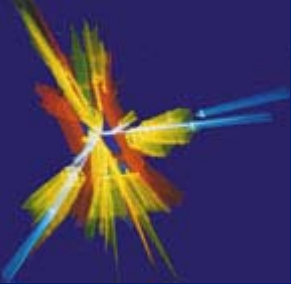


# Thorium kjernekraft

**FYS3510 og 4560  
på CERN**

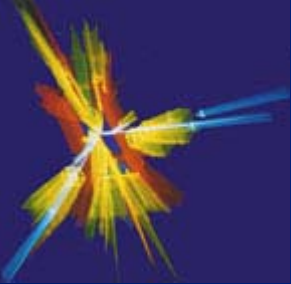
**CERN, 10. april, 2014**

**Egil Lillestøl**



# Innledning:

Kort om den globale energisituasjonen

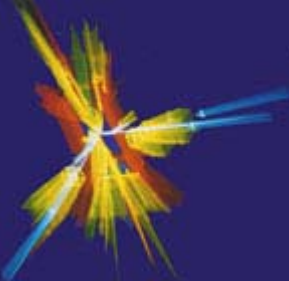


# Globalt ("sikre") konvensjonelle reserver (BP2013)

Med dagens forbruksrate har vi:  
olje for 53 år,  
gass for 56 år, og  
kull for 109 år

På bakgrunn av dagens doblingsrater, og ved å anta at forbruket vil gli over mot kull, så vil reservene av konvensjonelt fossil brennstoff være meget begrenset **lenge før 2070 !**

Tar ikke med i diskusjonen ikke-konvensjonelle kilder



## OECD energidefinisjon:

Enhet = termisk verdi av olje  
1 toe (1 tonn oljeekvivalent) =  
termisk verdi av 1 tonn olje (42 GJ)

Mtoe (= Megatonn o.e.) (42PJ)

OECD bruker en effektivitetsfaktor på  
38% fra termisk til elektrisk energi

$2 \text{ Mtoe} \approx 1 \text{ GW}_e \times \text{år} \approx 9 \text{ TWh}$

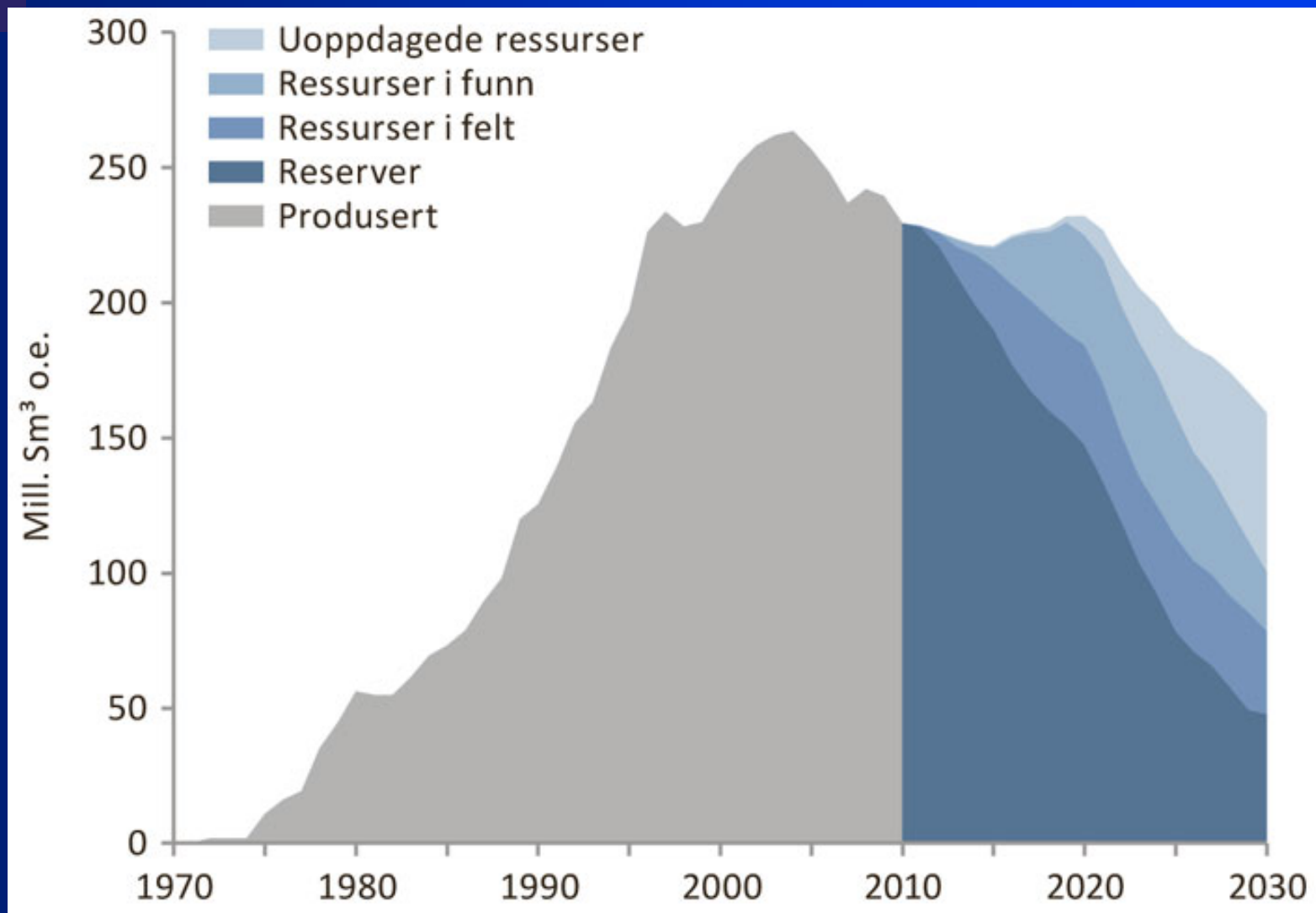
**Globalt årlig energiforbruk 2012: 12 500 Mtoe**



## Verdens befolkning slutten av 2012 (millioner) og energiforbruk pr. hode (toe/hode)

Land	Befolkning (Millioner)	Energiforbruk (toe pr hode)	Forbruksøkning 2012/2011
Kina	1 350	2.03	7.4%
India	1240	0.45	5.1%
USA	314	7.04	-2.8%
Afrika	1033	0.39	4.7%
Verden	7110	1.75	1.8%
Norge	5.1	9.43	11.1%

# Det norske olje og energidepartementet (OED) Ressursrapport 2011

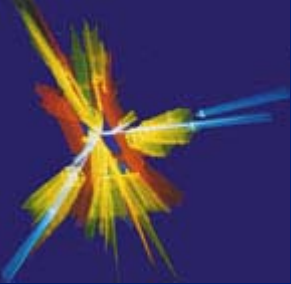


# En klar dag i Shanghai



Kina: 400 000 dødsfall pr. år fra luftforurensinger,  
globalt (WHO) 8 millioner dødsfall i 2012

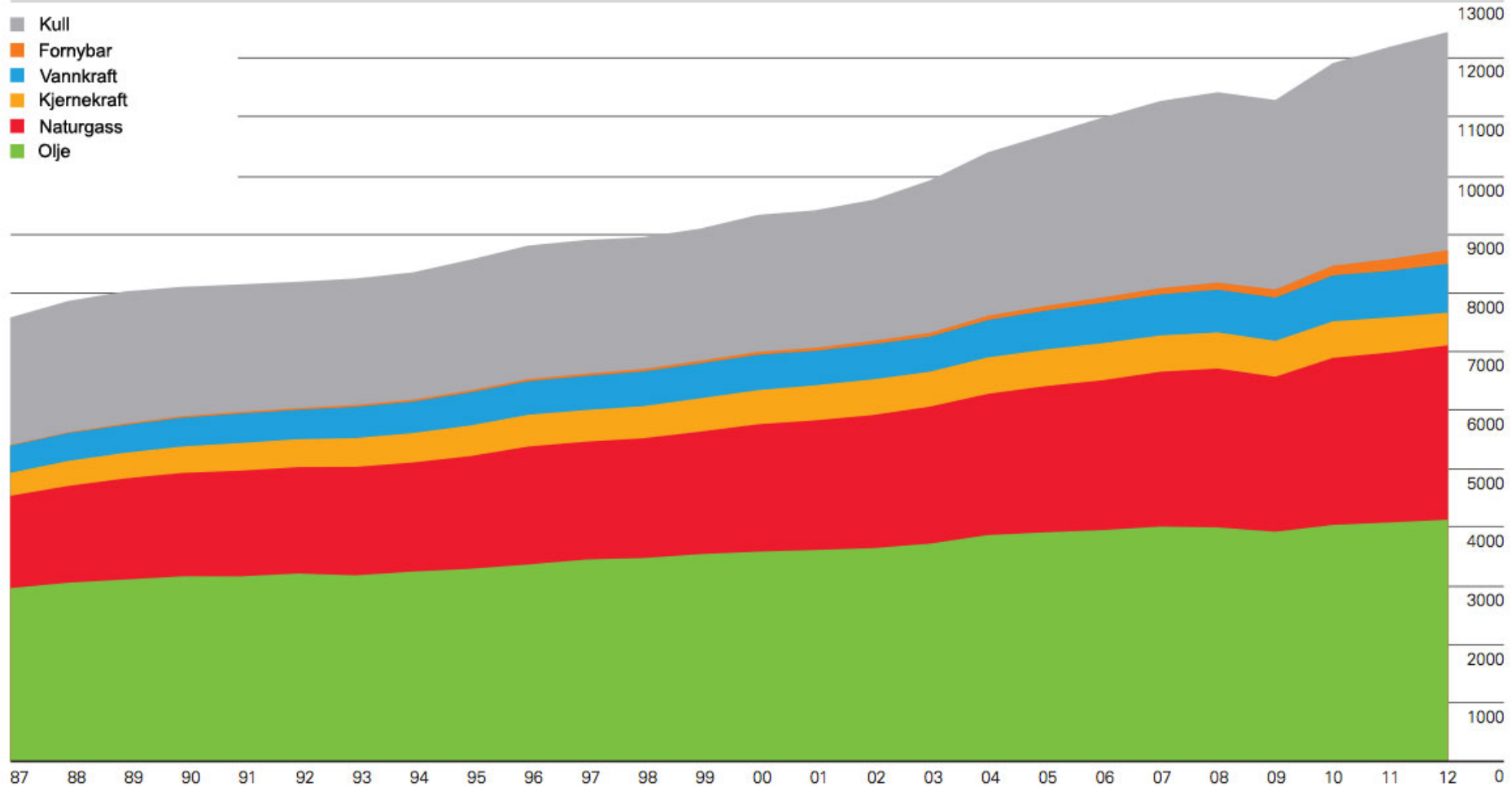
(2013 report by the Health and Environment Alliance):  
Kullbrenning i Europa forårsaker alene 42.8 milliarder  
Euro i årlige helskostnader

