

PAUL SCHERRER INSTITUT



Andreas Pautz :: Leiter des Forschungsbereichs Nukleare Energie und Sicherheit (NES) :: Paul Scherrer Institut

Aktuelle Entwicklungen in der Kernenergie und die Machbarkeit von Kernkraftwerken der neuen Generation

Referat im Rahmen der Vorlesungsreihe «Unsere postfossile Energiezukunft», St. Gallen, 22.09.2022

- Situation in der Schweiz
- Reaktoren der Generation-III (LWR)
- Small Modular Reactors (SMR) – LWR
- Reaktorkonzepte der 4. Generation (GEN-IV)
 - Hochtemperaturreaktoren & Kogeneration
 - Geschlossener Brennstoffkreislauf

Leichtwasserreaktoren (LWR) der Generation-II: vor 2000 in Betrieb genommene Leistungsreaktoren mit Leistungen von 300-1600 MW_e (alle Reaktoren der Schweiz)

Leichtwasserreaktoren (LWR) der Generation-III: «evolutionäre» Weiterentwicklungen der Generation-II, mit erheblichen Verbesserungen bei der Sicherheit, und typischerweise Leistungen > 1000 MW_e

Generation-IV: «revolutionäre» Reaktorkonzepte, die statt mit Wasser mit Flüssigmetallen (Blei/Natrium) oder mit Gas (Helium) arbeiten und «Brennstoff erbrüten» oder «Abfall verbrennen» können sollen

SMR: Kleine Modulare Reaktoren mit Leistungen unterhalb 300 MW_e. Diese können sowohl LWR (Generation-III) als auch Generation-IV sein.

MSR: Salzschnmelzereaktoren (**M**olten **S**alt **R**eactors), ein «exotischer» Generation-IV-Typ, bei dem der Brennstoff in flüssiger Form durch den Reaktor zirkuliert

Thorium: ein Schwermetall, das als Alternative zu Uran im Kernreaktor eingesetzt werden könnte

Transmutation: der physikalische Prozess, bei dem durch Neutronenreaktionen z.B. Uran zu Plutonium, oder Thorium zu Uran konvertiert wird

– **Art. 12a⁸ Verbot des Erteilens der Rahmenbewilligung für Kernkraftwerke**

Rahmenbewilligungen für die Erstellung von Kernkraftwerken dürfen nicht erteilt werden.

⁸ Eingefügt durch Anhang Ziff. II 7 des Energiegesetzes vom 30. Sept. 2016, in Kraft seit 1. Jan. 2018 ([AS 2017 6839](#); [BBl 2013 7561](#)).

– **Art. 9⁶ Wiederaufarbeitung**

¹ Abgebrannte Brennelemente sind als radioaktive Abfälle zu entsorgen. Sie dürfen nicht wiederaufgearbeitet oder zur Wiederaufarbeitung ausgeführt werden.

² Der Bundesrat kann zu Forschungszwecken Ausnahmen vorsehen.

⁶ Fassung gemäss Anhang Ziff. II 7 des Energiegesetzes vom 30. Sept. 2016, in Kraft seit 1. Jan. 2018 ([AS 2017 6839](#); [BBl 2013 7561](#)).

– **Art. 74a⁴¹ Berichterstattung über die Entwicklung der Kerntechnologie**

Der Bundesrat erstattet der Bundesversammlung regelmässig Bericht über die Entwicklung der Kerntechnologie.

⁴¹ Eingefügt durch Anhang Ziff. II 7 des Energiegesetzes vom 30. Sept. 2016, in Kraft seit 1. Jan. 2018 ([AS 2017 6839](#); [BBl 2013 7561](#)).

Kernanlagen der Generation-II in der Schweiz



Kernanlagen der Generation-II in der Schweiz



Stilllegung: 2029/2031

KKB 1/2, DWR, 2 x 365 MW_e

Stilllegung: 2019

KKM, SWR, 373 MW_e



Stilllegung: 2039

KKG, DWR, 1010 MW_e



Stilllegung: 2044

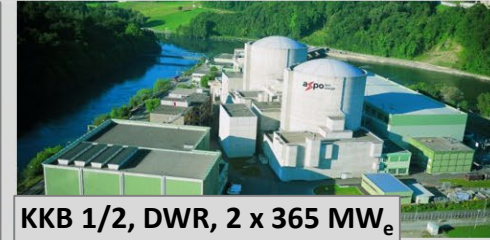
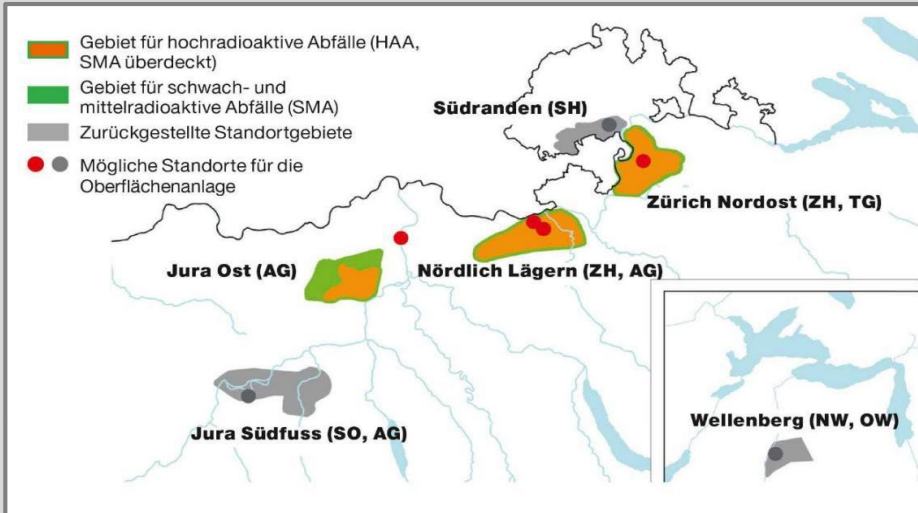
KKL, SWR, 1220 MW_e



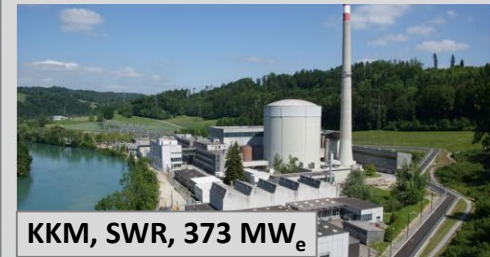
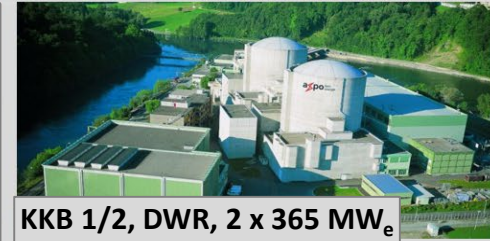
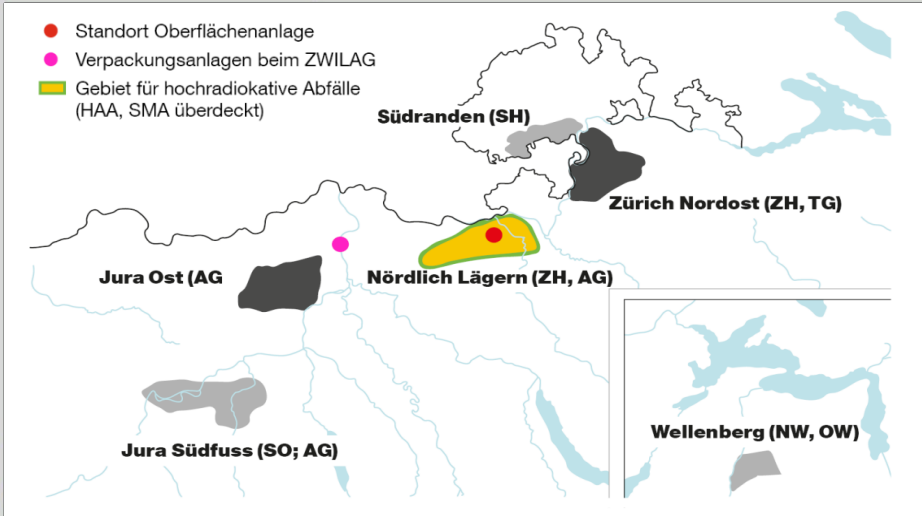
Stilllegung: nach 2070

ZWILAG

Geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle



Geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle



Boris Johnson says – build a nuclear power plant every year

The announcement was made during the Prime Minister's visit to Hartlepool nuclear power station



Dimitris Mavrokefalidis
More Articles

Tuesday 3 May 2022



Image: Boris Johnson / Twitter

Polish state firm signs deal to start work on nuclear reactors with US firm

FEB 15, 2022 | BUSINESS, ENERGY & CLIMATE

The Netherlands to build new nuclear plants under coalition deal

Deal contains a strong domestic push for using zero-carbon energy.

ATOMKRAFT

Belgien verschiebt Atomausstieg um zehn Jahre

Die Erleichterung war auch im Westen Deutschlands groß, als Belgien ankündigte, 2025 die letzten Reaktoren vom Netz zu nehmen. Jetzt sieht die Regierung genügend Gründe für eine drastische Laufzeitverlängerung.

NEWS | March 14, 2022

Czech Republic to launch tender for new unit at Dukovany nuclear plant

The tender for the new unit is said to have been called by the government to replace one of the existing units.



Romania unveils location of first small modular reactor



By Claudia Patricio May 26, 2022



Romania's energy minister Virgil Popescu announced that the country's first small modular reactor (SMR) will be located at the Doicești thermal power plant, in the Dâmbovița County.

France to build up to 14 new nuclear reactors by 2050, says Macron

French president says 'renaissance' of atomic energy industry will help end country's reliance on fossil fuels



Emmanuel Macron made his announcement during an visit to the eastern industrial town of Belfort. Photograph: Jean-François Badias/AFP/Getty Images

Ukraine planning for post-war nuclear power plants

16 May 2022



Energoatom's CEO Petro Kotin says that construction work on two new Westinghouse AP1000 units at the Khmelnytsky nuclear power plant "will begin as soon as the war is over".



Petro Kotin, CEO of Energoatom (Image: Energoatom)

Government to permit final disposal of spent nuclear fuel at Forsmark

Published 27 January 2022

The Government has today decided to permit the final disposal of spent nuclear fuel at Forsmark in Östhammar Municipality. The Government has also decided to permit construction of the encapsulation plant that is needed to handle the spent nuclear fuel in Oskarshamn Municipality.

“Sweden and Finland are the first countries in the world to take responsibility for nuclear waste. This will be a secure spent fuel repository that will provide safety for both the environment and people. In addition, it provides long-term conditions for the Swedish electricity supply and Swedish jobs,” says Minister for Climate and the Environment Annika Strandhäll.

