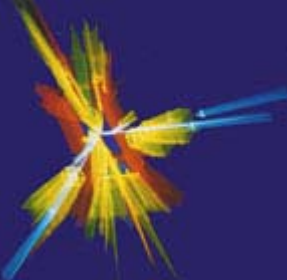


Hva må til for å bygge en ADS basert på thorium i Norge

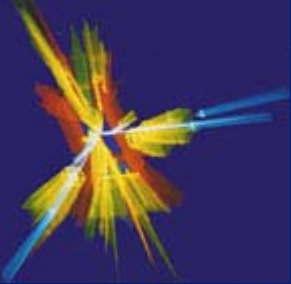
Statkraft, mars, 2007
Egil Lillestøl



Globalt energiforbruk (Mtoe) 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
svarer nå til en fordoblingstakt på ca. 20 år !



Økende globalt energibehov =
det største **uløste** problemet i dette århundret

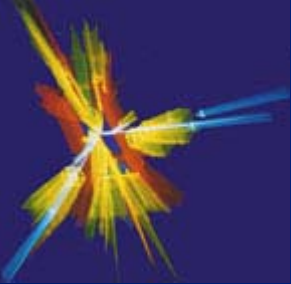
Øking i energibruk = øking i CO_2 - utslipp

Pådriverer for økt energibruk:

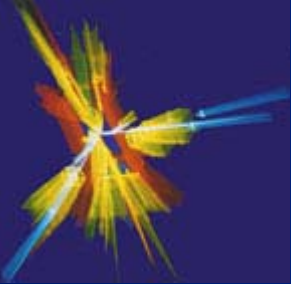
- CO_2 -rensing og deponering
- mangel på ferskvann
- mangel på mat

Energi + klima-problemet krever innsats på alle fronter:

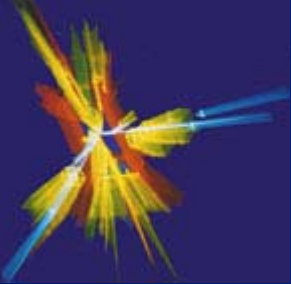
- sparing
- fornybar energi
- CO_2 deponering
- ny kjernekraftteknologi



Vi kommer ikke utenom en kraftig
global økning i bruk av kjernekraft
uansett hva vi foretar oss !



1. Prototyp av en ADS basert på thorium
2. Hvorfor et thoriumanlegg i Norge
3. Roadmap for et kommersielt anlegg

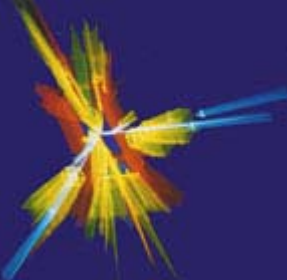


Totalbehov i år 2100:

Basert på "små" kjernekraftverk $\approx 500 \text{ MW}_e$,
og at ca. 50% av totalt energibehov dekkes
fra andre kilder:

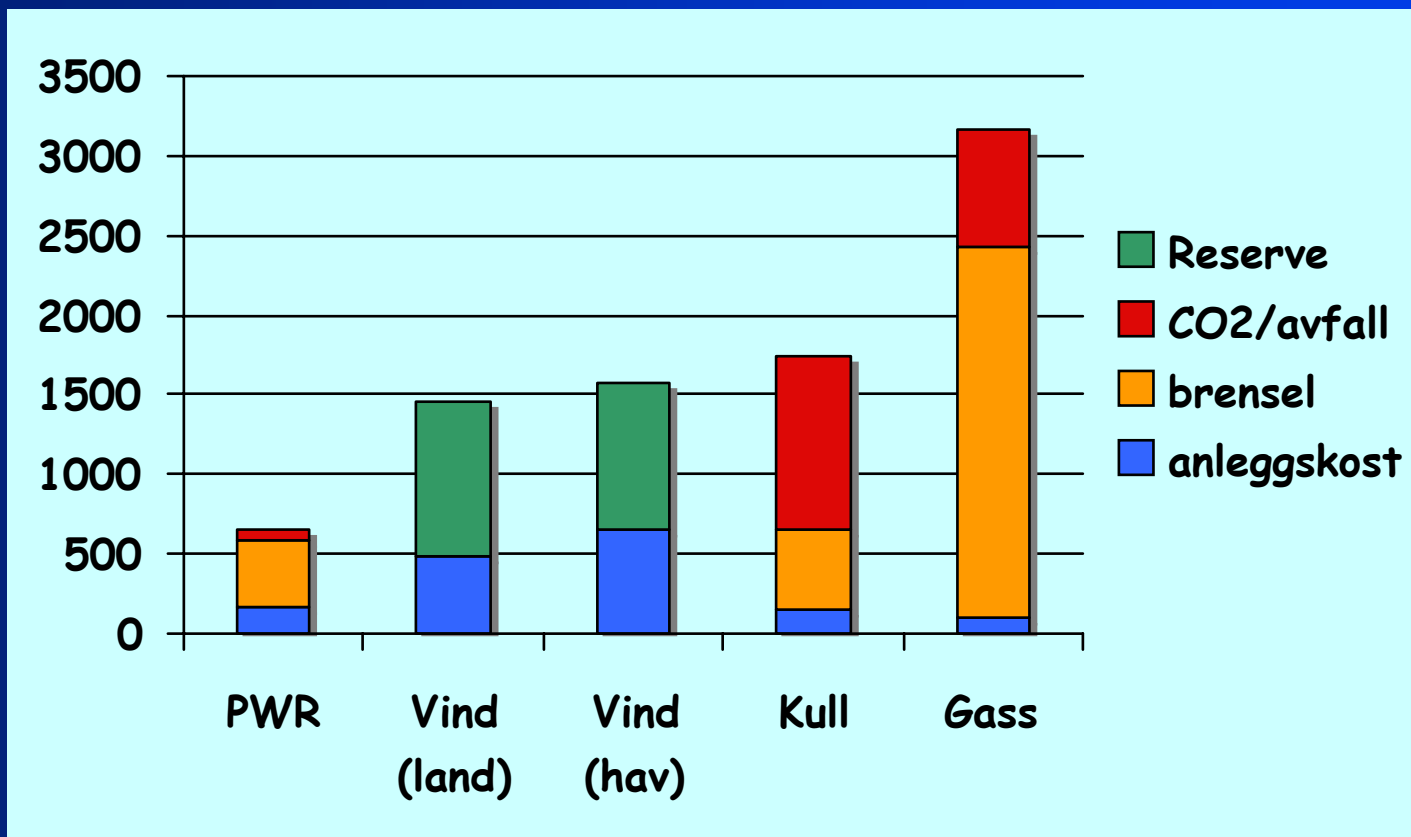
ca. 18 000 slike kraftverk

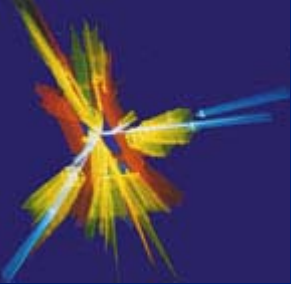
Må bygge ett slikt kraftverk
annen hver dag i resten av dette århundret !



Totalkostnad for 10 GW_e , 50-års system
i milliarder kr (kilde B. McNamara, UK, 2006)

Totalenergi 4.5×10^{12} kWh
(0.4 Nkr/kWh = 1800 milliarder kr)





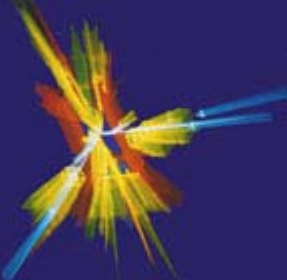
Problemer med "tradisjonell" kjernekraft:

