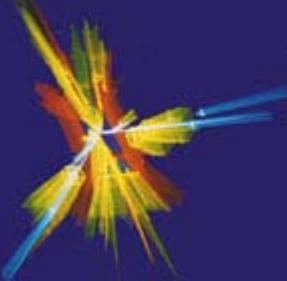


Utvikling av det globale energiforbruket i det 21ste århundret og hvordan dekke behovet

**September, 2006
Egil Lillestøl**

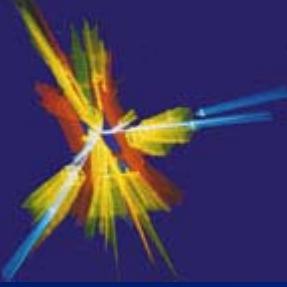


Motto for forskningsdagene:

Med viten og vilje

Motto for første del av min presentasjon:

Med stor uvitenskap og vilje



Verdens energiforbruk krever "Store" tall:

kilo (k) = 10^3

Mega (M) = 10^6

Giga (G) = 10^9

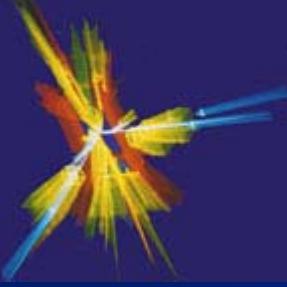
Tera (T) = 10^{12}

Peta (P) = 10^{15}

1 år = 8766 timer (h) (bruk 9 000 h i hoderegning)

1 kW kontinuerlig forbruk i ett år = ca. 9 MWh

1 GW kontinuerlig forbruk i ett år = ca. 9 TWh



OECD energidefinisjon

Som enhet brukes varmeverdien -
eller den termiske verdien av olje.

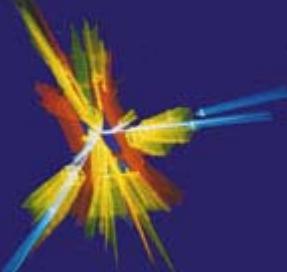
Forbruk av energi måles derved som oljeekvivalent,
f.eks:

1 toe (1 tonn oljeekvivalent) er det samme som
varmeverdien i ett tonn olje.

Globalt forbruk måles i Mtoe (= Megatonn o.e.)

OECD regner med en effektfaktor på 38% fra
termisk til elektrisk energi

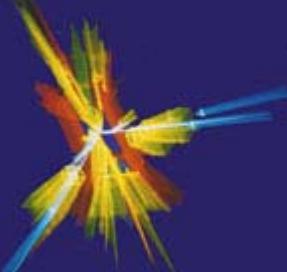
huskeregel: $2 \text{ Mtoe} \approx 1 \text{ GW}_e$ kontinuerlig)



Noen tall (Mtoe) for perioden 2002 - 2005:

	2002	2003	2004	2005
Verdens totale energiforbruk:	9405	9741	10224	10537
hvorav olje :	3522	3637	3642	3799
kull :	2398	2578	2614	2799
naturgass:	2282	2332	2420	2425
USAs totale forbruk	2293	2298	2332	2337
Europa + Eurasia totalforbruk	2829	2913	2964	2984

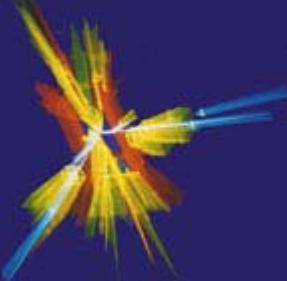
Globalt forbruk opp 3.3% pr.år fra 2001 til 2003,
5.0% fra 2003 til 2004 og 3.1% fra 2004 til 2005



Detaljer for 2005 (2004) i Mtoe:

	Olje	Gass	Kull	Kjerne energi	Hydro	Total
USA	949	581	604	188	60	2337
Europa+ Eurasia	963	1010	538	287	185	2984
Asia Pacific	1117	366	1648 (1506)	119	152	3424 (3199)
Verden	3767	2420	2799	624	635	10537 (10224)

Asias forbruk av kull opp 10.3% fra 2002 til 2003, 15.3% fra 2003 til 2004
 de tre siste årene er økningen 39% eller totalt 564 Mtoe.
 (Norges totalforbruk 40Mtoe pr år)



Vesteuropeers energiforbruk pr år: 4 toe

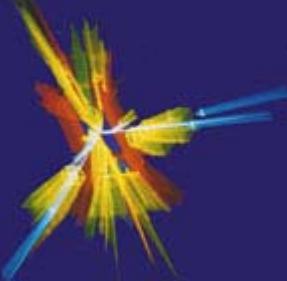
En amerikaners energiforbruk pr år: 9 toe

Nordmenns energiforbruk pr år: 10 toe
(63 % hydroelektrisitet)

Meget uklokt å bruke elektrisitet til oppvarming

3 % pr år gir en dobling hvert 24 år

BREMSENE MÅ PÅ !!



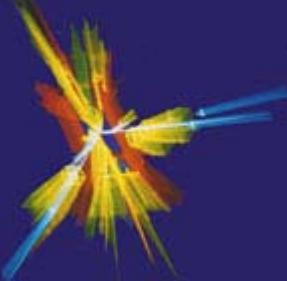
Jordens befolkning år 2000: ca 6 milliarder
Jordens befolkning år 2100: 9 - 10 milliarder

Antatt globalt energiforbruk år 2100:

55 000 Mtoe (økning faktor 5.5) !!!!

Kan dette bringes ned til ca. 40 000 Mtoe ???

Ingen prognosør tar med det økende behovet for energi
for å produsere rent ferskvann, til
 CO_2 rensing og til hydrogenprodusjon



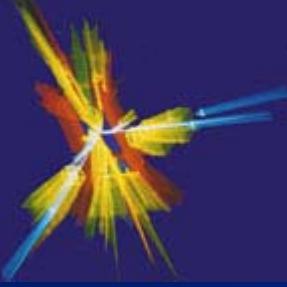
Luftforurensinger (spesielt fra kull forbrenning)

Udiskutabel dødsårsak:

I Kina er luftveisykdommer nå den fremste dødsårsaken. Verdensbanken anslår at dette skyldes forurensingene fra forbrenning av kull og biomasse. (Økende bruk av kull)

Kull forbrenning frigjør store mengder radioaktivitet !!!

(Ett tonn kull frigjør ca. 3000 Bq Radon (^{222}Rn) til atmosfæren)



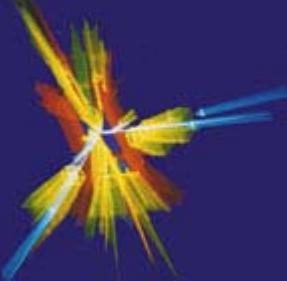
Hva kan gjøres ?

(Tar et MEGET optimistisk utgangspunktet)

Globalt energibehov år 2100: 40 000 Mtoe

Dessuten at forbruket av kull, olje og naturgass skal være (vesentlig) mindre i 2100 (5000Mtoe) enn i 2004 (8965 Mtoe)

Hvordan dekke 35 000 Mtoe fra andre kilder ?



Solvarme (direkte konvertering ved bruk av speil teoretisk mulig)

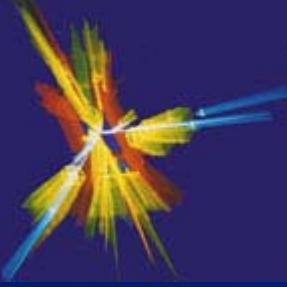
Eksempel:

I Sahara er utnyttbar solvarme ekvivalent til ca.
30 cm olje pr. m² pr. år for elektrisk produksjon, og ca.

15 cm olje pr. m² pr. år for produksjon av hydrogen

Med plass for infrastruktur kan vi gå ut fra

ca. 20 - 40 m² pr. person, eller totalt
opp til ca. 400 000 km²



Fra de franske Pyreneene

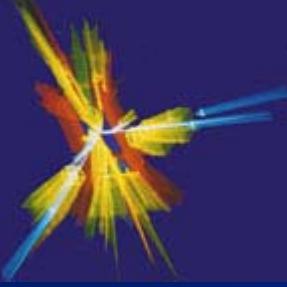




Om vi ville dekke det globale energibehovet
fra solvarme i år 2100, må vi bygge ut:

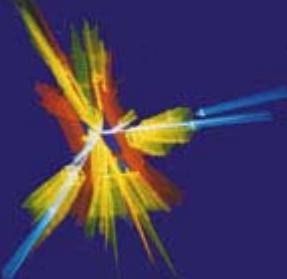
10 000 000 m² eller 10 000 mål hver dag fra nå av !

(Mange arbeidsplasser for speilvaskere)



Kramer Junction II



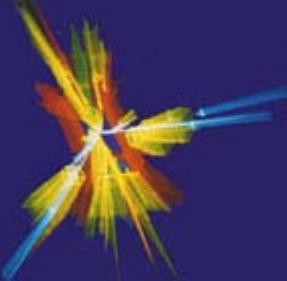


Energi fra fission (kjernekraft)

Sammen med solvarme eneste realistiske mulighet !

Kan det bygges sikre kjernekraftverk ?

Hvor mange slike kraftverk trenger vi ?