SCK CEN erhält 100 Millionen Euro für Forschung an modularen Kernreaktoren

Veröffentlicht am 24.05.2022 um 16:33

Das Kernforschungszentrum SCK CEN in Mol (bei Anwerpen) wird von der Föderalregierung ein Forschungsbudget von 100 Millionen Euro erhalten. Dies sagte Premierminister Alexander De Croo (Open VLD) am Dienstag anlässlich der Feierlichkeiten zum 70-jährigen Bestehen des SCK CEN.

ENERGY • EDITORS' PICK

Finland Breaks Ground On World's First Deep Geologic Nuclear Waste Repository

James Conca Former Contributor @

I write about nuclear, energy and the environment

Follow

May 31, 2021, 08:00am EDT



Listen to article 10 minutes



The [Radiation and Nuclear Safety Authority](#) of Finland has certified the process. Operation of the repository is expected to begin in 2023. The total cost estimate is about €2.6 billion (\$3.4 billion).

Das AKW Mühleberg war einmal

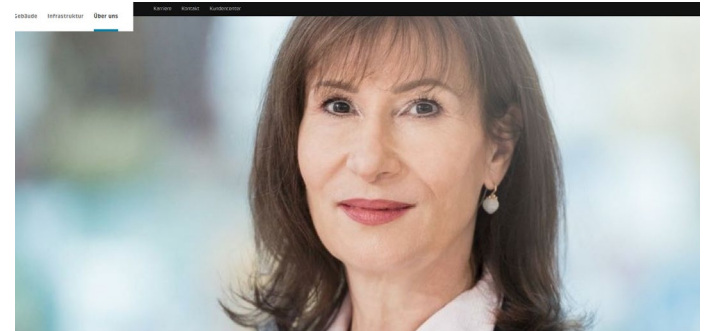
Das AKW Mühleberg ist Geschichte. Mit der Abschaltung des ersten kommerziellen Kernkraftwerks in der Schweiz neigt sich eine Ära dem Ende zu. Doch wie der Strom ersetzt wird, ist unsicher.

Helmut Stalder, Mühleberg
20.12.2019, 14.01 Uhr



Mit dem Ende des AKW Mühlebergs fällt auf einen Schlag ein Viertel der Stromproduktion der BKW weg, und die Produktion im Kanton Bern halbiert sich.

Anthony Anex / Keystone



Startseite > Über uns > Artikel > Blog > Standpunkte und Meinungen > «Energie produzieren ist ein Risikogeschäft»

«Energie produzieren ist ein Risikogeschäft»

Suzanne Thoma äussert sich zu den Risiken, welche das Produzieren von Energie mit sich bringt. In ihrer Kolumne schreibt die BKW-Chefin: «Wer Kraftwerke baut und betreibt, muss seine Investitionen auf eine Lebensdauer von bis zu 100 Jahren ausrichten. In dieser Zeitspanne kann viel passieren, auf das ein Energieunternehmen kaum Einfluss hat.»

Das AKW Mühleberg war einmal

Das AKW Mühleberg ist Geschichte. Mit der Abschaltung des ersten kommerziellen Kernkraftwerks in der Schweiz neigt sich eine Ära dem Ende zu. Doch wie der Strom ersetzt wird, ist unsicher.

Helmut Stalder, Mühleberg
20.12.2019, 14.01 Uhr

Hören Merken Drucken Teilen



Mit dem Ende des AKW Mühlebergs fällt auf einen Schlag ein Viertel der Stromproduktion der BKW weg, und die Produktion im Kanton Bern halbiert sich.

Anthony Arnes / Keystone

Ex-BKW-Chefin Suzanne Thoma warnt

«Wir müssen uns auf mögliche Stromabschaltungen vorbereiten»

Die ehemalige Strommanagerin Suzanne Thoma äussert sich zu einer drohenden Strommangellage – und hält den Atomausstieg für einen Fehler. Dass bei einer Stromlücke vor allem die Industrie sparen soll, findet sie nicht richtig.

Publiziert: 25.08.2022 um 18:04 Uhr | Aktualisiert: 26.08.2022 um 16:43 Uhr



Q 60



1/7 Die ehemalige BKW-Chefin Suzanne Thoma hält Stromabschaltungen für realistisch.

Die Schweiz schaltet ab ... und setzt auf Notstrom

Bern, 02.09.2022 - Der Bundesrat stärkt mit verschiedenen Massnahmen die Energieversorgung der Schweiz. Neben der Wasserkraftreserve, die bereits im kommenden Winter bei Bedarf gezielt genutzt werden kann, gehören auch Reservekraftwerke dazu. Mitte August 2022 hat der Bundesrat sein Einverständnis für entsprechende Vertragsverhandlungen gegeben. Nun hat das UVEK den ersten Vertrag unterzeichnet. Der Bund beschafft damit bei der Firma GE Gas Power acht mobile Gasturbinen. Sie werden auf dem Firmengelände von GE in Birr (AG) aufgebaut. Die Turbinen können neben Gas auch mit Öl oder Wasserstoff betrieben werden. Der heute unterzeichnete Vertrag ermöglicht es, dass diese Turbinen bereits für die kritische Zeit gegen Ende des kommenden Winters 2022/23 bis Ende April 2026 zur Verfügung stehen.

Mit dem Abschluss der Verhandlungen zwischen dem Bund und der Firma GE Gas Power bestehen jetzt die vertraglichen Grundlagen dafür, dass ein temporäres Reservekraftwerk in der kritischen Zeit gegen Ende Winter 2023 bei Bedarf eingesetzt werden kann. Die Verhandlungen mit möglichen weiteren Anbietern von Reservekraftwerken laufen noch. Die Turbinen werden von GE Gas Power auf dem Betriebsgelände am Standort Birr im Kanton Aargau aufgebaut. Es handelt sich um acht modulare, mobile Gasturbinen des Typs TM2500 mit je mindestens 30 Megawatt Leistung, insgesamt also gegen 250 Megawatt. Das entspricht in etwa der zweieinhalbfachen Leistung des Wasserkraftwerks Rheinfelden. Sie können neben Gas auch mit Öl oder Wasserstoff betrieben werden. Die Gesamtkosten für die ganze Laufzeit betragen rund 470 Millionen Franken.

Die Regelungen für den Aufbau, sowie für die Vorbereitungsarbeiten und Regelungen zu deren Inbetriebnahme und Betrieb werden in einer Verordnung verankert, über die der Bundesrat Mitte September entscheiden wird. Die Reservekraftwerke werden dem Emissionshandel unterstellt. Parallel dazu laufen die Abklärungen, welches Unternehmen den Betrieb der Anlage übernehmen wird.



Welche Vorzüge bietet die Kernenergie überhaupt?

- **Kernkraft ist im Betrieb praktisch CO₂-frei:** gerechnet über den gesamten Lebenszyklus hat (in CH) nur Wasserkraft geringere CO₂-Emissionen
- **Der Weiterbetrieb existierender Anlagen ist günstig.** Laufzeitverlängerungen (bis zu 80 Jahren, bei ursprünglich geplanten 40 Jahren) sind daher attraktiv für die Betreiber
- **Die Energiedichte der Kernkraft ist extrem hoch.** Dadurch sind Flächenverbrauch, Energie- und Materialeinsatz (Stahl/Beton) im Bau viel geringer als bei Solar- oder Windkraft (Faktor 10/50)
- **Die erforderliche Menge an Brennstoff ist extrem limitiert.** Die Uranbeschaffung trägt nur mit ca. 10-15% zu den Stromgestehungskosten bei, das Uran stammt aus gesicherten Quellen
- **Kernkraftwerke sind ganzjährig hoch verfügbar (ca. 90%)** und arbeiten optimal im stabilen Grundlastbetrieb. Sie haben eine lange Lebensdauer (*Design Lifetime* von Neuanlagen: 60 Jahre)
- **Kernkraftwerke sind lastwechselfähig:** im oberen Lastbereich sind potentiell bis zu 100 MW pro Minute Lastwechsel und damit ein Beitrag zur Primärregelung möglich
- **«Hybride» Anwendungen** wie Fern- oder Prozesswärme, Elektrolyse (H₂-Erzeugung), CO₂-Atmospheric Capture und Meerwasserentsalzung sind grundsätzlich möglich

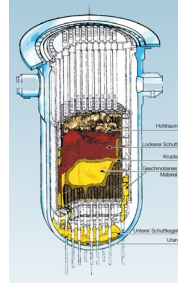
- **Nicht sicher:** Risiko von Kernschmelzunfällen mit grosser Freisetzung von Radioaktivität, Ziel von Terror- und Cyberattacken, Proliferation **=> Generation-III**
- **Nicht wirtschaftlich:**
 - grosse monolithische und kapitalintensive Kraftwerkseinheiten **=> SMR**
 - Klumpenrisiko für die Versorgungssicherheit bei Ausfall **=> SMR**
 - bestenfalls moderater thermischer Wirkungsgrad (<35%) **=> Generation-IV**
- **Nicht nachhaltig:** **=> Generation-IV**
 - Endlichkeit der Uranressourcen: damit kann Kernkraft nur Brückentechnologie sein
 - Keine Brennstoff-Kreislaufwirtschaft und kein befriedigendes Abfallentsorgungskonzept (jenseits der geologischen Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle)

Reaktoren der Generation-III (LWR): Sicherheit

Die schweren Unfälle der Generation-II

Three-Mile-Island 1978 (Kernschmelze nach kleinem Kühlmittelleck)

- Ursachen: mangelhafte Warteninstrumentierung, Komplexität des Ereignisablaufs, Fehler der Operateure bei Einleitung von Notfallmassnahmen
- Konsequenzen: Anlage zerstört, aber nur sehr geringe Freisetzen von Radioaktivität und keine Verletzten/Toten



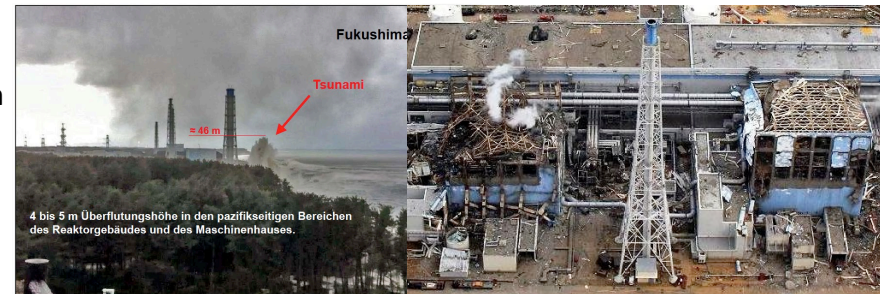
Chernobyl 1986 (explosionsartige Leistungsexkursion mit Graphitbrand)

- Ursachen: massive Fehler im Anlagendesign, grob fahrlässige/kriminelle Handlungen der Operateure, komplette Intransparenz bei Notfallmassnahmen
- Konsequenzen: Anlage vollständig zerstört, massive Freisetzen von Radioaktivität mit Ausbreitung über grosse Teile von Europa, 50 Tote vor Ort und geschätzte 4000 Tote (WHO) aufgrund von Folgeschäden