Begrensete ressurser av Uran

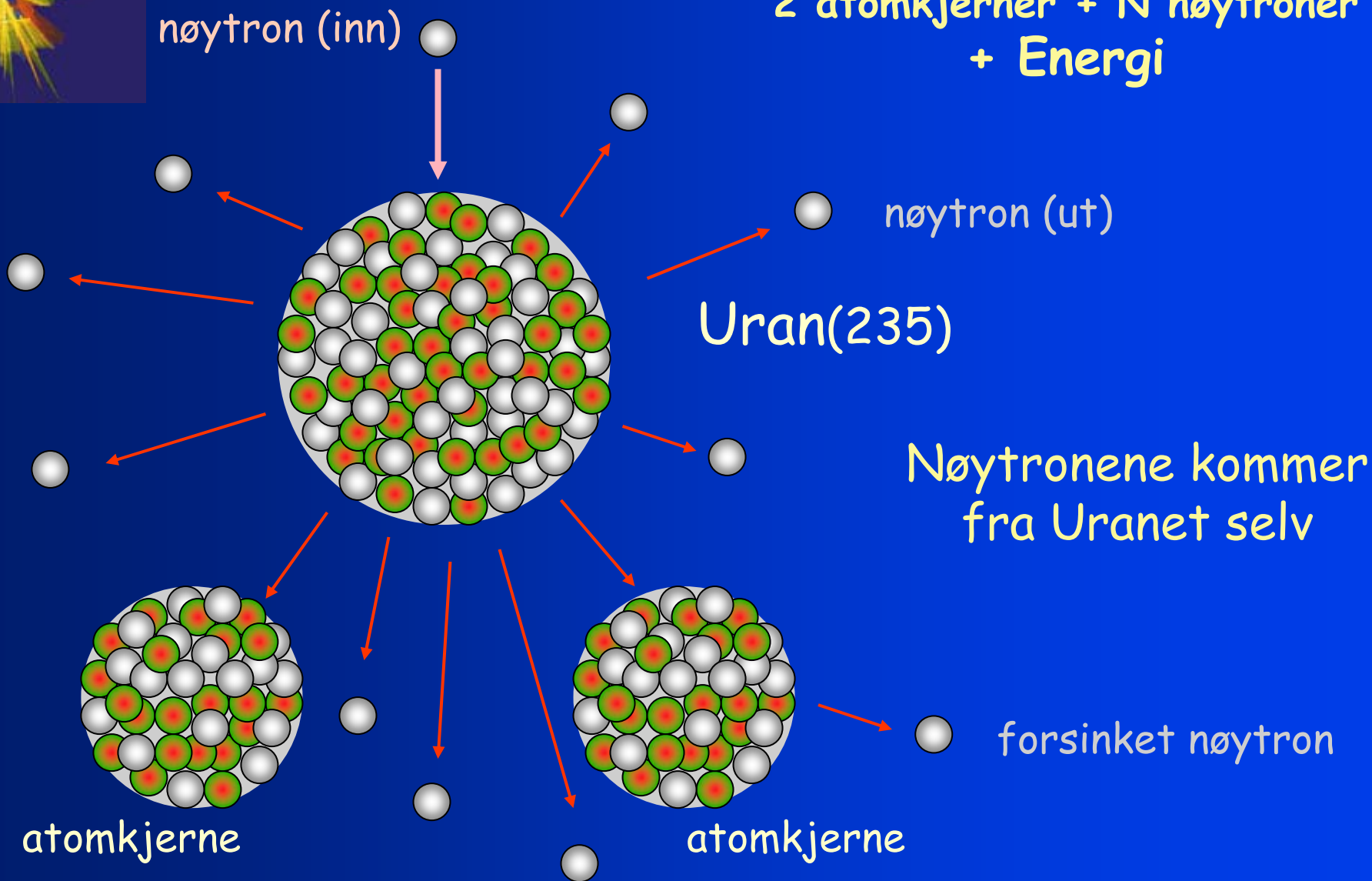
Nedsmelting (Tchernobyl)

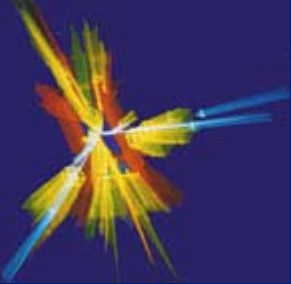
Plutoniumavfall

Spredning av kjernevåpen



Fission:





Kritikalitet (b):

$k \geq 1$: kjedereaksjon

$k = 1$ (kritisk): Kjernereaktor

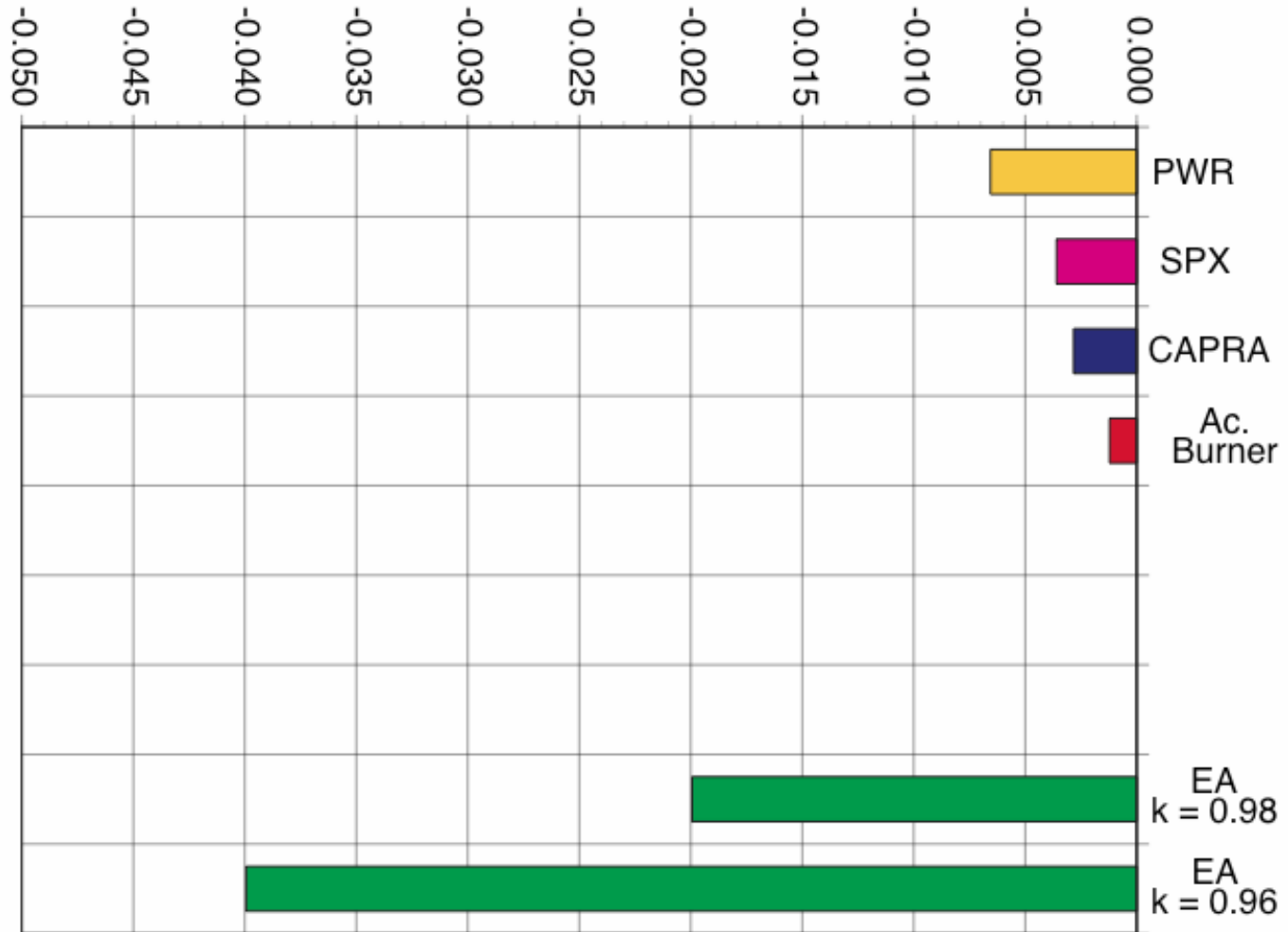
$k < 1$ (underkritisk): Reaktoren stopper

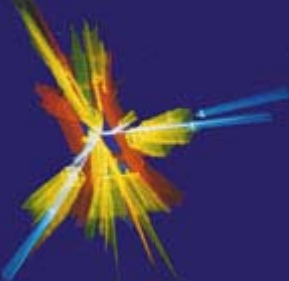
$k > 1$: Bombe

Hvordan kontrollere at $k = 1$ til en hver tid ?
Svar: bruk ^{235}U (0.7% forsinkete nøytroner)

ADS: $k < 1$ til en hver tid

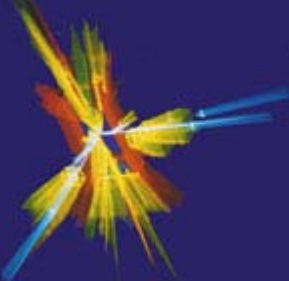
Kritikalitet (Ref. Y. Kadi)





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

- bruker Thorium som drivstoff
- drevet av en akselerator (ADS)
($k < 0$)
- 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