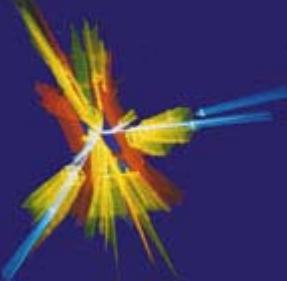


Antall slike kraftverk:

Et (lite) kjernekraftverk (*) ≈ 1 Mtoe (termisk),
vi trenger 35 000 Mtoe
og derfor ca 35 000 slike kraftverk

For å komme i mål må vi med andre ord bygge ca ett slikt kraftverk pr. dag i resten av dette århundre (del med to om vi snakker om meget store kraftverk)

(*) Små kraftverk kan plasseres i og nær byer slik at også spillvarmen kan utnyttes



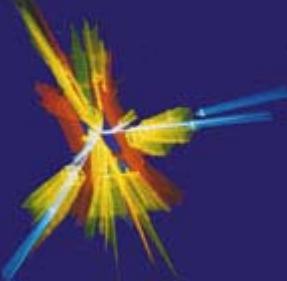
Problemer med "tradisjonell" kjernekraft:

Begrensete ressurser av Uran

Nedsmelting (Tchernobyl)

Plutoniumavfall

Spredning av kjernevåpen



Thorium(232)



Uran(233)



Uran(235) (0.7%)



Uran(238) (99.3%)

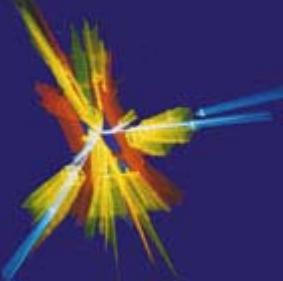
} naturlig
Uran



Plutonium(239)



Kan spaltes og gi energi

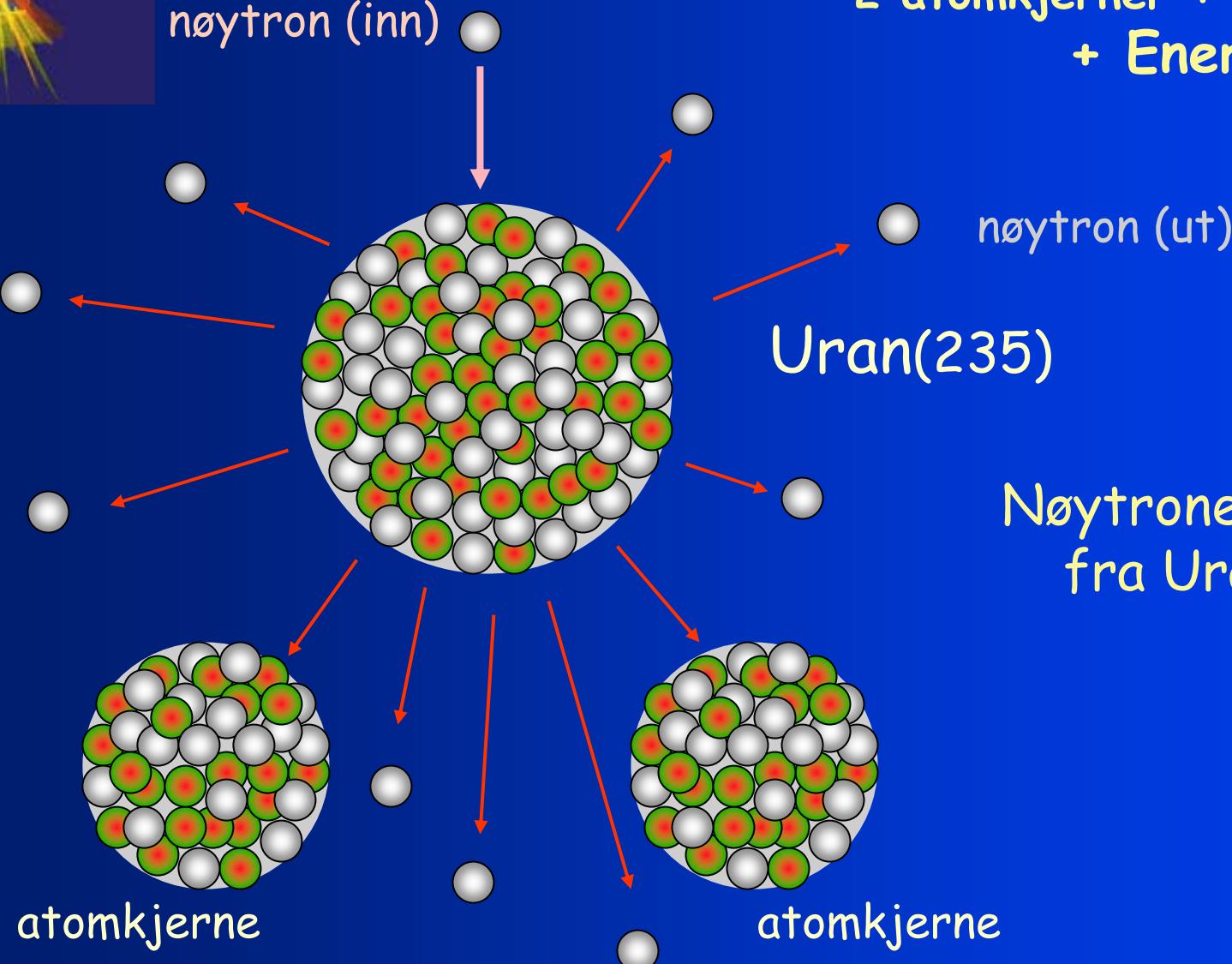


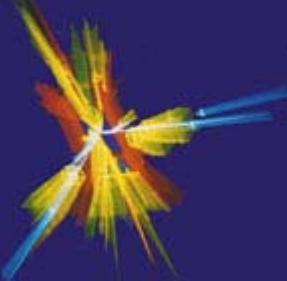
Fission:

nøytron + Uran

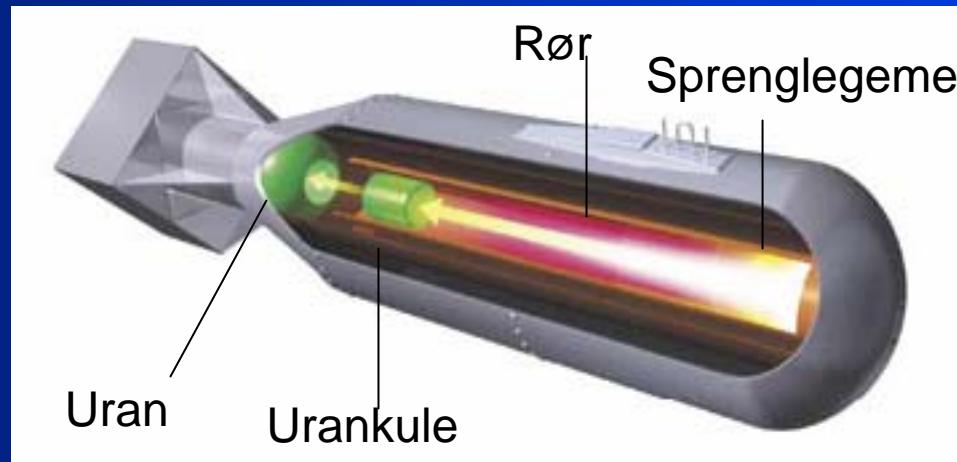


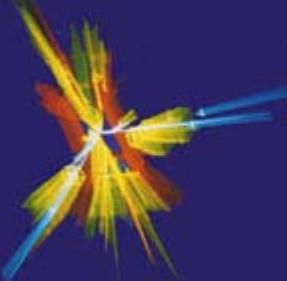
2 atomkjerner + N nøytroner
+ Energi





Atombombe, ca 60 kg Uran (evt. Plutonium)

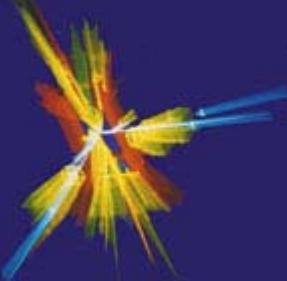




Trenger ny kjernekraftteknologi (fusjonsenergi (ITER) for neste århundre)

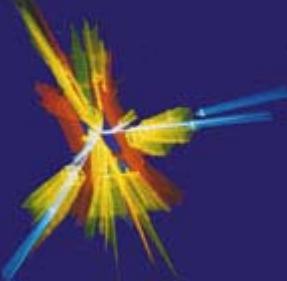
Et akseleratordrevet kjernekraftanlegg
basert på (det norske(*) grunnstoffet) Thorium
er en mulig løsning

(*) Les boken om Kartevoll
Se: www.fensfeltet.no

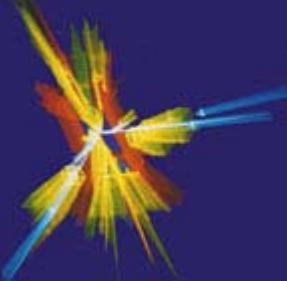


Carlo Rubbia (CERN) (Nobelpris 1984) Energy Amplifier Project (EA)

- bruker Thorium som drivstoff
- drevet av en akselerator
(IKKE kjedreaksjon)
- produserer praktisk talt ikke
avfallstoffer
- kan forbrenne avfall som
Plutonium (sammen med Thorium)
og få ut 30% ekstra energi
- Ikke anvendbart i våpenproduksjon
- Thoriumreserver for titusener av år

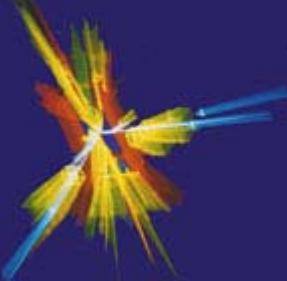


Et slikt kraftverk med akseleratorkompleks,
reaktor, strømgeneratorer,
anlegg for fjernvarme og infrastruktur
kan få plass på mindre enn 1000 m^2 .



