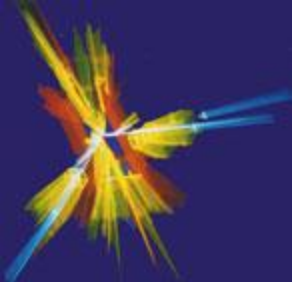


Verdens energifremtid

**Fysikklærere på CERN
30. September, 2013
Egil Lillestøl**

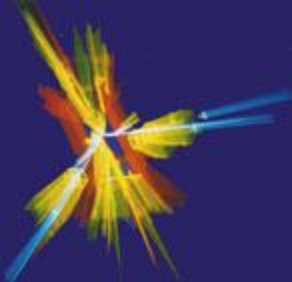


Siden Norge for tiden er en viktig energinasjon,
vil jeg lenke tittelen sammen med

Norges fremtid

og jeg toner flagg med én gang og starter med konklusjonen:

**Thorium - kjernekraft,
en vesentlig del av en
bærekraftig energifremtid**



Globalt energiforbruk trenger store tall:

(se <http://en.wikipedia.org/wiki/Giga->)

kilo (k) = 10^3

Mega (M) = 10^6

Giga (G) = 10^9

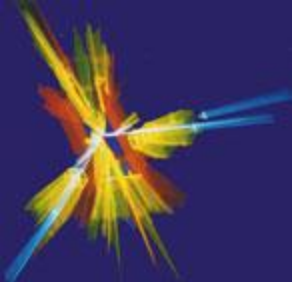
Tera (T) = 10^{12}

peta(P), exa(E), zetta(Z)...

1 år = 8766 timer (h) (bruk 9 000 h)

1 kW_e kontinuerlig forbruk for 1 år ~ 9 MWh

1 GW_e kontinuerlig forbruk for 1 år ~ 9 TWh



OECD energidefinisjon:

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

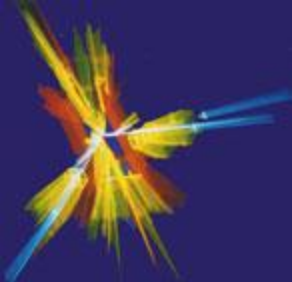
Mtoe (= Megatonn o.e.) (42PJ)

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

(*) Kommentar om tap og elektriske biler

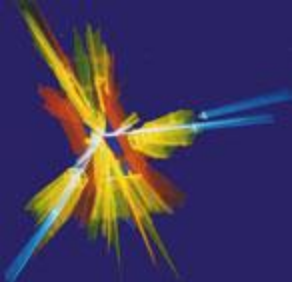


Globalt ("sikre") konvensjonelle reserver (BP2013)

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



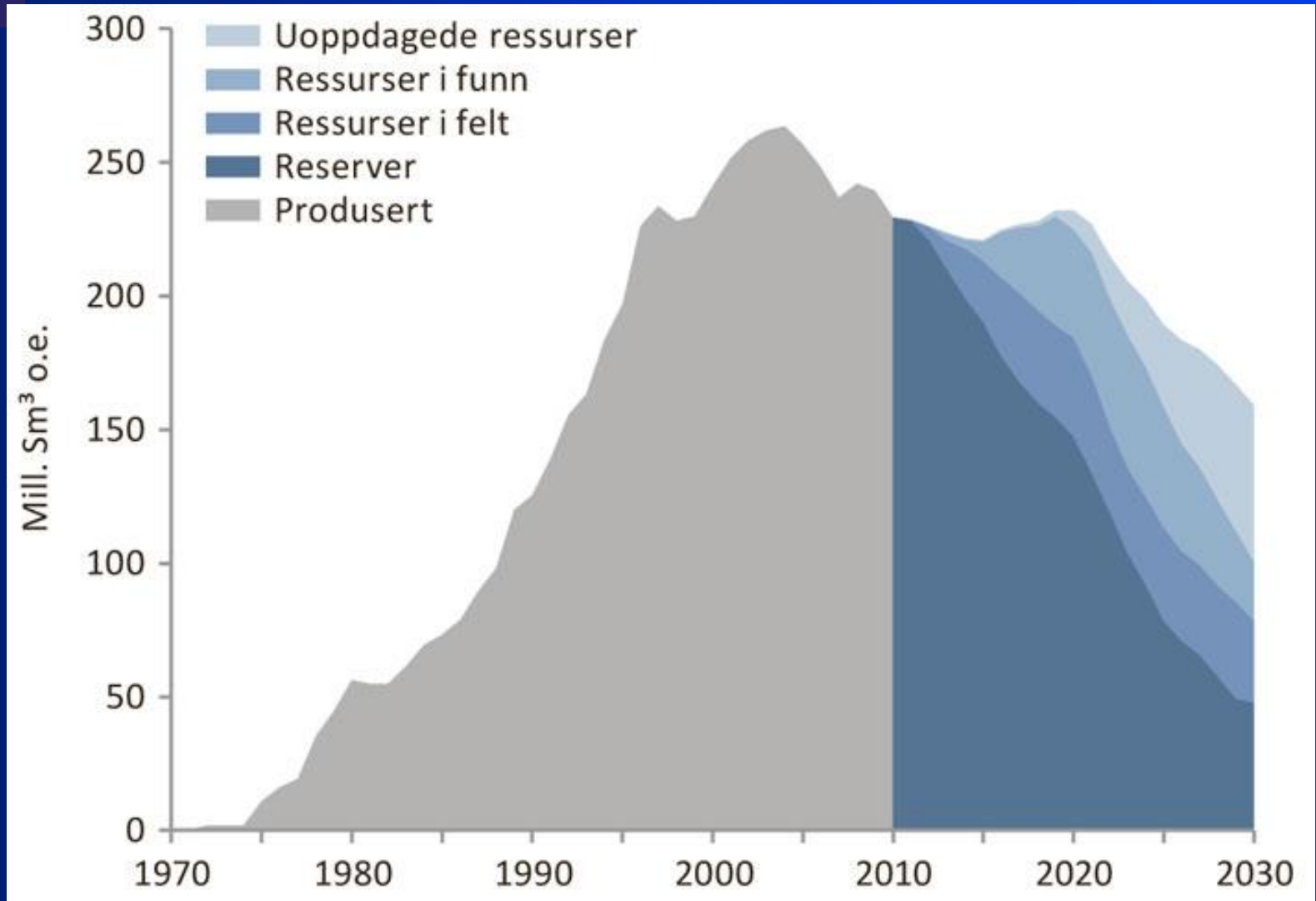
Fremtidig produksjon av fossilt brennstoff avhenger av den totale kapasiteten av de fossile ressursene og ressurser som forventes å bli oppdaget sammen med **raten disse kan utvinnes på**

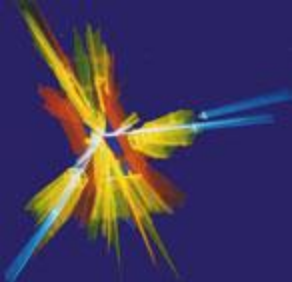
og utvinningsraten avhenger av teknologisk utvikling, økonomi, offentlighetens mening og økologiske føringer.

Finansielle problemer starter når produksjonen minker (Se diskusjoner om “peak oil”, “peak coal”...)

