

Fjärde generationens kärnkraftssystem

Kort beskrivning av tekniken med fördelar och nackdelar

Christian Ekberg, Chalmers

med bidrag från

Ane Håkansson och Staffan Qvist, Uppsala Universitet

Klara Insulander Björk, Chalmers



Några välkända citat från olika tidsåldrar

Ἐξ τμήσεως τῶν ατόμων ἐξέρχεται ἡ δύναμις

Ur delning av de odelbara utgår kraften

Futurum nostrum, quod est divide et impera atomibus

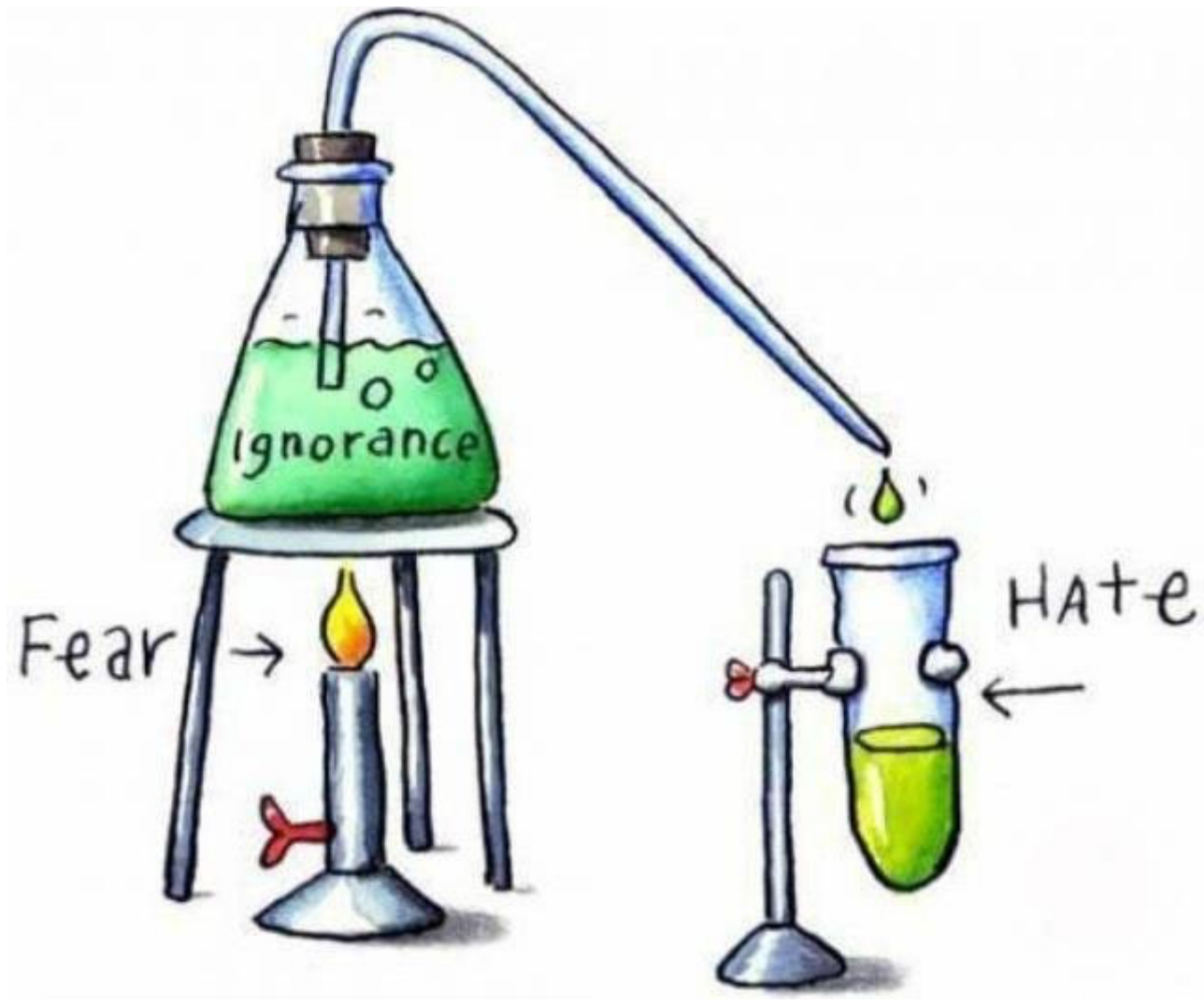
Vår framtid, det är att söndra och härska över atomerna

Allt er hægt að kljúfa með sterkum armlegg og mikilli öxi

Allting kan klyvas med en stark arm och en vass yxa

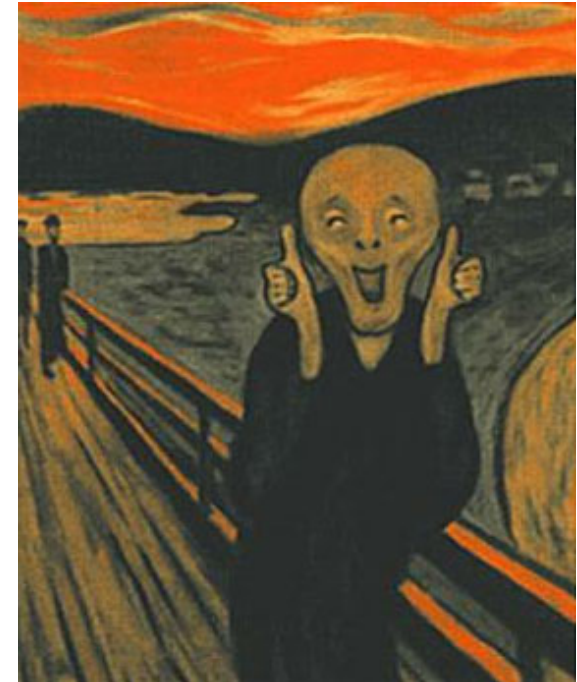


Kärnkraftsdebattens fokus





Gen IV system



Om energitnyttjandet av bränslet ökar hundrafalt och slutlagringstiden kan minskas till en hundra del kommer kärnkraftens hållbarhet i ett helt nytt ljus.



