

Ausgewählte Kernreaktoren der Generation IV

Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulenberg
Institut für Kern- und Energietechnik
Karlsruher Institut für Technologie

Kerntechnisches Symposium, Dresden, 19. Okt. 2011



Generation IV International Forum

Das Generation IV International Forum entwickelt und beurteilt Konzepte für Kernreaktoren, die ab ca. 2030 oder später benötigt werden könnten.

Grundsätzliche Kriterien:

- sicher und zuverlässig
- wirtschaftlich
- minimaler Abfall
- nachhaltige Brennstoffnutzung
- proliferationsresistent

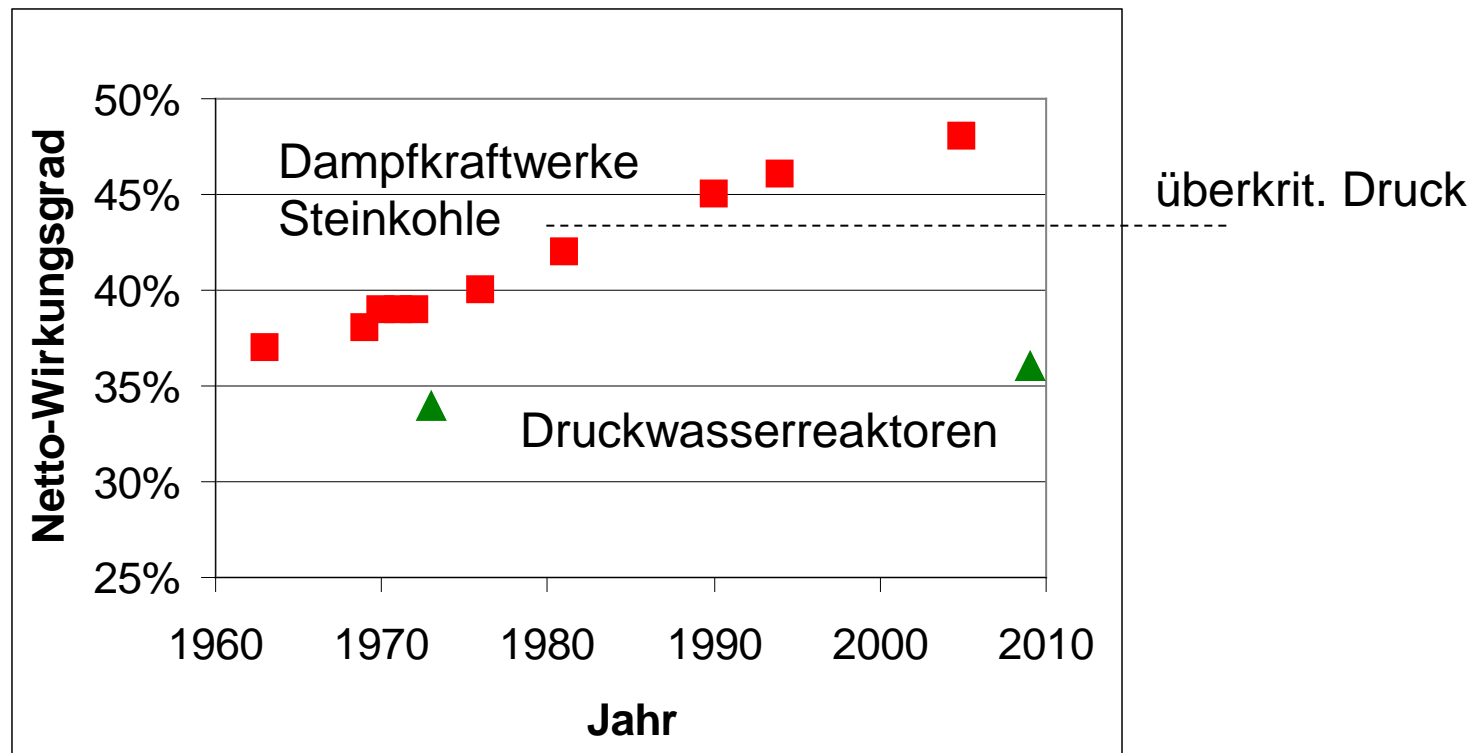


Die weltweite Verbundforschung konzentriert sich auf folgende 6 Konzepte:

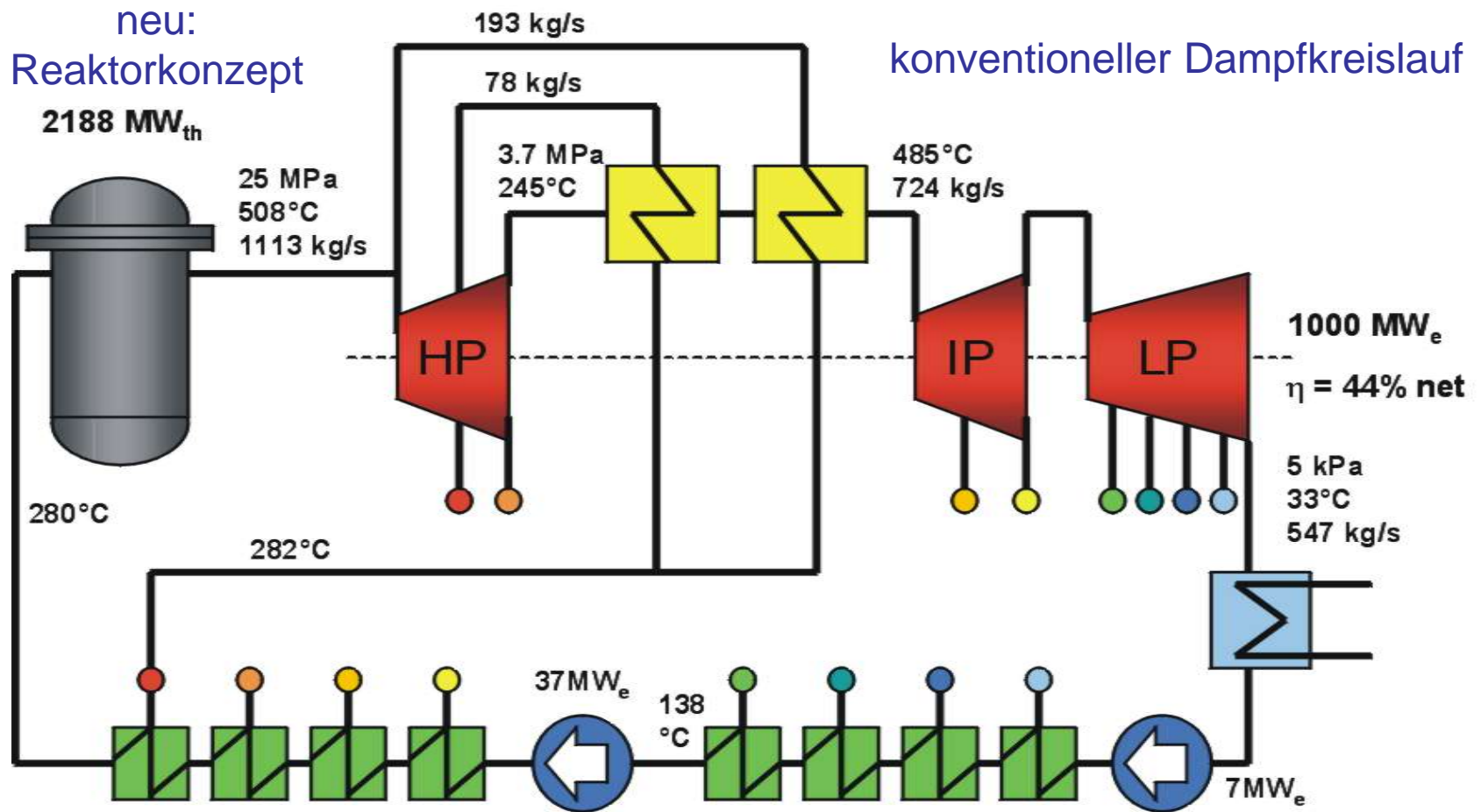
1. Leichtwasserreaktoren mit überkritischen Dampfzuständen
2. Heliumgekühlte Hochtemperaturreaktoren
3. Heliumgekühlte schnelle Reaktoren
4. Bleigekühlte schnelle Reaktoren
5. Natriumgekühlte schnelle Reaktoren
6. Salzschnmelzen-Reaktoren