En rask titt på Norge:

Det norske olje og energidepartementet (OED) Ressursrapport 2011





2011 (et spesielt år)

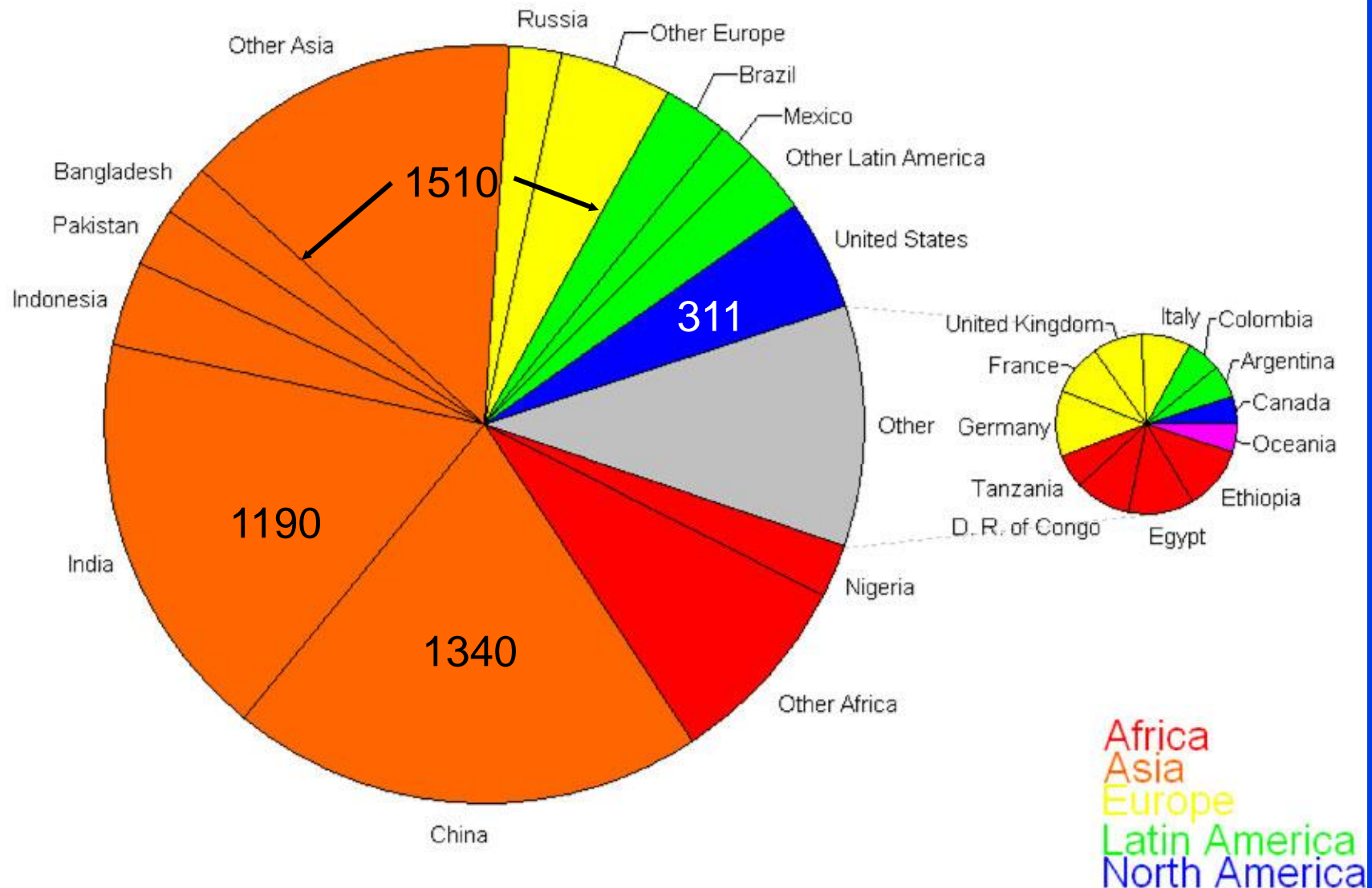
Den globale befolkning nådde 7 milliarder i 31. oktober (doblingsrate \approx 61 år, dvs. dobling rundt år 2072)

Fukushima, 11. mars

Tyskland stengte 8 av sine 18 kjernekraft-reaktorer og ble over natten netto importør av energi. Startet samtidig opp igjen flere utdaterte kullfyrte anlegg.

Sveits bestemmer seg for å fase ut kjernekraft og foreslår å bygge 8 nye gasskraftanlegg

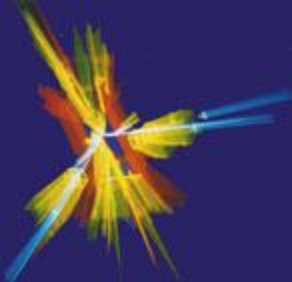
Verdens befolkning, 2010 (millioner)





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%



Fornybar energi 2012:

(Totalt globalt energiforbruk 12 477 Mtoe)

Tommelfingerregel: 1 GWår = 8 760 GWh \approx 9 TWh \approx 2 Mtoe

Fornybar (globalt): 987 Mtoe \approx 8.6 % of total

Vannkraft: 832 Mtoe \approx 6.7 %

Andre: 237 Mtoe \approx 1.9 %

(best i klassen: Kina, Tyskland, Danmark)



Utgangen av 2011

Hydroelektrisitet

Globalt installert kapasitet:	1 010 GW (1. 01 TW)
Gjennomsnitts-produksjon:	400 GW
Gjennomsnitts-effektivitet:	39.6 %

Vindkraft

Globalt installert kapasitet:	240 GW
Gjennomsnitts-produksjon:	39.4 GW
Gjennomsnitts-effektivitet:	16.4 %

Fotoceller (PV)

Globalt installert kapasitet:	67 GW
Gjennomsnitts-produksjon: :	9 GW
Gjennomsnitts-effektivitet:	13.5 %



2050

Verdens befolkning 9 milliarder ???

Global energi:

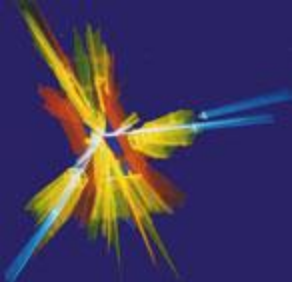
Totalt energiforbruk ca. 25 000 Mtoe
(opp 100% fra 2012)

Global energimiks:

Fornybar energi (Sol, vind,..)	40%	} Grid
Kjernekraft	40%	
Fossil energi	20%	

Norge:

i sitt 10ende år med økonomiske nedgangstider



Globalt elektrisitetsforbruk:

Gjennomsnitt forbruk:

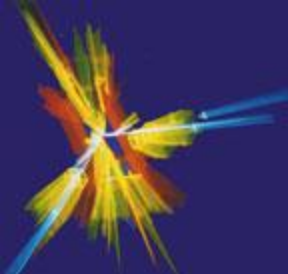
2.5 TW 2011 økende til ca 8 TW i 2050

Totalt 22 000 TWh i 2010,
(som er ca 42 % av det globale energiforbruket, og der
30% av elektrisiteten går til transportsektoren).