För- och nackdelar med teknologi – en filosofisk reflexion

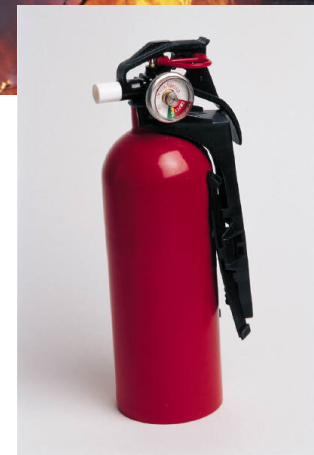


Exempel -Eld

Fördel

Teknisk lösning

Nackdel



Motmedel

Redundans

Exempel -Medicin

Fördel



Teknisk lösning



Nackdel



Motmedel

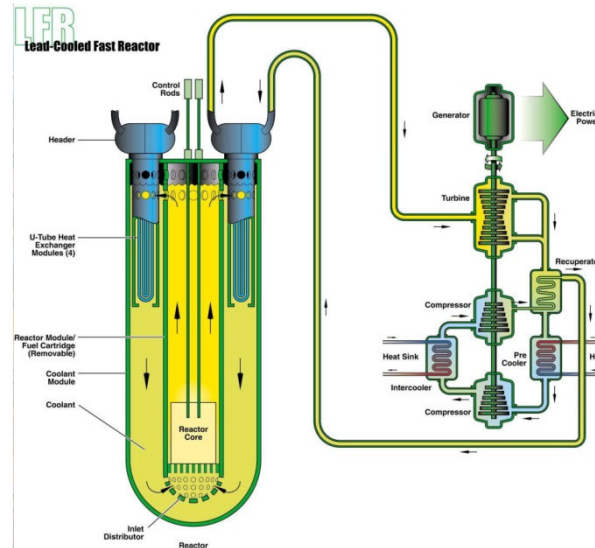


Redundans



Exempel– Energiförsörjning

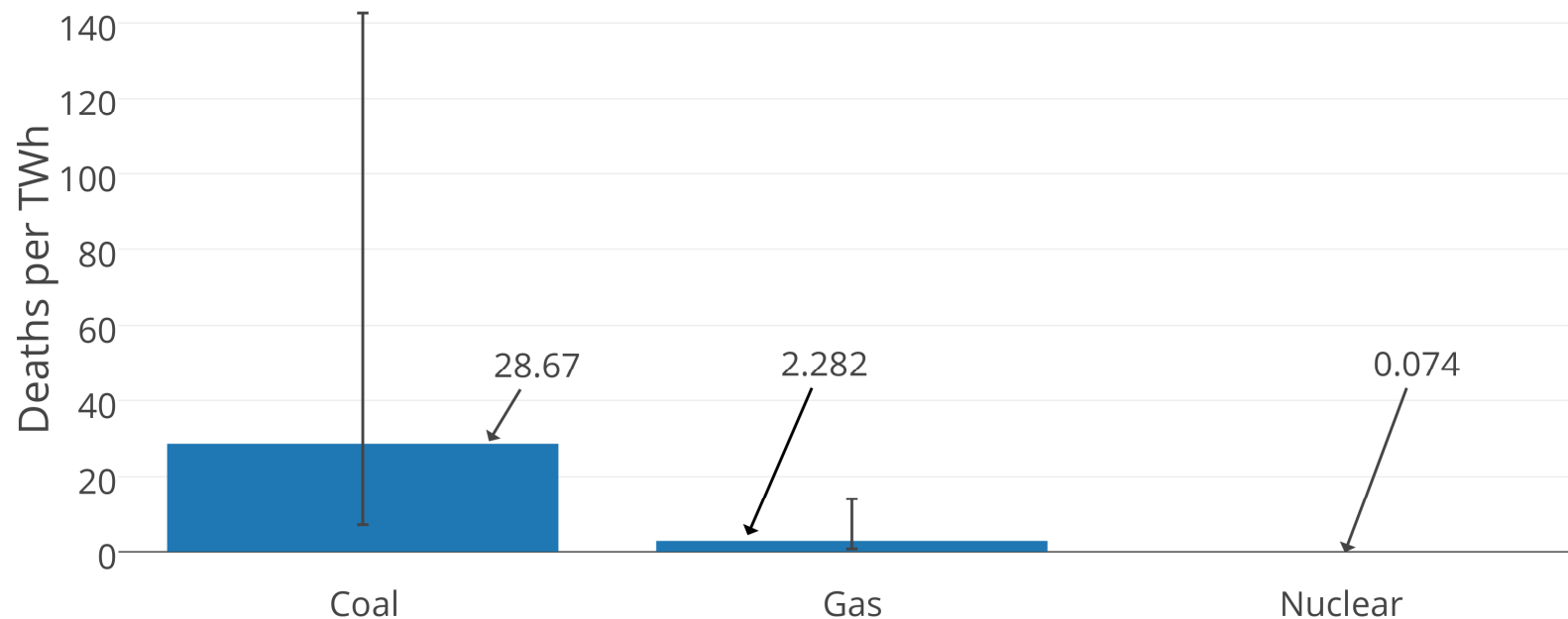
Fördel En teknisk lösning *Principiell* nackdel



Kärnvapnen blir vi knappast av med men Gen IV systemen kommer inte vara sannolika beståndsdelar i kärnvapenprogram.

Dödsfall orsakade av energiproduktion

- Data varierar stort, siffrorna som visas är "best-estimates"
- Dödligheten för kolkraft i Kina har exkluderats (mycket högre)
- Alla luftföroreningar dödar ungefär 7 miljoner människor/år



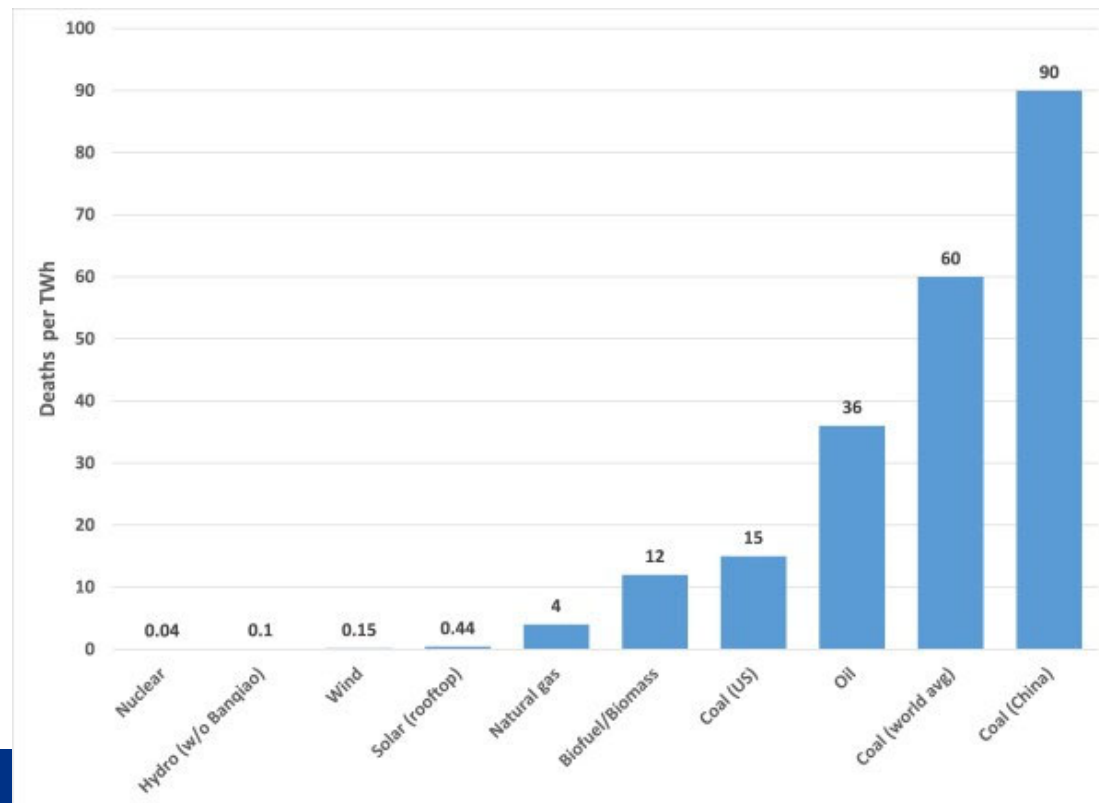
Markandya, A.; Wilkinson, P. Electricity generation and health.