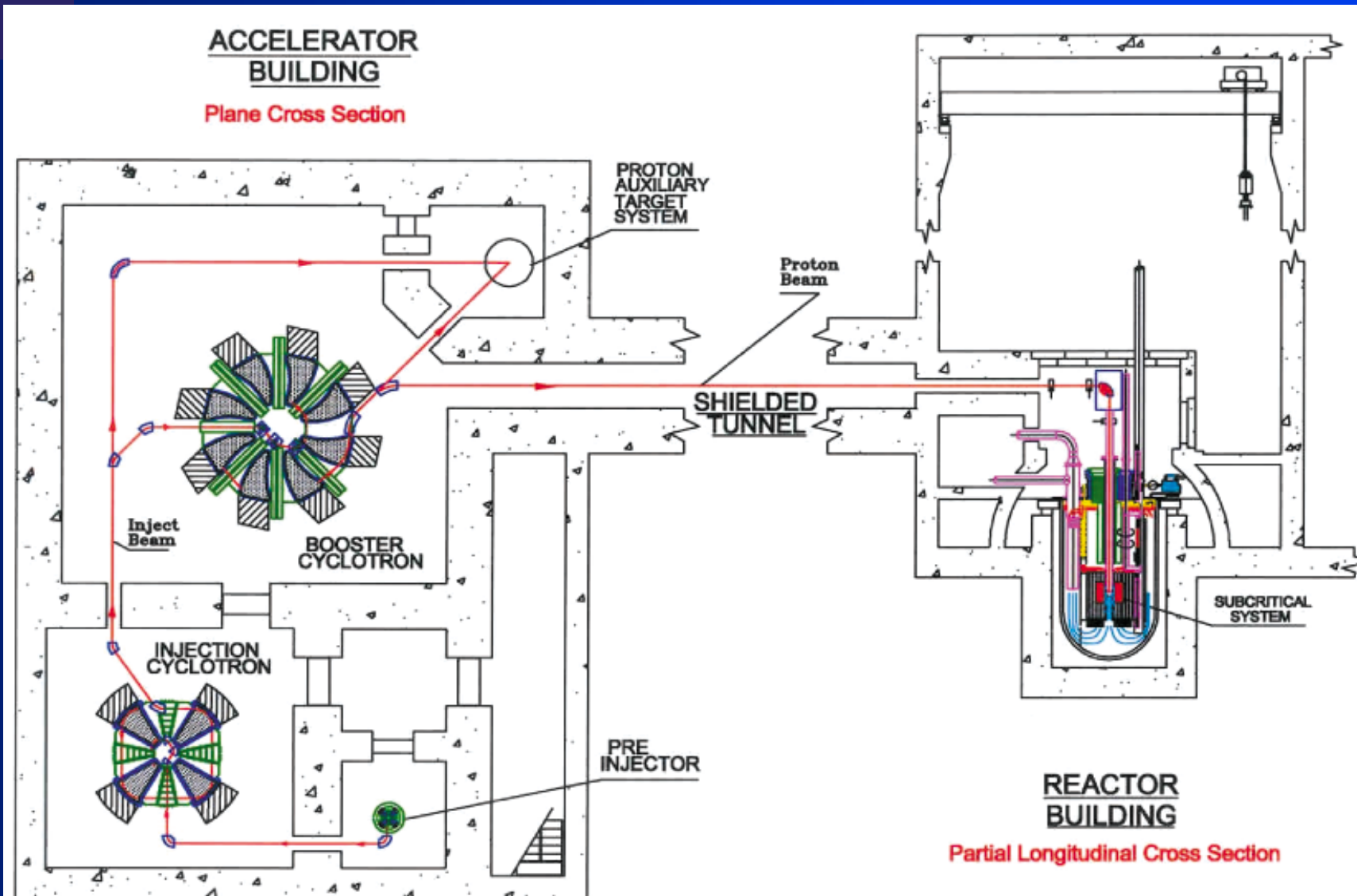


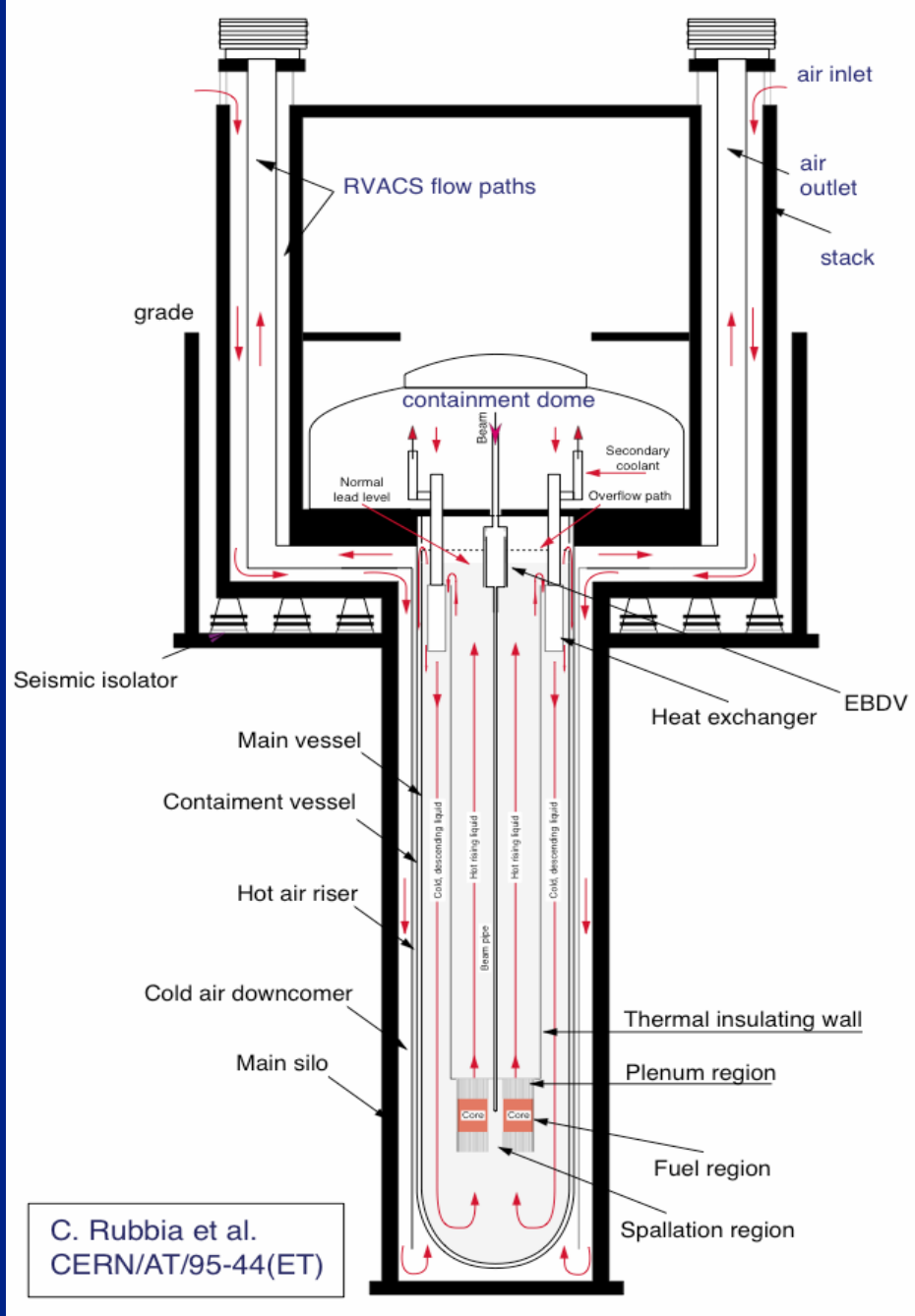
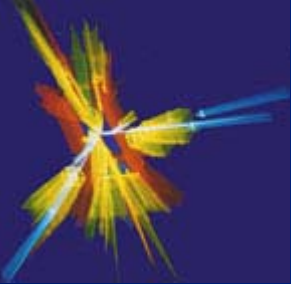
Ekstern nøytronstråle:

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

- eksterne protoner 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 spaltingsprodukt forvandler dette til et stabilt element