Med forventet økning i energiforbruket, og med en større del av energien som benytter elektrisitet som energibærer, antas det at det totale elektrisitetsforbruket i 2050 vil være i nærheten av

70 000 TWh, eller 8 TW kontinuerlig forbruk

Dette er bakgrunnen for tallene på neste slide:



Midlere effekt (MW) pr km² for forskjellige kilder og nødvendig overflate om **en av dem skulle** dekke elektrisitetsforbruket **alene** i 2050:

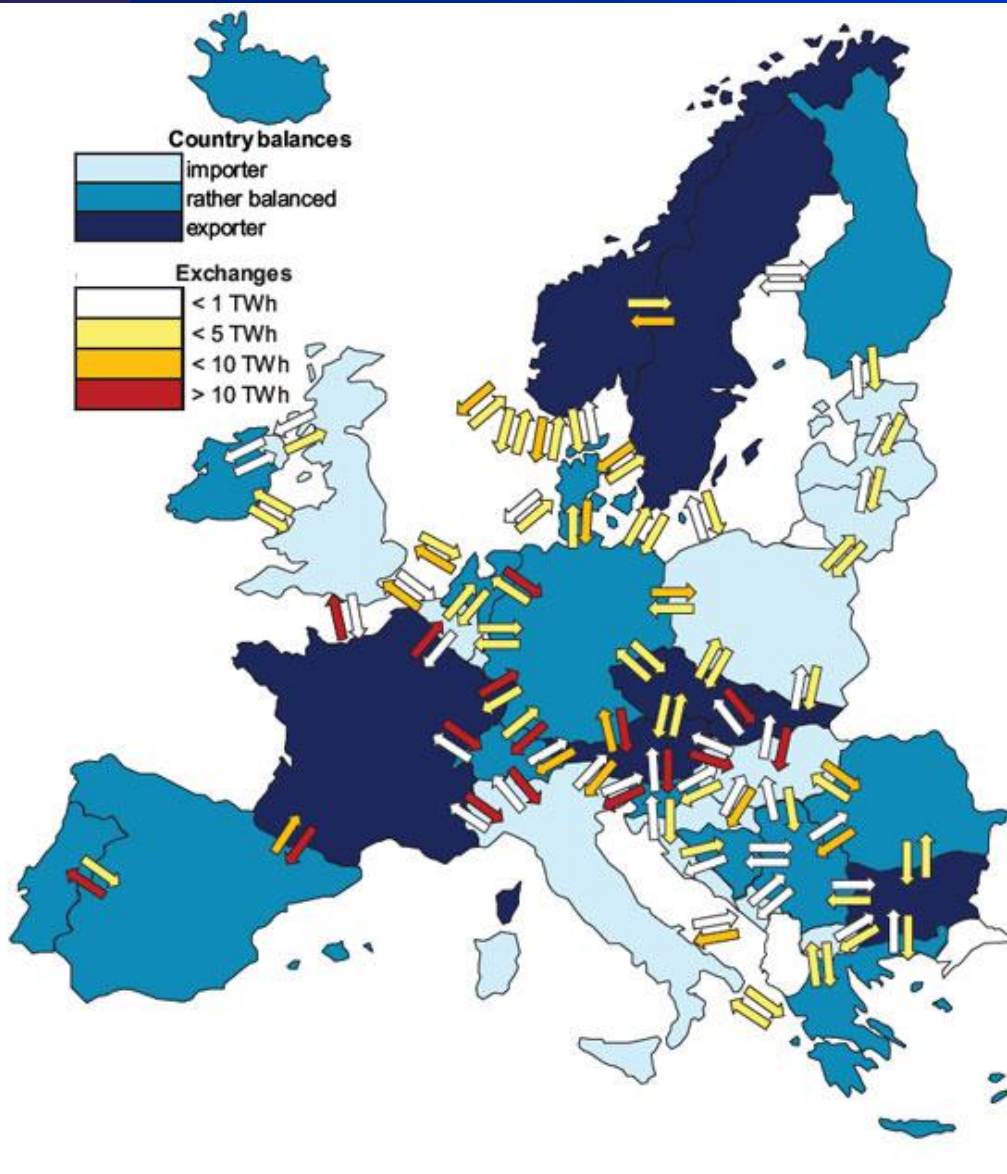
Kilde	Effekt (MW/km ²)	Totalt areal km ²
Konsentrert solkraft (CSP)	10	800 000
Fotoceller (PV) (*1)	10	800 000
Vindturbiner (*2)	2(3)	4 000 000
Bioenergi	0.6	13 000 000
Geotermisk energi	0.015	520 000 000

De tre første er variable og ikke forutsigbare, og energilagring er problematisk og vil i alle tilfelle føre til lavere effektivitet og større krav til areal(*).

Vanskelig å forestille seg hvordan man kan unngå å bruke en stor mengde basiskraft, d.v.s. **kjernekraft!**

(*1) 0.3% og (*2) 1.6 % av globalt el. konsum i 2011

“Solution”: TYNDP 12 Report Kraftutvekslingsplaner (2020) mellom ENTSO-E-Countries

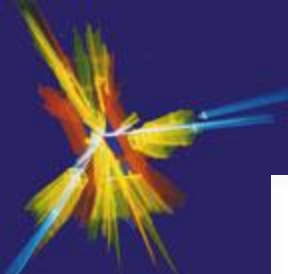


Det kreves:

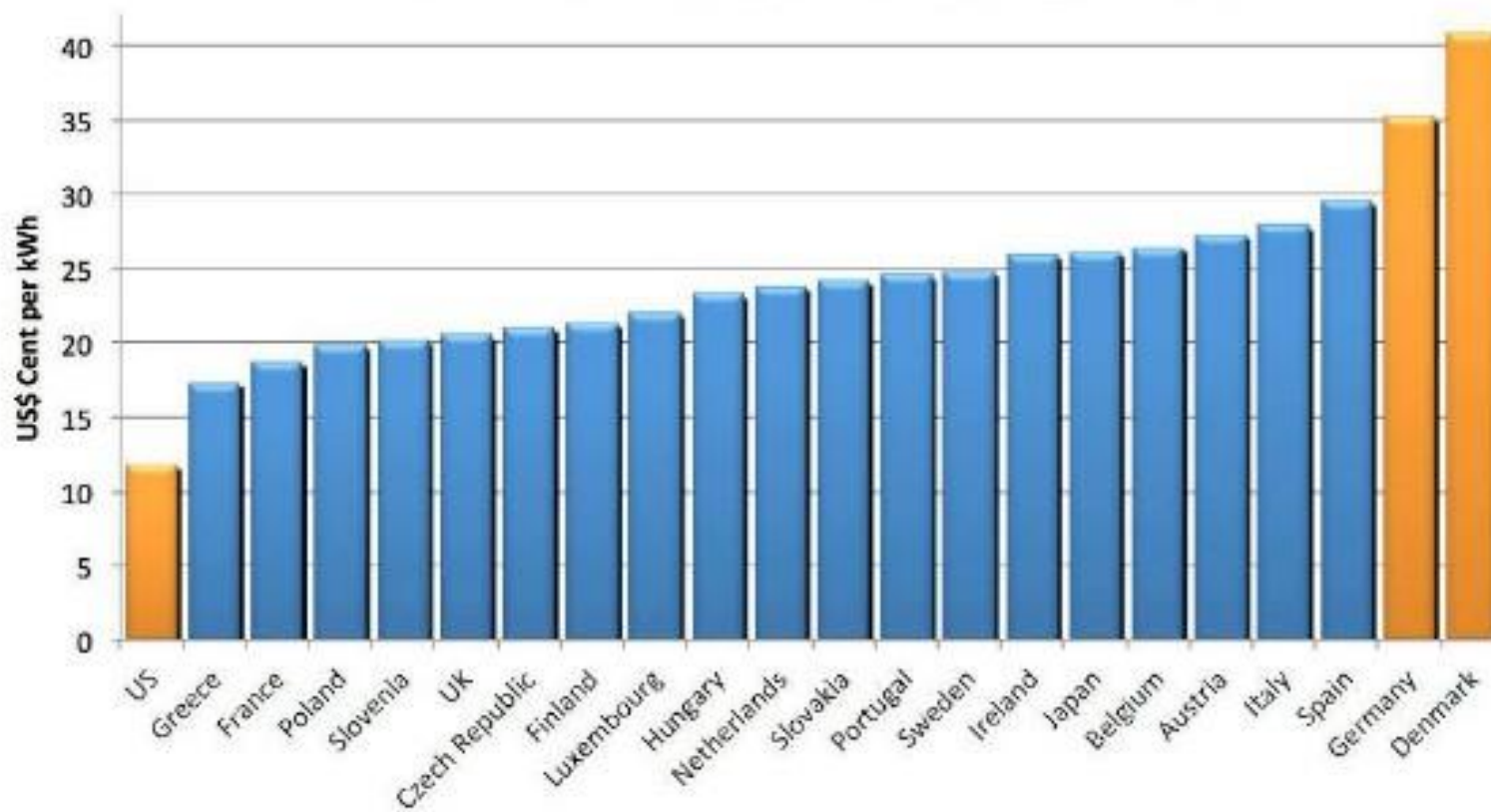
104 milliarder € til

51 500 km nye
og oppgraderte
HV linjer på tvers
av Europa

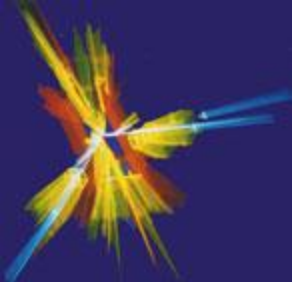
**Sårbare
nettverk**



EU and G7 Household Electricity Prices Including Taxes, 2011



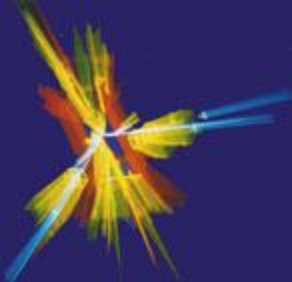
UK Department of Energy and Climate Change, September 2012



En sikrere, billigere, enklere, bærekraftig og mindre skjemmende løsning for basiskraft er:

Ny og sikker kjernekræftteknologi basert på Thorium

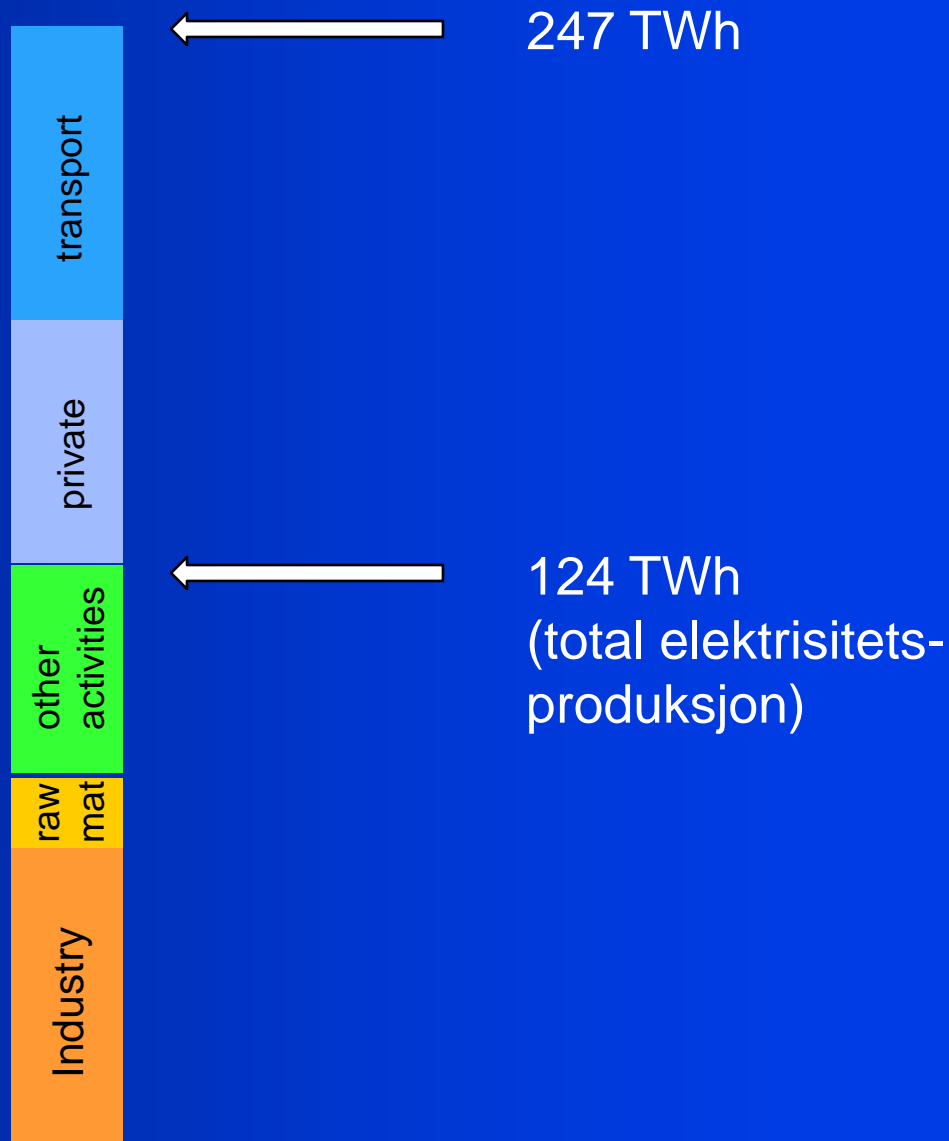
Så hva er utsiktene for Norge?

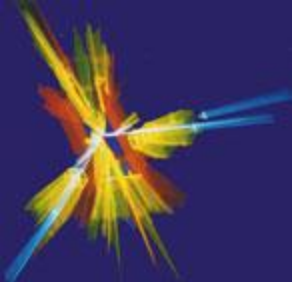


Norges energiforbruk i 2010

Ikke inkludert:

Norsk
internasjonal
skipsfart 46 TWh



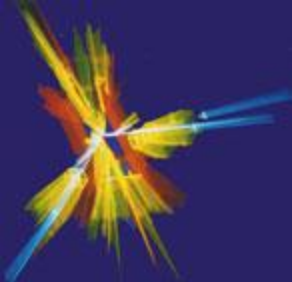


Hvordan skal Norge dekke sitt energibehov i andre halvdel av dette århundret?

Og enda viktigere:

Hvordan skal Norge betale for sin import ?