1: Weiterentwicklung der DWR und SWR

Idee: kontinuierliche Verbesserung der Frischdampfzustände analog der Entwicklung fossil gefeuerter Dampfkraftwerke

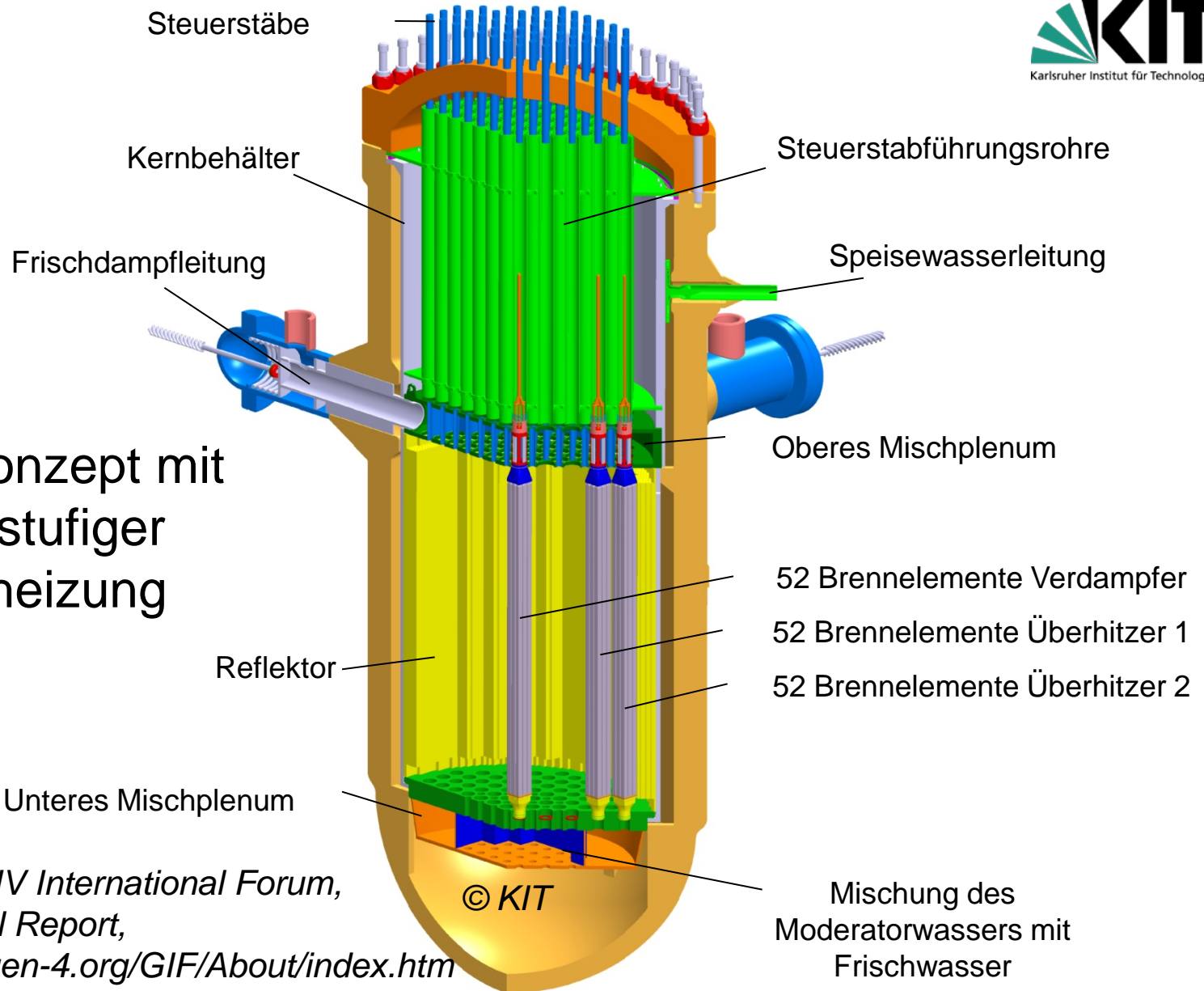


Leichtwasserreaktor mit 500°C Kernaustrittstemperatur



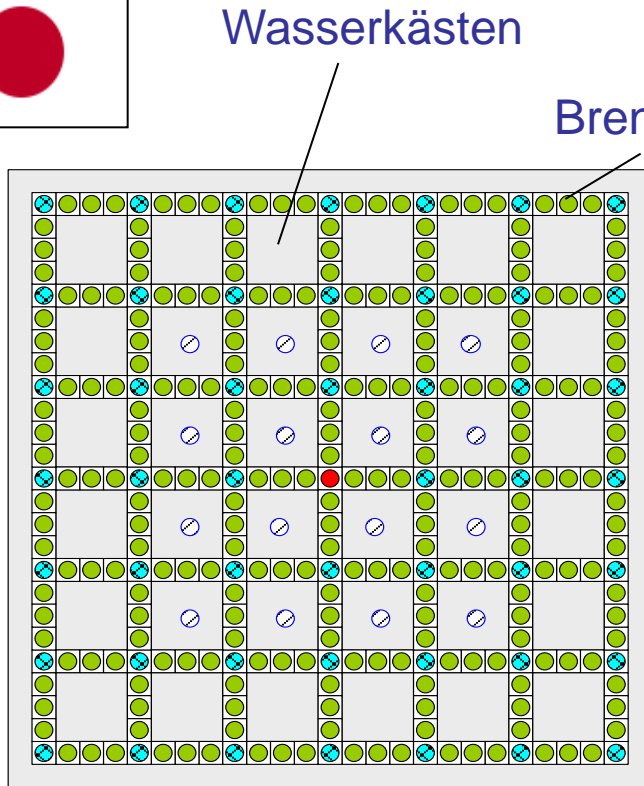


Kernkonzept mit dreistufiger Aufheizung



Generation IV International Forum,
2007 Annual Report,
<http://www.gen-4.org/GIF/About/index.htm>

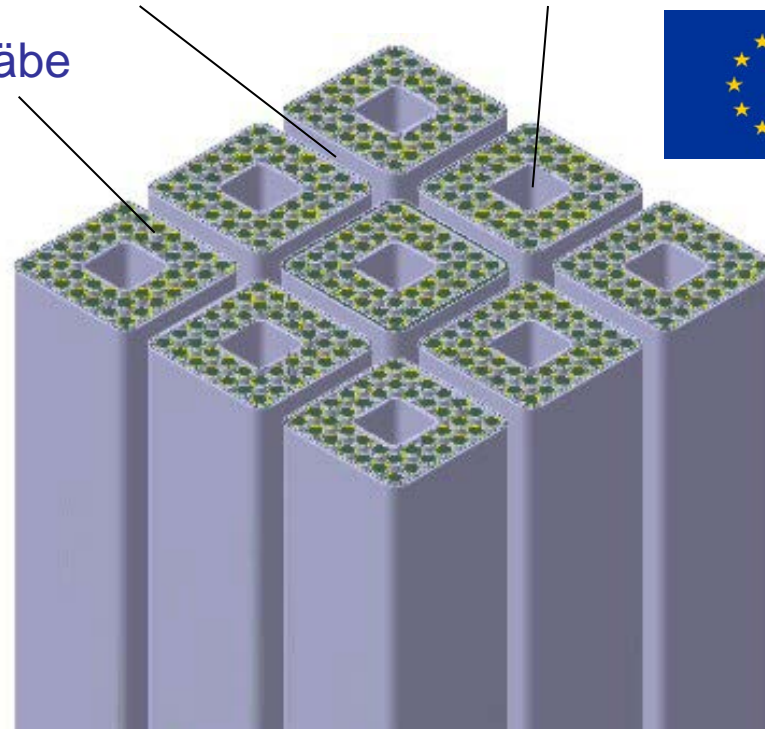
Brennelementkonzepte



Y. Oka, S. Koshizuka, Y. Ishiwatari, A. Yamaji,
*Super Light Water Reactors and Super Fast
 Reactors, Springer, ISBN 978-1-4419-6034-4
 (2010)*