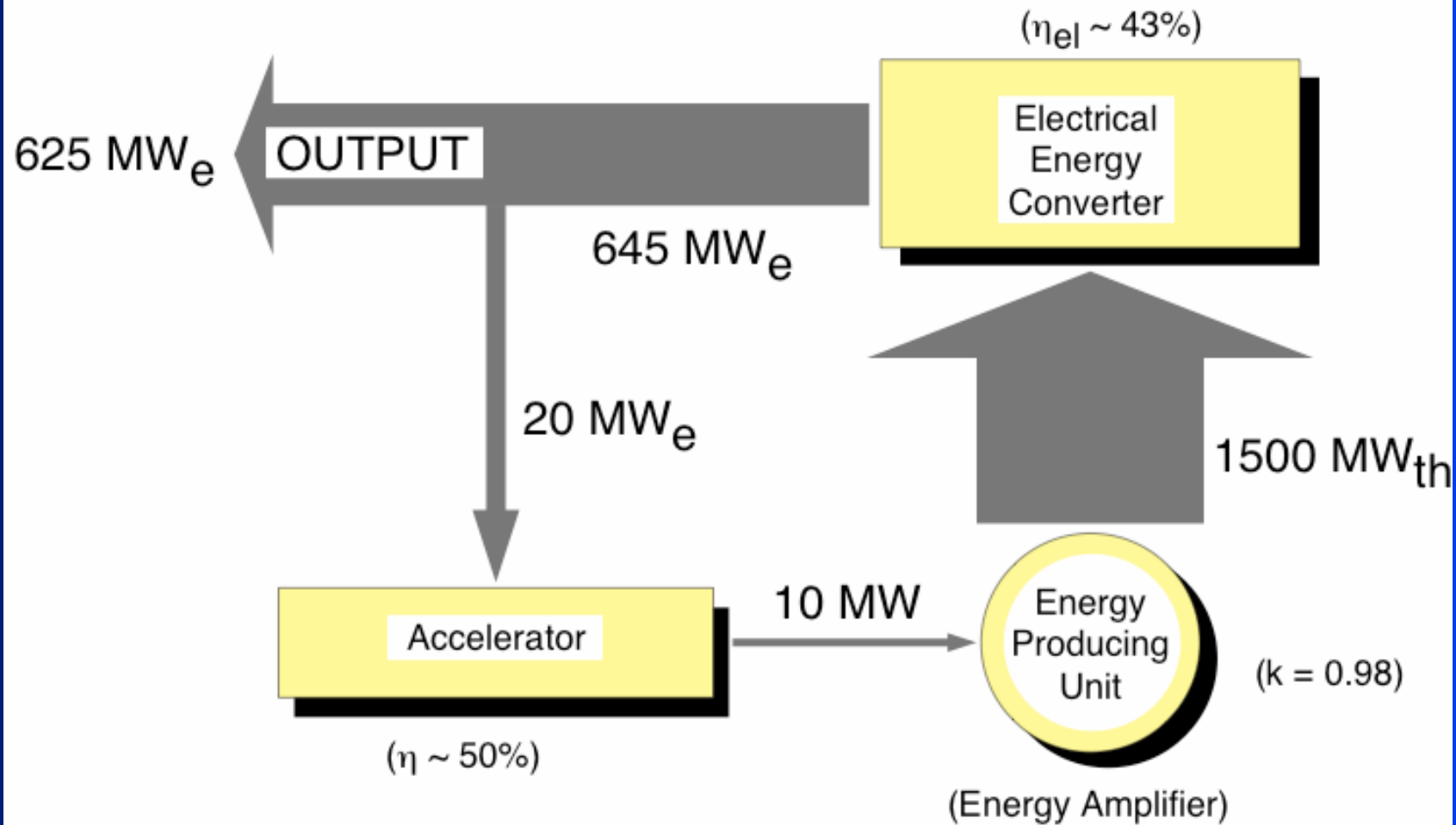
(Fra A. Kadi, CERN)

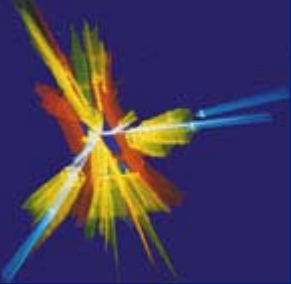




EA
skisse

Fra Carlo Rubbia ($1500 \text{ MW}_{\text{th}}$ i 5 år):

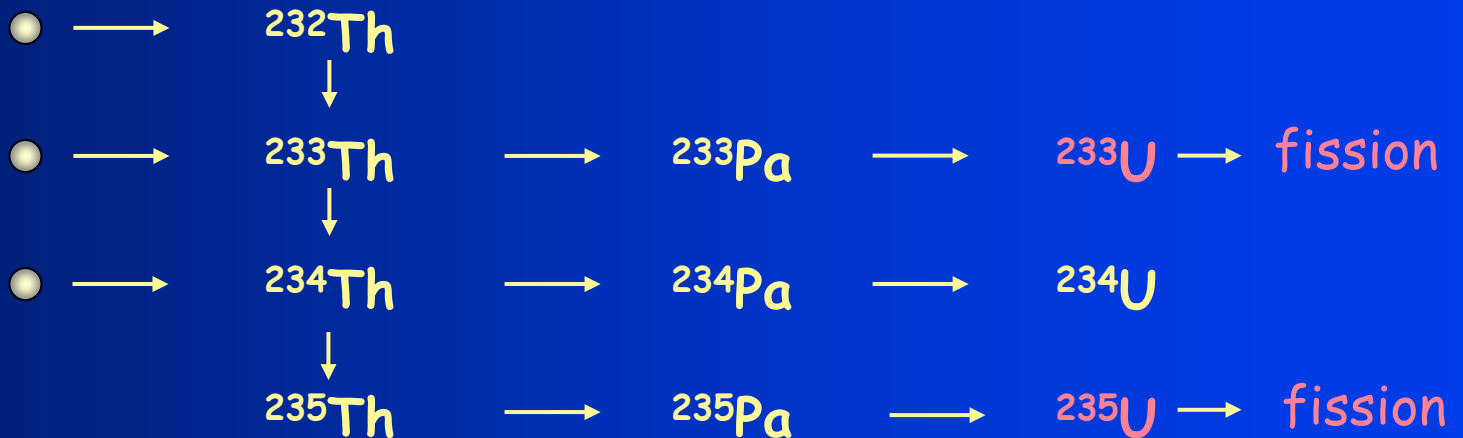


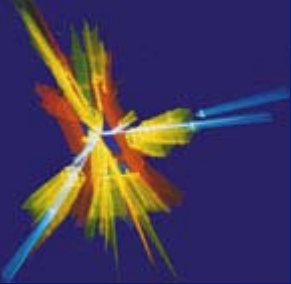


Uranreaktor, "intern" nøytronkilde



Thoriumreaktor ("ekstern" nøytronkilde)



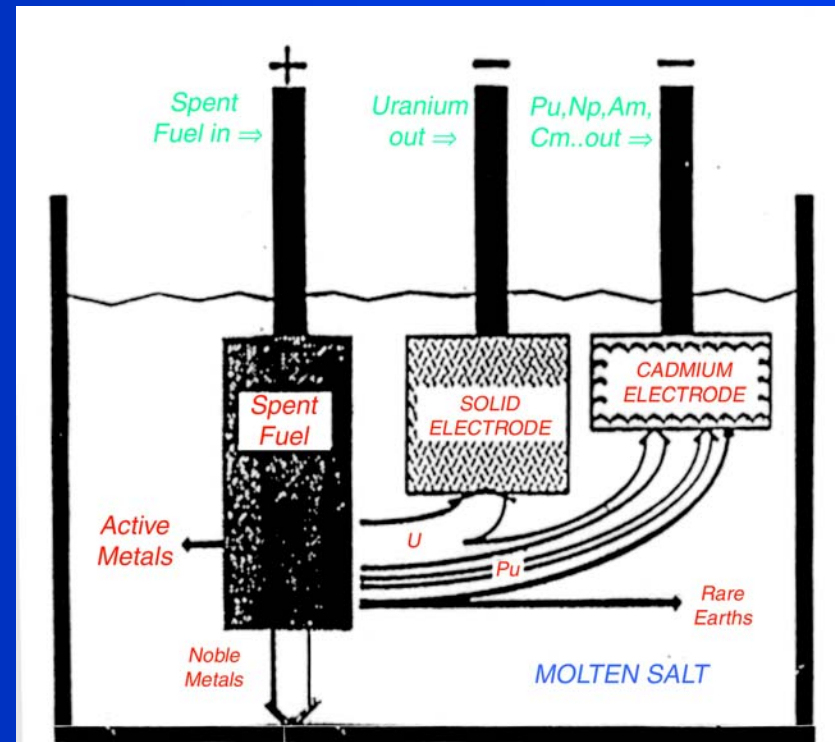


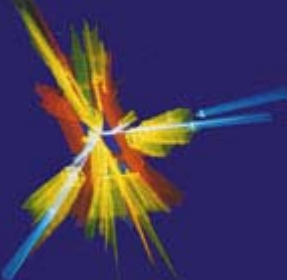
Brenselet i Thoriumreaktoren
tas ut hvert femte år for
prosessering, rensing og
påfyll av ca. 3 tonn Thoriumoksyd

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

Pyro-prosessering

- ◆ **Prinsipp:** Elektroder ved forskjellige spenninger i en smeltet saltoppløsning
- ◆ **Actinider** skillt fra fissionsprodukter and høynivå avfall: Plutonium kombinert with "minor Actinides" (Np, Am, Cm) og en omtrent lik mengde U
- ◆ fullt testet i laboratoriet
- ◆ Meget effektiv (> 99.9%)
- ◆ Ikke noe spill, alle kjemikaliene resirkulert
- ◆ Liets størrelse og lett å operere:
- ◆ Ingen spredning: alle TRU alltid fullstendig blandet
- ◆ Små mengder: ingen kritikalitetsrisiko.