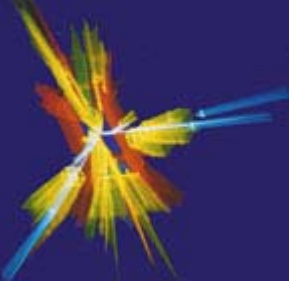


Kan disse problemene løses med fornybar energi ?



# Global årlig energiproduksjon i Mtoe for 1987 – 2012

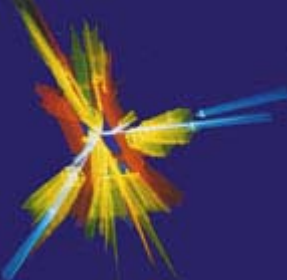




Min konklusjon:

Kjernekraft vil være en økende bidragsyter i den fremtidige globale energiblandingen

så derfor over til kjernekraft (fisjon)

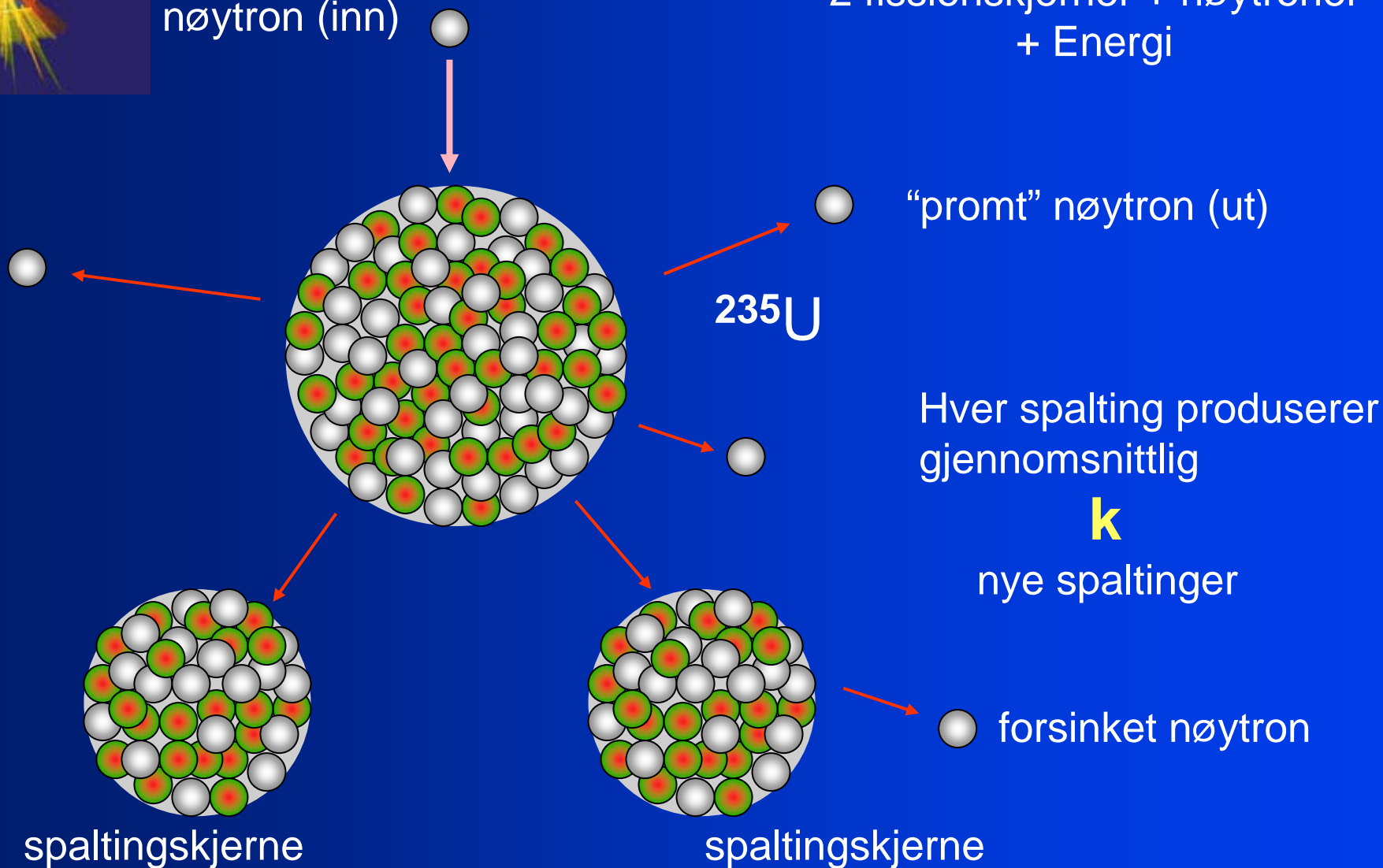


# Fisjon:



2 fissionskjerne + nøytroner  
+ Energi

nøytron (inn)



“prompt” nøytron (ut)

${}^{235}\text{U}$

Hver spalting produserer  
gjennomsnittlig

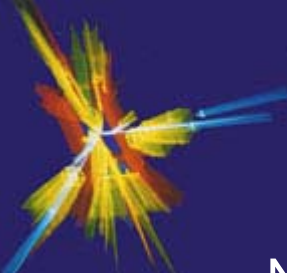
**k**

nye spaltinger

forsinket nøytron

spaltingskjerne

spaltingskjerne



faktoren **k** kalles **kritikalitet**

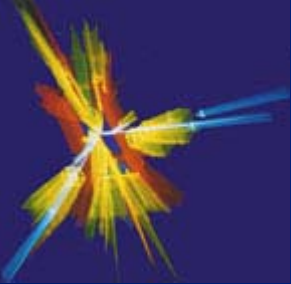
Nøytroner fra en uran-fissioner treffer andre urankjerner og produserer k nye fissioner. Når hver fission fører til mer enn én ny fission, er  $k > 1$ , og vi har en kjedereaksjon.

Antall fissioner produsert av en fission er gitt ved summen:

$$S = 1 + k + k^2 + k^3 + k^4 + \dots \text{(geometrisk rekke)}$$

Når  $k < 1$ , er  $S = 1/(1 - k)$ , og en klassisk reaktor vil stoppe opp.  
Når  $k > 1$ , går S til uendelig, og vi har en kjernereaktor-katastrofe (kritikalitets-uhell) eller en atombombe

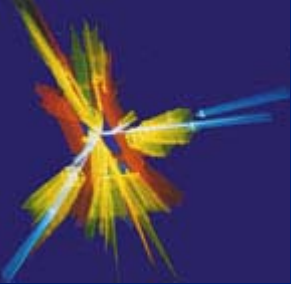
**Med k nøyaktig lik 1, har vi det vi kaller en kritisk reaktor.**



Nøytronene som produseres i fisjonene er øyeblikkelige, og de "lever" typisk ett millisekund inne i reaktorkjernen. Med  $k$  så lav som 1.01 ville dette i løpet av ett sekund føre til en multiplisering med en faktor  $1.01^{1000}$ , eller mer enn 10 000 som er greit for en bombe, men ikke så bra for en reaktor. (faktum er at en bombe har  $k \approx 2$  )

**MEN HELDIGVIS,**

så kommer 35% av de produserte nøytronene fra fisjonsproduktene, (forsinkete nøytroner), og derved øker den gjennomsnittlige levetiden til ca 0.1 s, noe som gir en multiplikasjonsfaktor på  $1.01^{10} \approx 1.1$  (eller ca 10%), og dette kan enkelt kontrolleres i en reaktor



## Uran, U, element nr 92

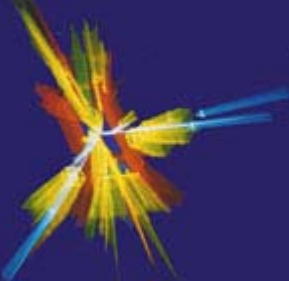
Naturlig Uran,  ${}_{92}\text{U}$ , er en blanding av to typer (isotoper),  ${}^{235}\text{U}$  (0.7%) og  ${}^{238}\text{U}$  (99.3%)

Bare  ${}^{235}\text{U}$  kan ha fisjon.