Lancet 2007, vol. 370, p. 979–990.



Dödsfall orsakade av energiproduktion

- Data varierar stort, siffrorna som visas är "best-estimates"
- Dödligheten för kolkraft i Kina har exkluderats (mycket högre)
- Alla luftföroreningar dödar ungefär 7 miljoner människor/år
- Annan figur från godtycklig blogg...
- Förnybart ungefär som kärnkraft



Några katastrofer ni hört (eller inte hört) talas om

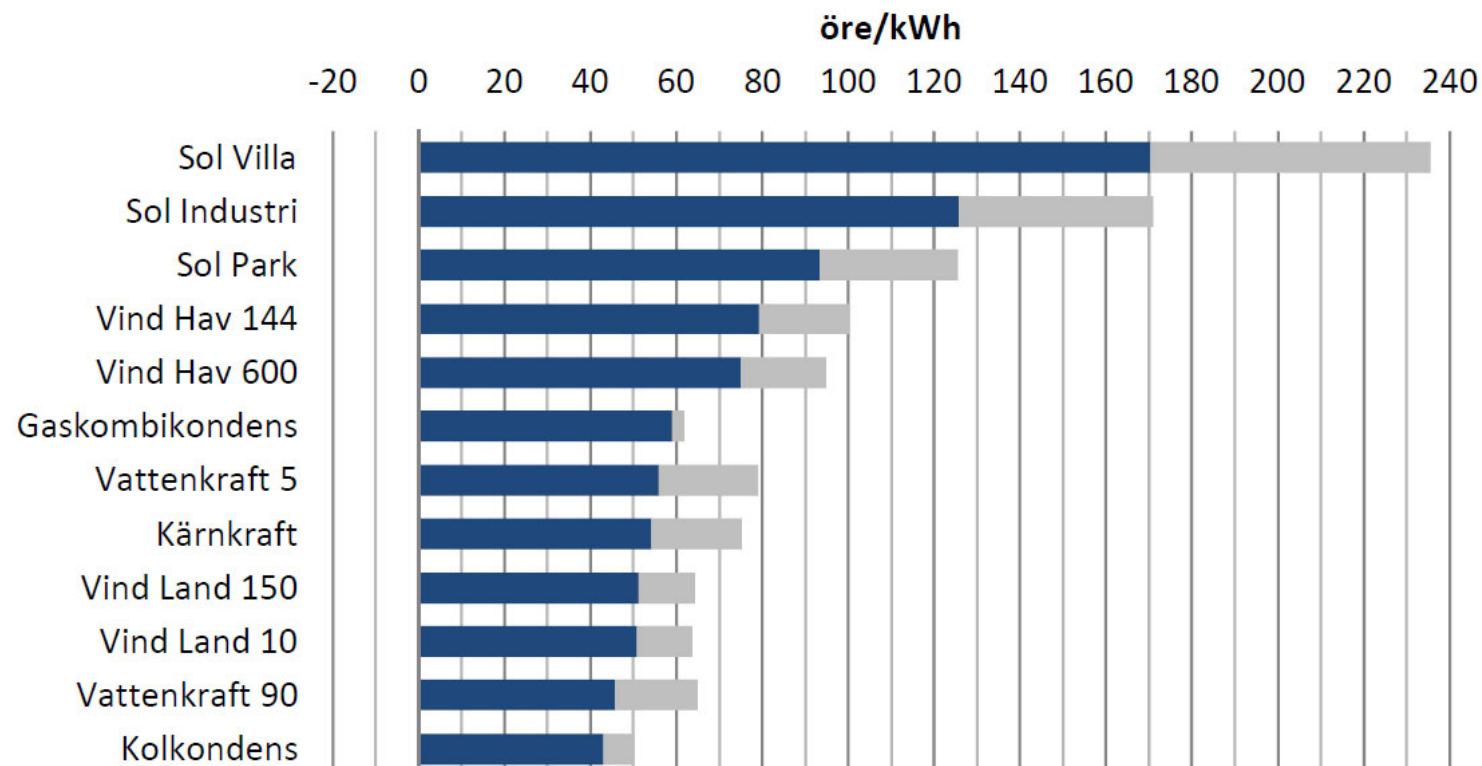
- Three mile island, USA, 1979, **0 döda**
 - Tjernobyl, Sovjetunionen, 1986, **upp till 4000 döda**
 - Fukushima, Japan, 2011, **0 döda**
-
- Banqiao hydropower dam collapse, China, 1975, **281,000 dead**
 - Vajont Dam break, Italy, 1963, **2000 dead**
 - Sayano hydropower station, Russia, 2009, **75 dead**
 - Morbi Dam, India, 1979, **up to 25,000 dead**
 - Fujinuma Dam, Japan (Fukushima), 2011, **8 dead**
 - Typical year of Coal power in India, **115,000 dead (per year)**
 - Traffic accidents, **1,250,000 dead (per year)**
 - Tobacco: **8,000,000 (per year)**
 - Suicide: **800,000 (per year)**



Elproduktionskostnader

Kalkyler med hög grad av godtycklighet...

Nedanstående (Elforsk rapport 14:40) inkluderar inte styrmedel, men heller inte investeringar i infrastruktur för energilagring eller back-up.





Konstruktionskostnad för ny kärnkraft

Det finns en förhärskande myt om att kostnaden för att bygga ny kärnkraft eskalerar.