Fukushima 2011 (Kernschmelze in drei Reaktoren nach Tsunami)

- Ursachen: mangelhafte Vorsorge gegen Auslegungsstörfälle, Unterbleiben von Nachrüstmassnahmen, Fehler in der Befehlskette
- Konsequenzen: 4 Reaktorblöcke vollständig zerstört, keine Toten als direkte Folge des Unfalls, aber geschätzt bis zu 1400 durch Evakuierung. Landverlust von ca. 300 km² durch Kontamination



Der weitaus größte Anteil der Anlagenneubauten der Generation-III setzt auf bewährte Leichtwasserreaktor-Technologie (Druck- und Siedewasserreaktoren)

Die Reaktoren der 3. Generation (Gen-III) erweitern die Sicherheitsphilosophie der 2. Generation:

- verstärkter Einsatz **aktiver und passiver Sicherheitssysteme**
 - Berücksichtigung schwerer Störfallabläufe / Kernschmelze bereits im Design
 - Kernschadenswahrscheinlichkeit $< 10^{-6}$ /Jahr
- „**Praktische Eliminierung**“ von Störfallsequenzen, die zu einer frühen Freisetzung von Radioaktivität führen ($< 10^{-7}$ /Jahr), mit *bis zu einer Woche Karenzzeit* bis zum menschlichen Eingriff
- Betrachtung von Störfallszenarios mit Überlagerung verschiedener einleitender Ereignisse sowie interner/externer Einwirkungen => Fukushima-Szenarios



Fukushima Daichi, Blöcke I-IV, Japan



Olkiluoto-III (EPR), Finnland

1970
Generation-II



2020
Generation-III

Sicherheitssysteme der Generation-III am Beispiel EPR

Internes Containment:

- Stahlhülle
- Lecksicherheit bis 6.5 bar
- Ausschluss von H₂-Explosion

Externes Containment:

Flugzeugabsturzsicher

Brennstoffnasslager:

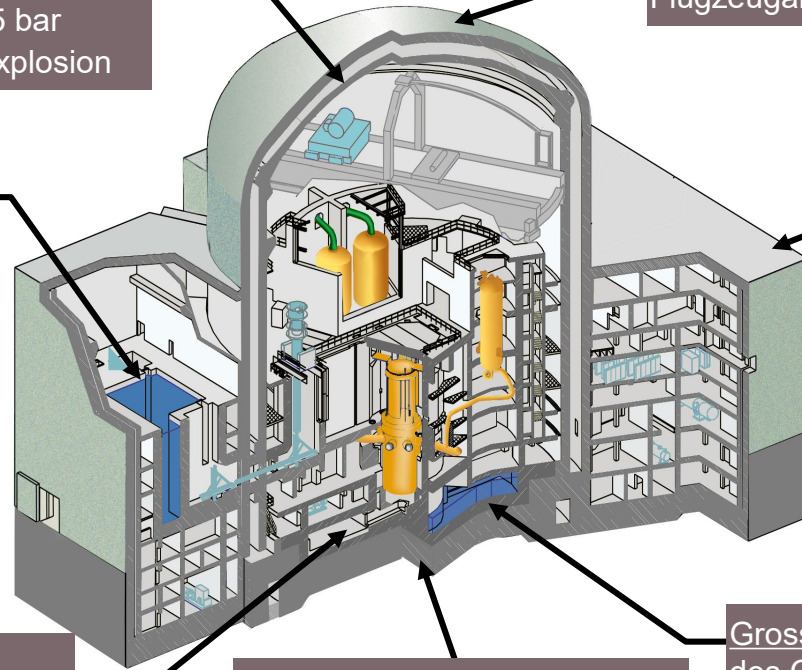
geschützt gegen
Flugzeugabsturz

Sicherheitssysteme:

gebunkert gegen externe
Einwirkungen, durchgängig 4-
fach (2v4) redundant mit
mehreren diversitären
Sicherheitsebenen ausgelegt

**Wahrscheinlichkeit eines
Kernschmelzunfalls $<10^{-6}$ /Jahr**

**Wahrscheinlichkeit einer
frühen Freisetzung $<10^{-8}$ /Jahr**



Core Catcher:

Sicherer Einfang der Kernschmelze bei
schweren Störfällen

Erdbebensicheres Design
ausgelegt für 100'000-jähriges
Erdbeben

Grosser geschützter Wasservorrat innerhalb
des Containments für die Beherrschung
schwerer Störfälle

Kraftwerkstypen der Generation-III am Markt



EPR (Framatome) in Olkiluoto (FI), 1600 MW



AP-1000 (Westinghouse) in Sanmen (CN), 1200 MW



VVER-1200 (Rosatom) in Novovoronezh (RU), 1250 MW



APR-1400 (KEPCO) in Barakah (UAE), 1400 MW

Wann sind diese Reaktoren wirtschaftlich?

Baukosten:

3'500-4'500 \$/kW installiert

Bauzeit:

5-7 Jahre

=> Stromgestehungskosten:

60-100 \$/MWh

Kraftwerkstypen der Generation-III am Markt



EPR (Framatome) in Olkiluoto (FI), 1600 MW)

- Geschätzte Baukosten > 7'000 \$/kW
- Bauzeit (Finnland): 17 Jahre
- Gestehungskosten > 120 \$/MWh
- Hersteller hatte seit 2000 keine Anlage mehr in Betrieb genommen
- Bisher nur zwei Anlagen im kommerziellen Betrieb, 3 in Bau

Wann sind diese Reaktoren wirtschaftlich?

Baukosten:

3'500-4'500 \$/kW installiert

Bauzeit:

5-7 Jahre

=> Stromgestehungskosten:

60-100 \$/MWh



AP-1000 (Westinghouse) in Sanmen (CN), 1200 MW

- Geschätzte Baukosten (USA) > 9'000 \$/kW
- Bauzeit (USA): >10 Jahre
- Gestehungskosten > 150 \$/MWh
- Hersteller hatte seit 1996 keine Anlage mehr in Betrieb genommen
- Bisher nur eine Anlage im kommerziellen Betrieb, 2 in Bau, 2 Projekte abgebrochen

- Baukosten (Indien) < 4'000 \$/kW
- Bauzeit (Indien/Bangladesh): 6 Jahre
- Gestehungskosten ~70 \$/MWh
- Rosatom hat seit 2010 mehr als 20 VVER-Anlagen in Betrieb genommen
- Zwischen 2022 und 2027 sollen 5 VVER-1200 in Russland und weitere 14 VVER weltweit fertiggestellt werden



VVER-1200 (Rosatom) in Novovoronezh (RU), 1250 MW

Wann sind diese Reaktoren wirtschaftlich?

Baukosten:

3'500-4'500 \$/kW installiert

Bauzeit:

5-7 Jahre

=> Stromgestehungskosten:

60-100 \$/MWh

- Baukosten (UAE) ~4'300 \$/kW
- Bauzeit (UAE): 5-8 Jahre
- Gestehungskosten < 80 \$/MWh
- KEPCO hat bereits 6 Anlagen dieses Typs in Korea in Betrieb genommen
- Die 4 Anlagen in den UAE sind das erste Auslandsprojekt des Herstellers

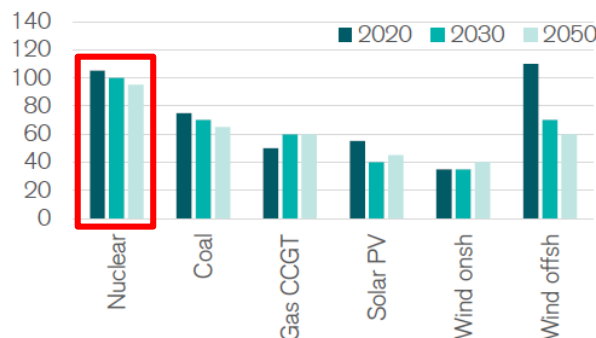


APR-1400 (KEPCO) in Barakah (UAE), 1400 MW

Production costs: nuclear vs. alternative fuels

Nuclear is already cost-competitive with gas in China and India

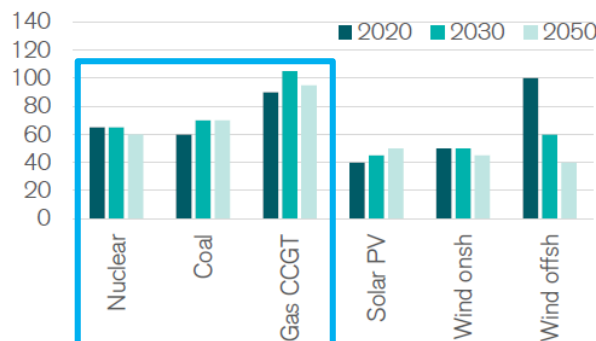
United States: VALCOE (USD/kW)



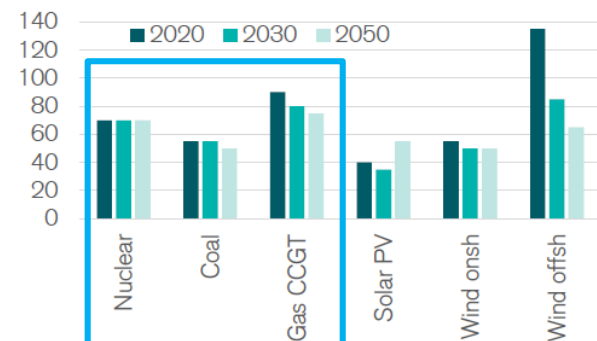
European Union: VALCOE (USD/kW)



China: VALCOE (USD/kW)



India: VALCOE (USD/kW)



VALCOE: value-adjusted levelized costs of electricity, CCGT: combined cycle gas turbine, PV: photovoltaic, kW: kilowatt

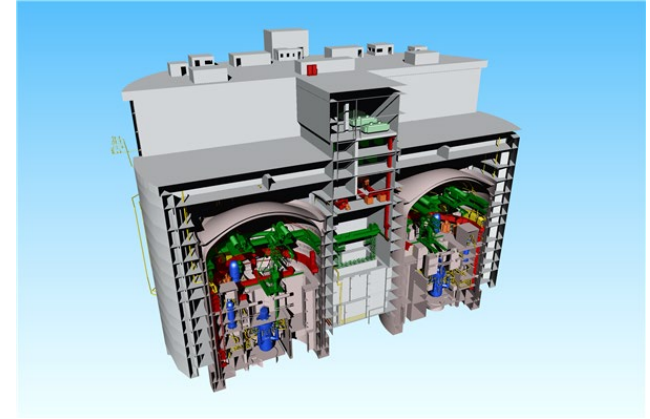
Small Modular Reactors (SMR) - LWR

- **Kleine modulare Reaktoren (SMR)** werden zunehmend als interessante Option angesehen:
 - **Geringere Leistung (45-300 MW_e)** bei vergleichbaren oder geringeren Kosten (<4'000 \$/kW) als grosse Anlagen, ermöglicht durch **Modulbauweise und Serienfertigung**
 - **Deutlich einfacheres Design** als große Leichtwasserreaktoren durch passive Sicherheitskomponenten
 - Je nach Bedarf können **mehrere Module gleichzeitig am selben Standort** gebaut oder nacheinander errichtet, zu- und abgeschaltet werden
 - **Deutlich reduzierte Errichtungsdauer** für jedes Einzelmodul (1.5-2 Jahre als Target)
 - **Kompakte Bauweise** eröffnet die Möglichkeit für Errichtung unter Grund
 - **«Walk-Away-Safe»**
- Die IAEA listet in ihrem SMR-Handbuch um die **70 verschiedene SMR**; davon basiert etwa die Hälfte auf der bekannten Leichtwasserreaktor-Technologie, die anderen setzen auf «revolutionäre» Konzepte (Gas- und Flüssigmetallkühlung, Salzschmelzereaktoren)

Kleine modulare Reaktoren: heute schon erhältlich?