En reaktor trenger en høyere konsentrasjon enn 0.7%  ${}^{235}\text{U}$ , slik at naturlig uranet **anrikes** opp til 8%

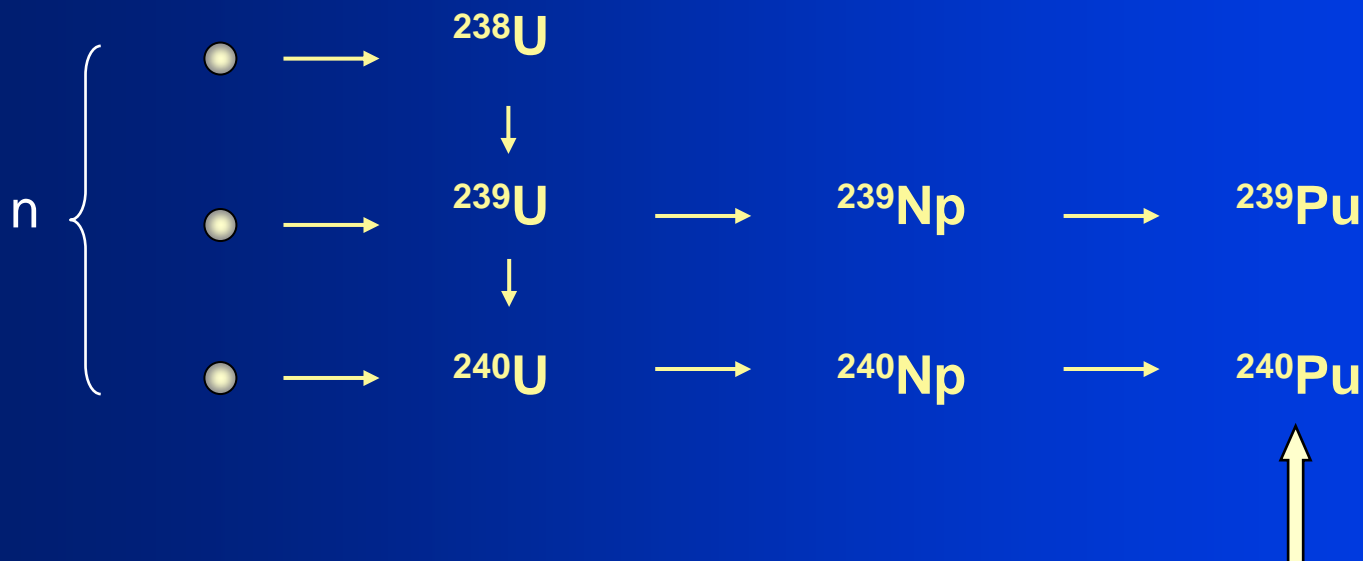
Kjernebomber har en meget høy anriking (over 90%)

anrikingsteknologien er komplisert, men når den beherskes, kan anrikingen fortsettes inntil man oppnår bombekonsentrasjoner.

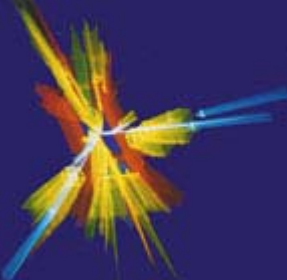


I en uranreaktor er det **meste** av uranet ikke fissilt, i.e.  $^{238}\text{U}$  – selv etter anriking.

Derved produseres det Plutonium som biprodukt:



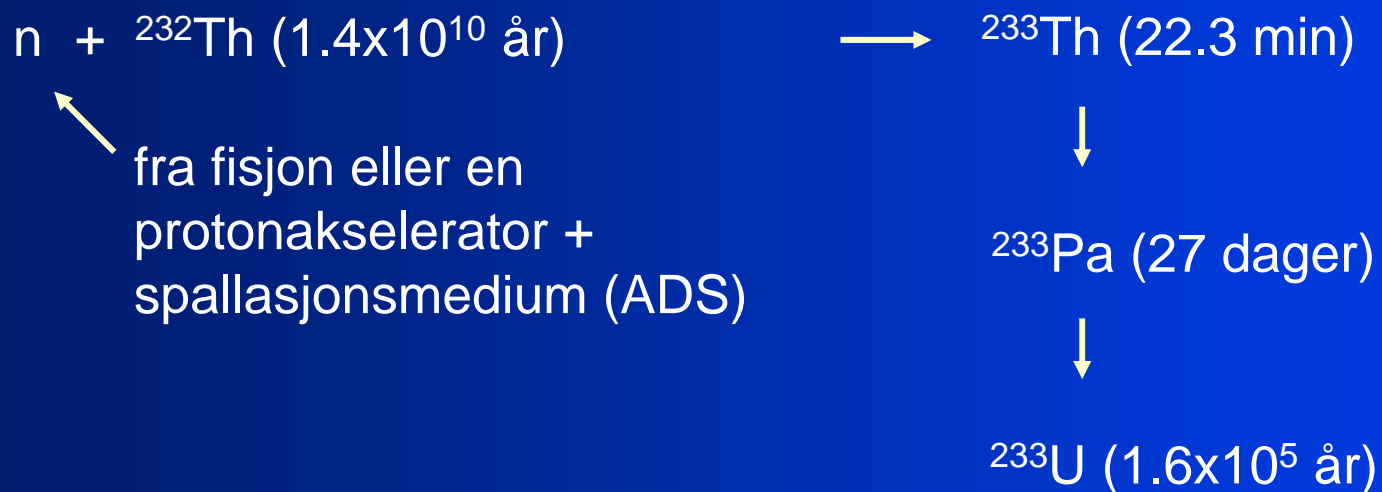
Radioaktivt avfall eller  
"glimrende" bombemateriale



## Reaktorer basert på element 90, Thorium

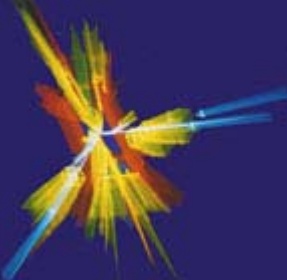
Thorium "kommer" ut av grunnen som en 100% ren, direkte nyttbar isotop,  $^{232}\text{Th}$ , og trenger ingen anriking

Men Thorium er IKKE spaltbar, men "fruktbar":



fulgt av ekstrahering eller direkte brenning av  $^{233}\text{U}$





## To hovedtyper thoriumreaktorer:

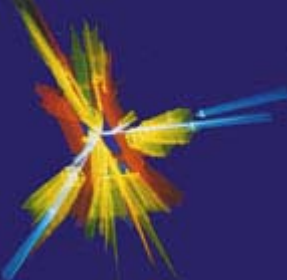
- kritiske ( $k = 1$ ): smeltet salt eller pellets)
- underkritiske ( $k < 1$ ): akseleratordrevne systemer (ADS)

Thorium forvandles til Uran ( $^{233}\text{U}$ ), og

$^{233}\text{U}$  fisjonerer mye på samme måten som  $^{235}\text{U}$ .