Den viktigste forskjellen mellom dette anlegget og et tradisjonellt kjernekraftverk er at nøytronene som driver fissionene i det tradisjonelle kraftverket kommer fra brenselet (uranet) selv, mens nøytronene i den akseleatorordrevne Thoriumreaktoren kommer fra en ekstern kilde (akseleator).

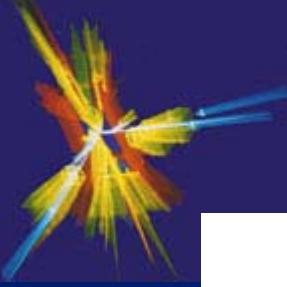
Derved er det en viss risiko at for at en tradisjonell reaktor kan komme ut av kontroll, mens dette ikke er mulig for Thoriumreaktoren



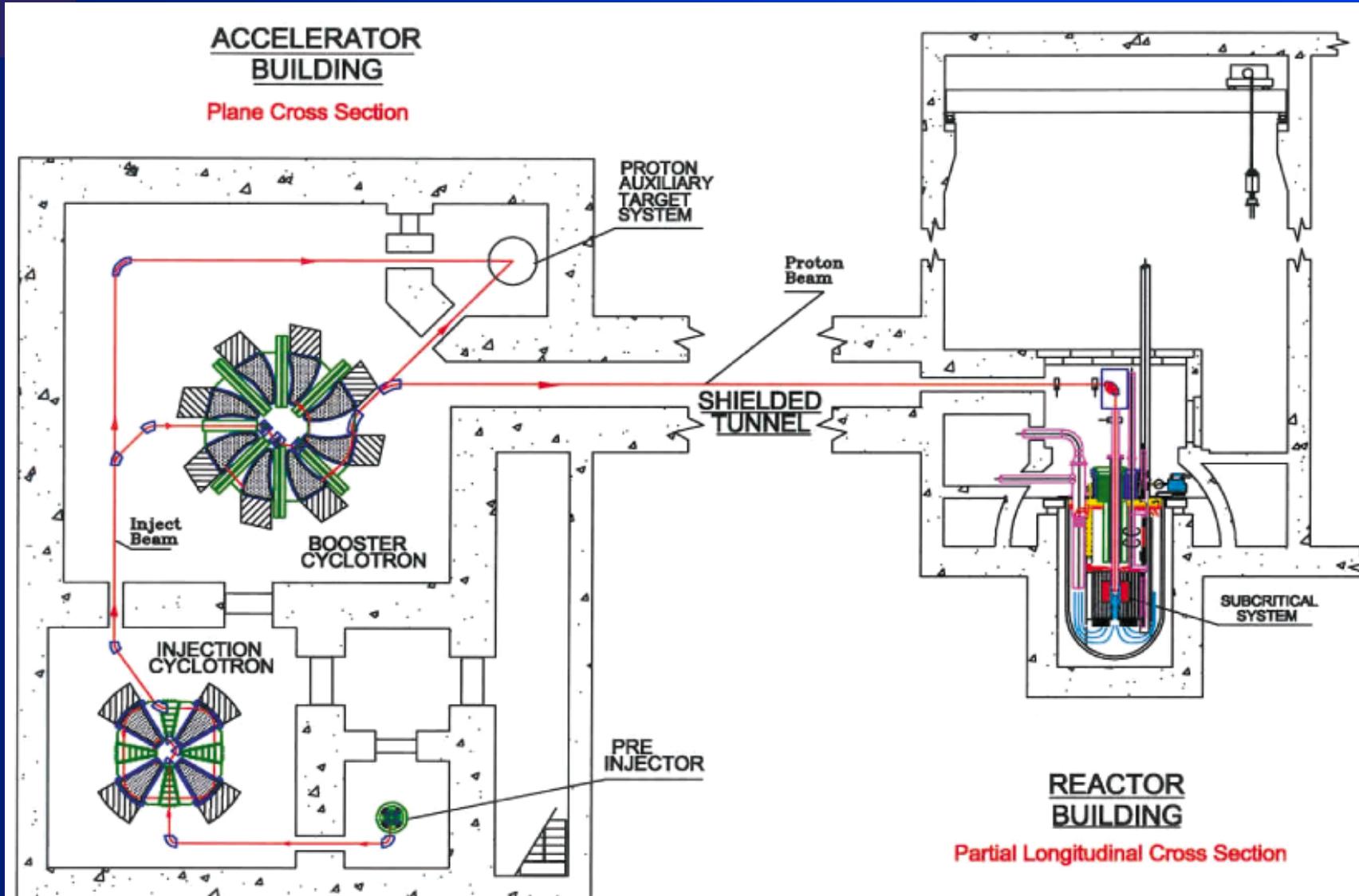
Ekstern nøytronstråle:

protonakselerator med "lav" energi,
800 - 1000 Mev og høy intensitet (10 til 20 mA)

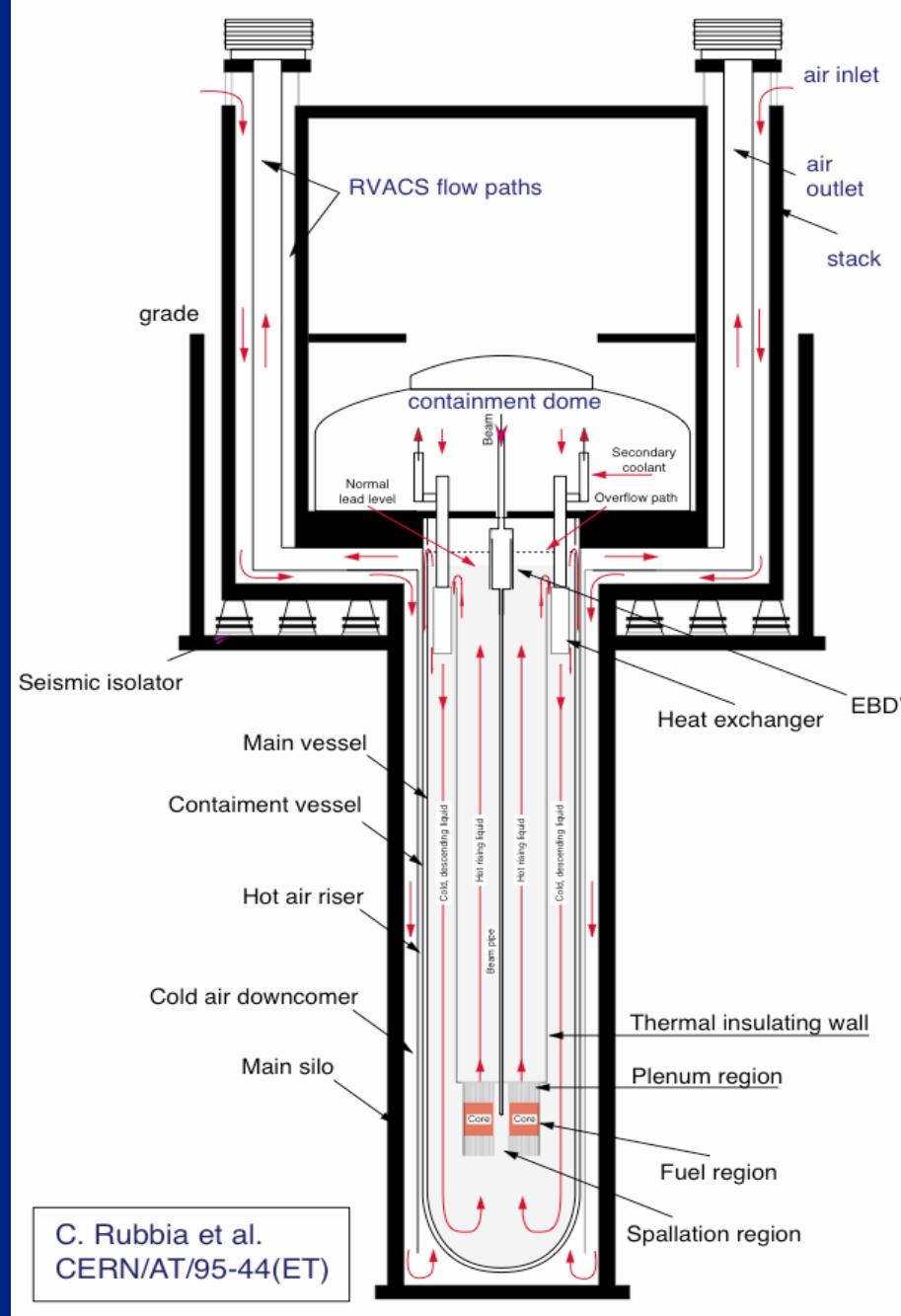
- protoner fra akselerator inn i bly gir nøytroner, og nøytroner inn i Thorium gir Uran(233) som fissionerer
- nøytroner inn i Plutonium(239) gir fission
- nøytroner inn i et radioaktivt spaltungsprodukt forvandler dette til et stabilt element