Akademik Lomonosov, Russland, 2 x 40 MW, seit Mai 2020 in Betrieb

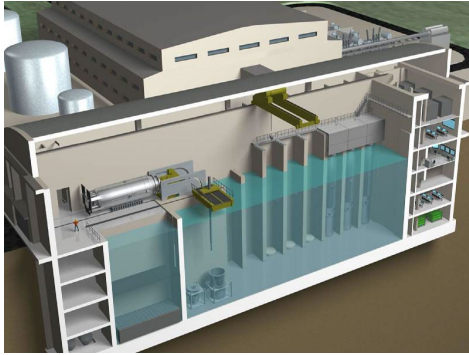


ACP-100, China, seit Juli 2021 im Bau, Fertigstellung 2026



CAREM-25, Argentinien, im Bau geplante Fertigstellung 2023

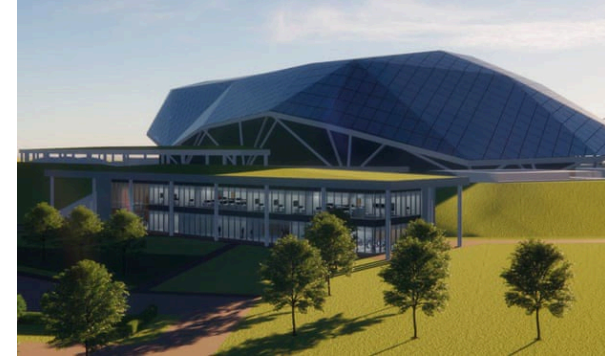
SMR (Generation-III) mit glaubhaftem Zeithorizont um 2030



NuSCALE (6x77 MW), für Utah, ab 2027
LCOE: 65\$/MWh, 3'600 \$/kW installiert



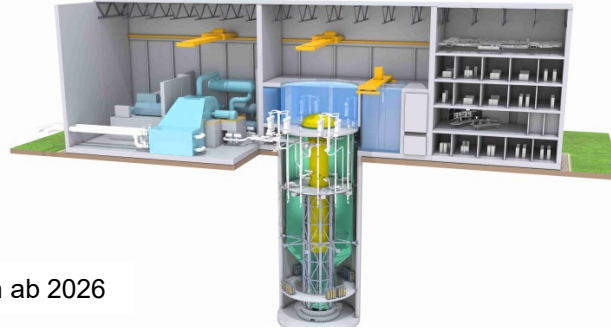
NUWARD (EdF/Technicatome), 170 MW, ab 2030



UK SMR (Rolls Royce), 443 MW, ab 2030



SMART (Korea), 100 MW, Betrieb in Saudi-Arabien ab 2026

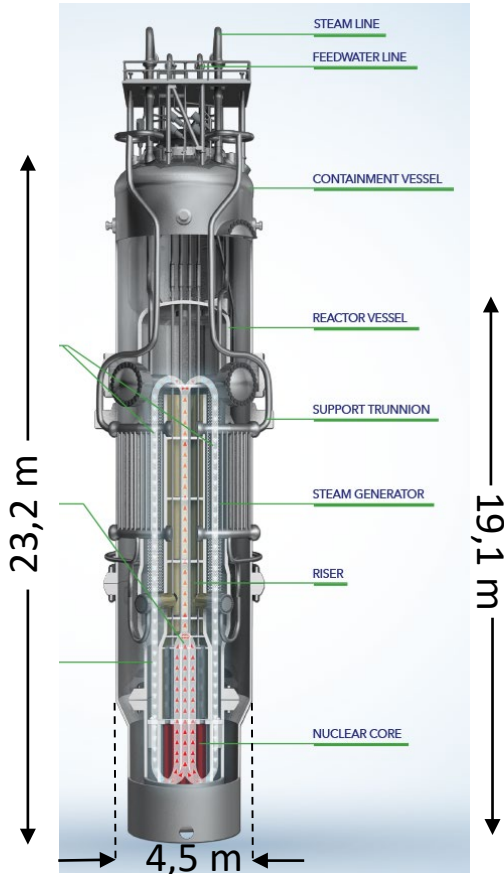


BWRX-300 (GE/Hitachi) für Ontario Power, Betrieb ab 2028, mittelfristiges Preistarget: **2'250 \$/kW**

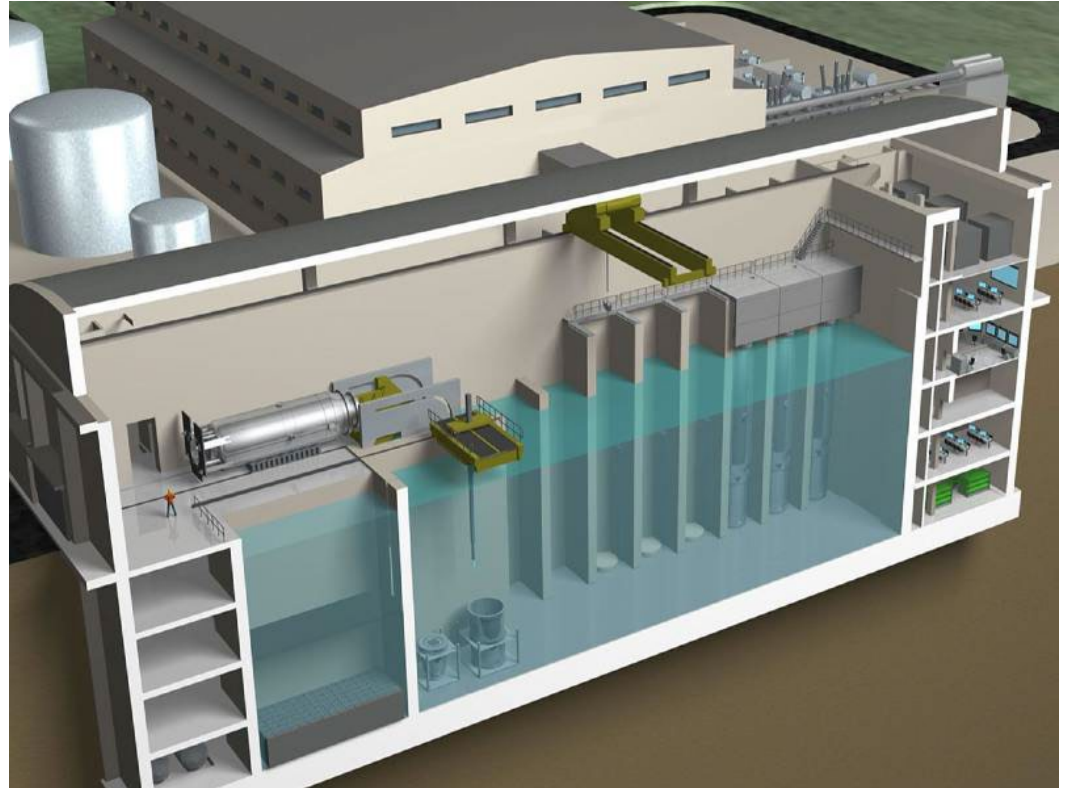


RITM-200 (Russia), Betrieb in Kirgistan ab 2028

Kleine Modulare Reaktoren (LWR-SMR): Integralbauweise



NuScale 77 MWe Einzelmodul



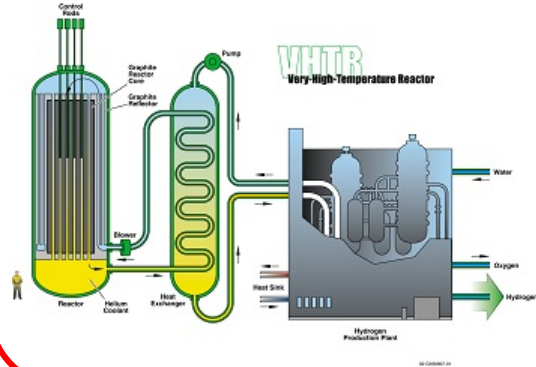
NuScale Design mit 6 x 77 MWe-Modulen

- Bis zu **12 Module parallel** ($12 \times 77 = 924 \text{ MW}_e$)
- **Gestaffelte Zu-/Abschaltung, Inselbetrieb und Schwarzstartfähigkeit**
- Ausgelegt **gegen geomagnetische Störungen und elektromagnetische Pulse**
- **Keine sicherheitsklassierten AC/DC-Notstromeinrichtungen**, keine Pumpen oder elektrisch angesteuerte Ventile (Notstromfall)
- **Unbegrenzte Kernkühlbarkeit** allein durch passive Sicherheitssysteme
- **Schutz gegen Flugzeugabsturz**
- **Kühlung des Brennelementlagerbeckens sichergestellt für 150 Tage**, danach externe Wiederauffüllung notwendig (über separate Anschlüsse z.B. über Feuerlöschleitungen)
- **Kernschadensfrequenz $< 10^{-8}$ /Jahr** für eine 12-Modul-Anlage

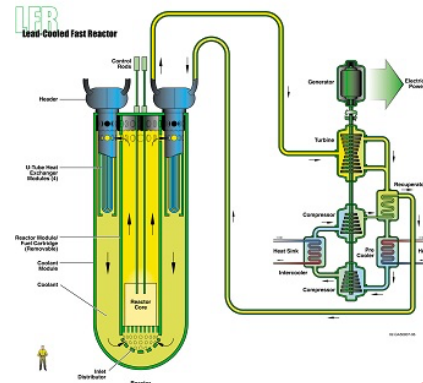
- ## Reaktorkonzepte der 4. Generation (GEN-IV):
- Geschlossener Brennstoffkreislauf
 - Hochtemperaturanwendungen