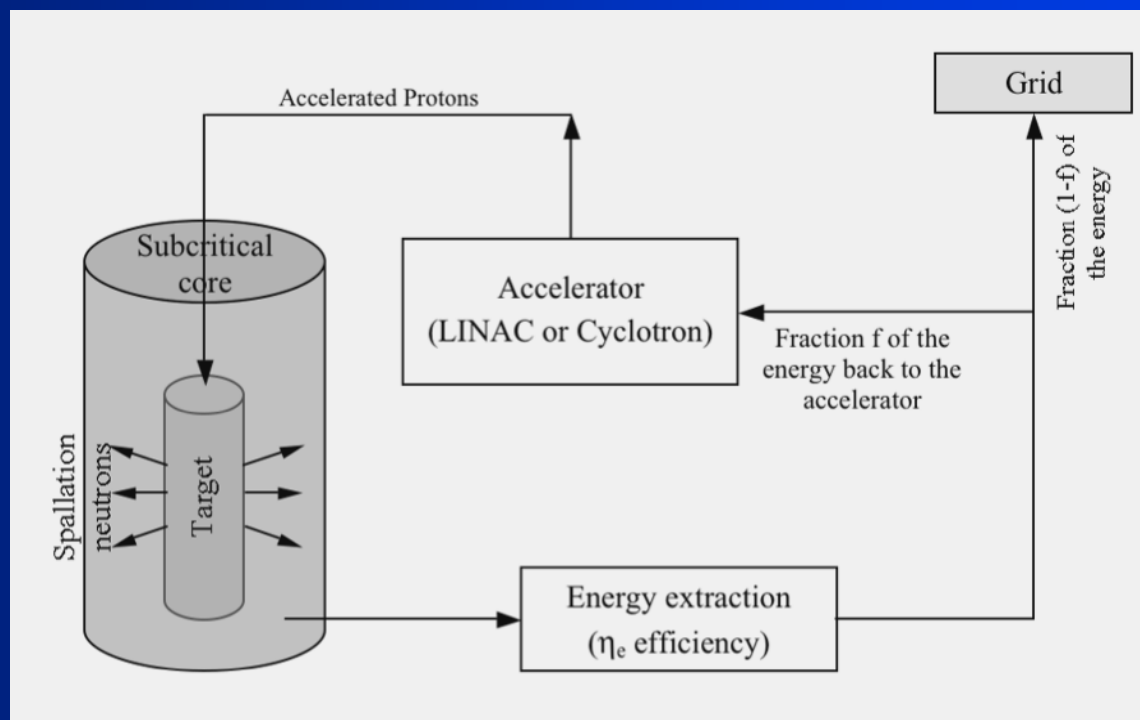
Det er mellom 4 og 6 ganger mer thorium enn uran i jordskorpen.

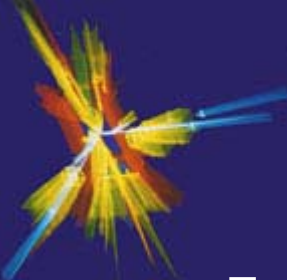
Om alt thoriumet forvandles og spaltes, vil en thoriumreaktor gi ca. 200 ganger mer energi enn samme mengden naturlig uran i en kritisk kjernereaktor.



## ADS – prinsipp (I):

Protoner fra en akselerator treffer et blymål der hvert proton produserer et stort antall nøytroner. Hvert av disse nøytronene danner kjedereaksjoner ved fisjon i  $^{233}\text{U}$ , og med energiproduksjon mange ganger energien på hvert av de innkommende protonene





## ADS-prinsipp (II)

En protonakselerator produserer og akselererer protoner opp til en bestemt energi. Protonene føres inn i reaktorkjernen som består av brenselstaver av thorium og uran ( $^{233}\text{U}$ ) badet i smeltet bly.

Når protonene kommer ut av strålerøret og inn i blyet, produseres et stort antall nøytroner som strømmer inn i reaktormaterialet. Nøytronene gir kjernereaksjoner der urankjerner spaltes og gir energi og nye nøytroner, mens thoriumkjerner forvandles til uran.

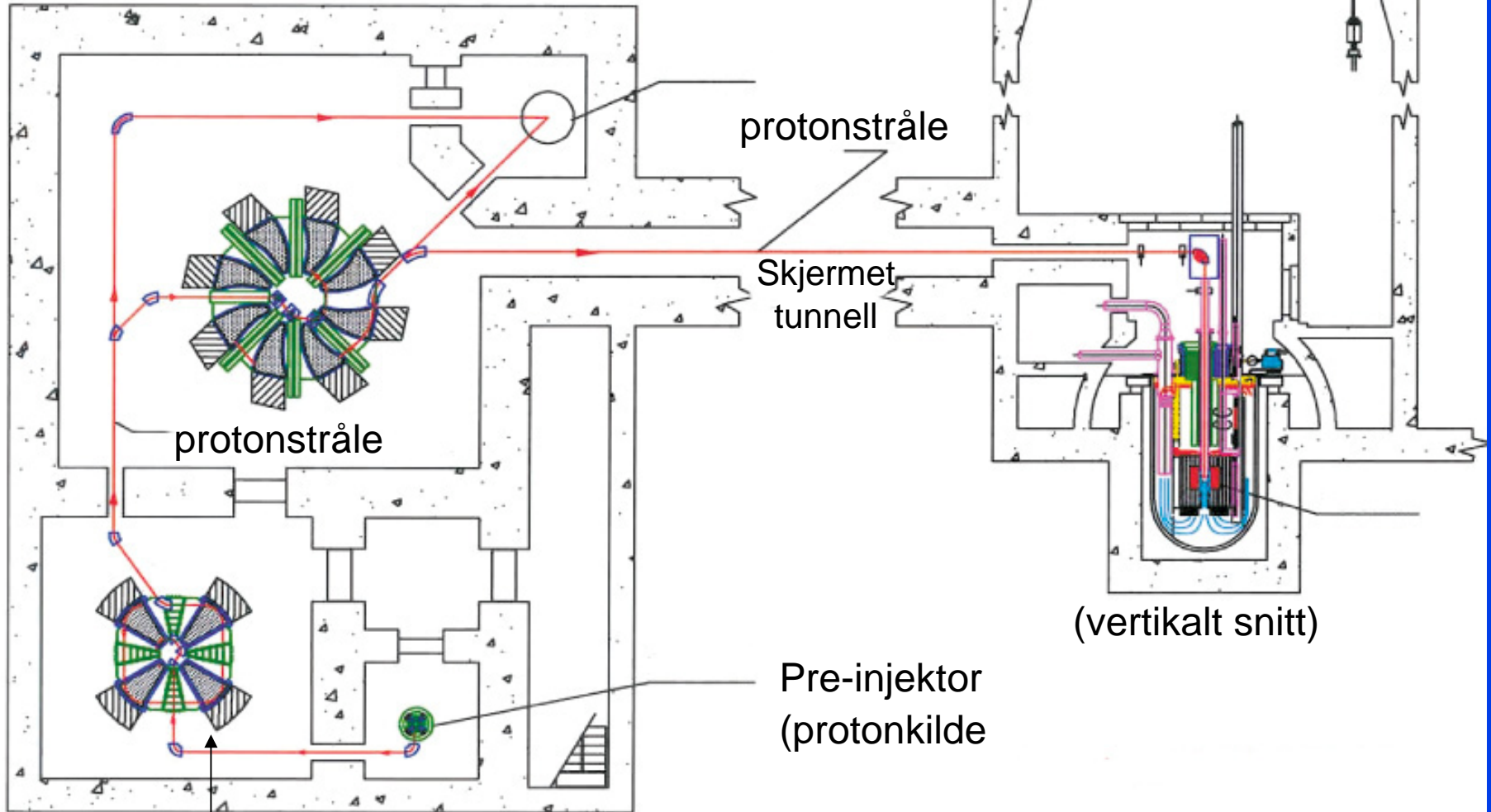
Når reaktoren er i likevekt, produseres det like mye uran som det spaltes, og reaktoren kan på denne måten opprettholde sin energiproduksjon i mange år uten at man trenger å re-prosessere brennstoffet.

Energiproduksjonen kan varieres ved å variere effekten på protonstrålen, og reaktoren stopper om protonstrålen stoppes.

# ADS

# Reaktorbygning

Akseleratorbygning  
(plant snitt)



Injeksjons-cyclotron

protonstråle

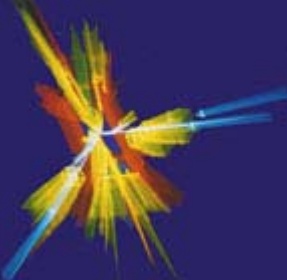
Skjernet  
tunnell

protonstråle

Pre-injektor  
(protonkilde)

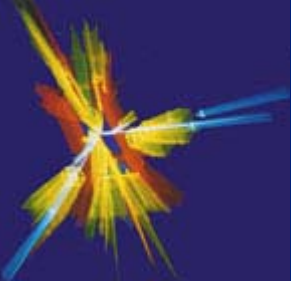
(vertikalt snitt)