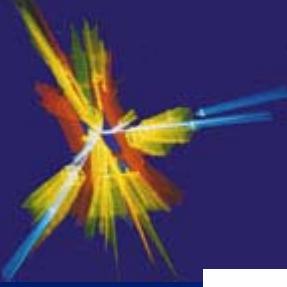


(Fra A. Kadi, CERN)

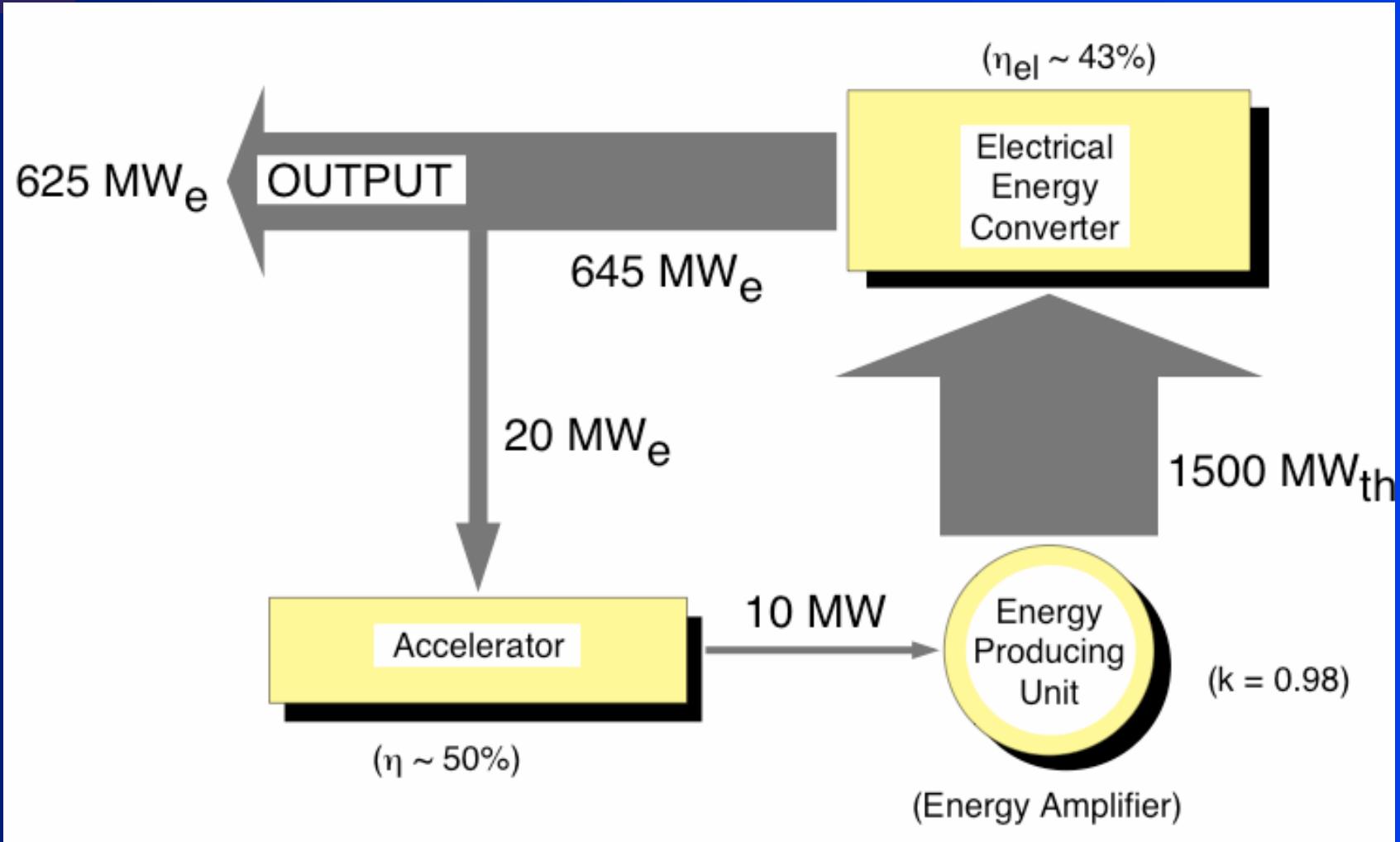


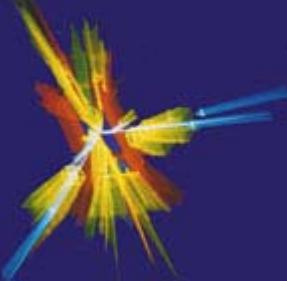
EA skisse





Fra Carlo Rubbia (1500 MW_{th} i 5 år):



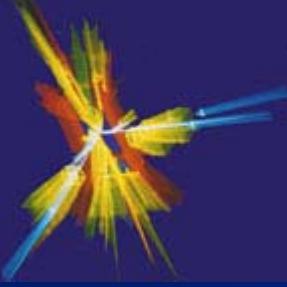


Eksterne protoner inn i bly gir nøytroner,
nøytroner i Thorium gir Uran(233),
nøytroner i Uran gir fission og nye nøytroner

Tilsammen gir dette nøytroner med et
kontinuerlig ("adiabatisk") energispektrum
fra 0 og opp til energien på protonene

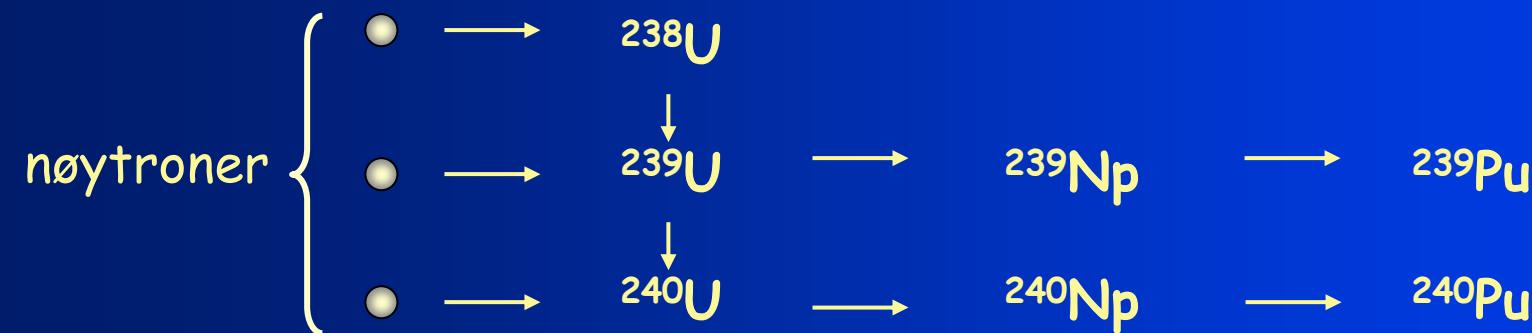
De høyeste nøytronenergiene er meget effektive
til forbrenning av Plutonium (med ekstra energiutbytte),
mens nøytroner med lavere energier er meget effektive
til forvandling av radioaktive fissionsprodukter

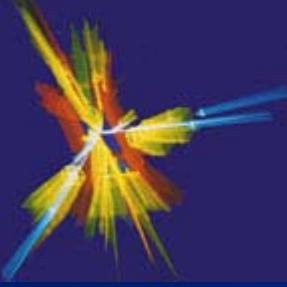
Reaktoren produserer minimalt med radioaktivt avfall !



I en Uranreaktor er mesteparten Uran(238) som ikke spaltes, men forvandles til Plutonium i prosessen:

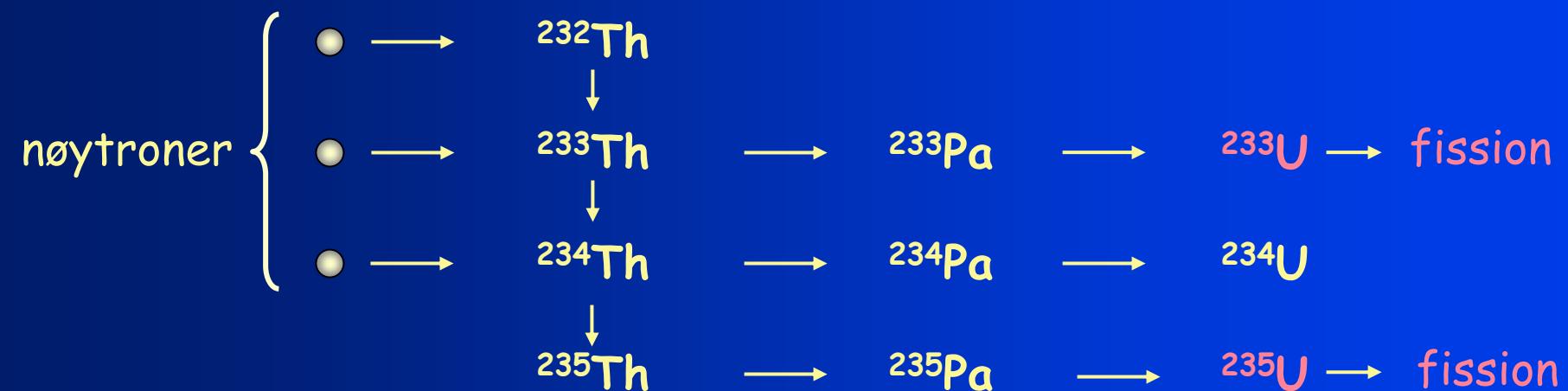
Uranreaktor, "intern" nøytronkilde

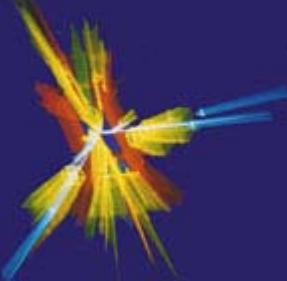




Thoriumreaktor med ekstern nøytronkilde (ingen produksjon av Plutonium)