Wasser zwischen
 Brennelementen

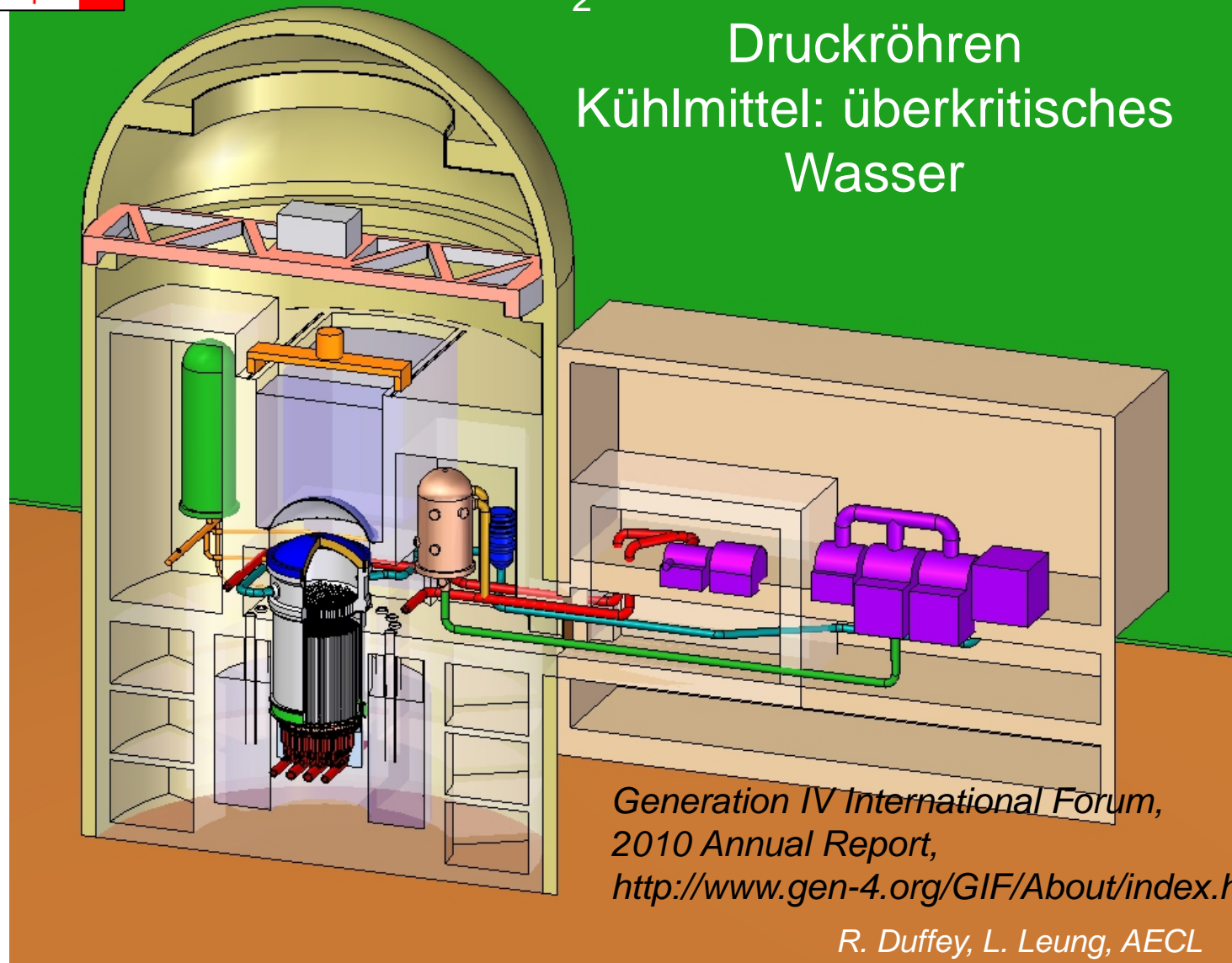
Wasserkästen



J. Hofmeister, *Dissertation Universität Karlsruhe,
 FZKA 7248, 2006*



D₂O moderierter Reaktor mit Druckröhren Kühlmittel: überkritisches Wasser



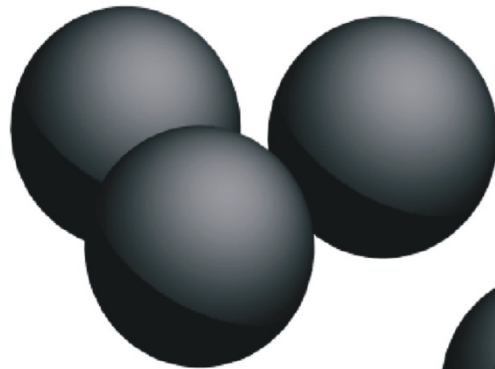
2: Hochtemperatur-Reaktor

- Basis: Helium gekühlter Reaktor mit Graphitkugeln oder –blöcken (Deutschland, USA)
- Ziel: Kernaustrittstemperaturen 900 bis 1000°C
- Vorteile:
 - Stromerzeugung mit hohem Wirkungsgrad (45-50%)
 - Nutzung von nuklearer Prozesswärme z.B. zur Wasserstoffproduktion für den Verkehr, Meerwasserentsalzung, .. etc.
 - Inhärent sicherer Reaktor bei kleiner thermischer Leistung
 - Dann kein Notkühlsystem erforderlich.
- Herausforderungen:
 - Werkstoffe für mehr als 850°C Kernaustrittstemperatur
 - Wirtschaftlichkeit

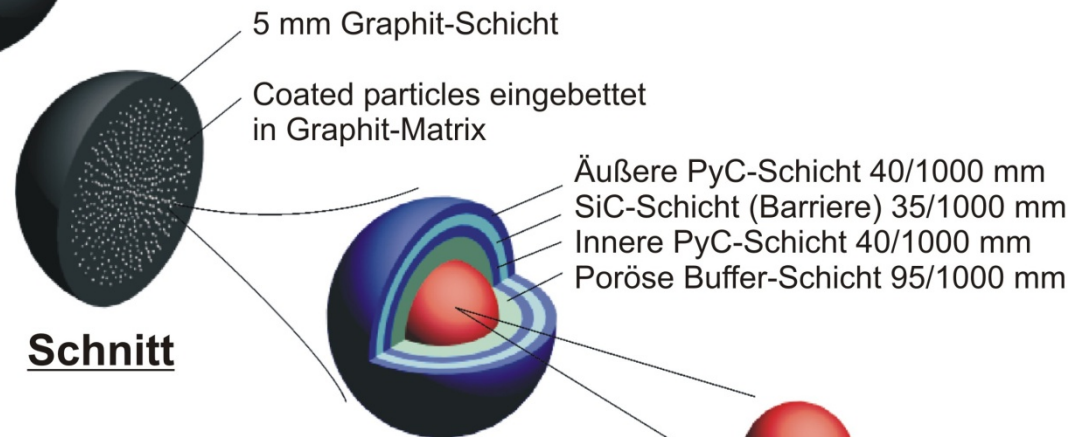


Kugelhaufenreaktor

- Leistungsdichte $5-10 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$
- Kugelförmige Brennelemente aus TRISO Partikeln



Dia. 60 mm
Kugelförmiges Brennelement



Schnitt

Dia. 0,92 mm
TRISO Coated Particle

Dia. 0,5 mm
Uran Dioxid Brennstoff-Kern

Beispiele von Hochtemperatur-Reaktoren



HTR-PM, 105 MW_e Kugelhaufen-Reaktor
Thermische Leistung 250 MW mit Dampferzeuger
Entwickelt durch INET & Huaneng, China, in Bau,
Prototyp mit 10 MW_{th} bereits in Betrieb

Weitere Informationen:

Z. Zhang et al., Nucl. Eng. Des. 236 (2006) 485-490

Z. Zhang et al., Nucl. Eng. Des. 239 (2009) 1212-1219



Modularer Kugelhaufenreaktor PBMR

Mit He-Turbine, Konzept: PBMR, Südafrika

Das Bauvorhaben wurde in 2010 leider aufgegeben



Hochtemperatur-Reaktor aus prismatischen Graphitblöcken

GT-MHR, 280 MW_e, mit He-Turbine, General Atomics, USA

Weitere Informationen: <http://gt-mhr.ga.com/>

Nachhaltige Kernenergie

- Methode: Spaltung von ^{238}U nach Konversion zu Plutonium
$$\text{U-238} + \text{n} \longrightarrow \text{U-239} \longrightarrow \text{Pu-239}$$
- Recycling des Pu (und Am) zur Stromerzeugung und zur Entlastung des Endlagers von langlebigen Radionukliden.
- ermöglicht Stromerzeugung aus geförderttem, abgereichertem Uran und abgebrannten Brennelementen für mindestens 3000 Jahre!
- Benötigt wird.
 - Reaktor mit schnellem Neutronenspektrum
 - Chemische Trennung von U und Pu aus abgebrannten Brennelementen
- Technische Machbarkeit bereits in den 80er Jahren demonstriert
 - z.B. in Karlsruhe: KNK Natrium gekühlter schneller Reaktor
 - WAK: Wiederaufarbeitung

Proliferationsresistenz und physikalischer Selbstschutz

- Reines Pu-239 (aus kurzzeitig bestrahltem U-238) kann für Kernwaffen verwendet werden.
- Anteile anderer Pu-Isotope, Americium und andere Transurane (nach langer Neutronenbestrahlung) erhöhen die Aktivität des Brennstoffs und machen Pu unbrauchbar für Kernwaffen.