Den faktiska kostnadsutvecklingen för de senaste utbyggnaderna:

Land	Period	Antal reaktorer	Kostnadsförändring/år
Sydkorea	1989-2008	19	-1 %
Japan	1980-2007	30	~0%
Indien	1990-2003	8	-1%

Lovering, Yip, Nordhaus (2016)

- EUs EPRer är utliggare och inte del av en trend
- Kostnadstrenden i Frankrike är flat medan kostnaderna ökar i USA 
- Kostnaderna i Kina är låga, men det är för tidigt att se någon trend 

Kärnkraft i framtiden – räcker bränslet?

- Total fossil elektricitet är **~65 EJ/år**,
Total fossil primäreenergi är **~470 EJ/y**
- Den kända resursbasen räcker för att täcka det nuvarande fossila elbehovet i **120 år**, med Generation-III-reaktorer (7700 EJ)¹
- Utvinner vi uran ur havsvatten samt implementerar Generation-IV-system räcker bränslet i **5 miljoner år...**
- Resursbasen kan utökas ytterligare 3-4 gånger genom att använda torium i Generation-IV-system

→ **Bränslet räcker, men bränslepriserna kommer att öka**



”Atomkraft”?

”Kärnkraft”?

Varför överhuvudtaget överväga användningen av kärnenergi?

I “förbränning” av uran utnyttjas krafter som är **flera miljoner gånger större** än alla andra krafter vi kan få energi ur.

För en given mängd producerad energi leder det till att:

- ✓ relativt liten mängd bränsle behövs.
- ✓ relativt liten mängd avfall produceras, vilket dessutom är lokaliserat. Exempelvis:



”Atomkraft”

Ved: 5 kWh/kg.

Olja: 10 kWh/kg.

”Kärnkraft”

Dagens kommersiella uranbränsle:

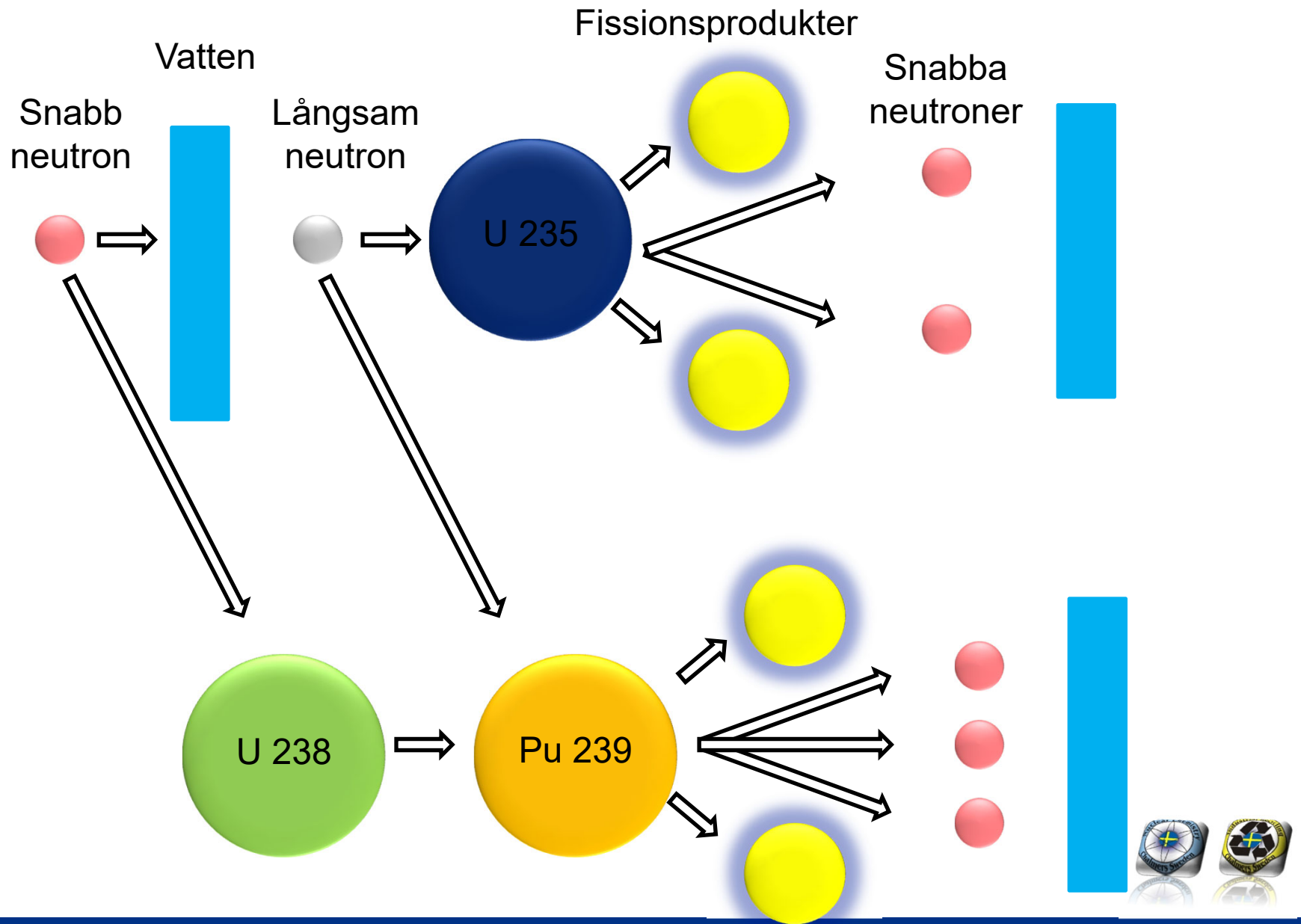
1000 000 kWh/kg.