Legg merke til at om vi i dag tok bort alle inntektene fra petroleusmeksport, ville Norge ha et underskudd på ca 140 milliarder Nkr. på sin betalingsballanse, eller ca 30 000 Nkr. for hver nordmann



En liten øvelse for dere som sitter her:

Om dere ønsker å få en god magefølelse, kan dere studere:

THE ATLAS OF ECONOMIC COMPLEXITY

av Hausmann, Hidalgo et.al. 2011

(Cambridge: Harvard's Center for International Development)

På neste slide viser jeg noen av konklusjonene i rapporten som er basert på en studie av 128 land som til sammen representerer 99% av verdenshandelen og 97% av det globale BNP



“THE ATLAS OF ECONOMIC COMPLEXITY”

Ranking 1, Økonomisk kompleksitet:

Japan (1), Sveits (2), Sverige (4), Finnland (6),
Singapore (7), Tsjekia(8), Norge (33)

Ranking 2, Forventet BNP vekst pr hode i 2020:

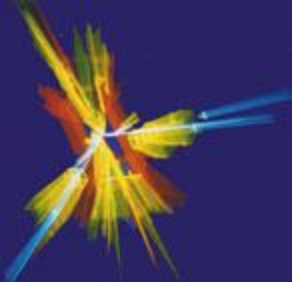
Kina (1), India (2),
Nigeria (118), Norge (119), Papua Ny Guinea (123)

Ranking 3, Forventet BNP vekst i 2020:

Uganda (1), Trinidad og Tobago (127), Norge (128)

Ranking 4, Forandring i Økonomisk kompleksitet (1964-2008):

Mauritius (1), Norge (96)



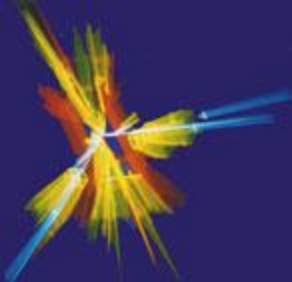
Foreløpig konklusjon:
Norge går bedrøvelige tider i møte om
vi ikke skaffer oss andre bein enn
plattformbein å stå på

I det følgende to eksempler på teknologier der Norge
kunne være i fronten og spille en betydelig rolle

Sway, kapasitet 10 MW, gjennomsnitt 3 MW ?)

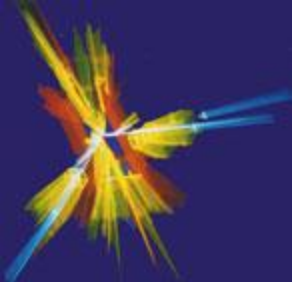


Meget avansert teknologi med stort eksportpotensial



MEN,
Norge har den desidert laveste veksten i installert vindkraft
blant de industrialiserte landene,

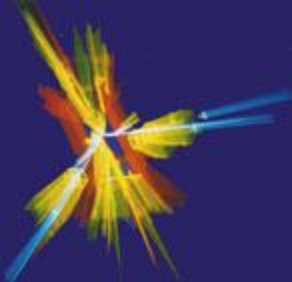
og offentlig støtte er på vei nedover!



La oss se litt på kjernekraft (fisjonsreaktorer)

I dag har vi mer enn 18000 års akkumulert driftserfaring med kommersielle kjernereaktorer.

Et run-away uhell som det i Tsjernobyl - ulykken er ganske enkelt ikke mulig for en moderne reaktor.



Uran, U, element nr 92

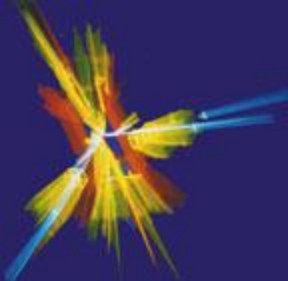
Naturlig Uran, ${}_{92}\text{U}$, er en blanding av to typer (isotoper), ${}^{235}\text{U}$ (0.7%) og ${}^{238}\text{U}$ (99.3%)

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

En reaktor trenger en høyere konsentrasjon enn 0.7% ${}^{235}\text{U}$, slik at naturlig uran må anrikes

Kjernebomber trenger enda høyere anriking

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

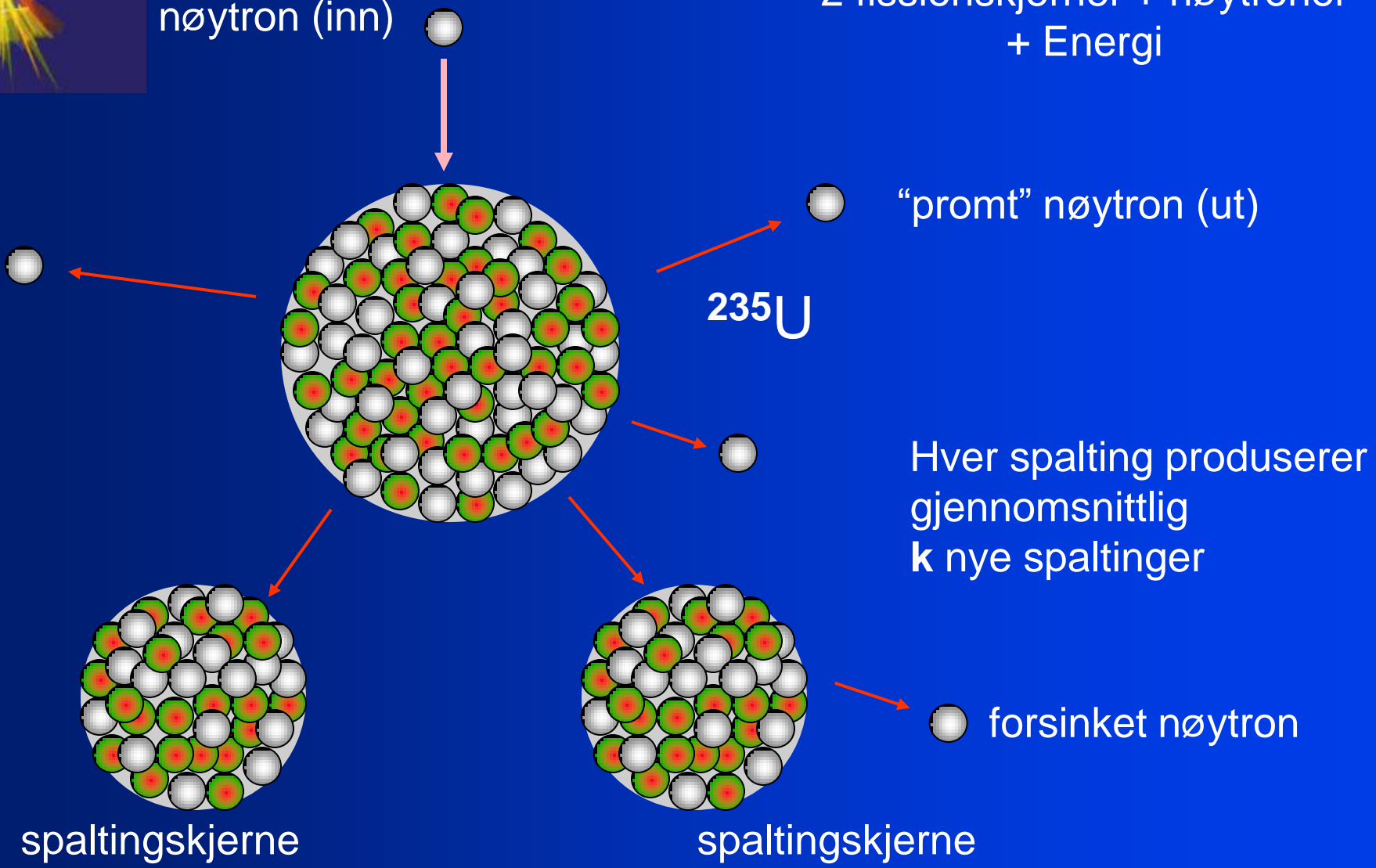


Fission (atomkjernespalting):