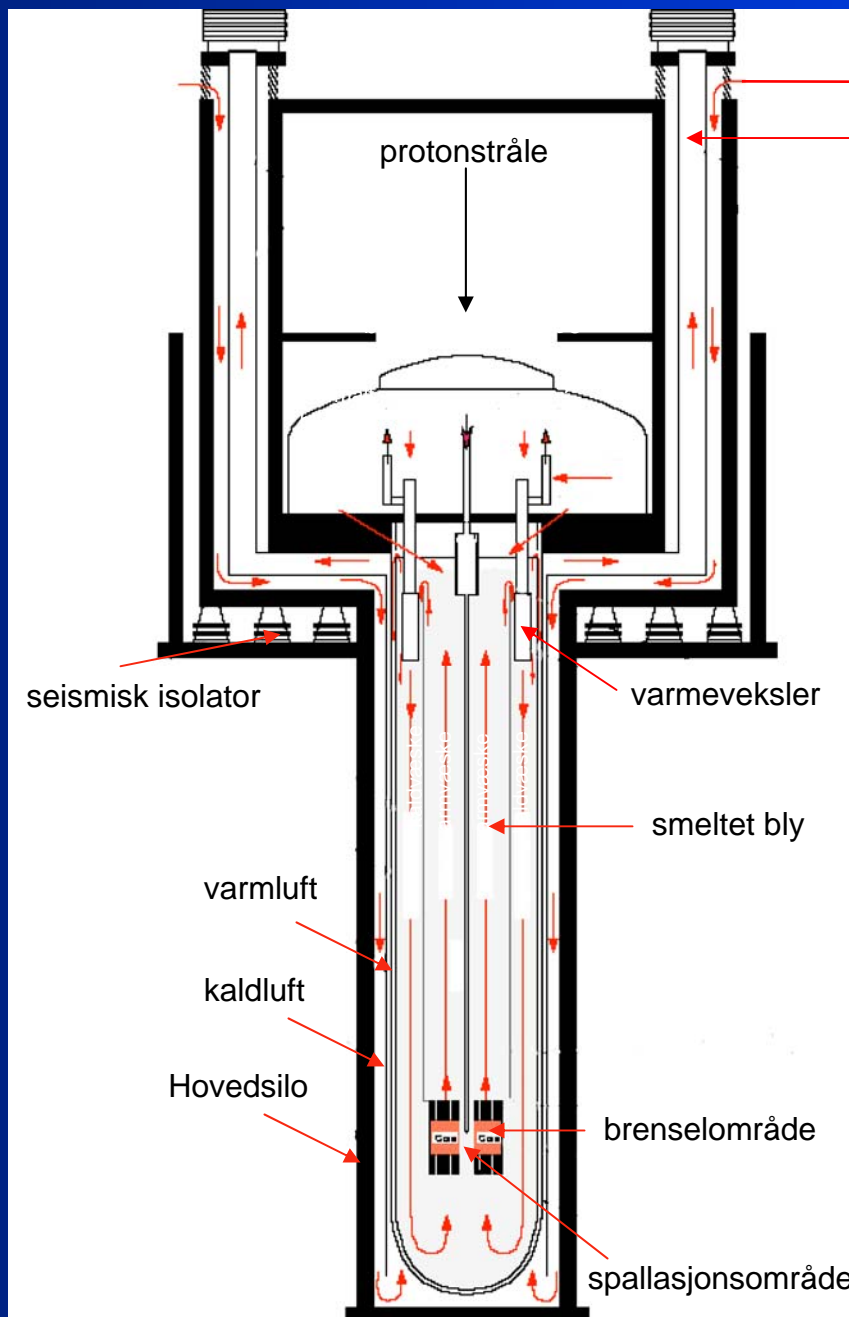


# PSI syklotronen (1974)





Carlo Rubbias  
egen skisse



kaldluft inn  
varmluft ut  
(passiv kjøling)

seismisk isolator

varmeveksler

smeltet bly

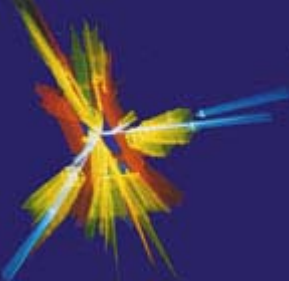
varmluft

kaldluft

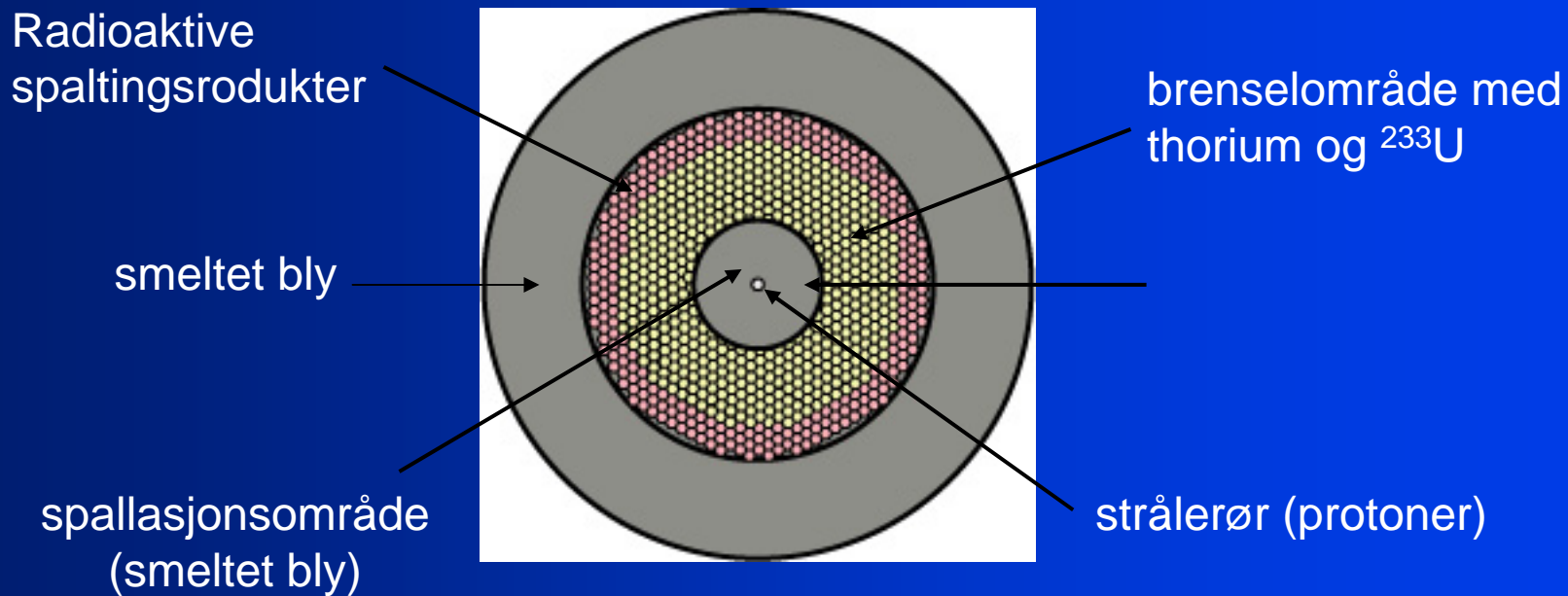
Hovedsilo

brenselområde

spallasjonsområde



# Reaktorkjernen





## Blykjøling og sikkerhet

Smeltet bly fungerer både som spallasjonsmedium og kjølevæske.

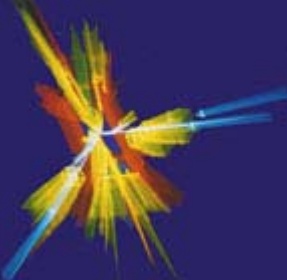
Smeltet bly har høy varmekapasitet og høyt kokepunkt ( $1740^{\circ}\text{C}$ ). Bly har også en stor varmeutvidelseskoeffisient som gir en sterk konveksjonsstrøm. Kjølningen og varmevekslingen kan derved skje uten bruk av mekaniske pumper.

Varmeutvidelsen av blyet kan også brukes i en enkel sikkerhetsmekanisme.

Om temperaturen i blyet skulle stige over en viss grense, ville det totale blyvolumet øke og blyet strømme inn i området for protonstrålen slik at denne og derved reaktoren stoppet opp!

Om hele anlegget ble utsatt for alvorlig uhell eller sabotasje, ville reaktoren i verste fall stoppe og blyet størkne, slik at den radioaktive reaktorkjernen ble liggende fullstendig innkapslet i størknet bly.