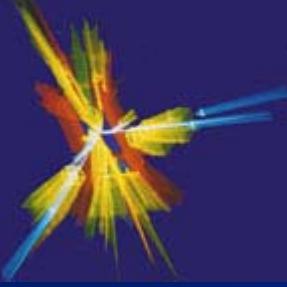
Thoriumreaktor ("ekstern" nøytronkilde)





Brenselet i Thoriumreaktoren
tas ut hvert femte år for
prosessering,rensing og
påfyll av ca. 3 tonn Thoriumoksyd

Transuraner skilles ut i en enkel
pyroelektrisk prosess og legges tilbake
i reaktoren sammen med de mest
"ubehagelige" fissionsproduktene

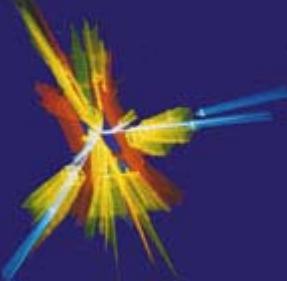


Kjente og lett tilgjengelige Thoriumreserver (tonn)



Australia:	340 000
India:	300 000
US:	300 000
Norge:	180 000
Canada:	100 000
Sydafrika:	39 000
Brasil:	18 000
Malaysia:	4 500
Andre:	100 000

1 tonn Thoriumoksyd = 3.7 millioner tonn kull

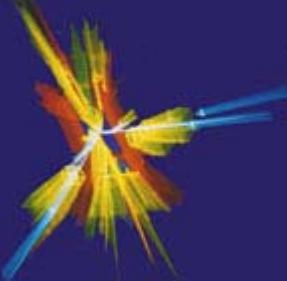


Nyttige sammenligninger

1 GW_e × år krever:

- 0.7 tonn Thorium,
- 2 600 000 tonn kull,
- 34 km² solceller (fotovoltaiske),
- 12 km² termiske solpaneler (+ infrastruktur)
- 2000 km² hurtigvoksende skog (**bioenergi**)

De norske thoriumreservene representerer en verdi etter dagens oljepris på ca. 250 000 milliarder US\$, eller ca tusen ganger oljefondet



Forbrenning av avfalls-plutonium

Avfalls-plutonium inneholder 33 % av den opprinnelige energien i Uranet

Plutoniumet blandes med Thorium i forholdet 1 til 7, brennes og gir fra seg all sin energi

Thorium er en mye bedre incinerator enn Uran (flere nøytroner pr. fission)



FEAT (the First Energy Amplifier Test) Eksperiment på CERN, 1993-1994

Eksperimentell bestemmelse av energispektret for nøytroner
generert i kjernekaskader fra protonstråler

CEN, Bordeaux-Gradignan, France

CIEMAT, Madrid, Spain

CSNSM, Orsay, France

CEDEX, Madrid, Spain

CERN, Genève, Switzerland

Dipartimento di Fisica e INFN, Università di Padova, Padova, Italy

INFN, Sezione di Genova, Genova, Italy

IPN, Orsay, France

ISN, Grenoble, France

Sincrotrone Trieste, Trieste, Italy

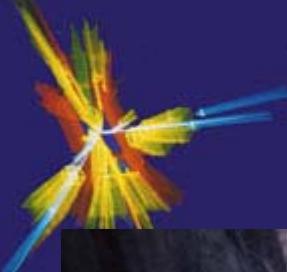
Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain

Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain

University of Athena, Athens, Greece

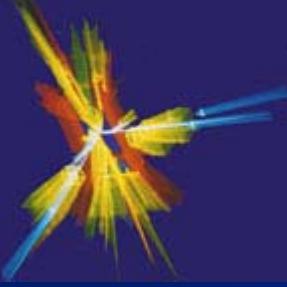
Université de Bâle, Bâle, Switzerland

University of Thessalonic, Thessalonique, Greece



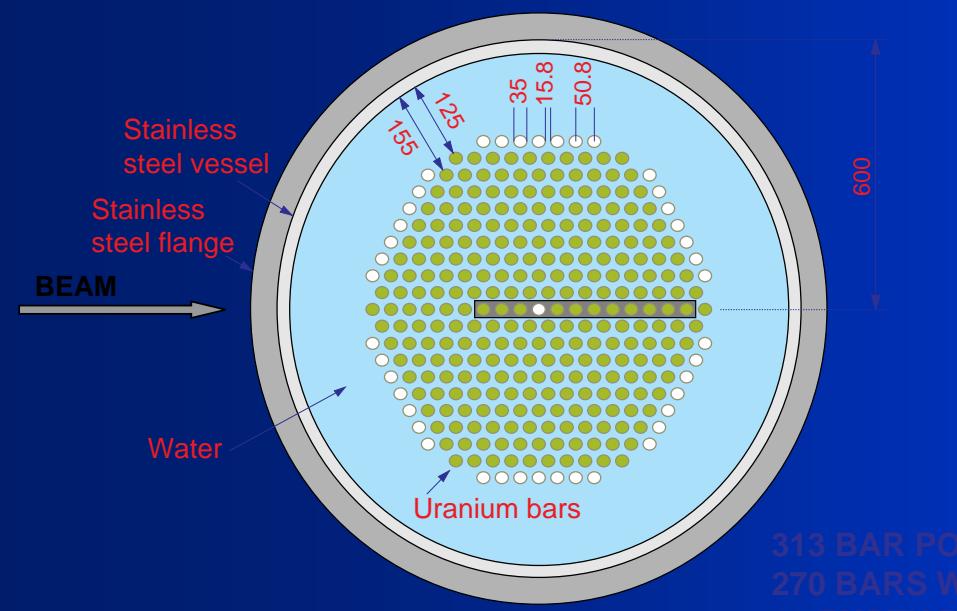
3.6 tonn naturlig uran



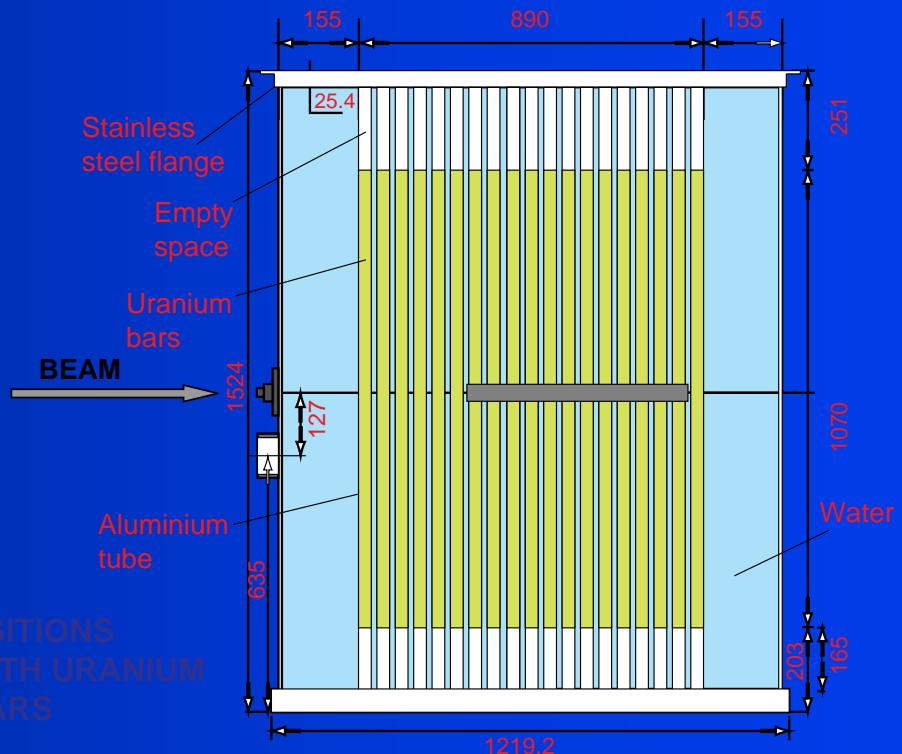


FEAT

Topp og sidebilde av FEAT-oppsettet,
i T7 strålen fra CERNs Proton Synchrotron.
(fra Y. Kadi)