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

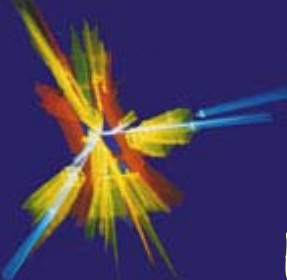


Nyttige sammenligninger

1 GW_e x 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



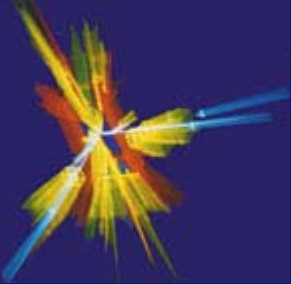
Radiaktivt avfall

Europa: 35% av sin elektrisitet fra kjernekraft produserer ca 2500 tonn/år avfall, derav

- 25 tonn Pu
- 3.5 Minor Actinides (Np, Am, Cm) og
- 3 tonn LLFF (Langlivete Fissionsfragmenter)

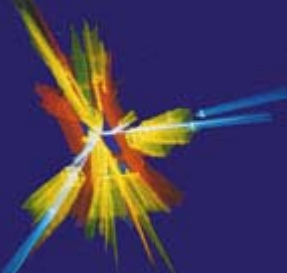
Nødvendig med sikre og sosialt aksepterbare løsninger

Utviklingen av et akseleratordrevet system (ADS) basert på thorium kan også løse avfallsproblemet



Energiutbyttet i reaktoren beregnet
i et omfattende simuleringsprogram
utviklet av Carlo Rubbias gruppe på CERN

Simuleringsystemet og simuleringsresultatene
verifisert i eksperimentet FEAT på CERN (1994)



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

Eksperimentell bestemmelse av energispektret for nøytroner generert i kjerneekaskader 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