Ziel der 4. Generation:

- Erzeugung von Plutonium, das nicht für Kernwaffen verwendet werden kann.

4: Bleigekühlter schneller Reaktor



SVBR 75/100

Elektr. Leistung	80 MW
Therm. Leistung	265 MW
Nettowirkungsgrad	34,5%
Kühlmittel	PbBi
Kühlmitteltemperatur	
Kerneintritt:	286°C
Kernaustritt:	435°C
Kernbeladezyklus:	6 Jahre
	dann wird der Kern als ganzes gewechselt

Sekundärkreislauf:

Sattdampfprozess mit 260°C

mit 6 Dampferzeugern im
Reaktorbehälter

Passives Nachwärmeabfuhrsystem:

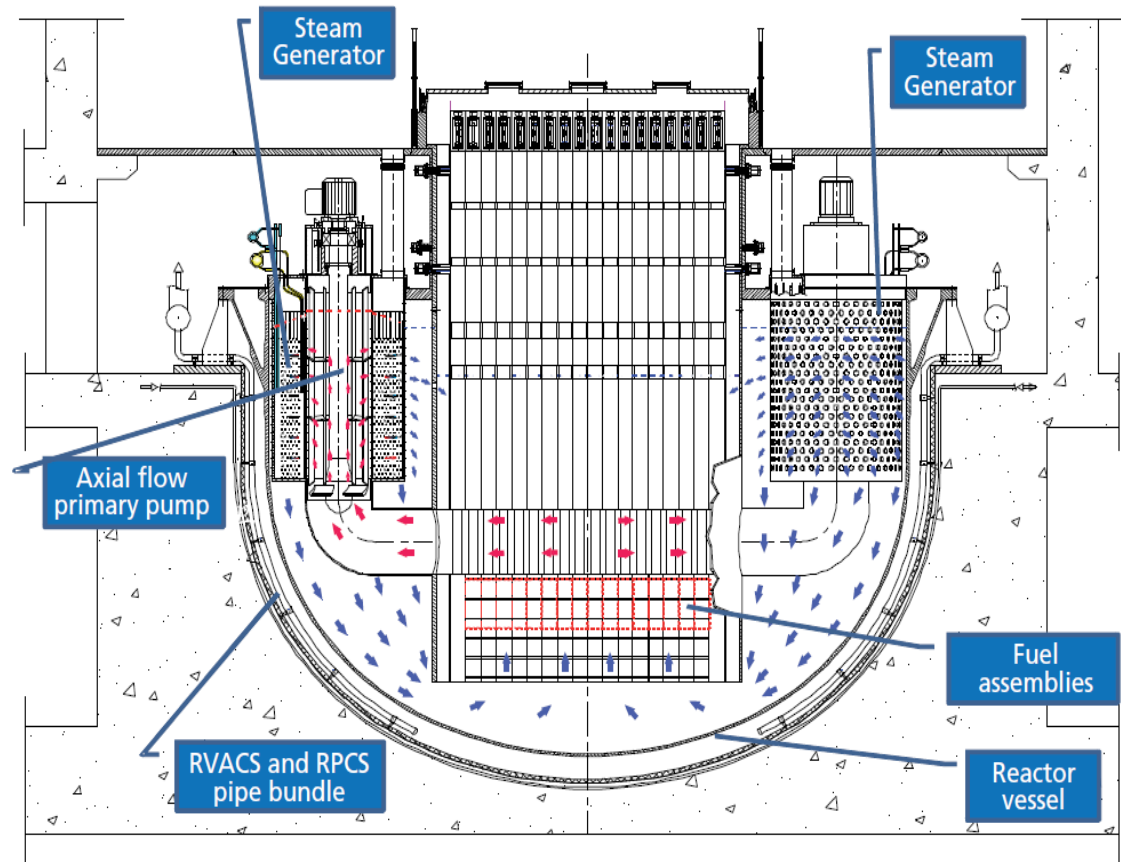
Wärmeabfuhr an ein
Wasserbecken um den
Reaktorbehälter

*Weitere Informationen:
IAEA TECDOC 1531, 2006,
ISBN 92-0-114206-4*



Langfristiges Ziel: Bleigekühlter Reaktor

- Kühlmittel: reines Blei
- Temperaturen:
 - Kerneintritt: 400°C
 - Kernaustritt: 480°C
- Herausforderungen:
 - Korrosionsbeständige Werkstoffe für hohe Temperaturen
 - Zuverlässige Oxydschutzschichten
 - Wirtschaftliche Kraftwerkskonzepte



*Konzept: European Lead Cooled System (ELSY), 600MW_e
Generation IV International Forum, 2008 Annual Report
<http://www.gen-4.org/GIF/About/index.htm>*