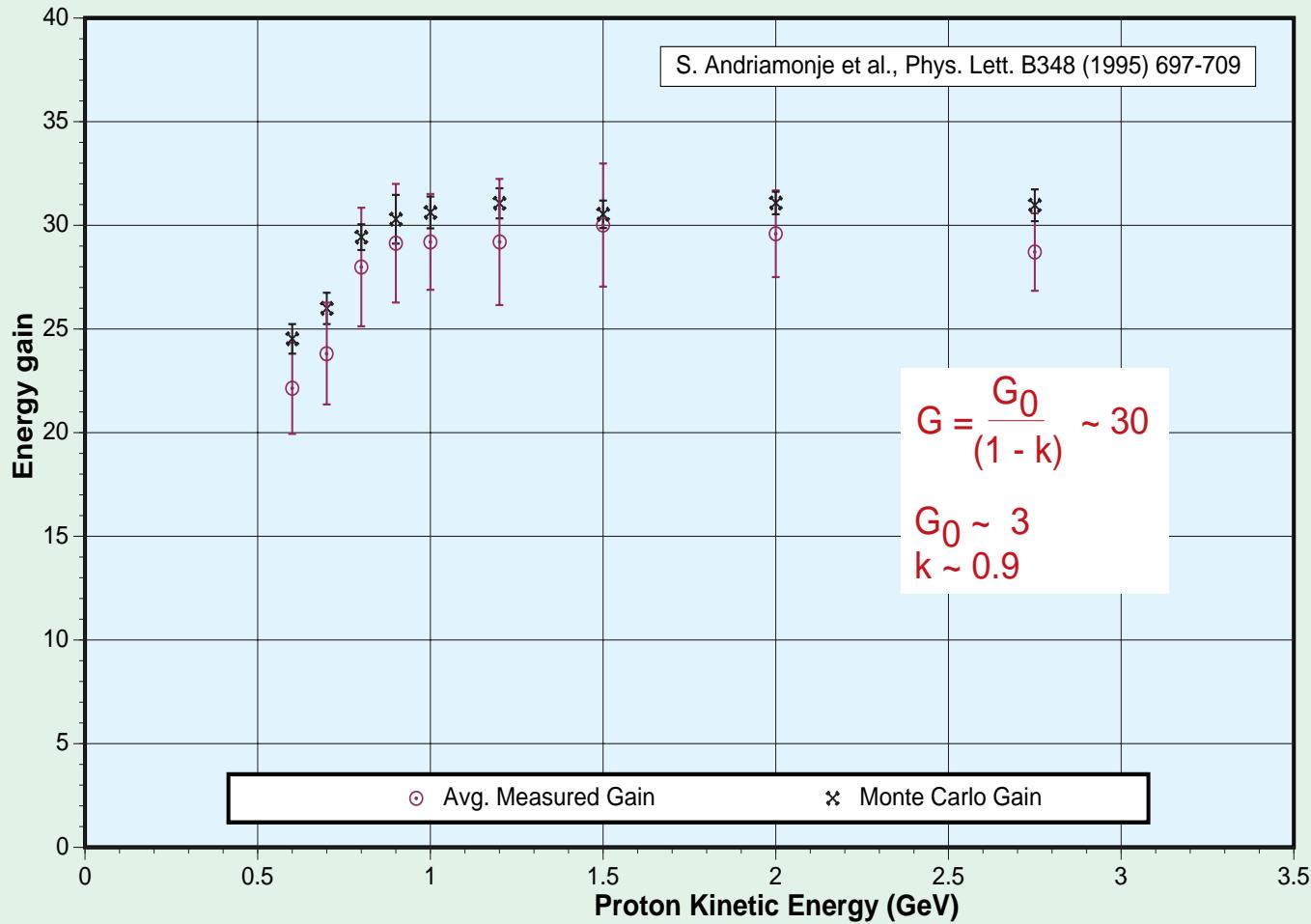


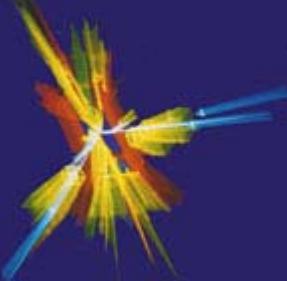
313 BAR POSITIONS
270 BARS WITH URANIUM
10 EMPTY BARS



(Fra Y. Kadi):

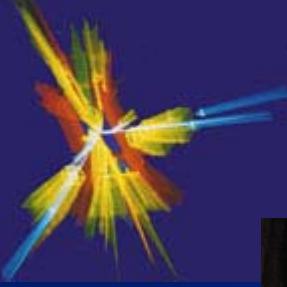
*Energy gain vs. kinetic energy
(Average from all counters & MonteCarlo)*





The TARC Experiment (CERN 1997 - 1998) Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing

- Detaljstudier av nøytronfluks i bly
- Direkte test av transmutering av radioaktive fissionselementer, spesielt ^{99}Tc og ^{129}I , ved "Adiabatic Resonance Crossing"
- Utvikling og validering av simulerings- og beregnings-verktøy
- Produksjon av radiofarmasøyttiske stoffer

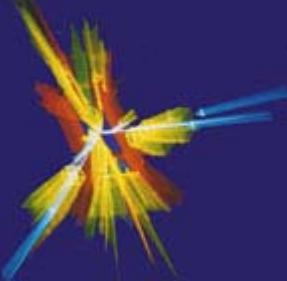


C.R.s TARC-eksperiment

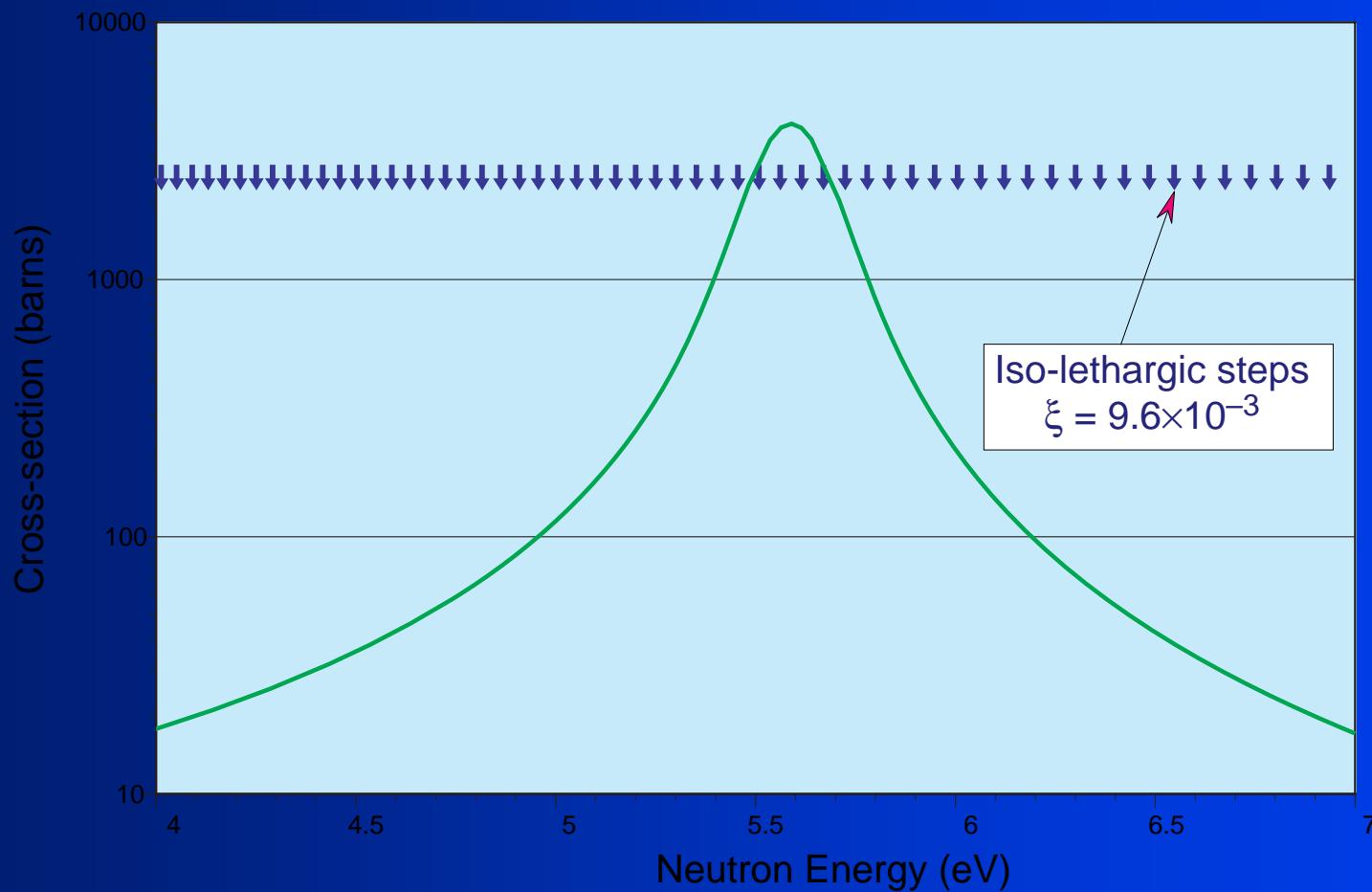


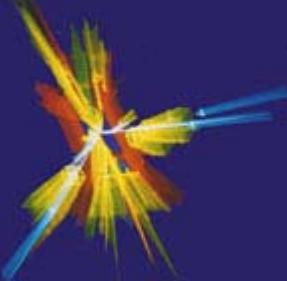
Egil Lillestøl, CERN & Univ. of Bergen

BGO, Sept, 2006



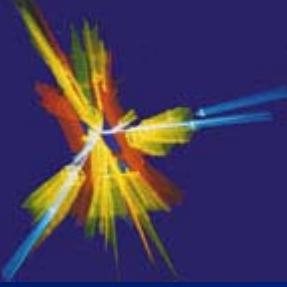
Adiabatic Resonance Crossing av 5.6 eV ^{99}Tc resonansen (fra A. Kadi)