## Energiregnskap for en ADS med $k = 0.98$

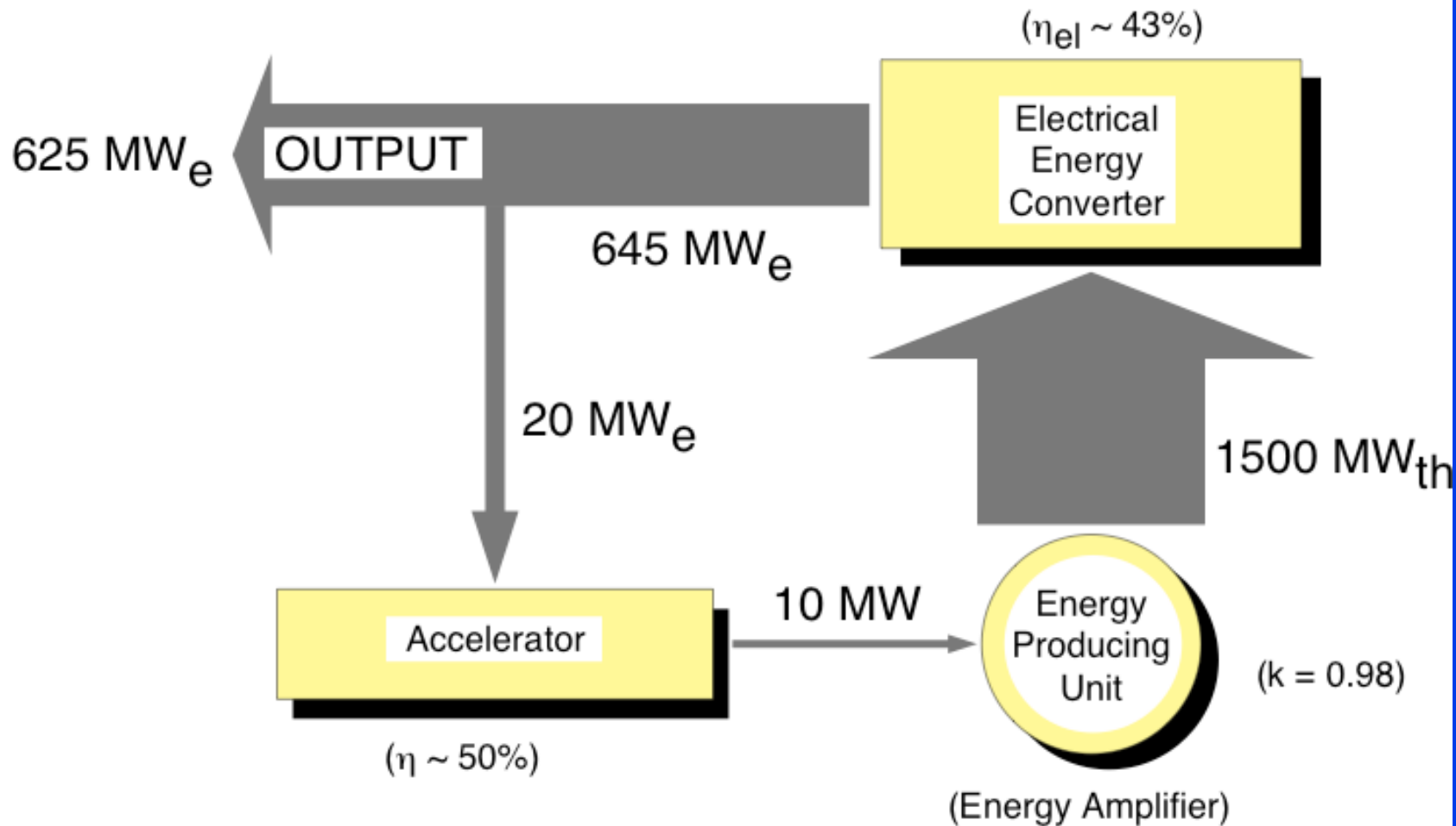
Ett proton med energi 1 GeV inn i bly gir ca 30 nøytroner i en spallasjonsprosess. Disse nøytronene har en stor energivariasjon, og når de kommer inn i reaktorkjernen med  $^{233}\text{U}$ , spaltes uranet og gir energi og nye nøytroner. Hvert nøytron gir tilsammen  $1/(1-k)$  nye nøytroner, der  $k$  er kritikalitetsfaktoren.

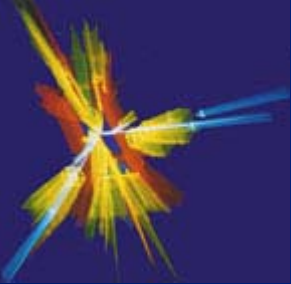
For  $k = 0.98$ , gir ett proton ca. 1500 nøytroner, som vil føre til ca. 750 fisjoner.

Hver fisjon gir ca. 0.2 GeV eller totalt 150 GeV, og vi har fått en energiforsterking på ca. 150.

Dette betyr at en partikkelstråle på 10 MW gir  $1500\text{MW}_{\text{th}}$  eller  $1.5\text{GW}_{\text{th}}$ , der th står for termisk energi.