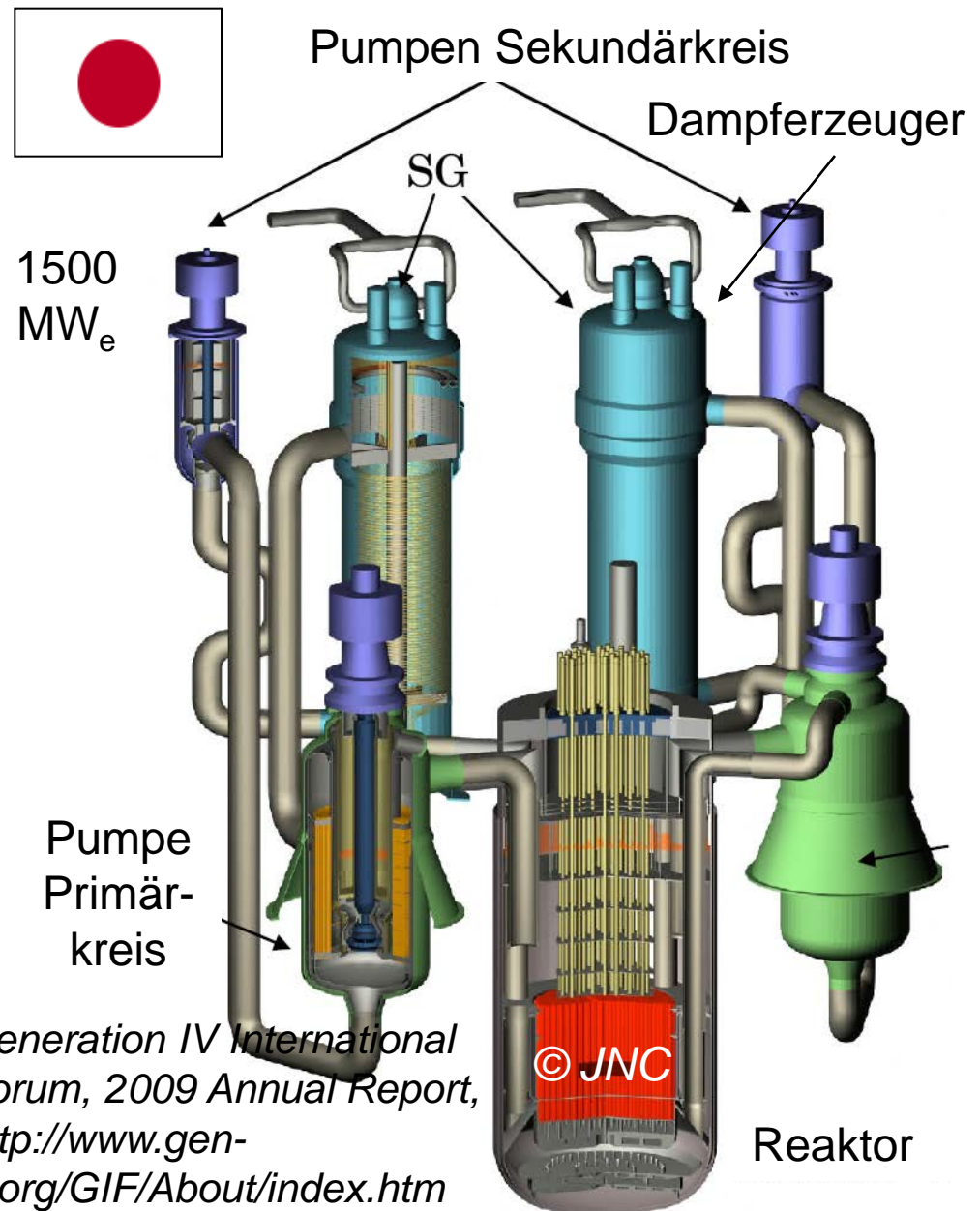
5: Natrium gekühlter schneller Reaktor

Vorteile im Vergleich zum bleigekühlten Reaktor:

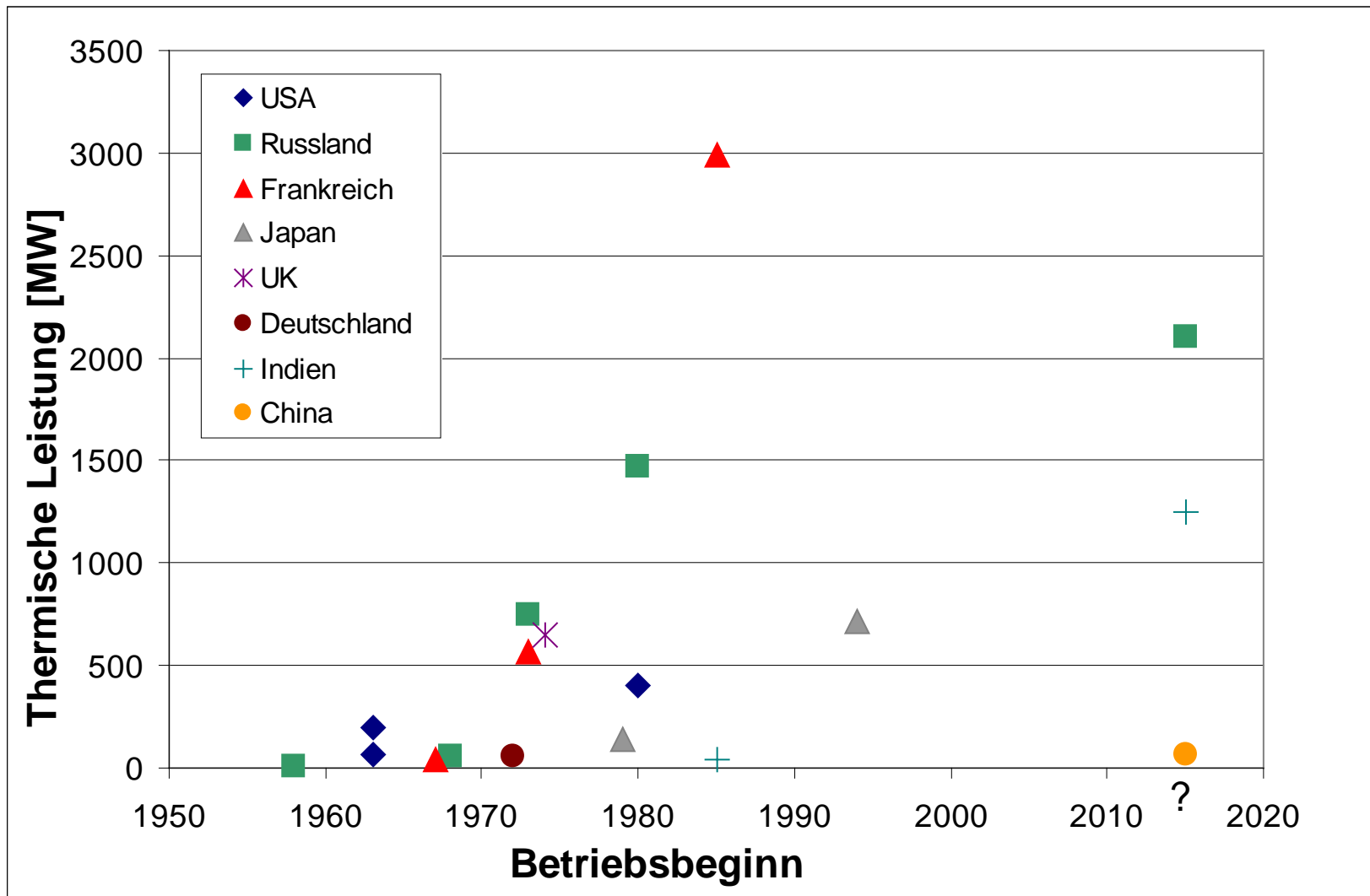
- Keine Korrosion auch über sehr lange Einsatzzeiten
- Langjährige Erfahrung und favorisiertes Konzept in USA, Frankreich und Japan