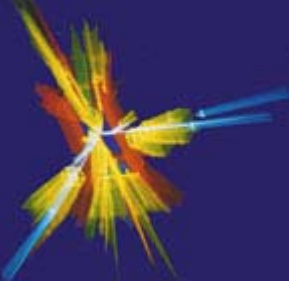
University of Athena, Athens, Greece

Université de Bâle, Bâle, Switzerland

University of Thessalonic, Thessalonique, Greece

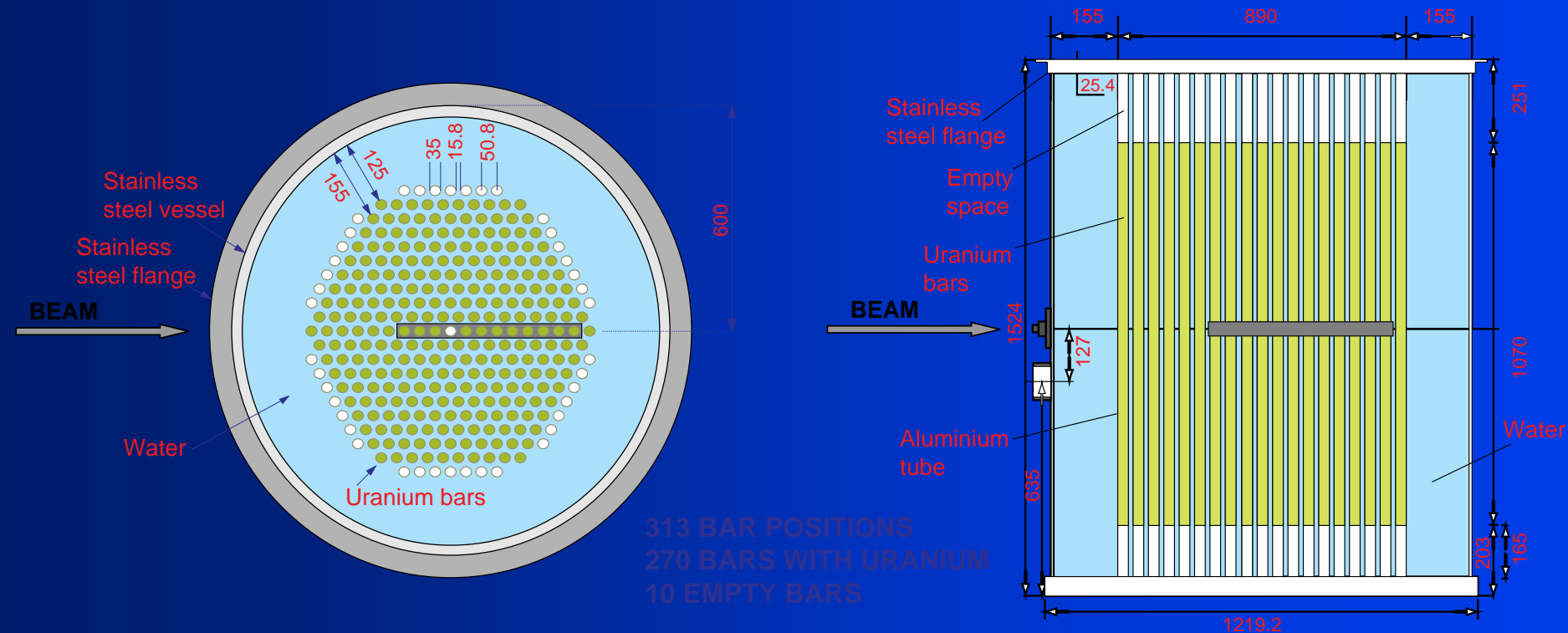
3.6 tonn naturlig uran





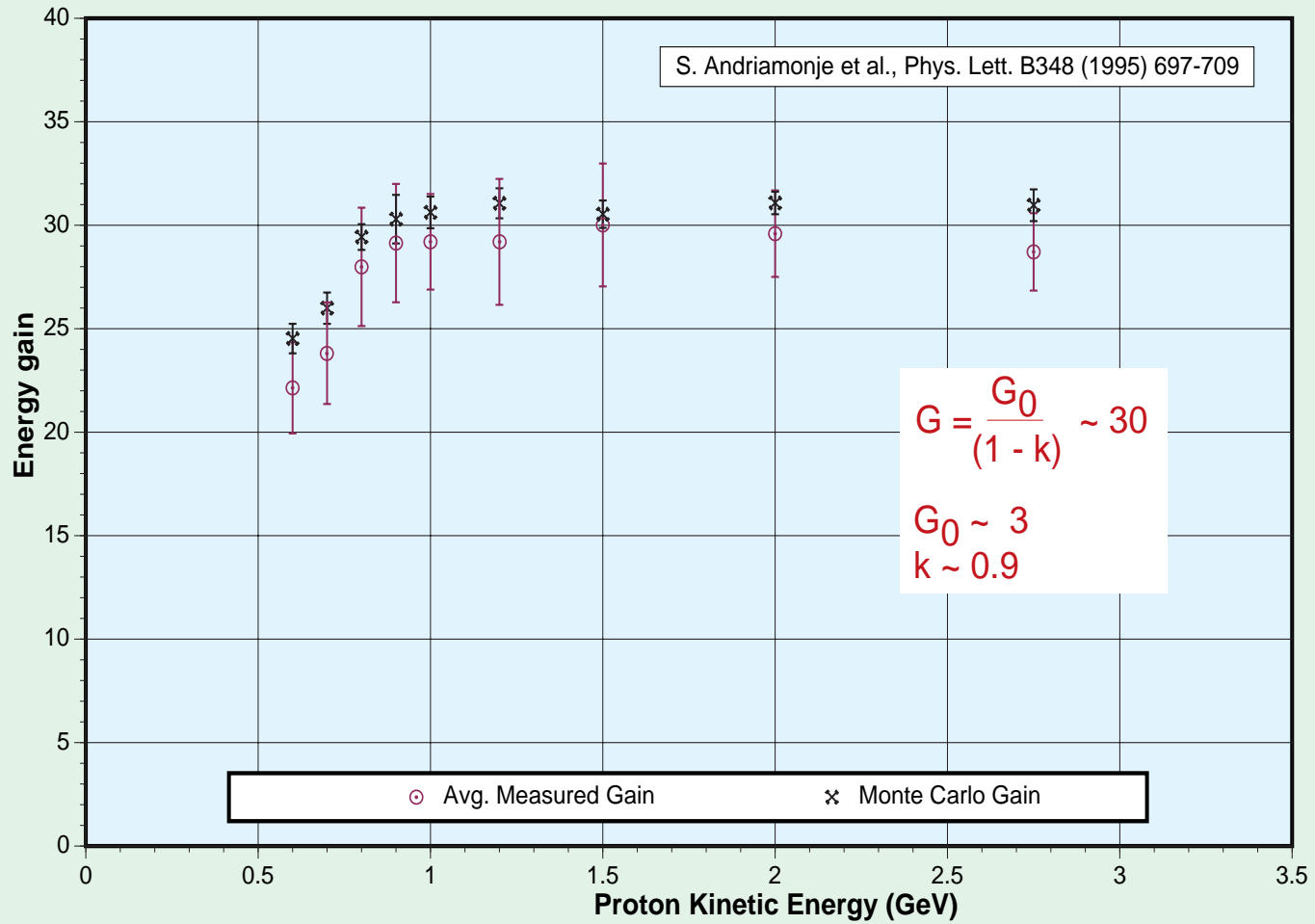
FEAT

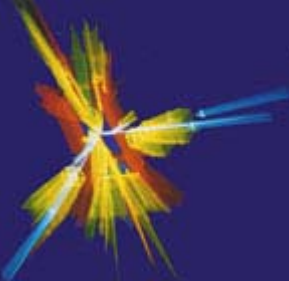
Topp og sidebilde av FEAT-oppsettet,
i T7 strålen fra CERNs PS.



(Fra Y. Kadi):

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



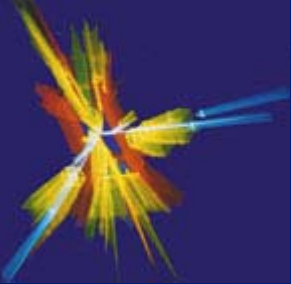


The TARC Experiment (CERN 1997 - 1998) Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing (stort sett samme gruppene som for FEAT-eksperimentet)

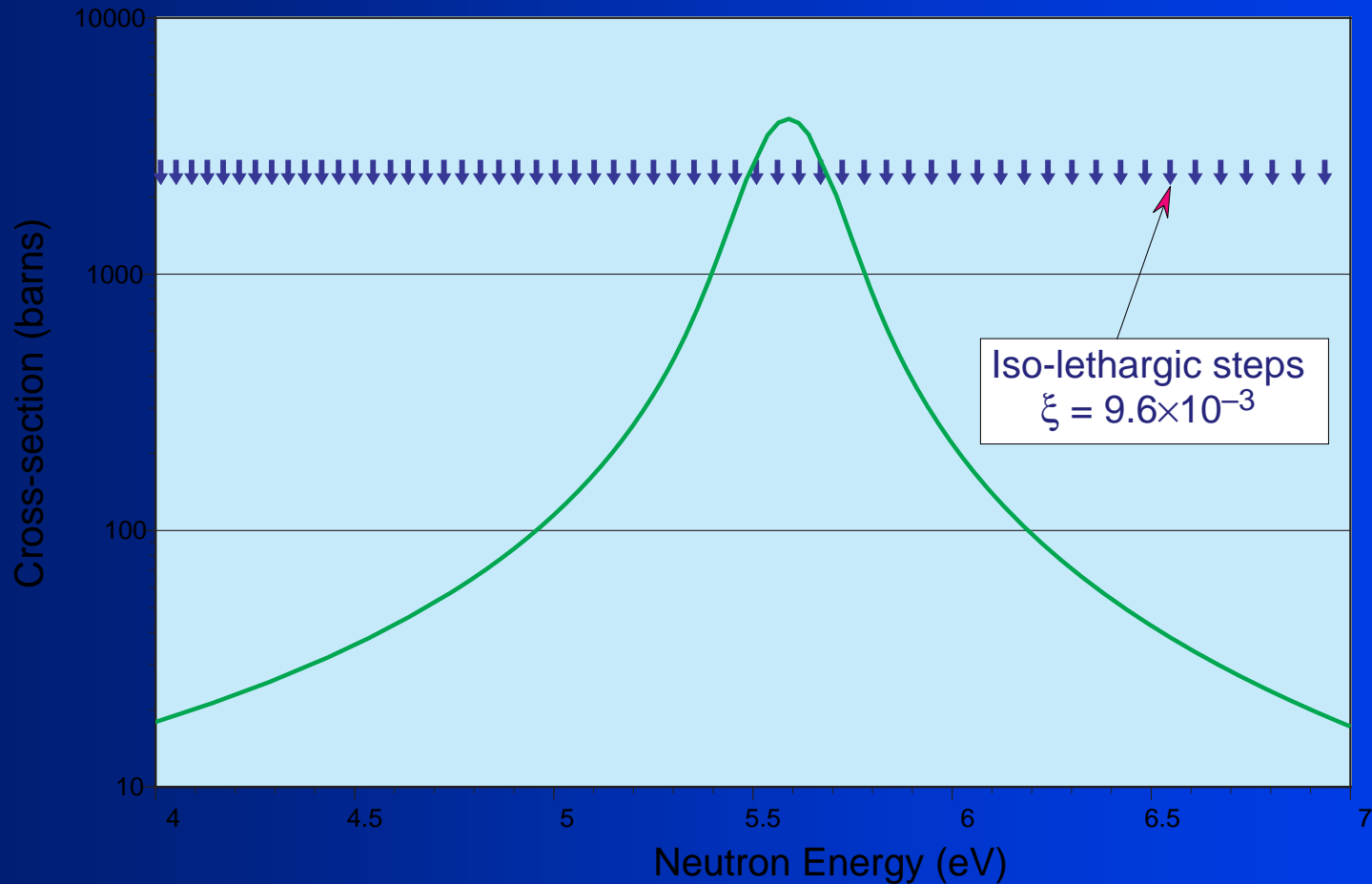
- Detaljstudier av nøytronfluks i bly
- Direkte test av transmutering av radioaktive fissionselementer, spesielt ^{99}Tc og ^{129}I , ved "Adiabatic Resonance Crossing"
- Utvikling og validering av simulerings- og beregnings-verktøy
- Produksjon av radiofarmasøytiske stoffer