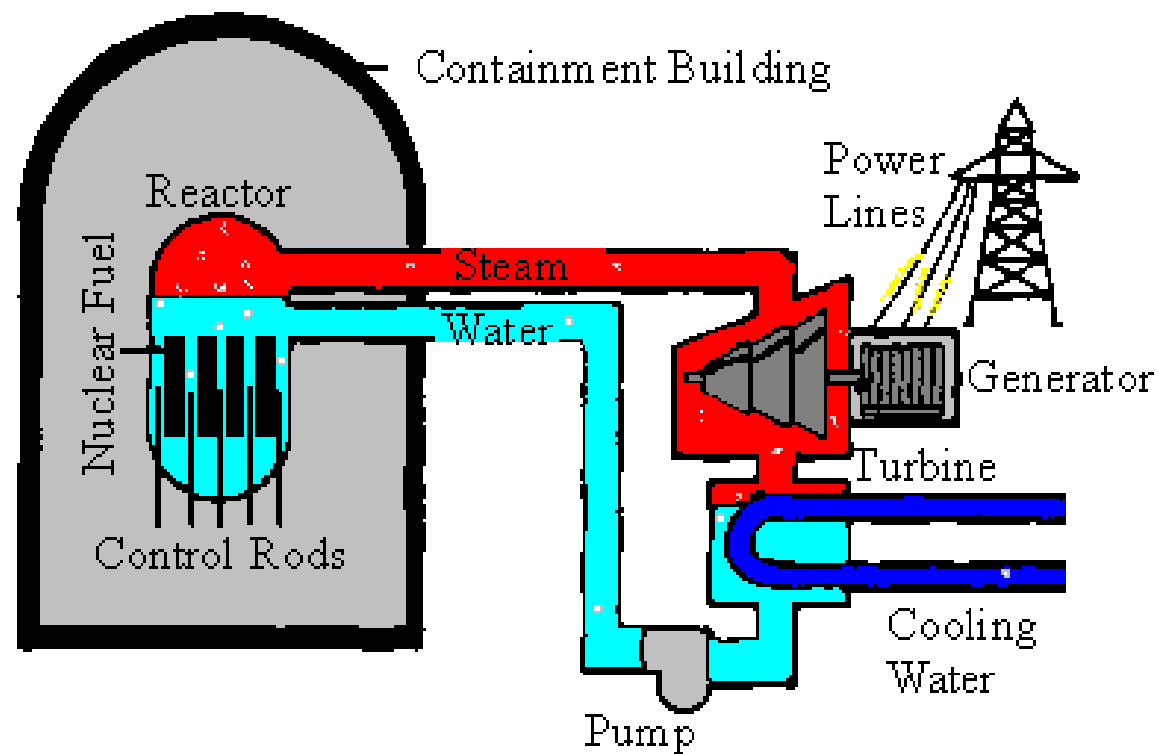
Energien i en bränslekuts motsvarar
800 liter olja.

Det finns ca 15 miljoner
bränslekutsar i en reaktor.