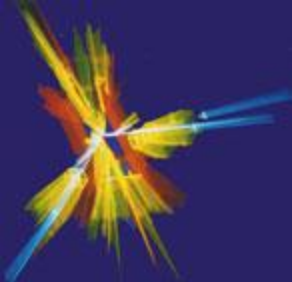


2 fissionskjerne + nøytroner
+ Energi

nøytron (inn)



Hver spalting produserer
gjennomsnittlig
k nye spaltinger

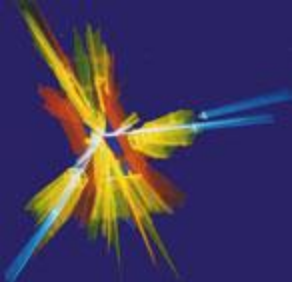


“Problemer” med tradisjonelle fisjonsreaktorer:

- 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}Th i stedet for Uran



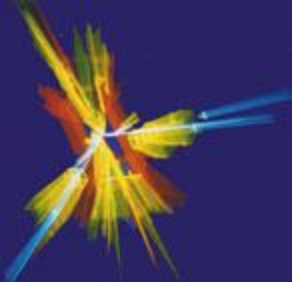
Thoriumreaktorer

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.

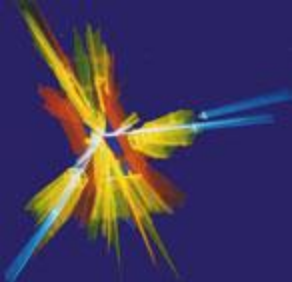
Fremdeles en jobb å gjøre med kommersialisering både for kritiske reaktorer og for Akselerator Drevne Systemer (ADS) basert på Th - ^{233}U syklusen.

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
Grønland	54	2
Kanada	44	2
Sydafrika	18	1
Andre	33	1
Total	2460	100



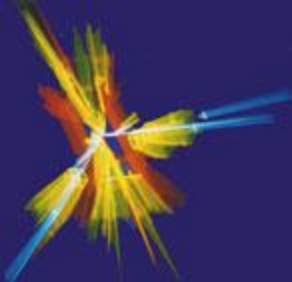
En interessant sammenligning:

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

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

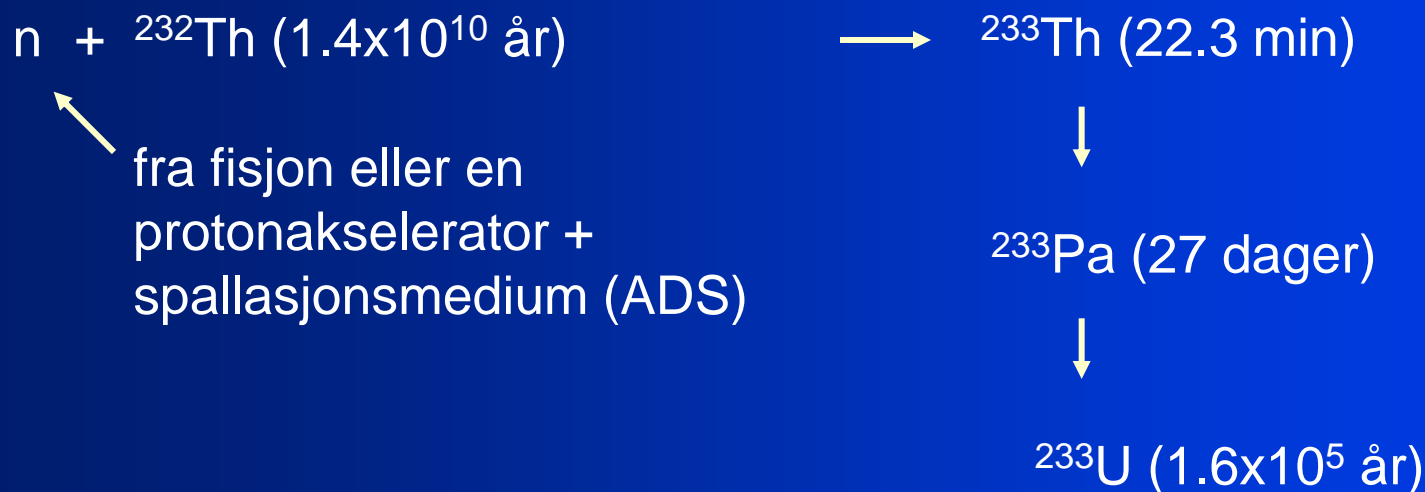
Ett års elektrisitetskonsum i Norge svarer til ca 9.7 tonn thorium
De norske thoriumressursene svarer til minst
13 tusen års forbruk

Globale thoriumreserver for tusener av år

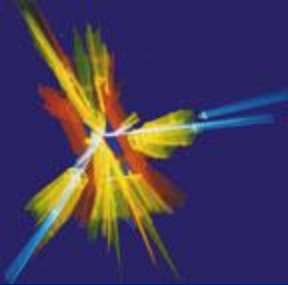


Thorium "kommer" ut av grunnen som en 100% ren, direkte nyttbar isotop – trenger ingen anriking

Men Thorium er IKKE spaltbar, men "fruktbar":