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

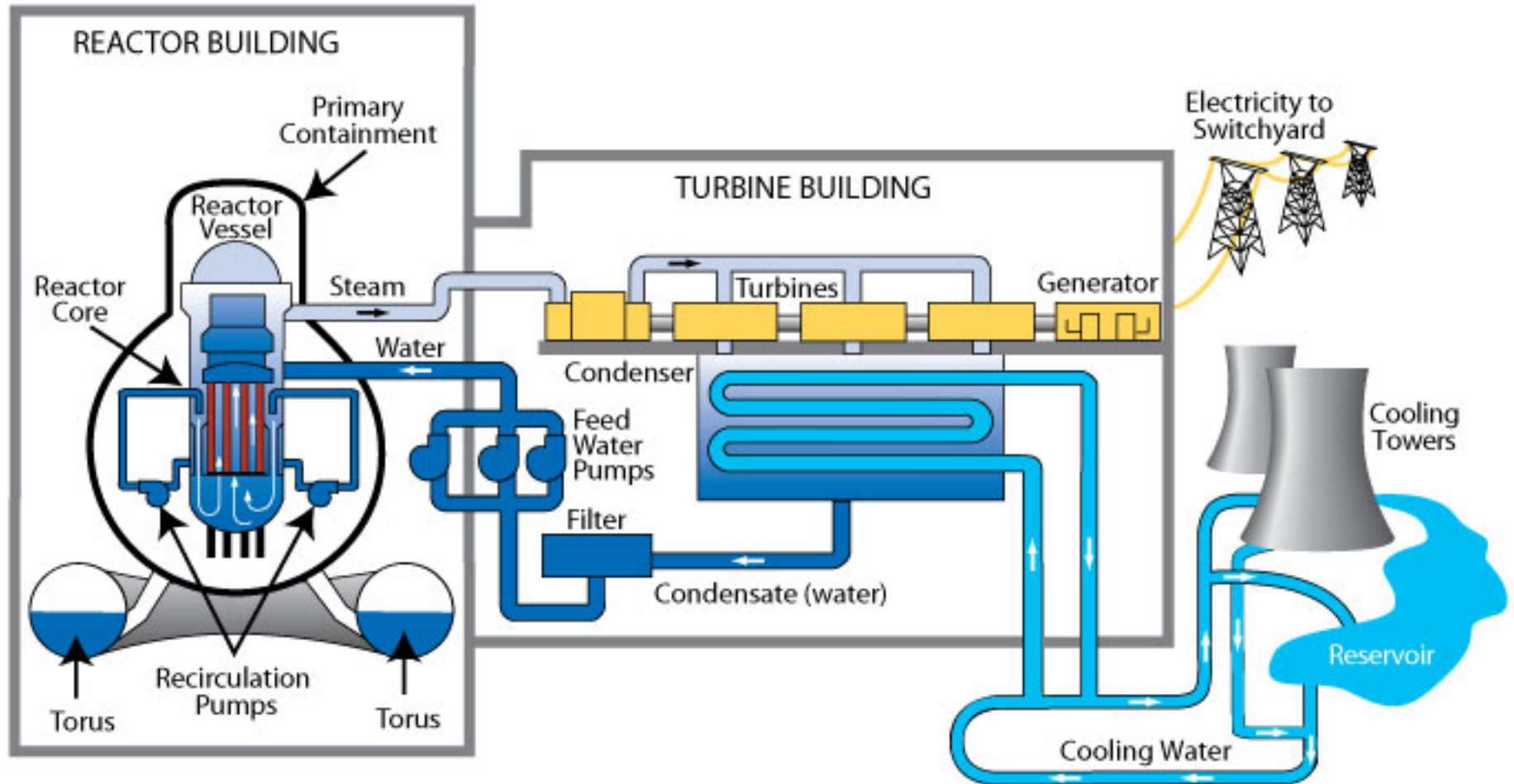


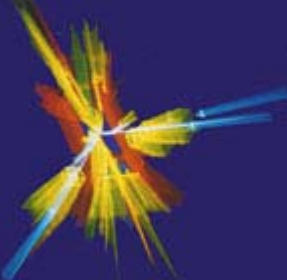


Noen få slides for kritiske reaktorer

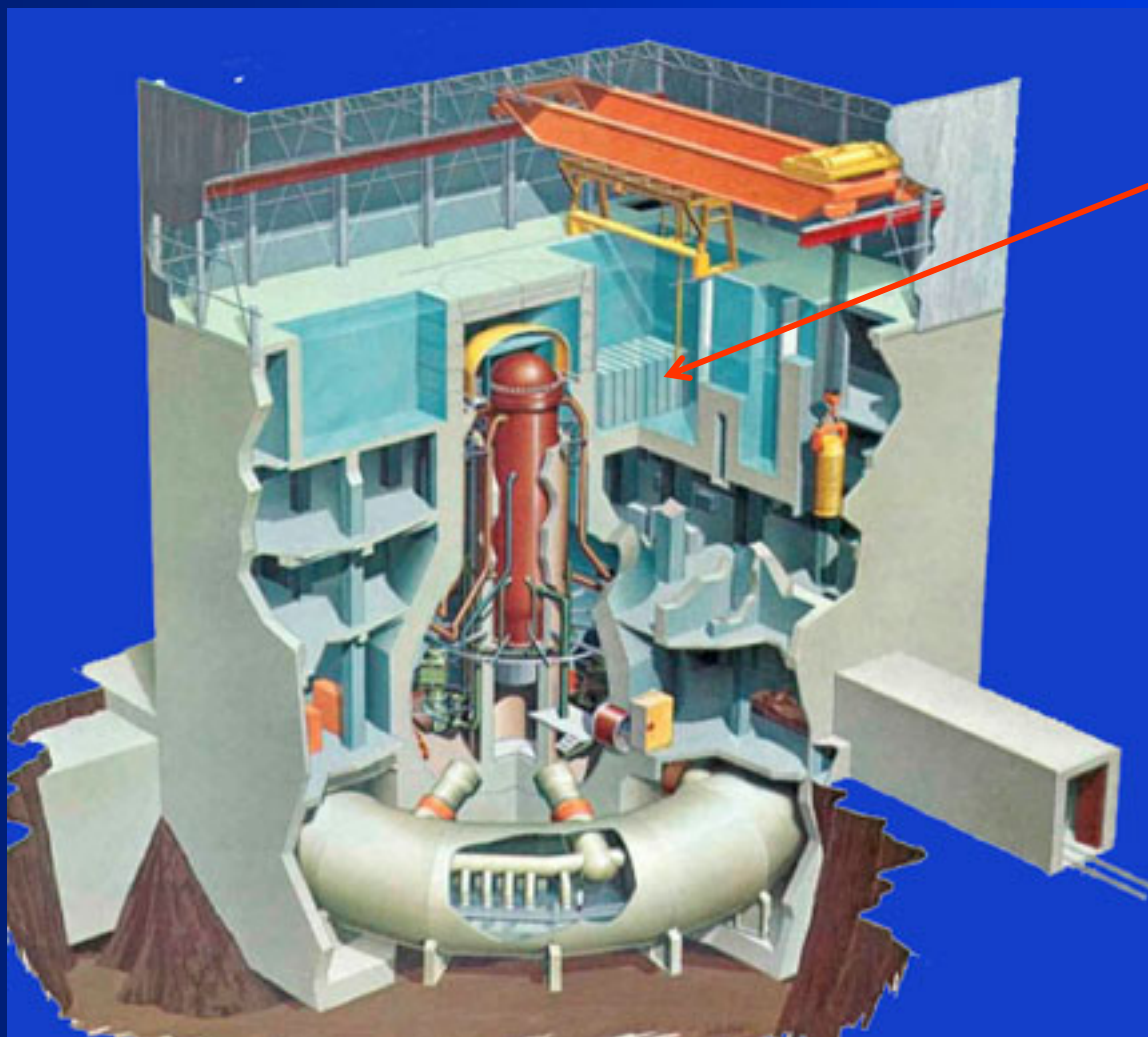
# Kok-vanns-reaktor (BWR) (Fukushima)

Trykk 75 atm og temperatur 285 °C (558 K)

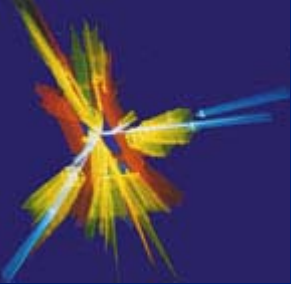




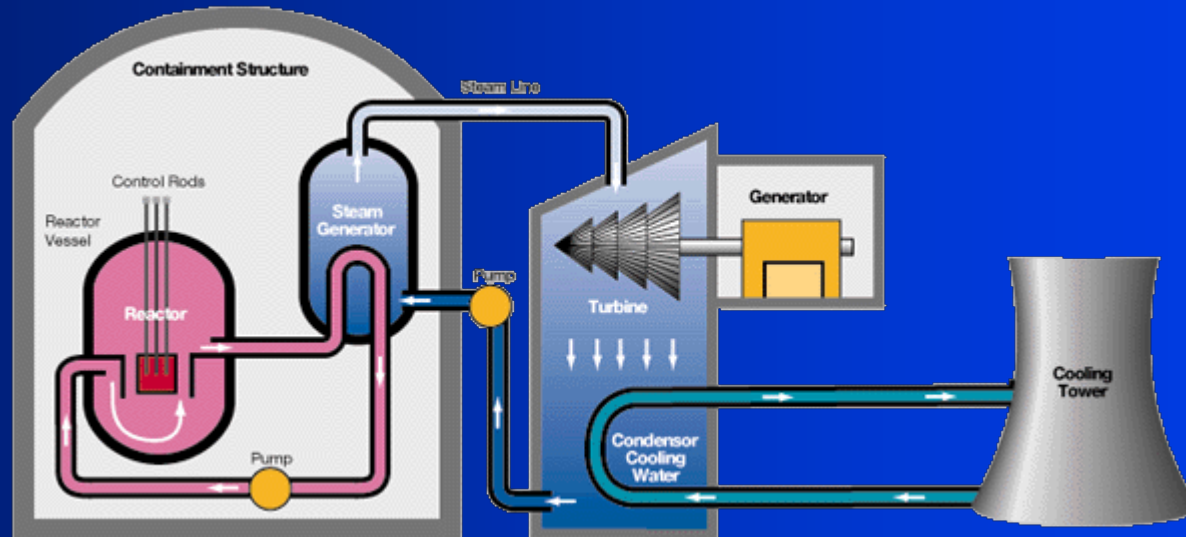
# Fukushima - reaktoren



Brukte  
brenselstaver



## Trykkvanns – reaktor PWR



Overhettet vann pumpes under høyt trykk inn i reaktorkjernen og virker både som kjølemedium og moderator.

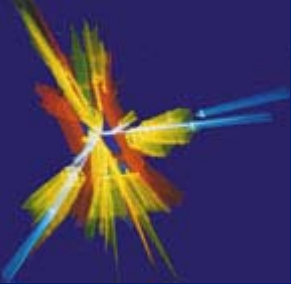
(Kjølevannet med  $T_{ut} = 583 \text{ K}$  går til en dampgenerator)



# PWR (Pressurized Water Reactor)



Olkiluoto, Finland



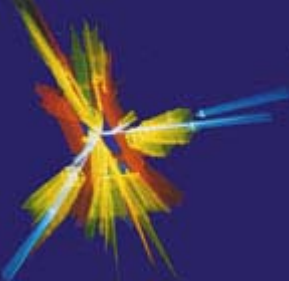
“Problemer” med tradisjonelle fisjonsreaktorer:

- Kritikalitetsuhell
- Nedsmelting av reaktorkjernen
- Radioaktivt avfall med lang levetid
- Spredning av kjernevåpen (anrikning og plutonium)
- Begrensete uranressurser

En mulig simultanløsning av alle disse problemene:

Kjernereaktorer basert på “det norske” elementet  
Thorium  $^{232}\text{Th}$  i stedet for Uran





## Thoriumreaktorer

der er 4 – 6 ganger mer thorium enn uran i jordskorpen, og thorium er over 200 ganger mer effektiv som brensel i forhold til uran i en vanlig reaktor

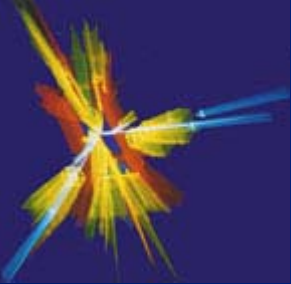
Allerede mye akkumulert erfaring med bruk av thorium og i produksjon av thoriumbrensel.

Fremdeles en jobb å gjøre med kommersialisering både for kritiske reaktorer og for Akselerator Drevne Systemer (ADS) basert på Th -  $^{233}\text{U}$  syklusen.

Trenger også utvikling av effektiv re - prosesseringsteknologi

## Thorium - ressurser (< 80 US\$ pr kg)

Land	Ressurs (´ 000 t Th)	%
Australia	420	17
US	400	16
Tyrkia	344	14
India	319	13
Venezuela	300	12
Brasil	221	9
Norge	132	5
Egypt	100	4
Russland	75	3
Grønnland	54	2
Kanada	44	2
Sydafrika	18	1
Andre	33	1
Total	2460	100



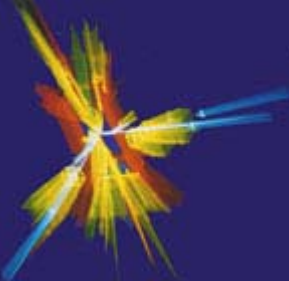
En interessant sammenligning:

1  $\text{GW}_e \times \text{år}$  (= 9 TWh) krever:

- 0.7 tonn Thorium,
- 2 600 000 tonn kull,
- 2 000 000 tonn olje

Ett års elektrisitetskonsum i Norge svarer til ca 9.7 tonn thorium  
De norske thoriumressursene svarer til minst  
13 tusen års forbruk

Globale thoriumreserver for tusener av år



En ADS thoriumreaktor er robust.

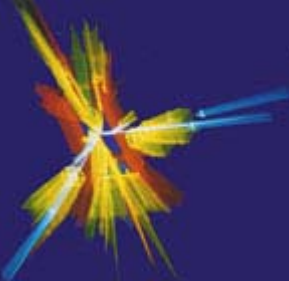
Den kan brukes både til energiproduksjon og til eliminering av radioaktivt avfall (Myrrha)

Den produserer praktisk talt ikke eget avfall.