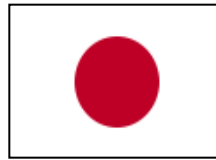
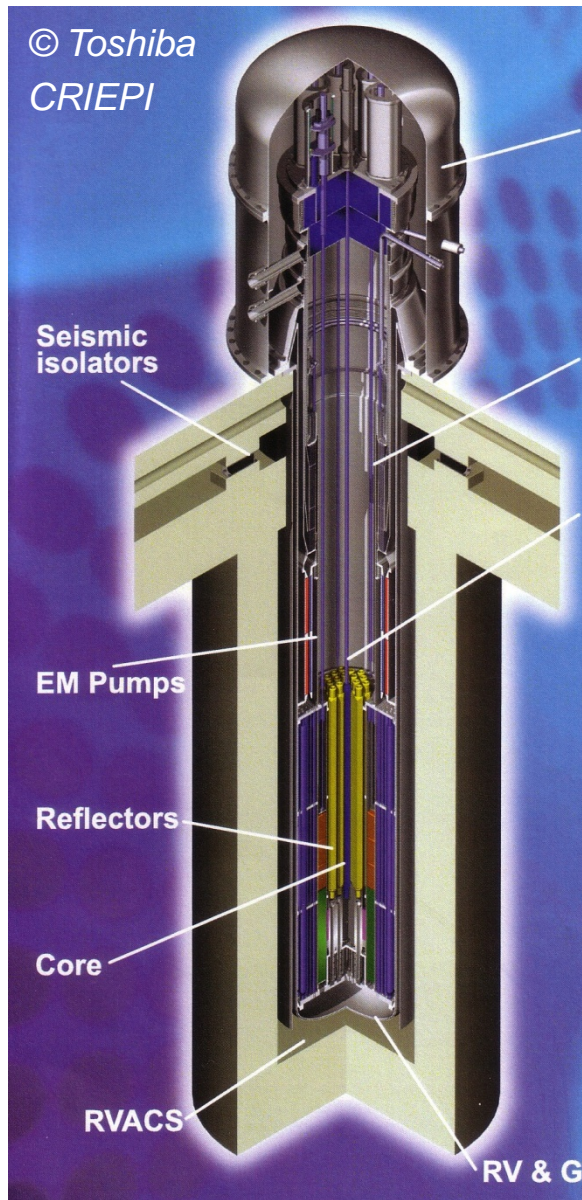
Herausforderungen:

- Ausschluss von Risiken durch Na-Brand oder Reaktion mit Wasser
- Wirtschaftliche Kraftwerkskonzepte