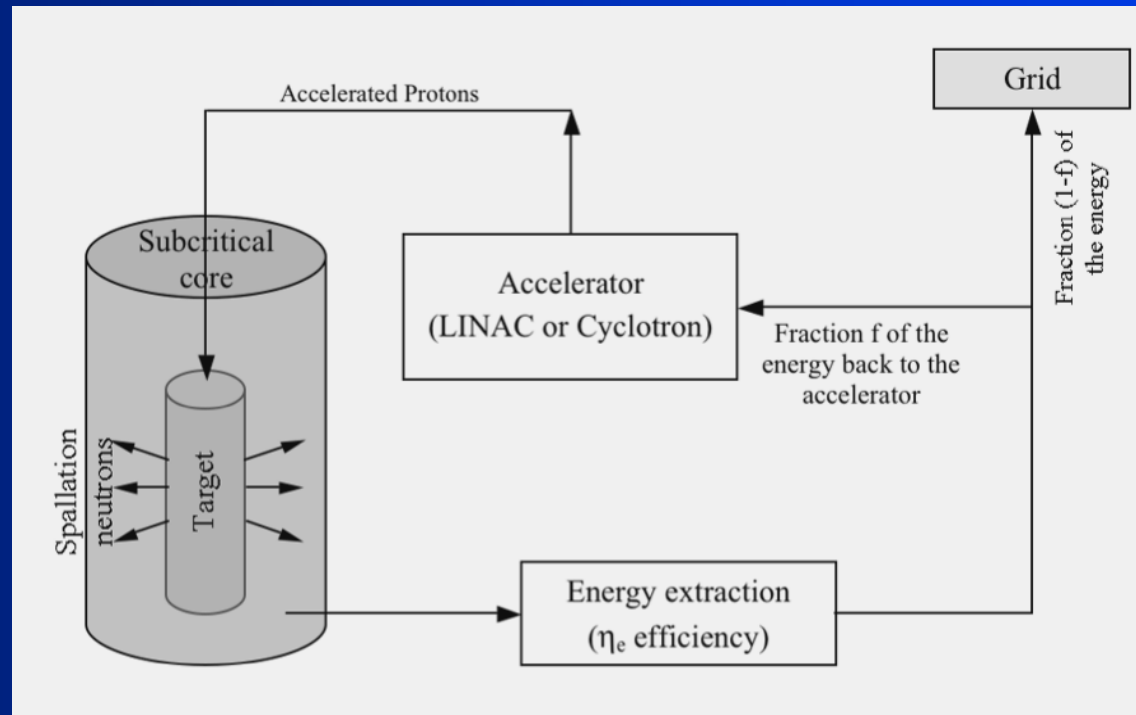


fulgt av ekstrahering eller direkte brenning av ${}^{233}\text{U}$



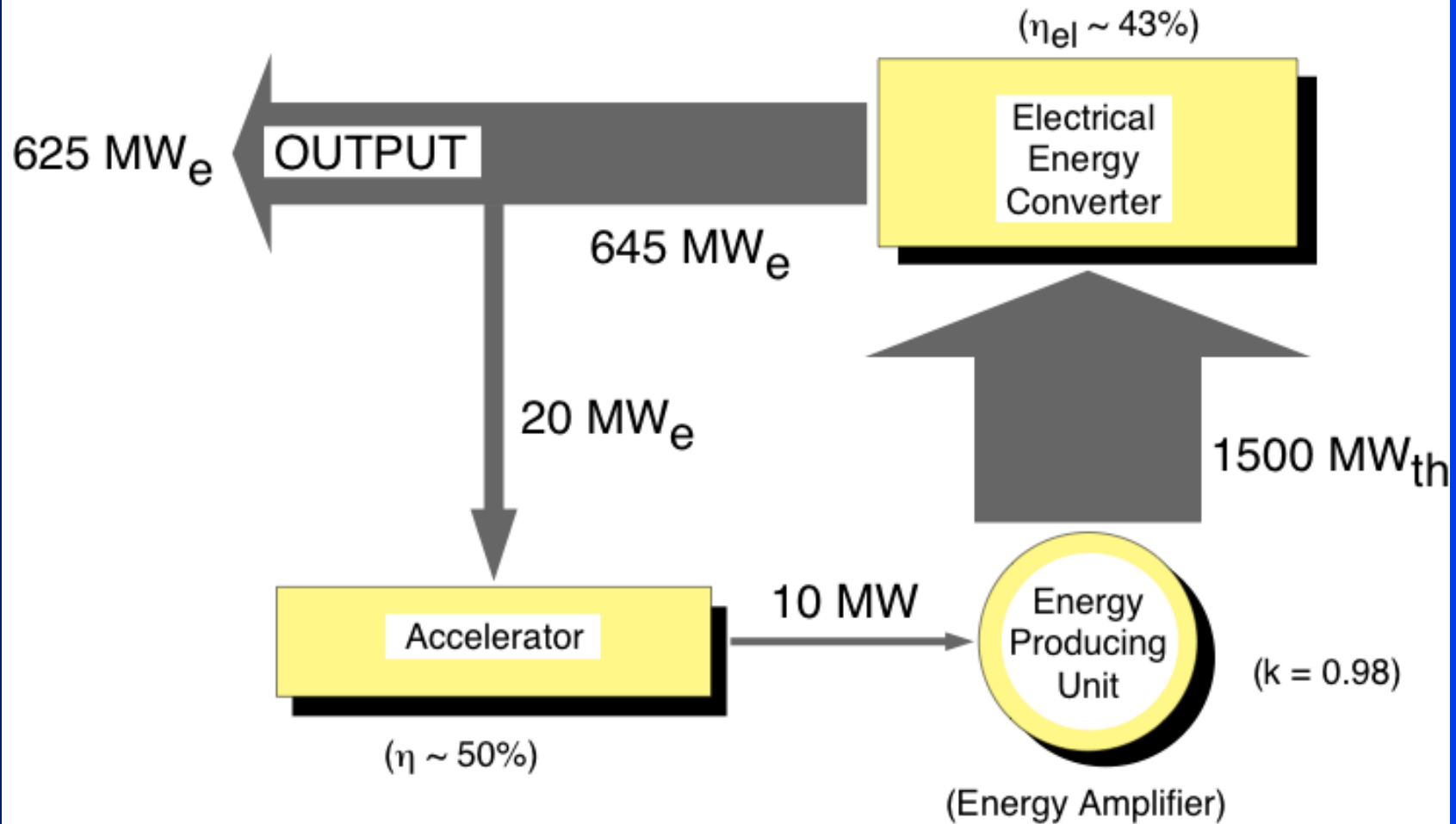
ADS - prinsipp:

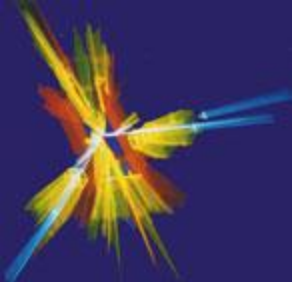
Protoner fra en akselerator treffer et blymål der hvert proton produserer et stort antall nøytroner. Hvert av disse nøytronene danner kjedereaksjoner ved fisjon i ^{233}U , og med energiproduksjon mange ganger energien på hvert av de innkommende protonene



En 10 MW stråle med 1 GeV protoner ville gi en total utgangseffekt på ca $1500 \text{ MW}_{\text{th}}$

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





En ADS thoriumreaktor er robust.