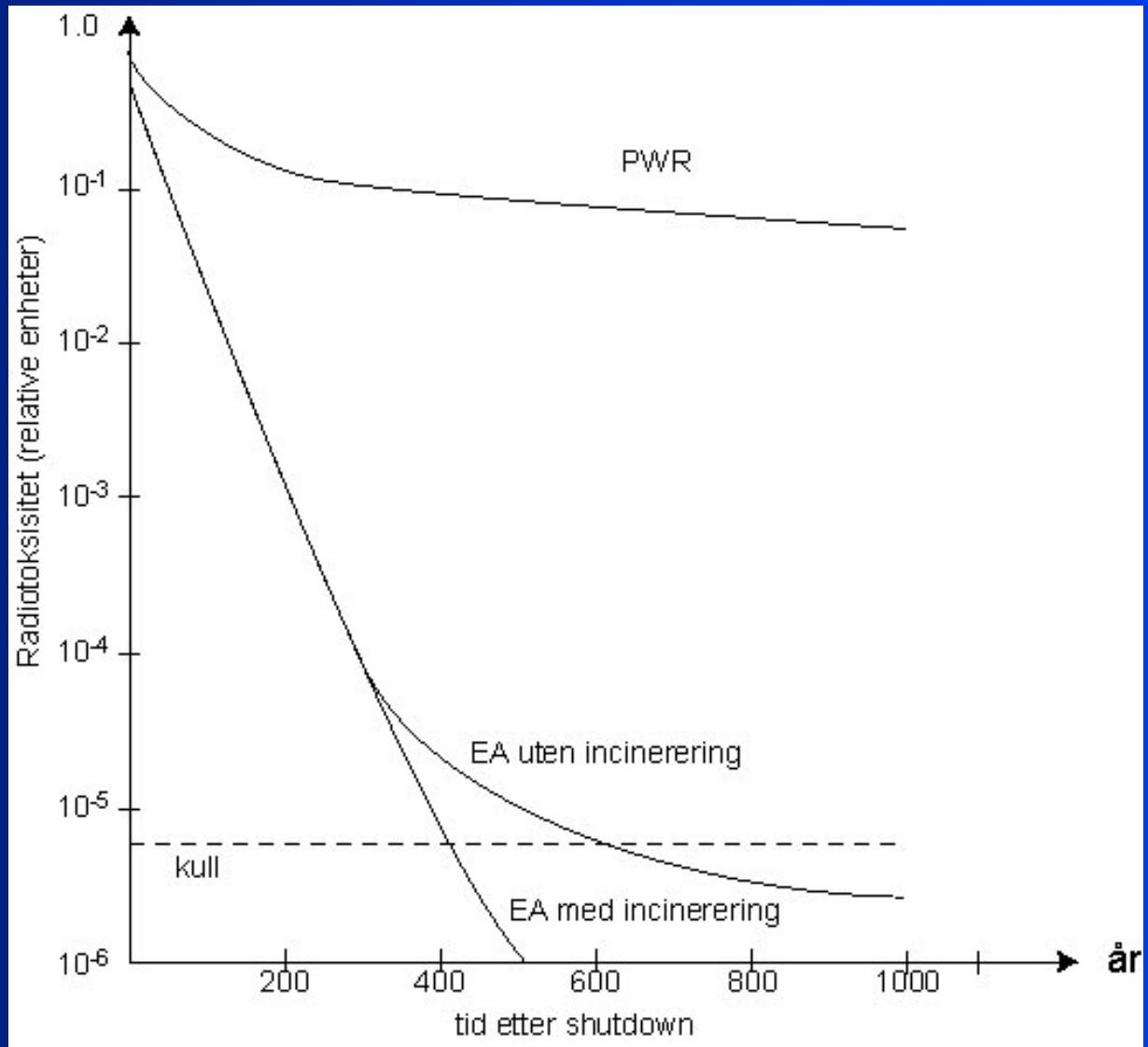


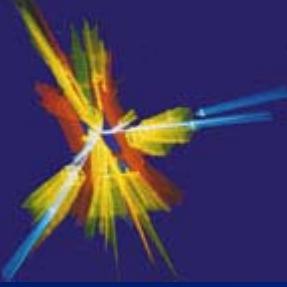
Technitium-forbrenning:



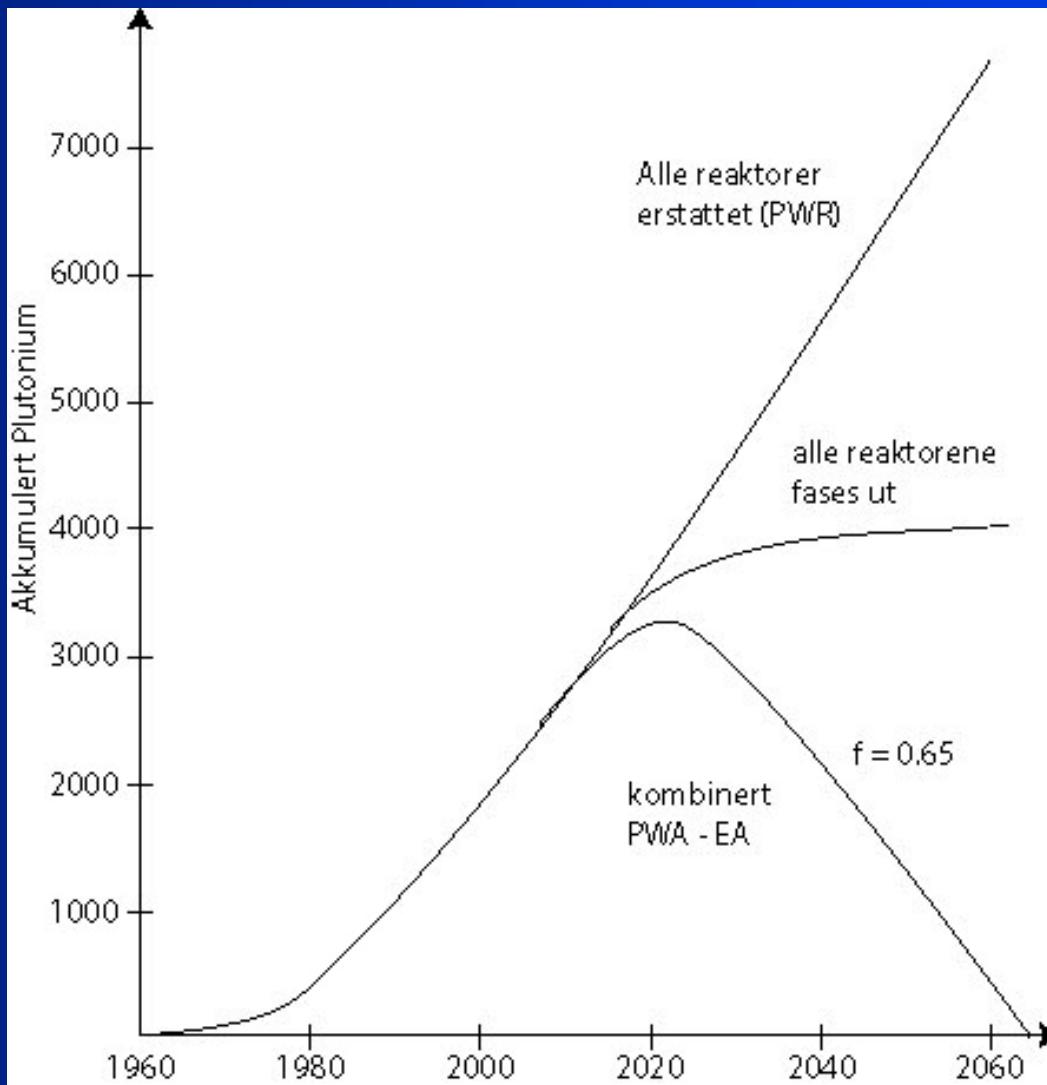


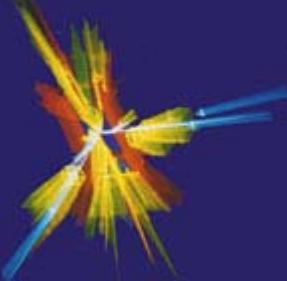
Radiotoksisitet





Akkumulert Plutonium (tonn)





De følgende slides viser noen av planene
og samarbeidspartnere i et pågående samarbeid
med mål å forbrenne avfallsplutonium.