Reprosesseringen av brennstoffet er enklere enn i en kritisk reaktor og gjør det meget vanskelig å utnytte til bombemateriale.

Thoriumreserver for tusener av år

**Kraftproduksjonen kan varieres på sekunders varsel, dvs en ideell kilde til basiskraft sammen med fornybar energi**



Det er teknologisk mulig å bygge en fullskala prototyp innen 2025

Problem nr. 1: akseleratoren,

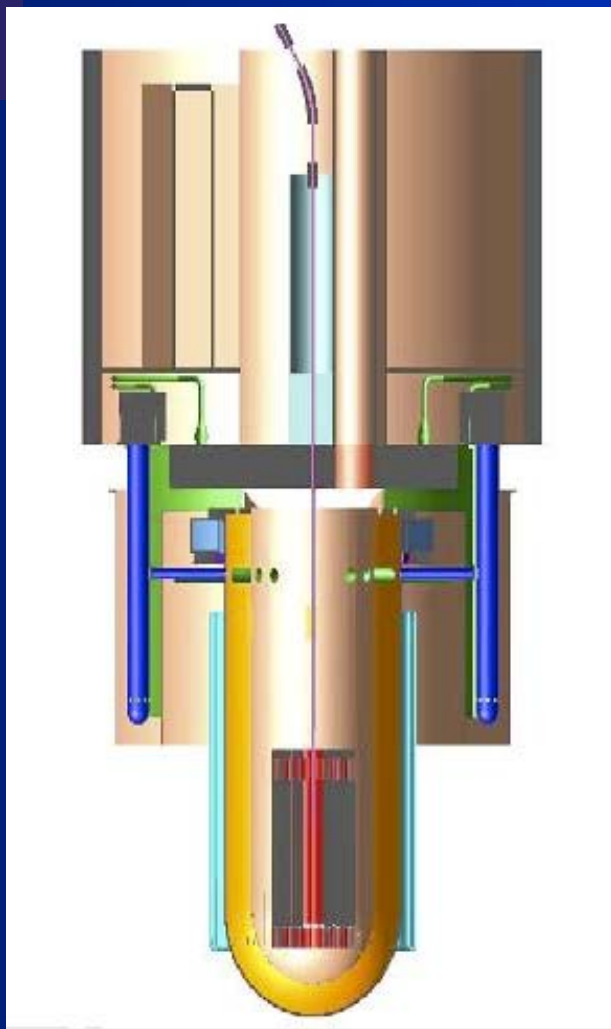
en **stabil** akselerator med 1 GeV, 10 mA og kontinuerlig stråle.

Syklotroner klarer strømstyrken (10 mA) og kan levere kontinuerlig stråle, men klarer ikke partikkelenergien 1 GeV

Synkrotroner klarer partikkelenergien, men leverer pulserende stråler (normalt med mindre strømstyrke)

Lineærakseleratorer kan klare jobben, men de er store og kostbare.

Ny akseleratorutvikling (synkrotroner) med flere injektorer er på gang



Aker Solutions har deltatt i utviklingsarbeid sammen med Carlo Rubbia siden 2007, og de har kjøpt C.R.s patent



# Thorium Energy Conference ThEC13

October 27 - 31, 2013, Globe of Science and Innovation, CERN, Geneva, Switzerland

## Scientific Advisory Committee

Ulrich Becker, MIT, USA  
Hans Blix, Ex director IAEA  
Robert Cywinski, Univ. of Huddersfield, UK  
Hesheng Chen, CAS, China  
Bruno Coppi, MIT, USA  
Sylvain David, CNRS IPNO, France  
Roland Garoby, CERN  
Waclaw Gudowski, KTH, Sweden  
Stuart Henderson, Fermilab, USA  
Victor Ignatiev, Kurchatov Inst. Russia  
Wolfgang Kröger, ETHZ, Switzerland  
Matts Lindroos, ESS, Sweden  
Alex C. Muller, CNRS IN2P3, France  
Ganapati Myneni, Jefferson Lab. USA  
Baldev Raj, PSG, India  
Carlo Rubbia, CERN  
Toshinobu Sasa, JAEA, Japan  
Mike Seidel, PSI, Switzerland  
Richard Sheffield, LANL, USA  
Alexander Stanculescu, INL, USA

## Local Organizing Committee

Egil Lillestøl, U. of Bergen, Norway  
(Conference Chair)  
Jean-Pierre Budliger, iTheC  
Rafael Gimalov, iTheC  
Claude Haegi, iTheC  
Yacine Kadi, CERN  
Jean-Christophe de Mestral, iTheC  
Andreas Pautz, EPFL and PSI  
Jean-Pierre Revol, CERN and iTheC  
Karel Samec, CERN  
Jean-Pascal Stancu, iTheC

## Conference Secretaries

Carnita Hervet, CERN  
Ulla Tihinen, CERN



Conference Web Page: <http://indico.cern.ch/event/thec13>

Enquiries and Correspondence: [Ulla.Tihinen@cern.ch](mailto:Ulla.Tihinen@cern.ch)

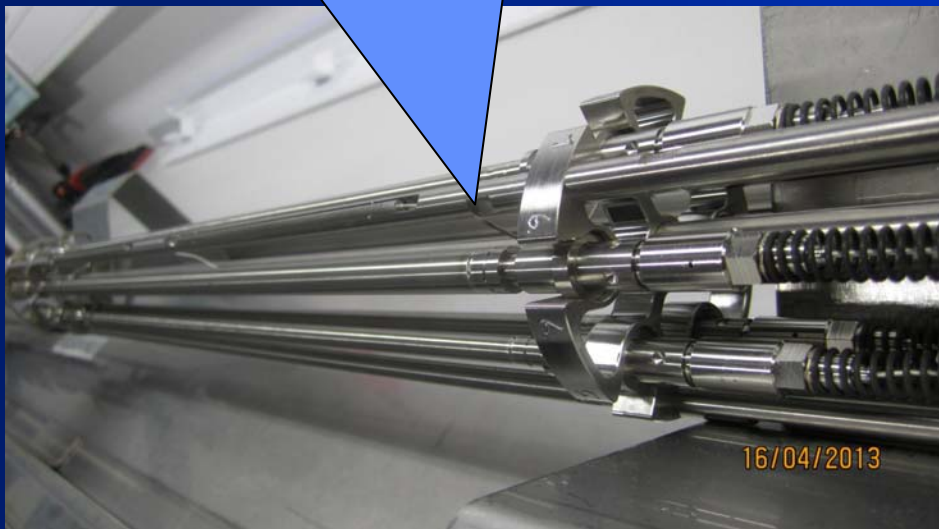
Organized by iTheC, [www.ithec.org](http://www.ithec.org), in collaboration with iTheO, [www.itheo.org](http://www.itheo.org)



# Thorium in Light Water Reactors

Thor Energy (The Norwegian Thorium Initiative) collaborates with Westinghouse to carry out **thorium fuel tests** in the Halden research reactor.

- 2 Rods 85%Th - 15%Pu pellets, ITU, Germany
- 2 Rods 7%Th – 93%UOX, IFE, Norway
- 1 Rod 65%Th – 35%UOX, IFE, Norway
- 1 UOX Reference rod





# Organizational Overview

The Chinese Academy of Sciences (CAS) and U.S. Department of Energy (DOE) Nuclear Energy Cooperation Memorandum of Understanding (MOU)

**MOU Executive Committee Co-Chairs**  
 China – Mianheng Jiang (CAS) 江绵恒  
 U.S. – Peter Lyons (DOE)



**Technical Coordination Co-Chairs**  
 China – Zhiyuan Zhu (CAS) 朱志远  
 U.S. – Stephen Kung (DOE)



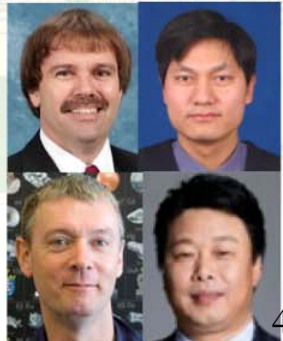
**Molten Salt Coolant Systems**  
 – Hongjie Xu (SINAP, CAS) 徐洪杰  
 Weiguang Huang (SARI, CAS) 黄伟光  
 – Cecil Parks (ORNL)  
 Charles Forsberg (MIT)



**Nuclear Hybrid Energy Systems \***  
 – Zhiyuan Zhu (CAS) 朱志远  
 Yuhan Sun (SARI, CAS) 孙予罕  
 – Steven Aumeier (INL)

\* Work scope governed by Science Protocol Agreement

A few days ago the Chinese Government decided that the first fully-functioning thorium MSR reactor should be built within ten years, instead of 25 years as originally planned



SINAP: Shanghai Institute of Applied Physics  
 SARI: Shanghai Advanced Research Institute  
 ORNL: Oak Ridge National Laboratory  
 INL: Idaho National Laboratory  
 MIT: Massachusetts Institute of Technology  
 UC-Berkeley: University of California, Berkeley