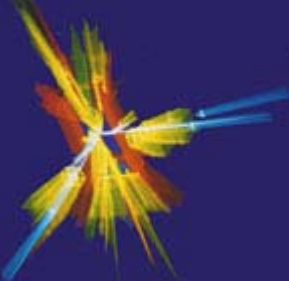
C.R.s TARC-eksperiment





Adiabatic Resonance Crossing av 5.6 eV ^{99}Tc resonansen

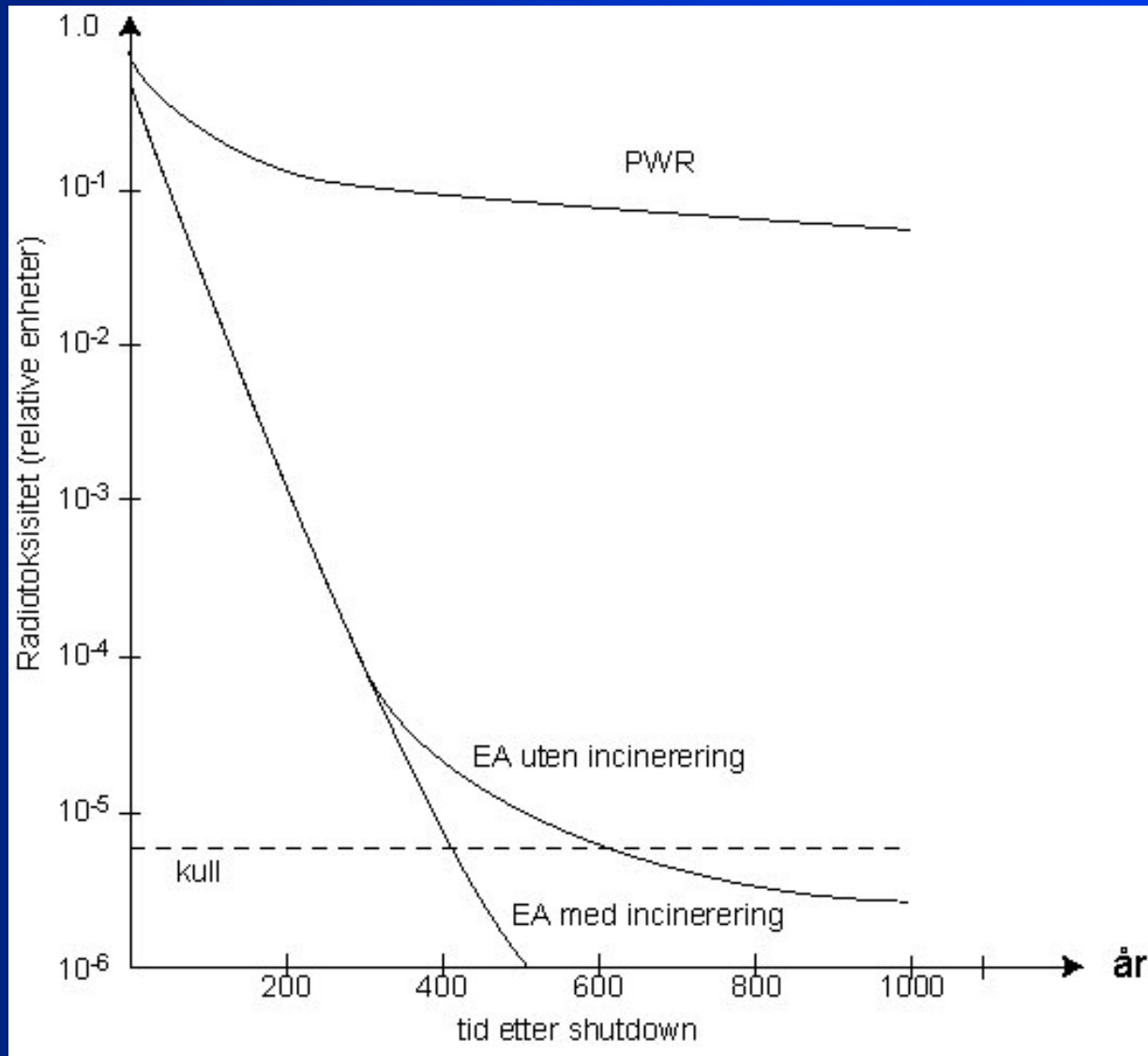


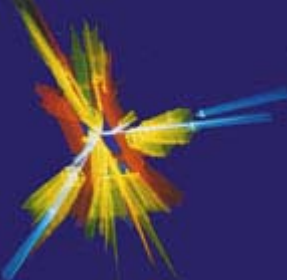


Technitium-forbrenning:



Radiotoksisitet

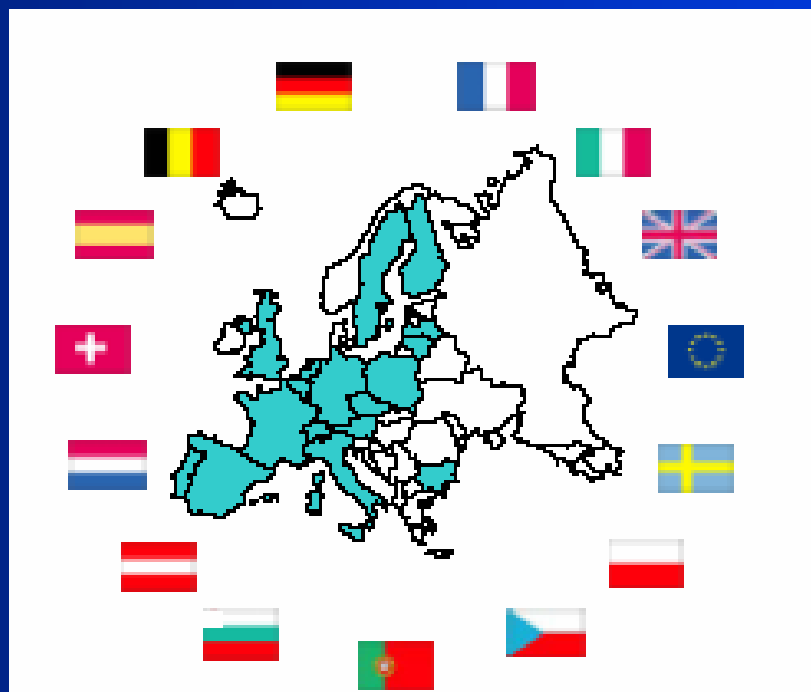


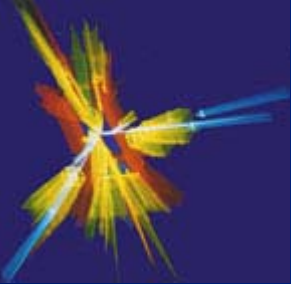


FI6W-CT-2004-516520: Integrated Project on European Transmutation (EUROTRANS)

(fra Alex C. Mueller, Orsay)

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





PEACE

Project for an Energy Amplifier for a
Clean Environment med

Norge i spissen for et internasjonalt samarbeid
for bygging av et pilotprosjekt der:

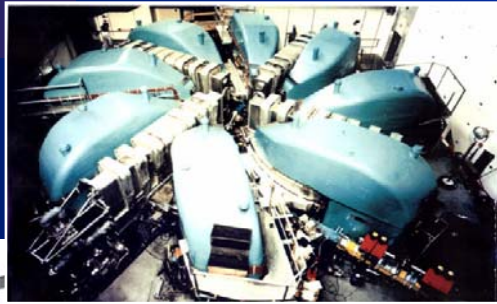
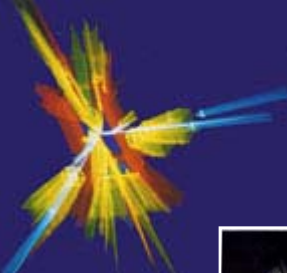
aksleratoren kommer fra Sveits

teknologi for gruvedrift og thoriumutvinning
kommer fra India

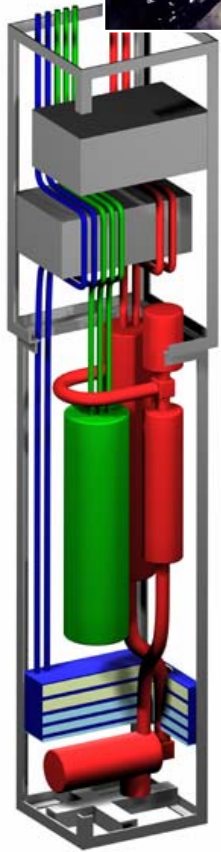
reaktorkjernen kommer fra Russland

teknologi for separasjon av radioaktive
avfallstoffer (Th, U, TRU + FF) kommer fra USA

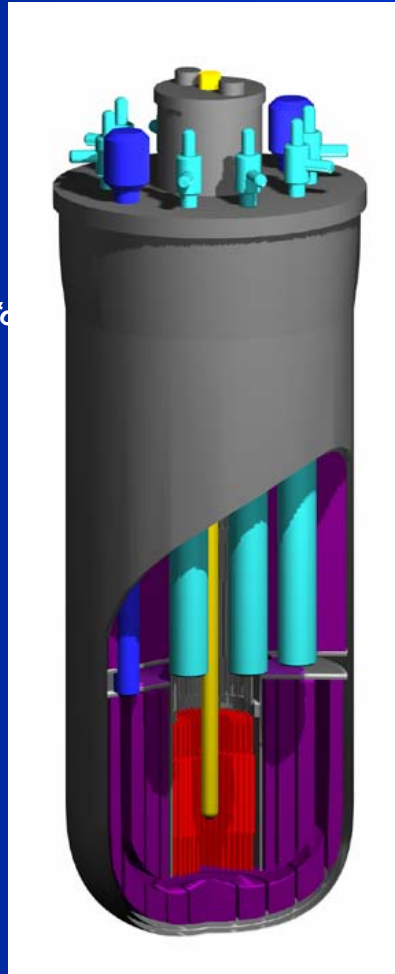
ROAD MAP FOR PEACE (Y. Kadi)



