5 kg für eine Kernwaffe ausreichend
- Andererseits:
  - Umgang mit großen Mengen nicht mehr selbstschützender kernwaffenfähiger Materialien während der 150 Jahre Betrieb der Anlagen
  - Hohes Brutpotenzial der Anlagen
  - Entwicklung & Aufrechterhaltung von Wiederaufarbeitungsexpertise notwendig, die grundsätzlich Dual-Use fähig ist

5

Fazit

Fazit – Lösen neue Reaktorkonzepte das Proliferationsproblem?

- Trotz „Neuer Reaktorkonzepte“ müssten heutige Reaktorkonzepte langfristig weiter genutzt werden
  → bestehende Proliferationsprobleme (z.B. Anreicherungsanlagen) bleiben bestehen
- Viele „Neue Reaktorkonzepte“ dienen zum Erbrüten neuen Spaltstoffs aus Uran oder Thorium
  →Zielkonflikt zwischen „Ressourcennutzung“ und „Proliferation“
- Thorium
  - benötigt einen Spaltstoff als „Starthilfe“,
  - auch Uran-233 ist ein gut geeigneter Kernwaffenstoff
- Bei einer Abtrennung neuer Spaltstoffe hängt die Proliferationsresistenz entschieden vom „Design“ der jeweiligen Anlage ab

Fazit – Lösen neue Reaktorkonzepte das Proliferationsproblem?

- … eher nicht!

Quelle: Spektrum der Wissenschaft, Februar 2013.

Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Thank you for your attention!

Haben Sie noch Fragen?
Do you have any questions?