Die Reaktorkonzepte der Generation-IV

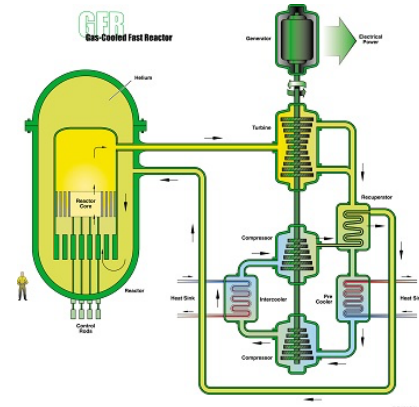
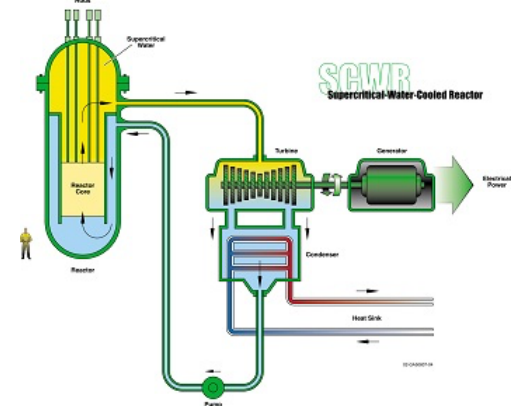
Hochtemperaturreaktor



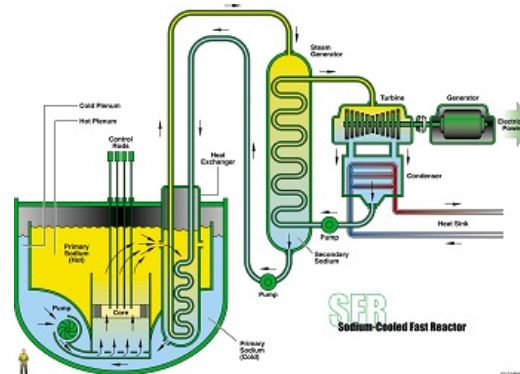
Bleigekühlter Schneller Reaktor



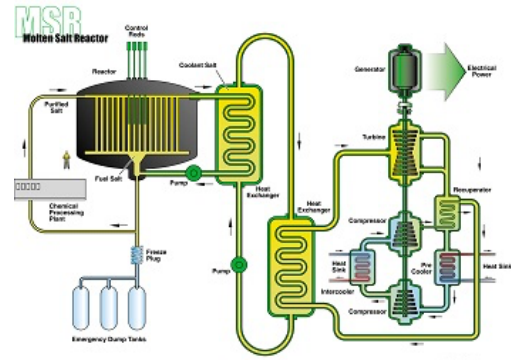
Superkritischer LWR



Gasgekühlter Schneller Reaktor

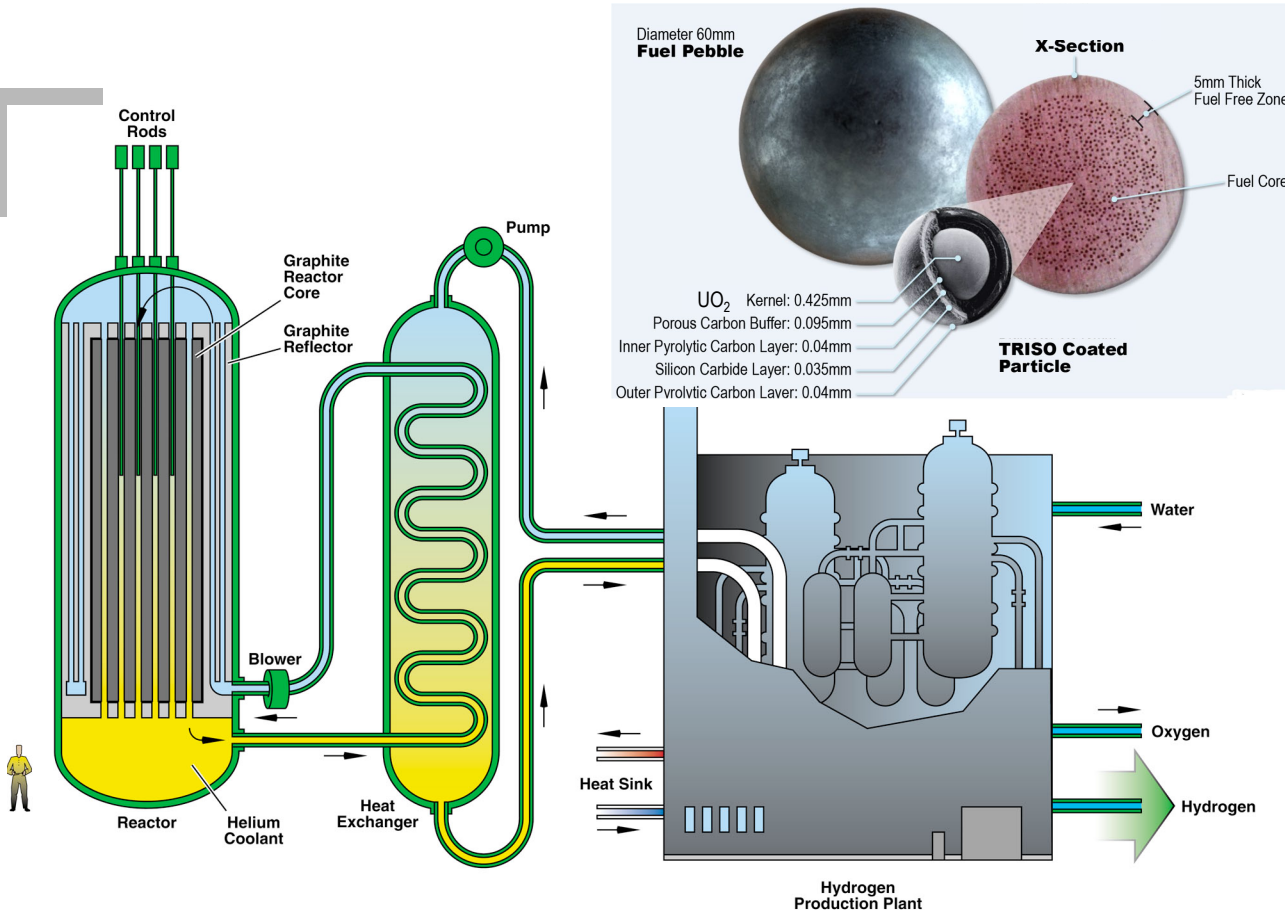


Natriumgekühlter Schneller Reaktor



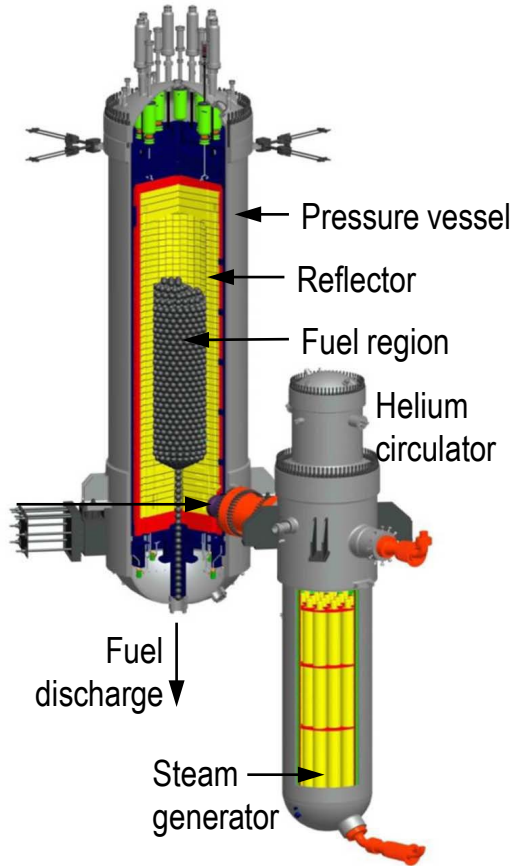
Salzschmelze-Reaktor

Generation-IV: Hochtemperaturreaktor



- **Leistung:** 150-300 MW_e
- **Kühlmittel:** Helium bei 40 – 90 bar
- **Kühlmitteltemperatur am Kernaustritt:** 850°C bis 1000°C (!)
- **Fuel:** niedrig angereichertes Uran (8 to 15%) in sog. “Pebbles”, stabil bis 1600 °C
- **Einige Betriebserfahrung vorhanden (USA, D)**

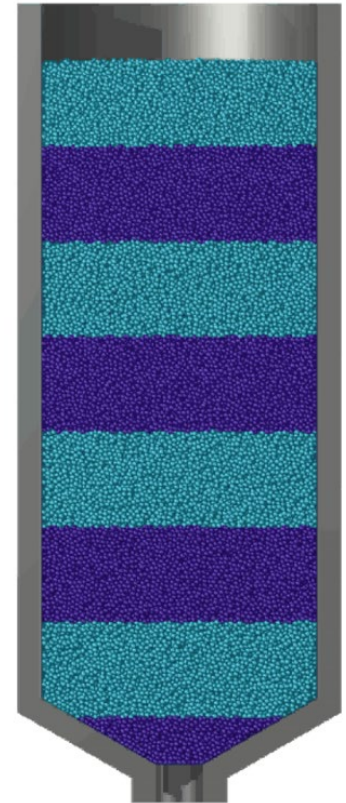
Generation-IV: HTR-PM (China)



Single-Module HTR-PM: Courtesy of Tsinghua University



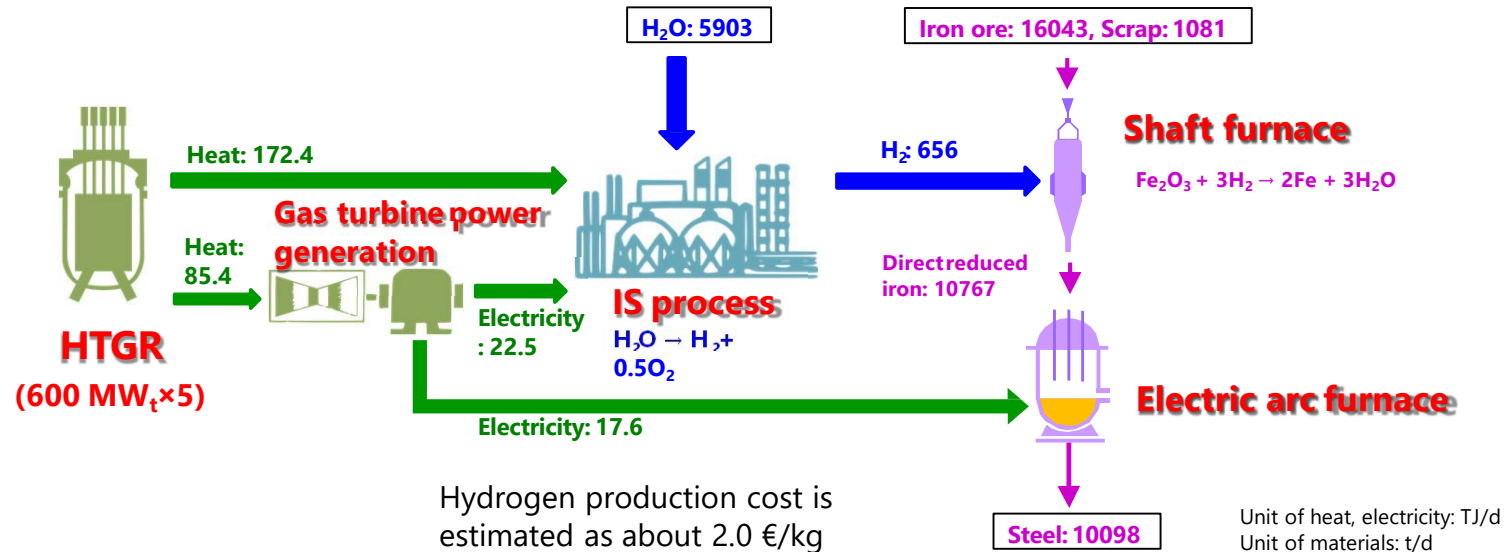
- **HTR-PM** (China), ein modularer Hochtemperaturreaktor mit bis zu 6 Einheiten à 110 MW_e Leistung, und Gastemperaturen **bis 750 °C**
- Dadurch steigt der thermische **Wirkungsgrad auf 44%**
- Eine Prototyp-Anlage mit zwei Modulen (220 MW_e) ist seit Januar **202** mit dem Netz synchronisiert und im Vollastbetrieb
- Der HTR gehört zur Klasse der «katastrophenfreien» Reaktoren, bei denen eine **Kernschmelze per Design ausgeschlossen werden kann**
- **Wasserstoffherzeugung** und Prozesswärme mit hoher Effizienz