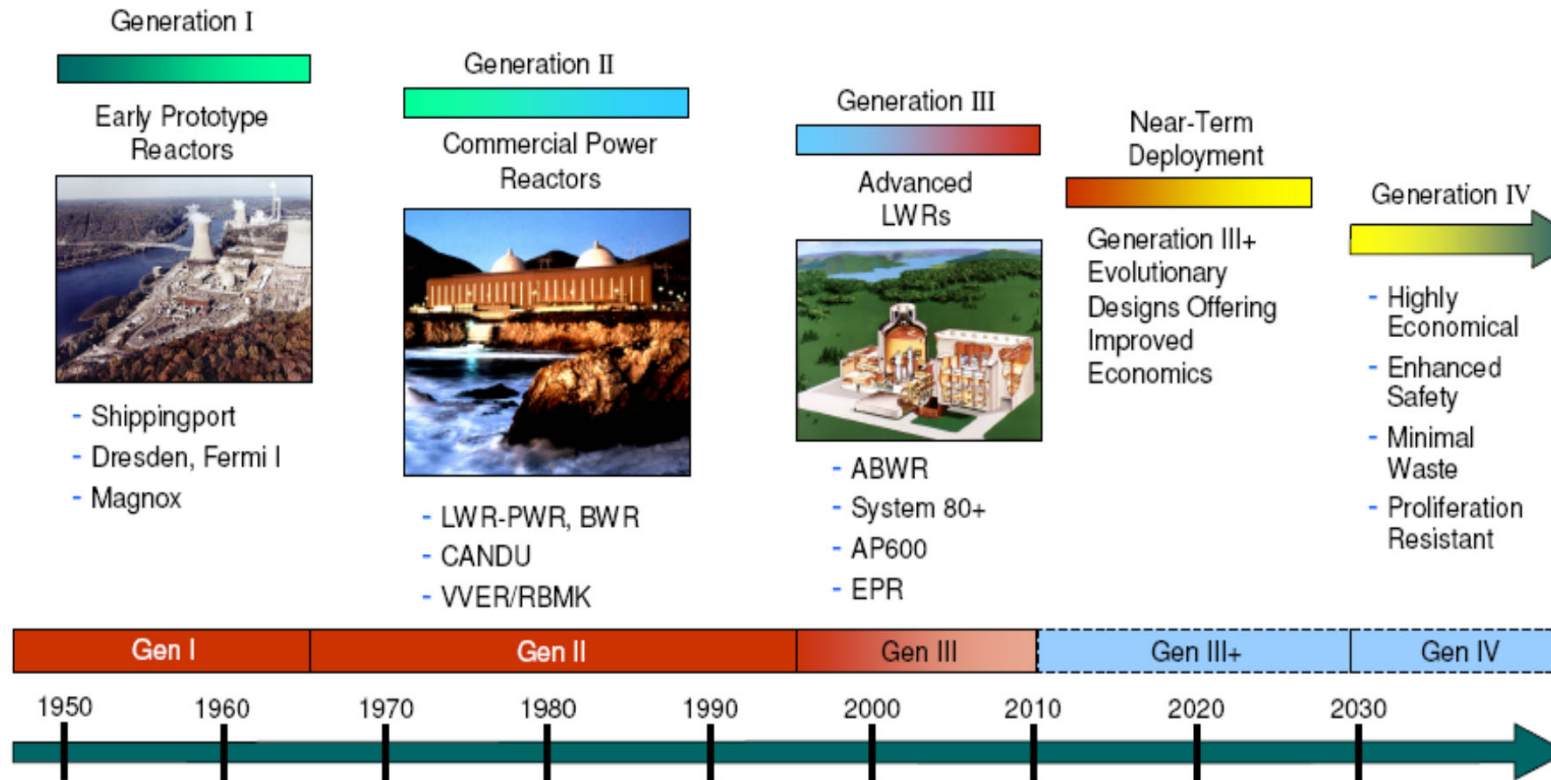




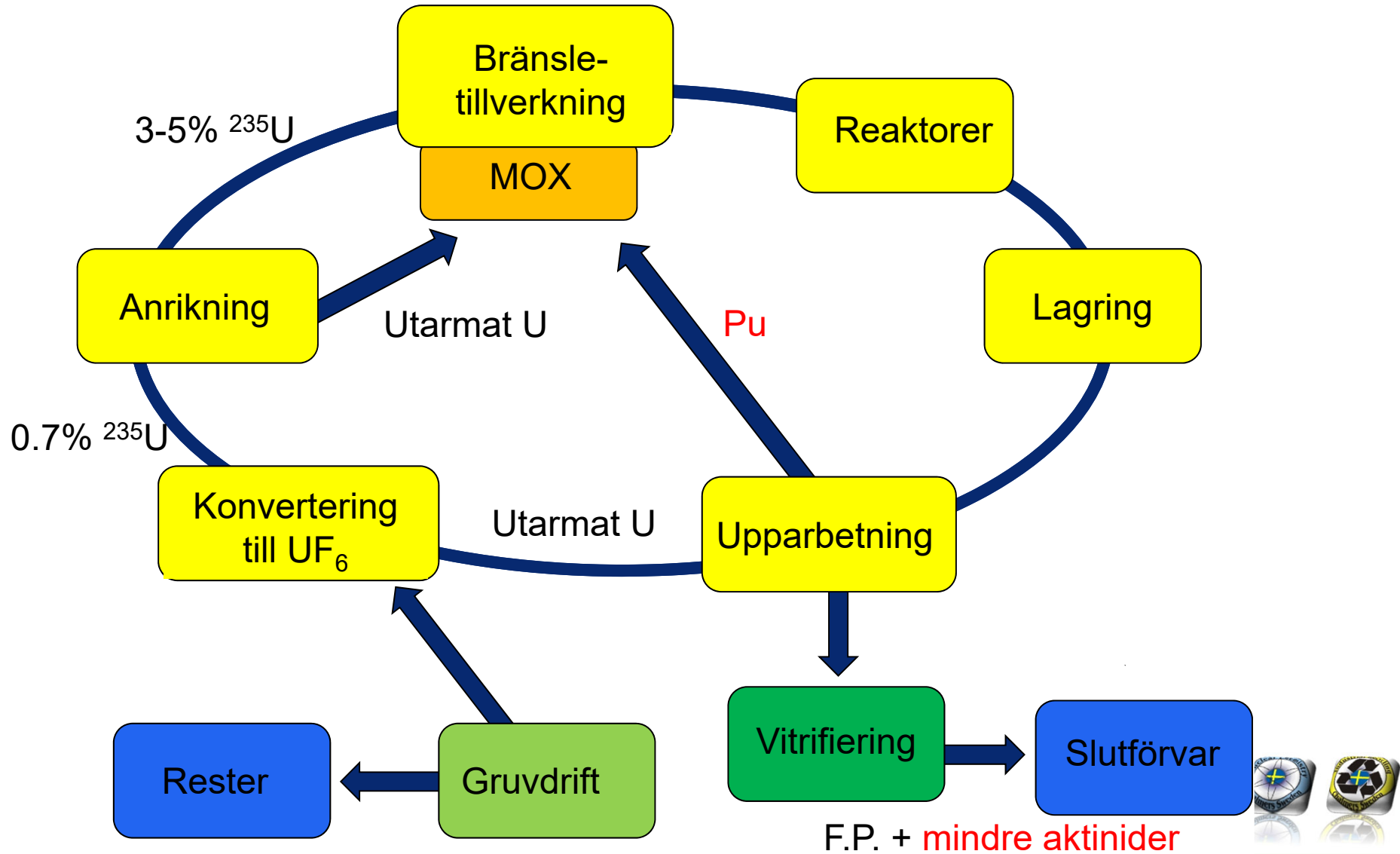
Kärnkraft



Kärnkraft



Dagens bränslecykel



Slutsats

- ✓ Mycket energi produceras med liten mängd bränsle
- ✓ Liten mängd avfall
- ✓ Låga produktionskostnader
- ✓ Ytterligg små utsläpp av växthusgaser per kWh

Finns nackdelar?



Slutsats

I dagens kommersiella reaktorer utnyttjas naturliga uranet till ca en procent. Resten betraktas som "avfall".

Leder till funderingar:

- ✓ Uthållighet
- ✓ **Ekonomi**
- ✓ Avfallsförvaring
- ✓ **Etik**



Lösning på upplevda och faktiska problem

Fjärde generationens kärnteknik (Gen IV)

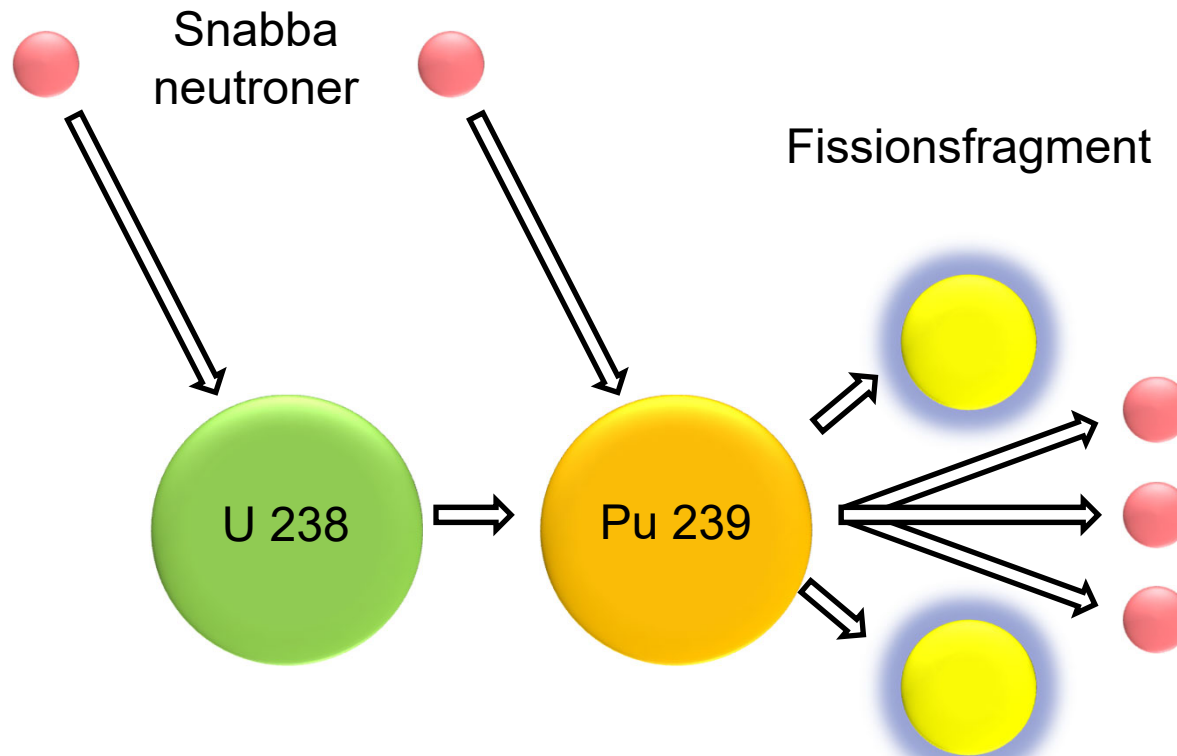
Stipulerade krav:

- ✓ Ännu högre driftsäkerhet
- ✓ Förbättrad ekonomi
- ✓ Radikalt minskad mängd långlivat avfall
- ✓ Mycket hög motståndskraft mot spridning av klyvbart material