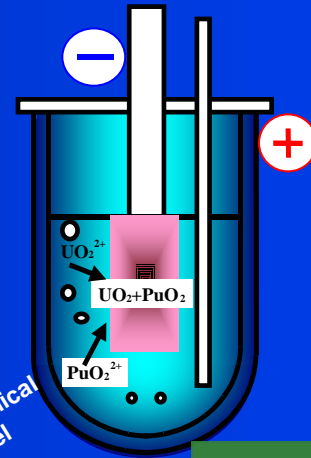
High power accelerator technology



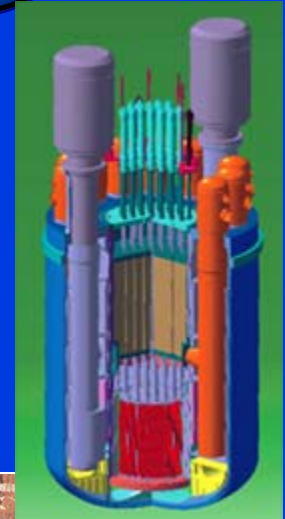
Liquid metal targets technology



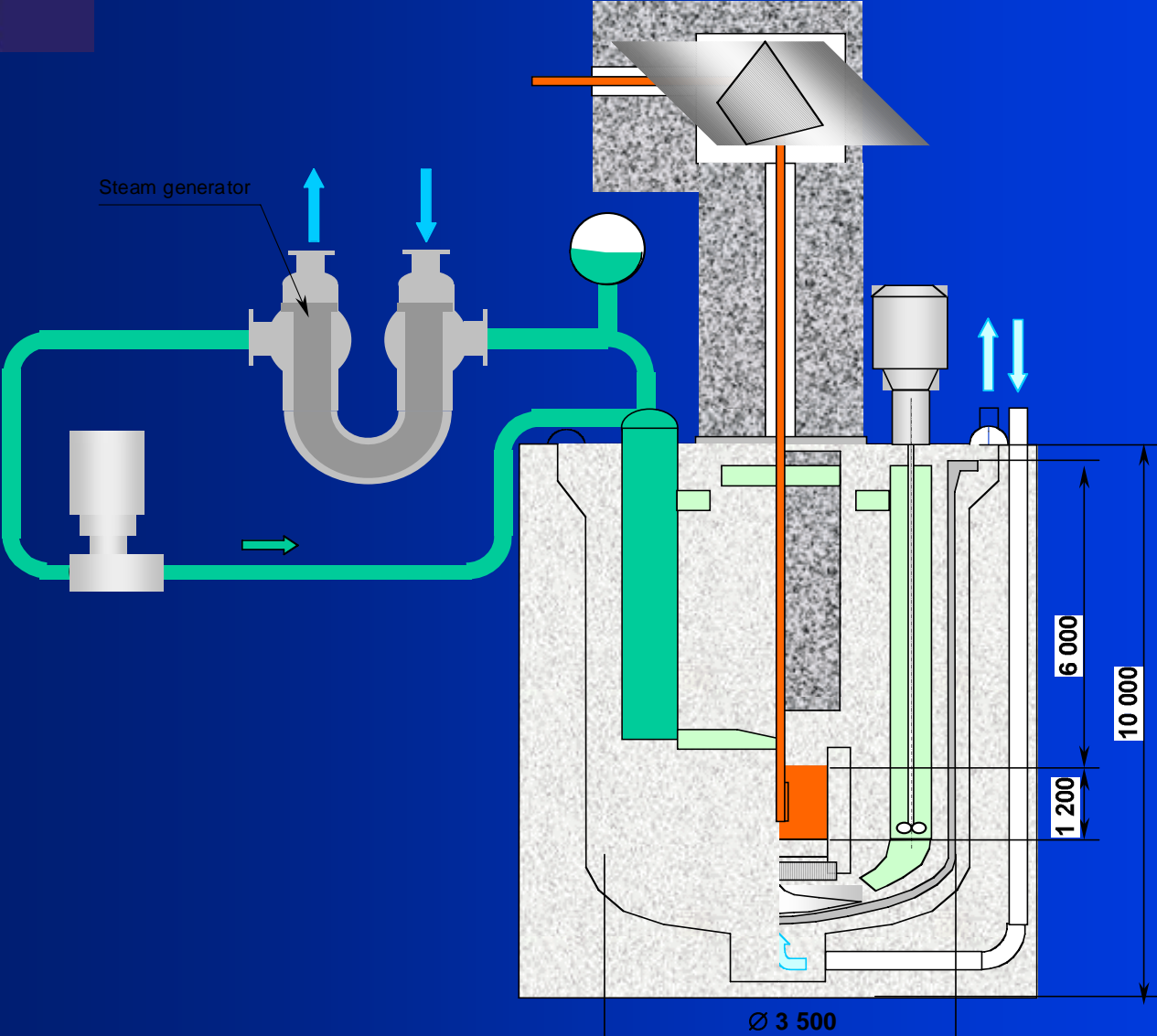
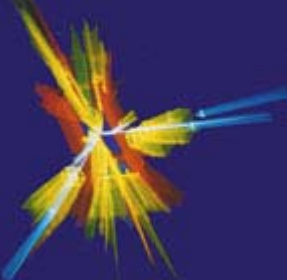
Technology of pyrochemical reprocessing of fuel

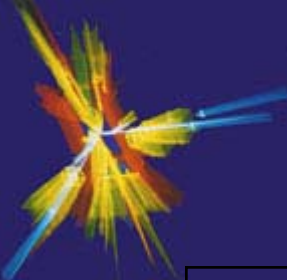


Technologies of fast reactors with lead-bismuth coolant



Modifisert version av SVBR-75 for ADS





	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Proton Driver Power	250 MeV*3 mA = 0.75 MWth	250 MeV*6 mA = 1.5 MWth	900 MeV*6 mA = 5.4 MWth
Gain G_0	0.75	0.75	2.5
Sub-criticality level, k	0.95	0.975	0.975
Gain= $G_0/(1-k)$	15	30	100
Thermal Power Output	11.25 MWth	45 MWth	540 MWth



Mulige samarbeidspartnere (A. Kadi)

Accelerator → *CERN (CH), PSI (CH), AIMA (F), IBA (B)*

Spallation source

Basic spallation data → *CERN (CH), GSI (D), PSI (CH)*

Feasibility of the windowless design → *UCL (B), FZR (D), FZK(D), NRG (NL), CEA (F) + ENEA (I) + IPUL (Latvia)*

Subcritical assembly →

RSC "Kurchatov Institute", Moscow - designing target - blanket systems; investigation and justification of the fuel cycle in transmutation systems, including radiochemical problems.

SSC RF IPPE, Obninsk - target - blanket system construction at the SSC RF IPPE site, the functions of designer and production engineer of the element (component) base for the blanket.

OKB "Hydropress", Podolsk - Chief designer of the target - blanket system. GSPI and VNIPIET, St. - Petersburg - Design work at the SSC RF IPPE site.

SSC RF _ VNIINM, Moscow - MOX fuel development and justification;

IYaI RAN, Troitsk - R&D work in justification of subcritical system physics.

NIKIET, Moscow - Chief designer of the equipment for the IYaI RAN site.

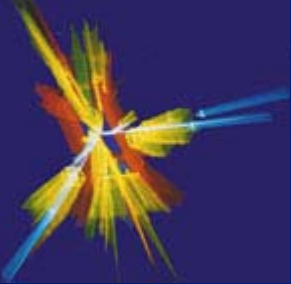
ENEA (I), CEA (F), BN (B), UoK-UI (LT), TEE (B), CIEMAT (SP)

Fuel → *US, EUR, INDIA, RUSSIA*

Safety → *EUR, RUSSIA*

Robotics → *EUR*

Building → *EUR*



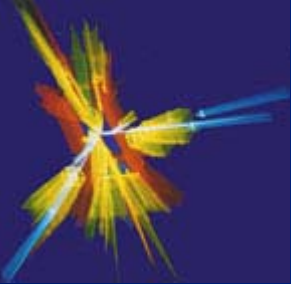
Veien frem til kommersialisering er lang, men

norske kjernefysikere er positive, og norske studenter entusiastiske.

Dessuten:

Norge har avansert (energi)teknologi og meget gode internasjonale kontakter

Ved å satse på et slikt anlegg i Norge vil vi være blant de fremste i verden på denne teknologien og være netto eksportør av energi og thorium lenge etter at olje- og naturgasstoppen er passert



Norge bør ta initiativ til et internasjonalt samarbeid og til grunnfinansiering
av den første prototypen for et
akselerator-drevet kjernekraftverk
basert på Thorium