Simulation Pebble Flow
Rycroft, Debhi (PSI)

HTGR Energy Supplied Steelmaking System

- Steelmaking by hydrogen and electricity produced by the HTGR-IS cogeneration system
- CO₂ emission from steel plants can be **cut by 100%** (104 million ton/year in Japan*¹).



Energy and material balance of a plant to produce steel of 10,000 ton/d ^{*2} (Scale of a standard steel plant) ^{*3}

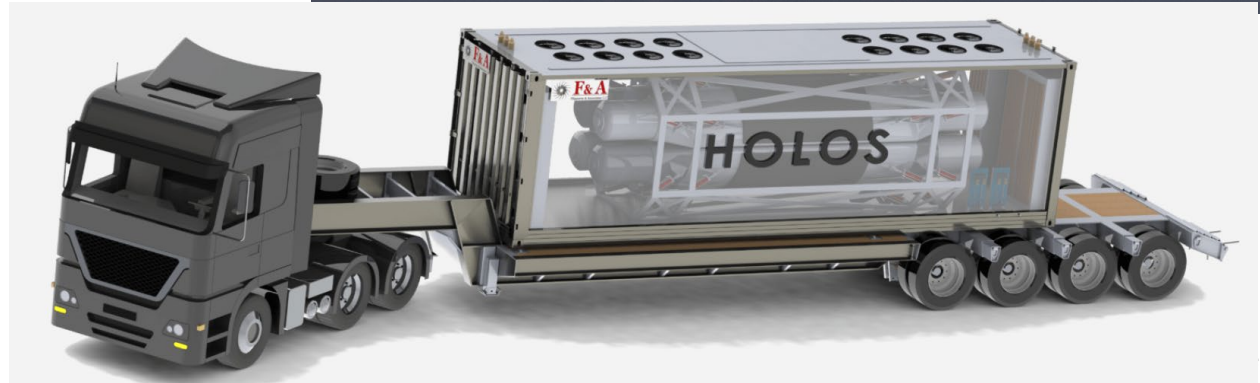
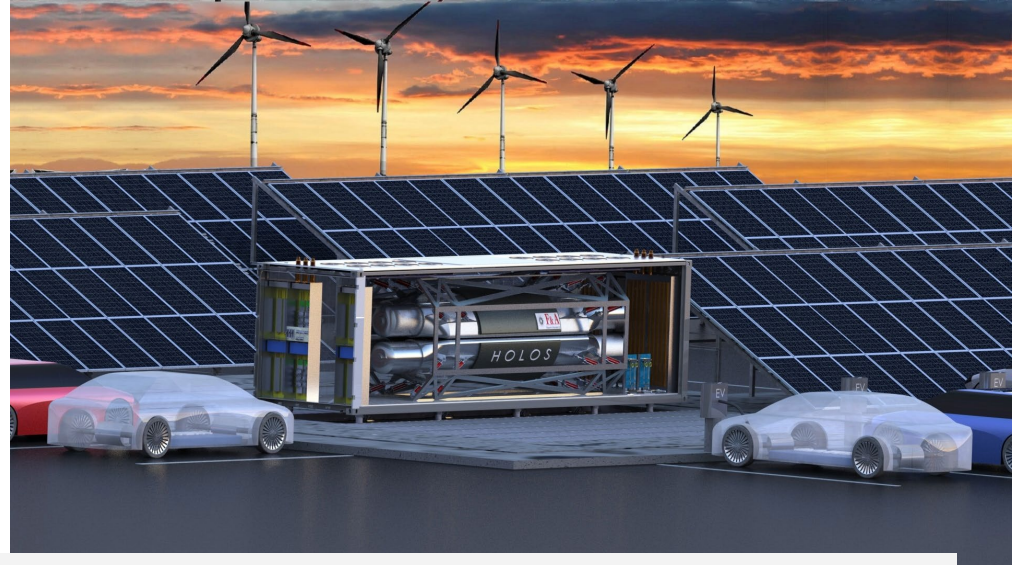
*¹ Data of 2016. Ref.: Greenhouse gas emission data in Japan (1990–2016 definite report), Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (May 29th, 2018 update).

*² Domestic steel production: c.a. 290,000 t/d (2016).

*³ Kasahara and Ogawa, Production of Green Energy and Its Utilization in Ironmaking and Steelmaking Processes, Iron and Steel Institute of Japan, 123–143, 2012.

HOLOGEN (Micro-Reactor, HTR)

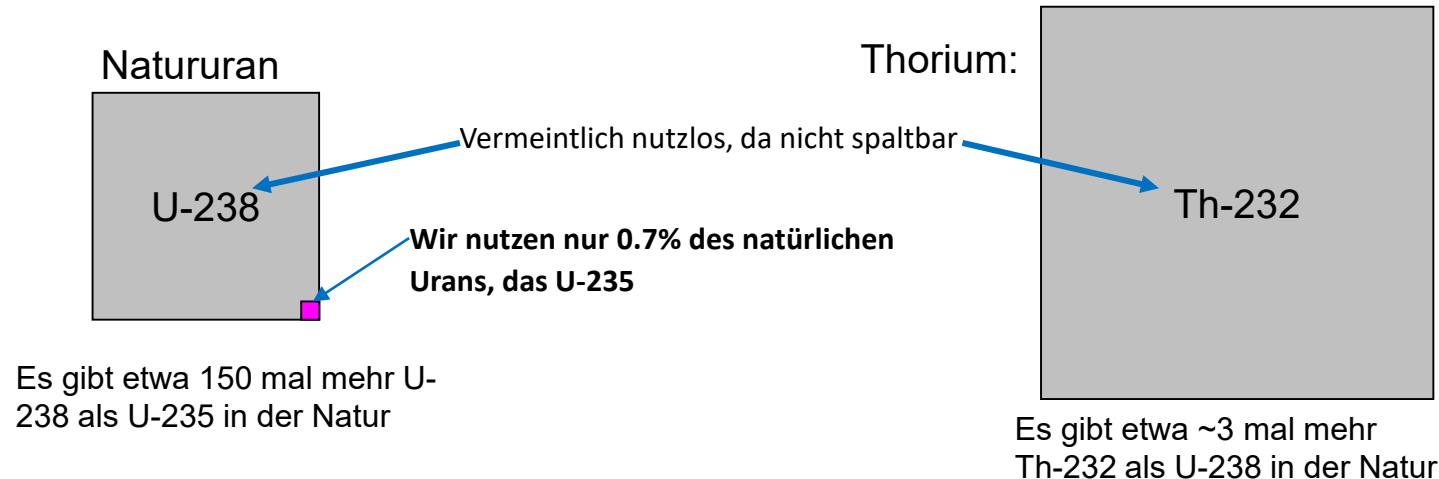
- Gas-cooled thermal reactor
- Total power of 13 MW_e; no re-fueling for 15-20 years
- Walk-away safe
- Operating temperature 850-900 °C
- Transportabel



Reaktoren der Generation-IV: Nachhaltigkeit?

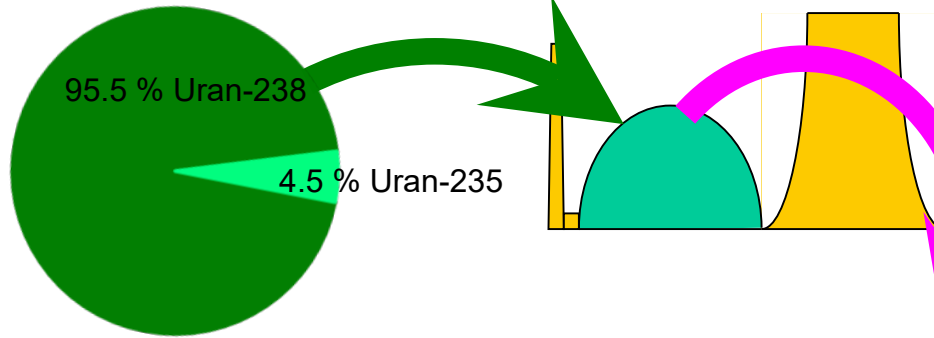
- **Die Generation-IV tritt mit den Zielen an:**

- Vergleichbares oder besseres Sicherheitsniveau als Generation-III
- Bessere Ökonomie, z.B. durch SMR-Bauweise, höhere Temperaturen/Wirkungsgrade, hybride Anwendungen, lange Lebensdauer (>60 Jahre)
- **Reduktion des langlebigen radiotoxischen Abfalls auf ein Minimum und Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für die endlichen Uran- und Thoriumressourcen**



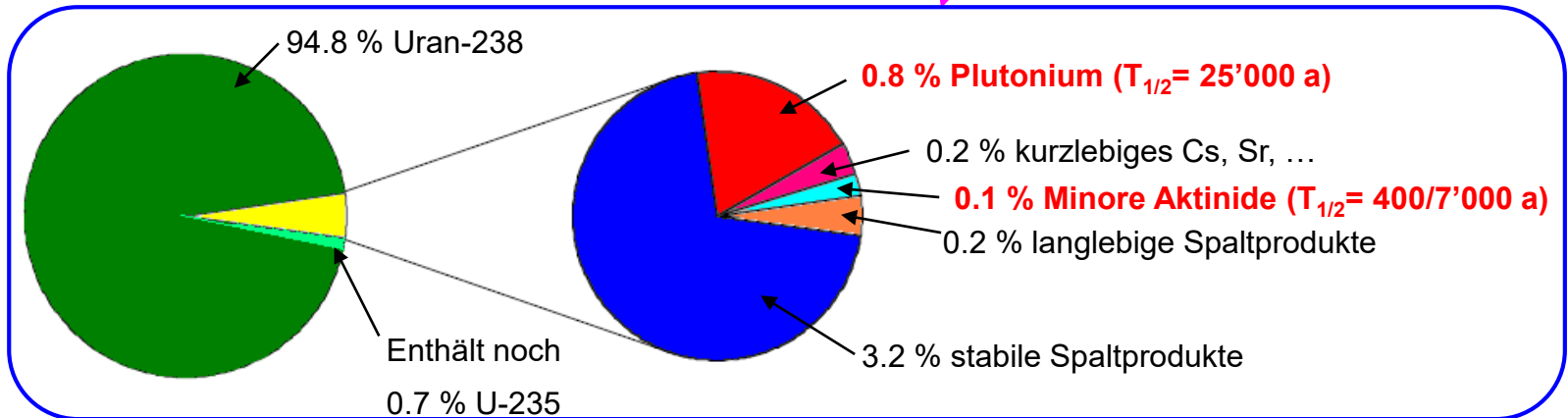
Leichtwasserreaktoren: Offener Brennstoffkreislauf