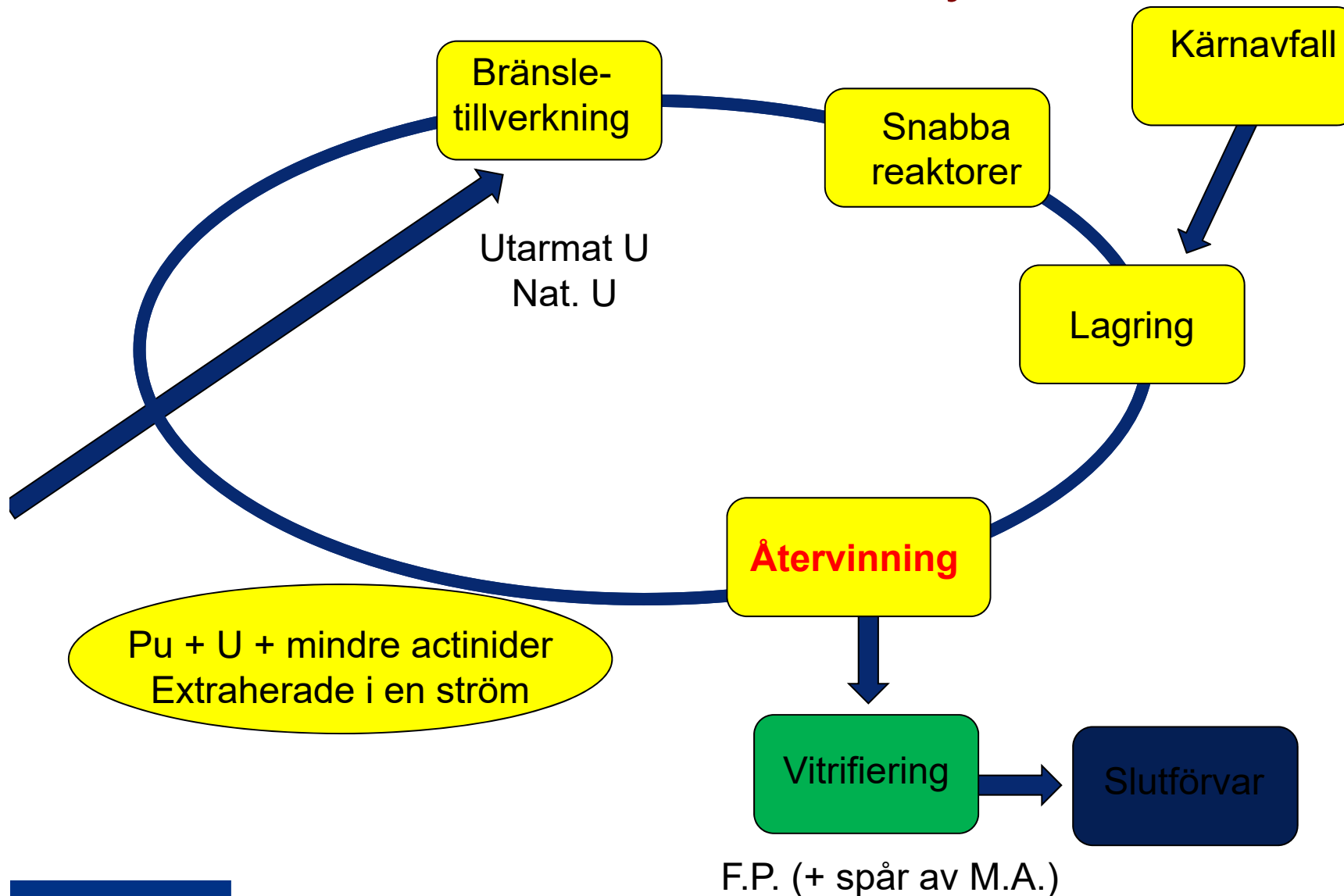


Gen IV

“Snabba” reaktorer



Gen IV bränslecykel



Gen IV

Vad kan uppnås?

- ✓ 100 gånger bättre utnyttjande av naturresurserna.
- ✓ Använt bränsle kan användas. Exempelvis: Sveriges använda bränsle kan ge lika mycket energi som dagens kärnkraft i ca 1000 år.
- ✓ Uthålligheten ingen fråga längre.



Gen IV

Vad kan uppnås?

- ✓ Väsentligt mindre volym av långlivat avfall
Avfallets effektiva halveringstid väsentligt kortare
- ✓ Nya tekniker för återvinning => ökad säkerhet mot spridning av klyvbart material.
- ✓ Det slutliga avfallet kan ej användas till kärnvapenproduktion.
- ✓ Ingen anrikning behövs



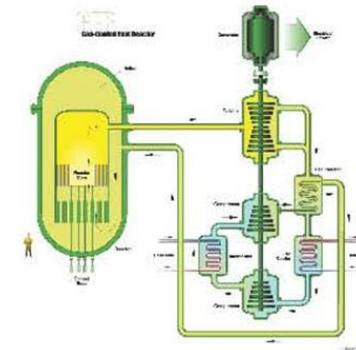
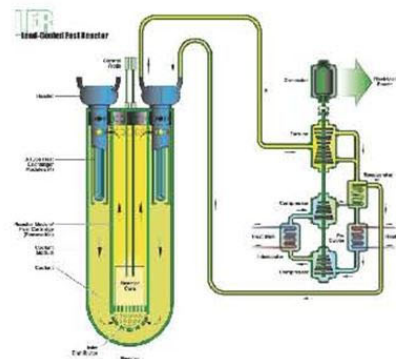
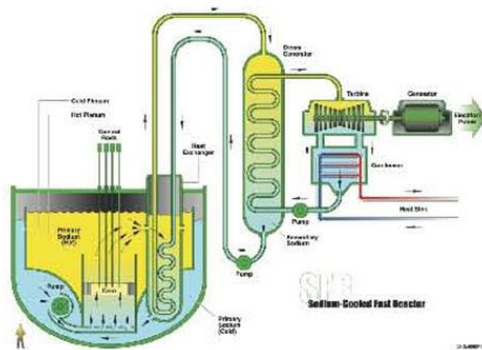
Gen IV

	Gen-II & III	Gen-IV
Kylmedel	Vatten	Na, Pb, He
Bränsle	Oxider av (U,Pu)	Olika (U,Pu,Am,Cm)
Bränsletub	Zirkonium	Stål
Återvinning	Endast Pu	U, Pu, Am & Cm
Avfallslagring	> 100 000 år	< 1 000 år
Bränsleresurs	~100 år	> 5000 år



Gen IV- Vilka varianter

- ✓ Kylmedel: natrium, bly och gas (helium)
- ✓ Återvinningsteknik: vattenlösning, saltlösning / metallsmältor
- ✓ Bränsletyper: oxider, metaller, nitrider, karbider