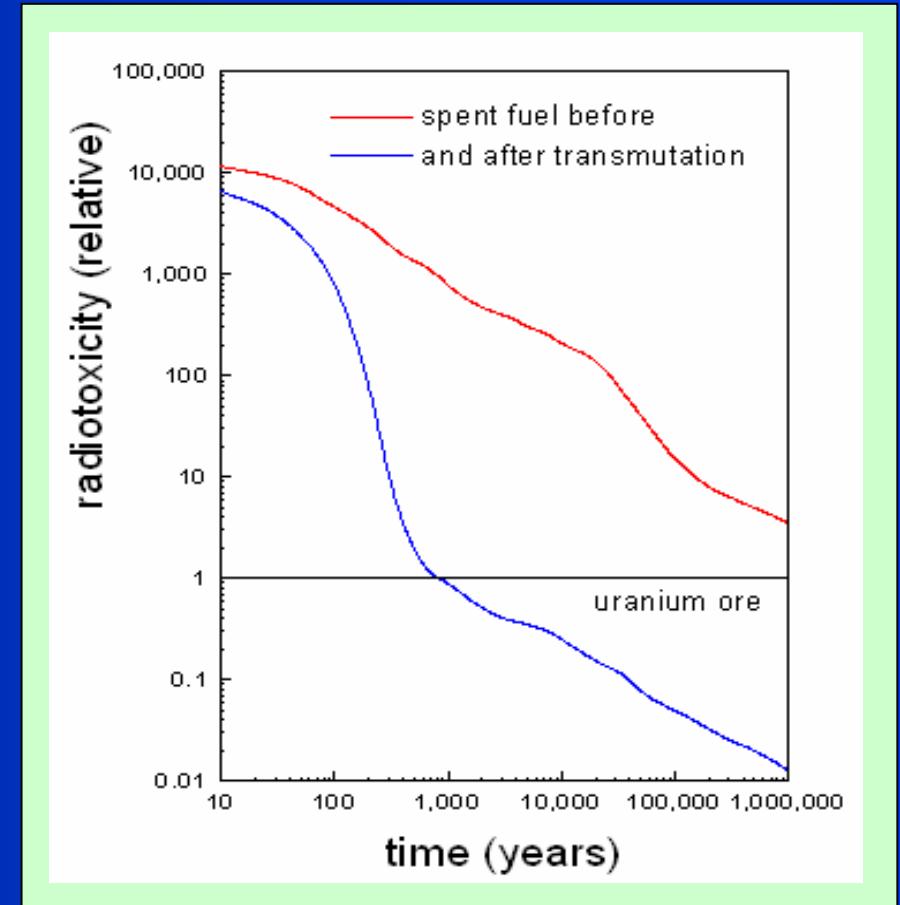
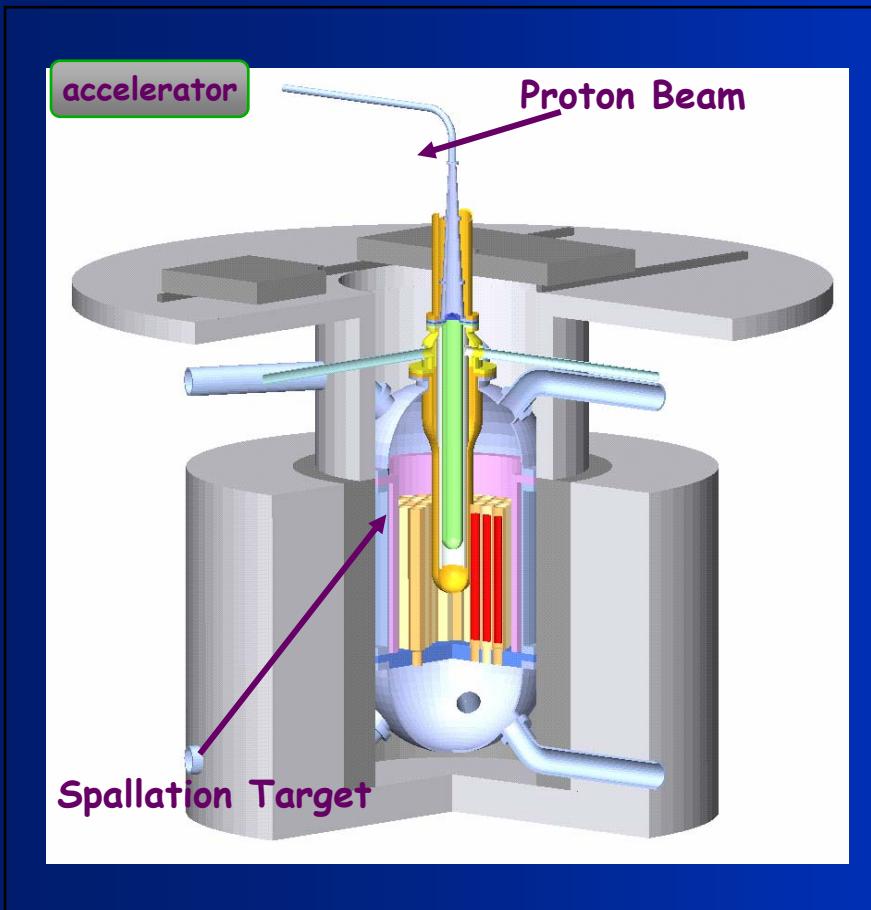
Legg merke til at de fleste europeiske land deltar
i dette samarbeidet,
mens Norge glimrer med sitt fravær !

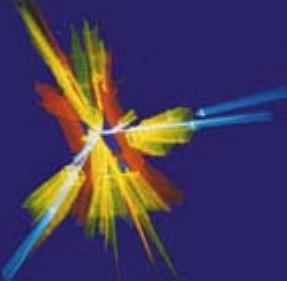
ADS: Accelerator Driven (subcritical) System for transmutation (fra Alex C. Mueller)

Both critical (fast!!) reactors and sub-critical Accelerator Driven Systems (ADS) are potential candidates as dedicated transmutation systems.

Critical reactors, however, loaded with fuel containing large amounts of MA pose safety problems caused by unfavourable reactivity coefficients and small delayed neutron fraction.

ADS operates flexible and safe at high transmutation rate (sub-criticality not virtue but necessity!)





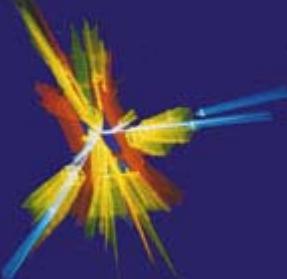
(personal) vision/hope

(Alex C. Mueller)

A European XT-ADS
Based on the Belgium
MYRRHA site-proposal

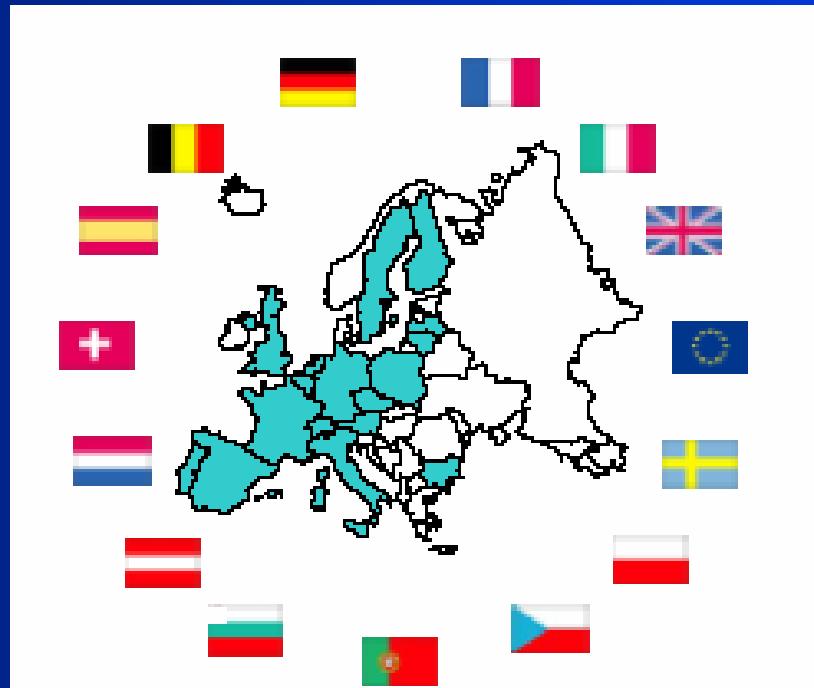
Operational: "say" 2016
Cost: "say" 500 M€

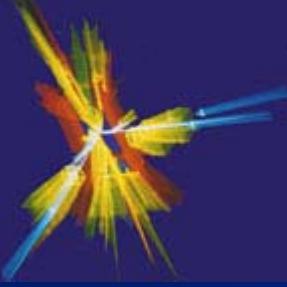




(fra Alex C. Mueller, Orsay)

EURopean Research Programme for the TRANSmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System



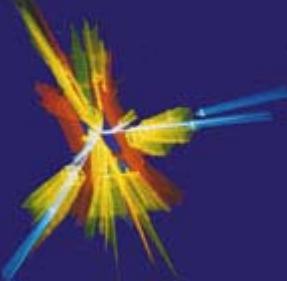


Konklusjoner:

Alt må gjøres for å spare energi

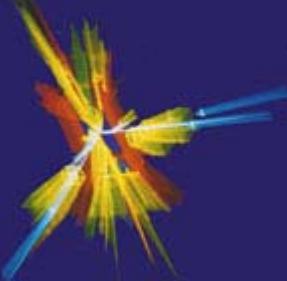
Alternativer til bruk av fossilt brennstoff må utvikles så fort som mulig, og Norge som energinasjon bør være pådriver

Forbruk av fossilt brennstoff vil de neste tiårene øke kraftigere enn de mest pessimistiske prognosene



Norge bør i ren egeninteresse og med tanke på fremtidige generasjoner satse maksimalt på utvikling av avansert "nedstrømsteknologi" og industri

Norge bør av samme grunn bremse på uttak av olje og gass slik at denne industrien forblir selvforsynt med råvarer også etter 2050



Norge bør ta initiativ til finansiering
av den første prototypen for et
akseleratordrevet kjernekraftverk
basert på Thorium