Angereichertes Uran

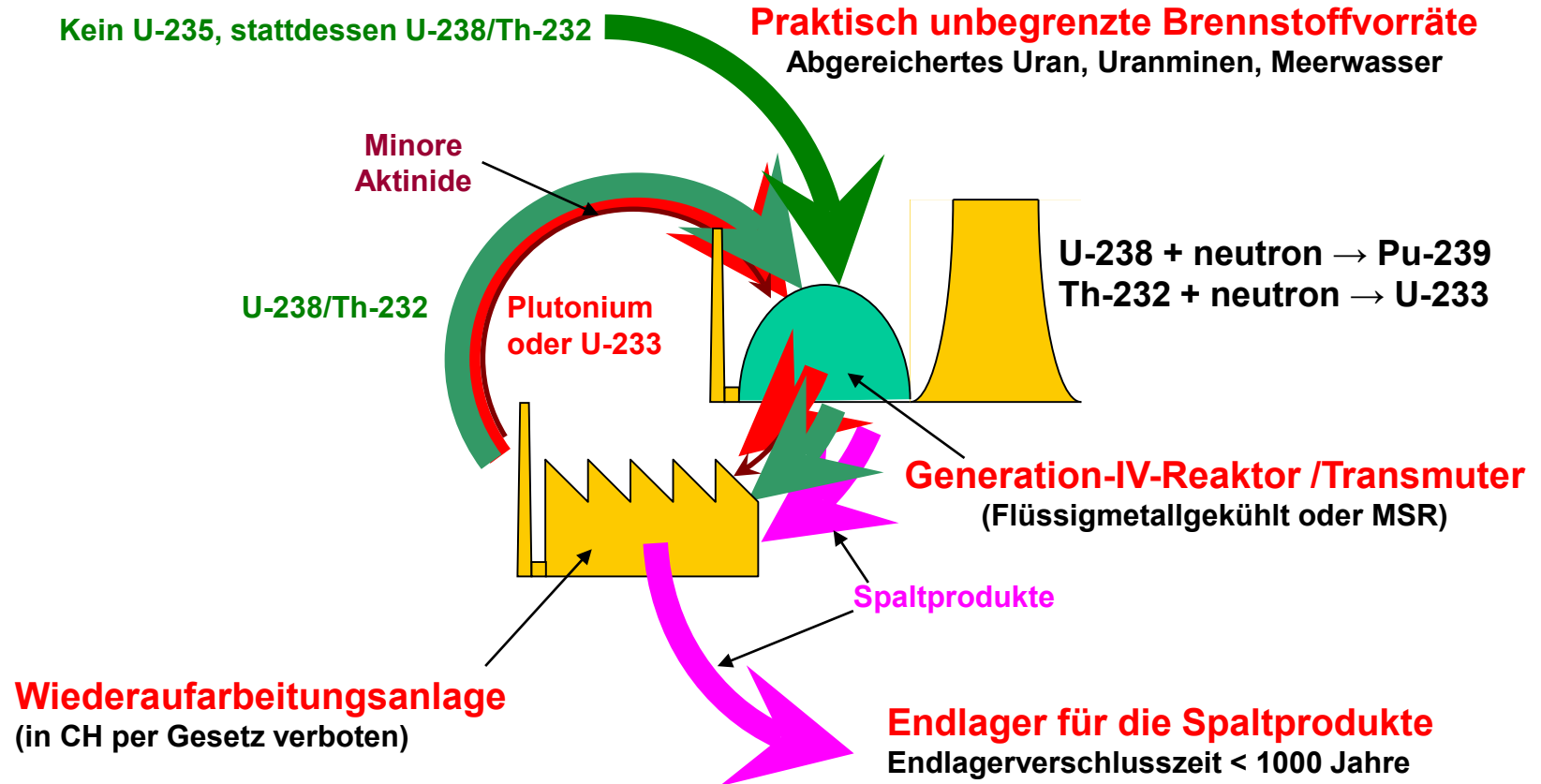


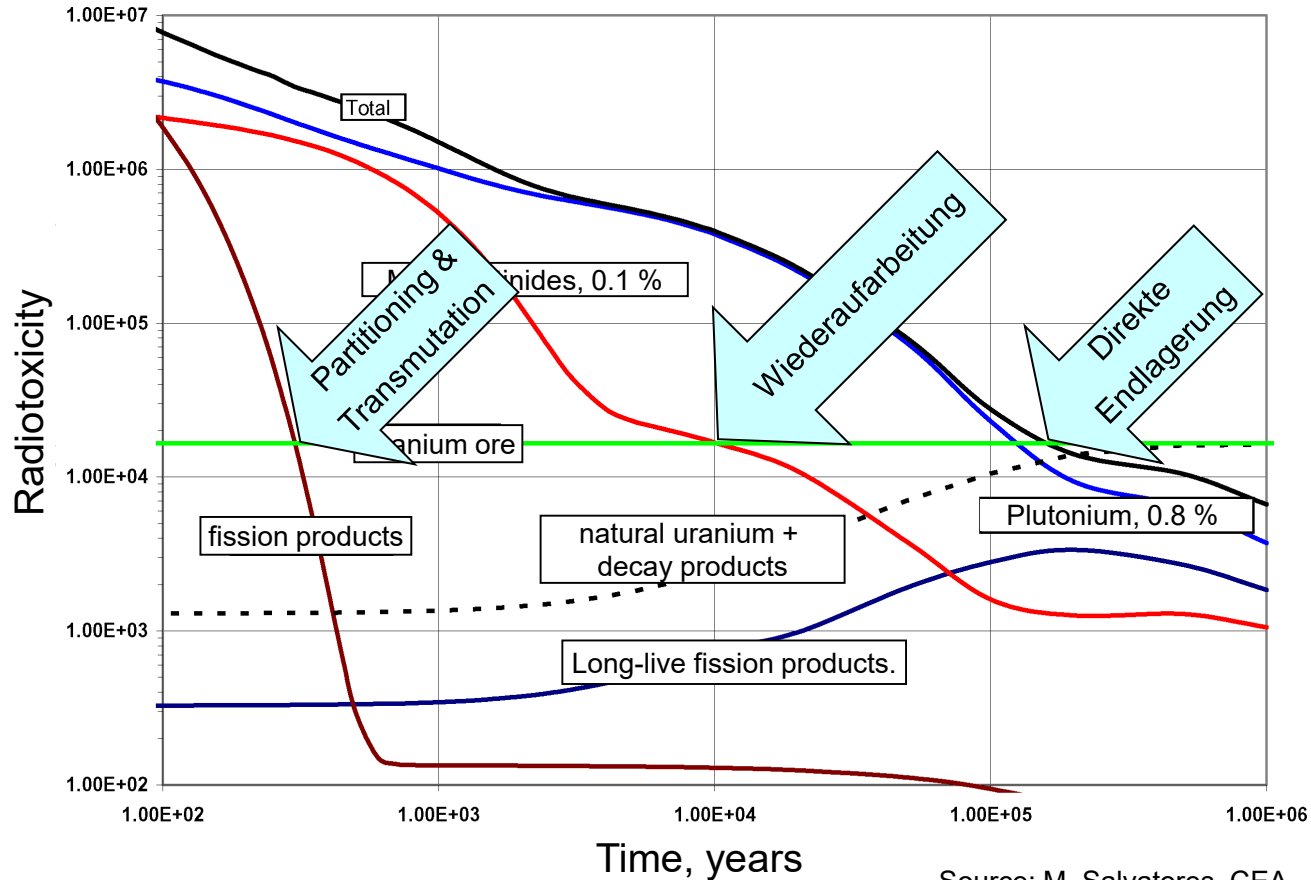
Abgebrannte Brennelemente

(Endlagerverschlusszeit > 200'000 Jahre)



Vollständiges Brennstoffrecycling

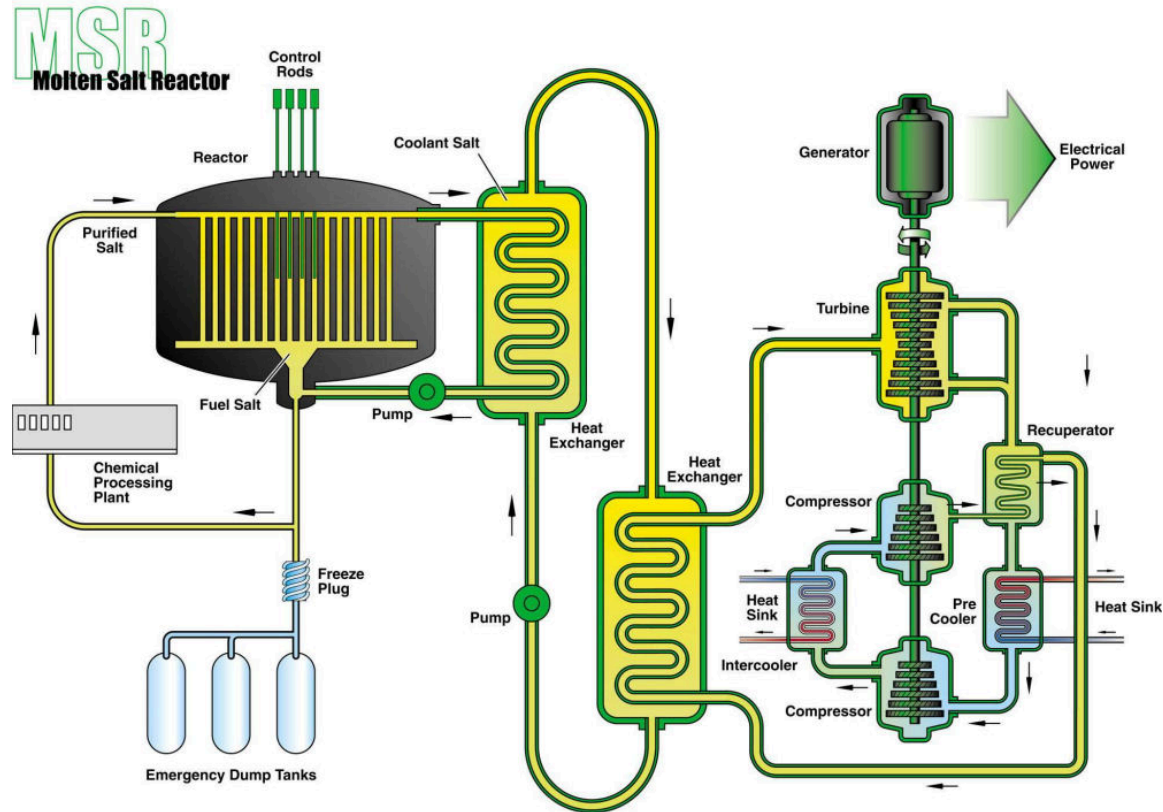




Source: M. Salvatores, CEA

Der Salzschnelze-Reaktor (MSR)