Gen IV- kylmedel

Type	Melting point (C)	Boiling point (C)	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W / mK)	Heat Capacity (J / molK)	Thermal expansion (µm / mK)
Water	0	100	0.99	0.6	74.5	69
Helium	-----	----	----	0.15	20.8	-----
Lead	328	1740	11.34	35.3	26.6	29
Sodium	98	883	0.97	172	28.2	71

$$\rho_{\text{Na}}(T) = 1012 - 0.220T - 1.923 \times 10^{-5}T^2 + 5.637 \times 10^{-9}T^3$$

$$\rho_{\text{Pb}}(T) = 11367 - 1.1944T$$



Gen IV- bränsle

Metals, t. ex. U

Oxides, t. ex. UO_2

Nitrides, t. ex. UN

Carbides, t. ex. UC

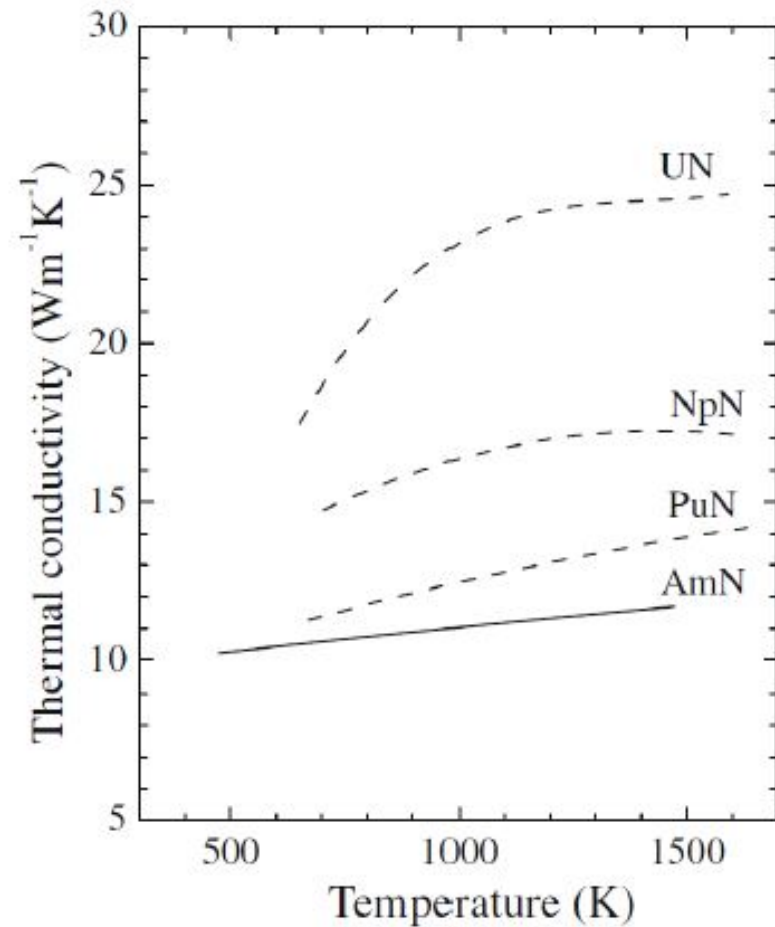
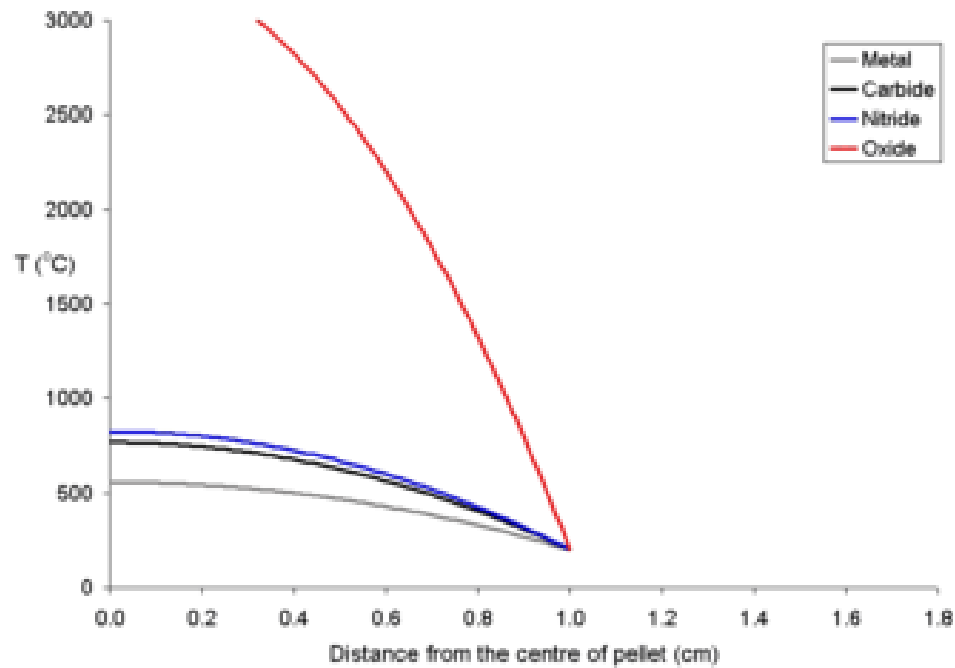
CERCER, t. ex. UO_2 i MgO

CERMET, t. ex. UO_2 i Mo

Type	Melting point (C)	Density (g/cm ³)	U-density (g/cm ³)	Crystal structure
U	1135	19.05	19.05	
UO_2	2800	10.95	9.6	orthorombic
UC	2525	13.63	12.97	Cubic NaCl
UN	2850 (2.5 atm N_2)	14.32	13.53	Cubic, NaCl



Gen IV- bränsle



Gen IV- vad finns i dag



- ✓ Natriumkylning är en industriellt mogen teknik. BN-600 i Ryssland har producerat 560MW el sedan 1981. PHOENIX och SUPERPHOENIX i Frankrike har drivits framgångsrikt.



- ✓ 10 sovjetiska militära reaktorer har använt bly/vismutkylmedel
- ✓ Vattenbaserad återvinning av Pu är industriellt mogen. Förekommer i Frankrike och UK



- ✓ Tillverkning av Pu-bränsle i oxidform (MOX) är instruellt mogen teknik. I frankrike tillverkas 195 ton MOC /år



Nya snabbreaktorer



BN-800, Ryssland

Snabbreaktorer med en (slutgiltig) kombinerad effekt på nästan $4000 \text{ MW}_{\text{th}}$ startade 2015



CEFR, Kina



PBFR, Indien



Gen IV- vad är utmaningen?

- ✓ Sluta prata om Gen IV reaktorer!
- ✓ Snabbreaktortekniken är mogen och har fungerat väl i decennier
- ✓ Bränslecykeln måste slutas!
- ✓ Forskning/Tillverkning av bättre bränslen!
- ✓ Spridningssäkra återvinningsprocesser



Tack för mig!