Betriebserfahrung mit Na-gekühlten Reaktoren

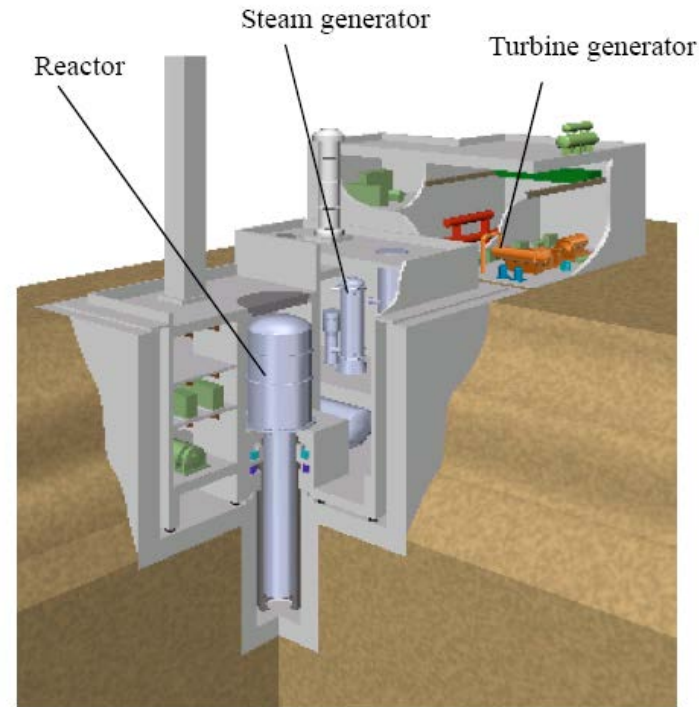




4S Nuclear Battery

Leistung: 30 MW_{th}, 10 MW_{el}

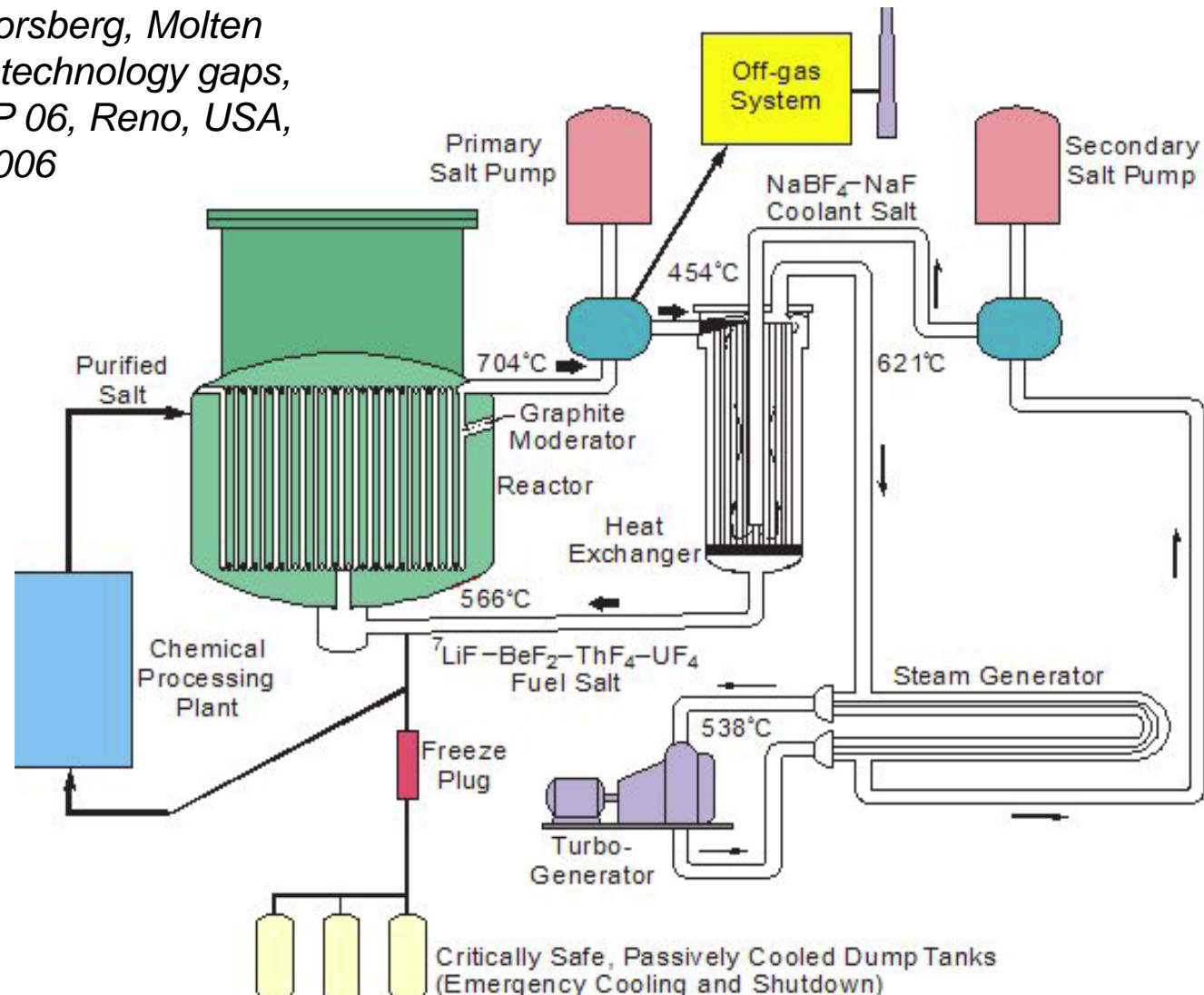
30 Jahre Laufzeit ohne Brennelementwechsel
Geplant für Galena, Alaska



Y. Tsuboi et al., Proc. ICAPP 09, Paper 9214, 2009

6: Salzschnmelzenreaktor

Ref.: C.F. Forsberg, Molten salt reactor technology gaps, Proc. ICAPP 06, Reno, USA, June 4-8, 2006

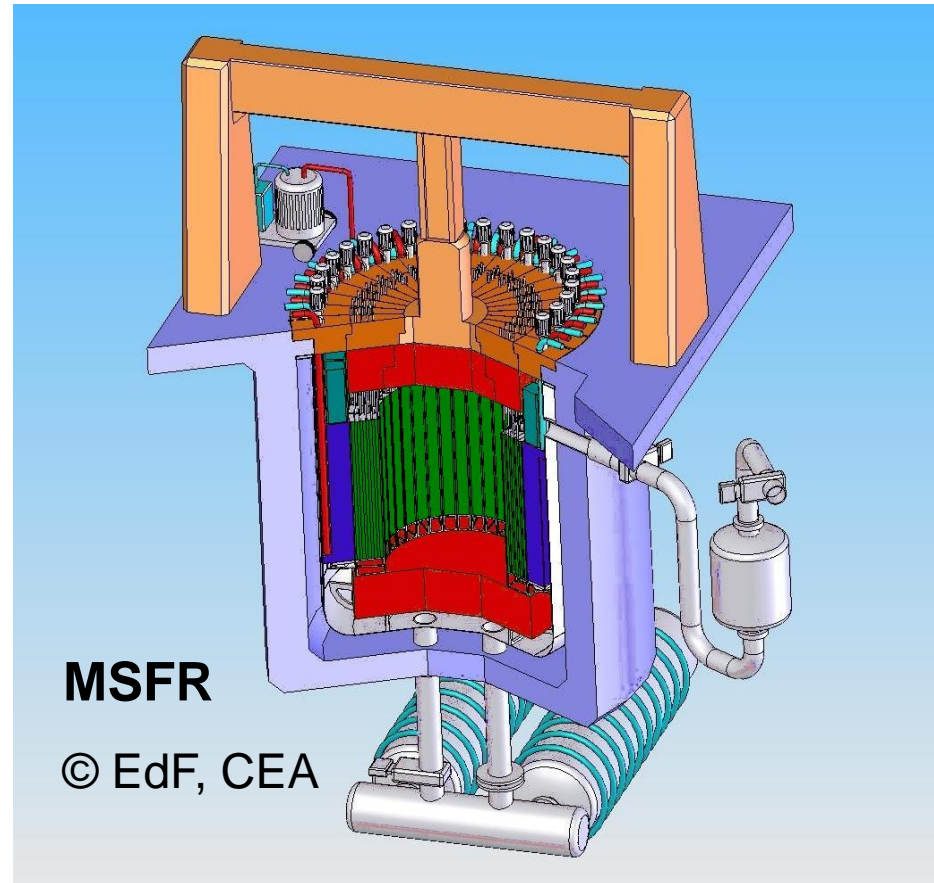


Konstruktives Konzept



Derzeit Studien sowohl zu Reaktorkonzepten mit thermischem als auch mit schnellem Neutronenspektrum

Erfahrungen mit kleinen Reaktoren in USA bereits seit den 50er Jahren;
damaliges Ziel:
Flugzeugantriebe



*Generation IV International Forum, 2009 Annual Report,
<http://www.gen-4.org/GIF/About/index.htm>*

Visionen und offene Fragen des Salzschmelzenreaktors

Visionen:

- Flüssiger Brennstoff benötigt keine Brennelemententwicklung.
- Kann praktisch sämtliche Transurane verwerten.
- Abtrennung der Spaltprodukte im Kraftwerk.
- Keine Wiederaufarbeitung

Offene Fragen:

- Korrosion durch die Salzschmelze schon bei geringen Wasserkonzentrationen
- Risiko des Einfrierens des Salzes
- Tritium-Rückhaltung
- Salzreinigung und Spaltproduktabtrennung
- Auslegung eines Reaktors, ...etc.

Fazit

Reaktorkonzepte der 4. Generation haben als Ziel:

- Weitere Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der 3. Generation
- Brennstoffe und Prozesswärme aus Kernenergie
- Nachhaltige Nutzung des Urans und Wiederverwertung des Abfalls

Die Frage, wann diese Reaktoren gebaut werden, wird der Weltmarkt entscheiden.

Bis dahin ist die 4. Generation eher Gegenstand der Forschung.