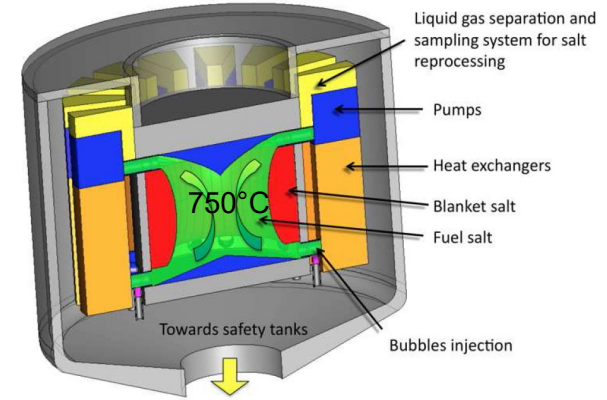
- Leistung: 1200 MW_{th}
- Kühlmittel: Fluor-Salze, bei Atmosphärendruck
- Moderator: Graphit, oder als schneller Reaktor
- Brennstoff: Uran, Plutonium oder Thorium im Salz gelöst, ggf. auch U-233
- Kühlmitteltemperatur am Kernaustritt: 850°C



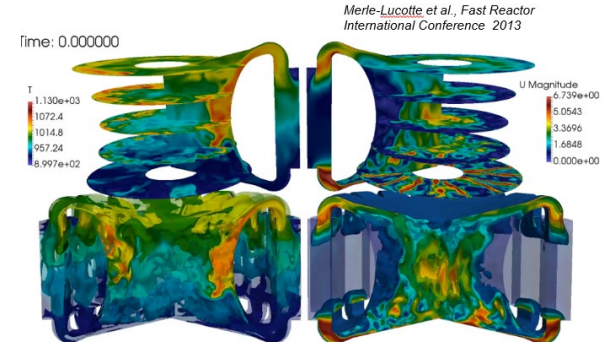
Molten Salt (Fast-spectrum) Reactor

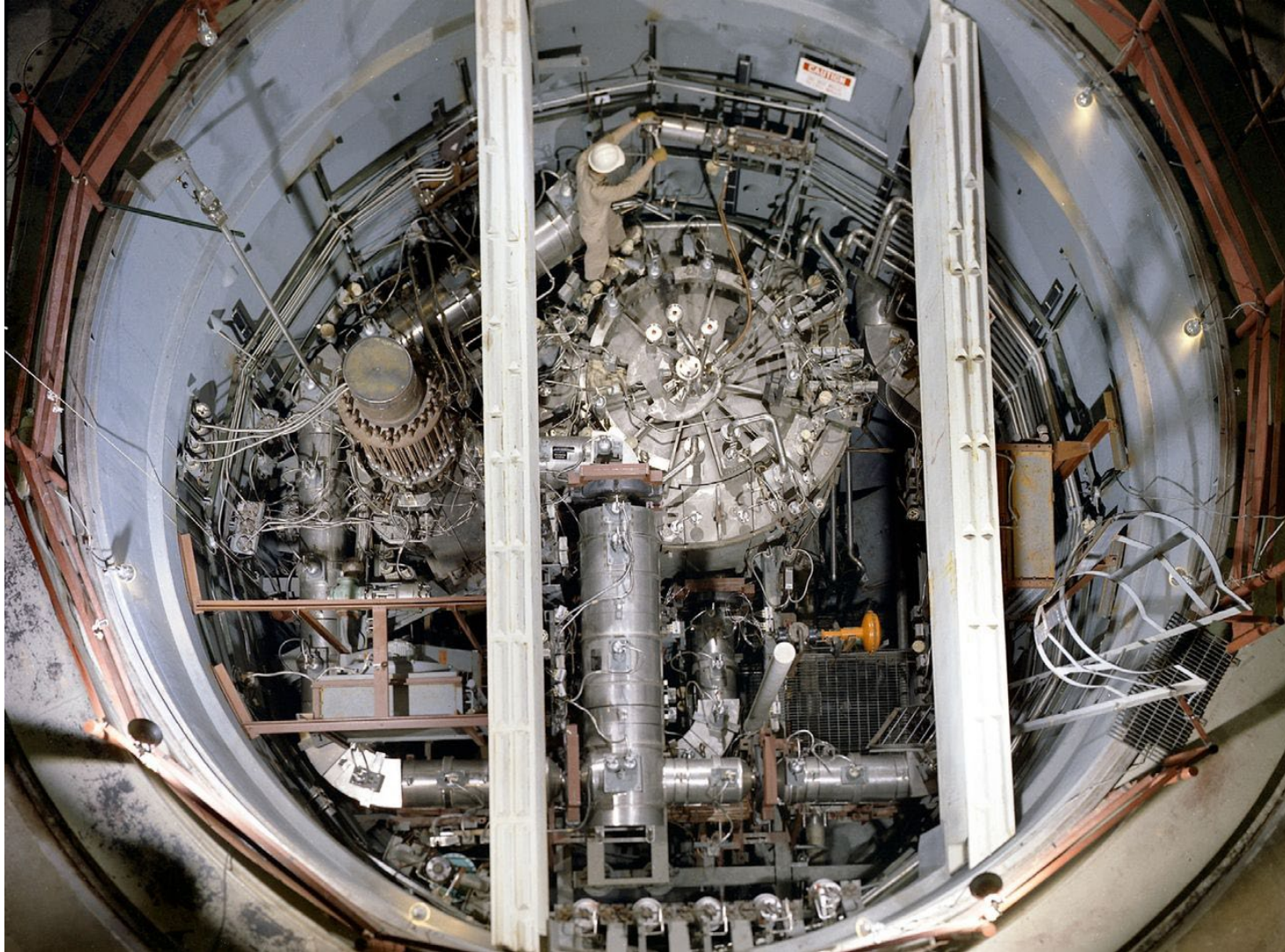
(CNRS, France)

- Thermisches und schnelles Neutronenspektrum möglich (kann als «Breeder» oder «Burner» betrieben werden)
- Der Brennstoff ist in geschmolzenem Salz (Nitrid / Karbid / Fluorid) aufgelöst, keine Brennstofffertigung notwendig
- Keine Bestrahlungseinschränkung des Brennstoffs (ermöglicht sehr hohen Abbrand)
- Geringes spaltbares Inventar
- Die Wiederaufbereitung des Brennstoffs vor Ort ermöglicht die Erzeugung von Plutonium oder Uran-233 aus Thorium
- Sehr korrosiv für Strukturmaterialien
- Schnelle Leistungsexkursionen praktisch ausgeschlossen
- Wenig Betriebserfahrung
- Hohe Schmelztemperatur der Salze ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$), der Reaktor kann «einfrieren»

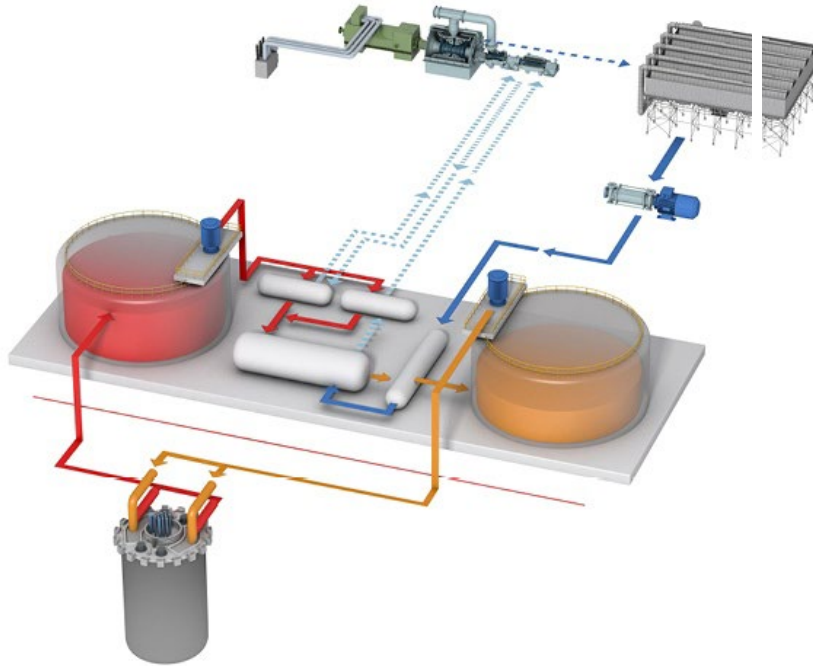


Merle-Lucotte et al., Fast Reactor International Conference 2013





SMR der Generation-IV mit Hochtemperaturanwendungen



- **Natrium™**, ein mit flüssigem Natrium gekühlter Reaktor mit 345 MW_e Leistung und einer Kühlmitteltemperatur **um 550 °C**
- Der Reaktor ist an einen **thermischen Salzschmelzespeicher** gekoppelt, der ca. 1 GWh Energie speichern kann. Damit kann die Anlage über mehrere Stunden die **Leistung auf 500 MW_e erhöhen**
- Wird seit 2008 von der Firma Terrapower mit Unterstützung von **Bill Gates und Warren Buffett** entwickelt.
- **Die Anlage soll voraussichtlich bis 2028 am Standort Kemmerer (Wyoming) fertiggestellt werden**

Wie geht es weiter mit der Kernenergie?

- **Laufzeitverlängerung** der bestehenden Anlagen auf 60-80 Jahre
- Weiterbau **grosser Kernkraftwerke der Generation-III**: sind heute am Markt verfügbar (z.B. EPR)
- Ab 2030 werden **(wassergekühlte) SMR** am Markt zur Verfügung stehen. Geringes Investitionsrisiko, da bewährte Technik und vertraute Regulierung
- **Generation-IV-Reaktoren werden ab 2035-2040 zur Verfügung stehen**. Sie ermöglichen effiziente Kogenerationstechnologien, eine nachhaltige Brennstoffnutzung und das «Verbrennen von Abfall»
- Die nukleare Stromerzeugung wird, gemäss der grossen Mehrheit von Energiesystemstudien, zwischen **10 und 20%** an der weltweiten Gesamtstromerzeugung ausmachen