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

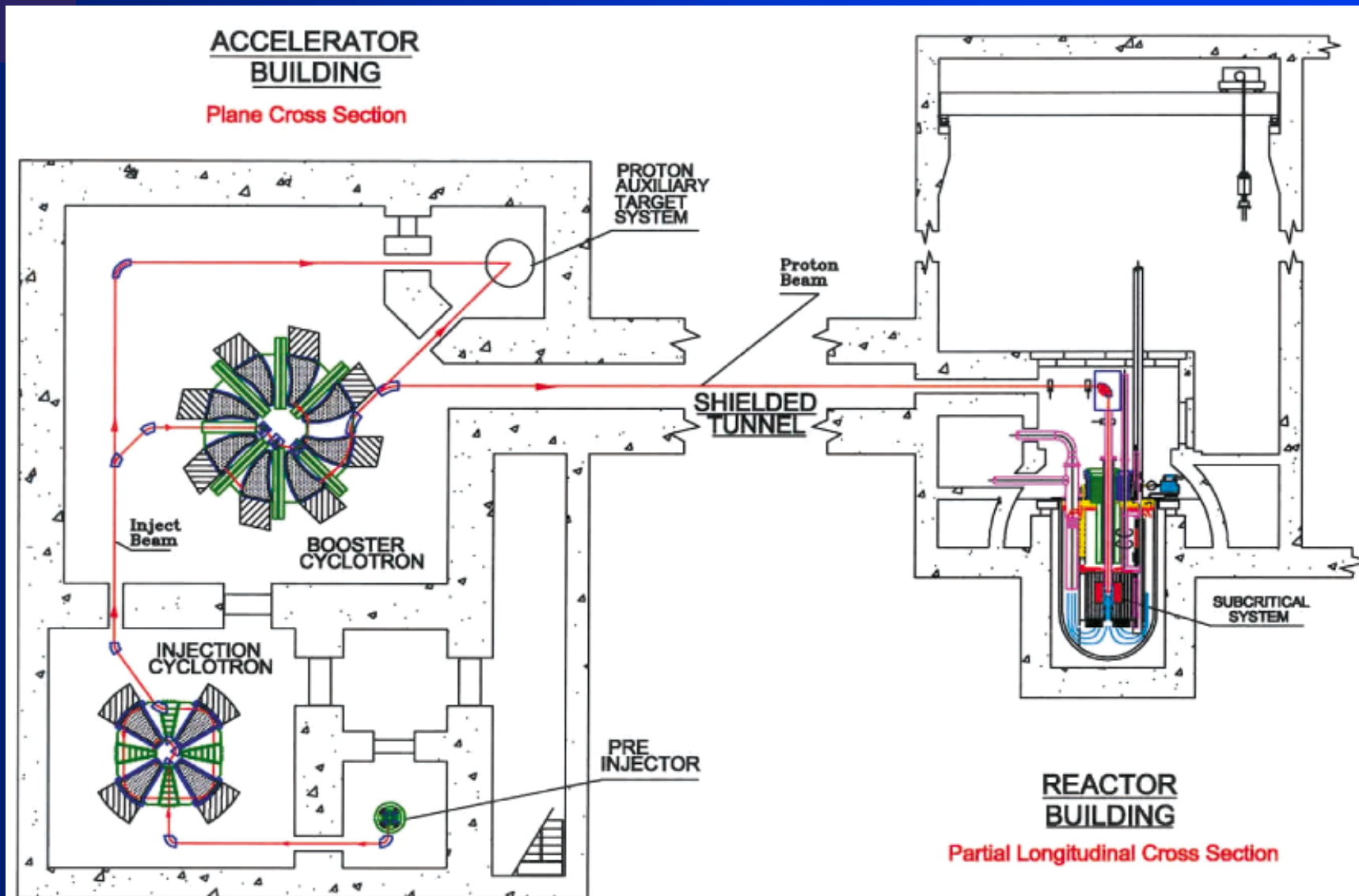
Den produserer praktisk talt ikke eget avfall.

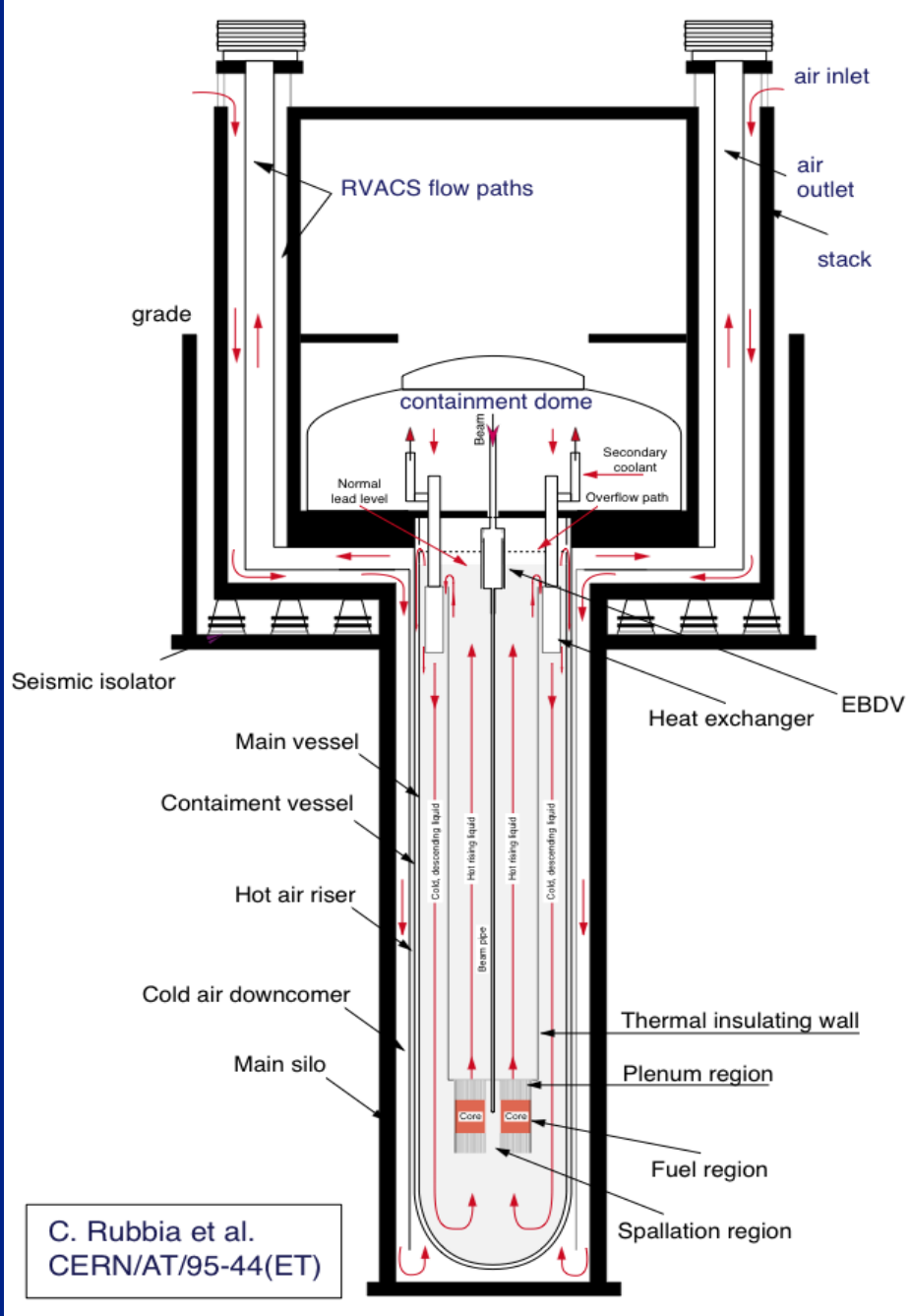
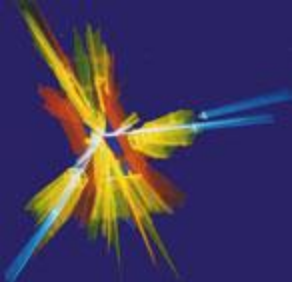
Reprosesseringen av brennstoffet er enklere enn i en kritisk reaktor og gjør det meget vanskelig å utnytte til bombemateriale.

Thoriumreserver for tusener av år

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

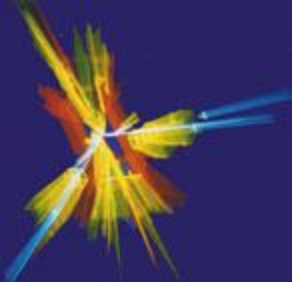
(Fra A. Kadi, CERN)





EA
skisse

fra
C. Rubbia



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.

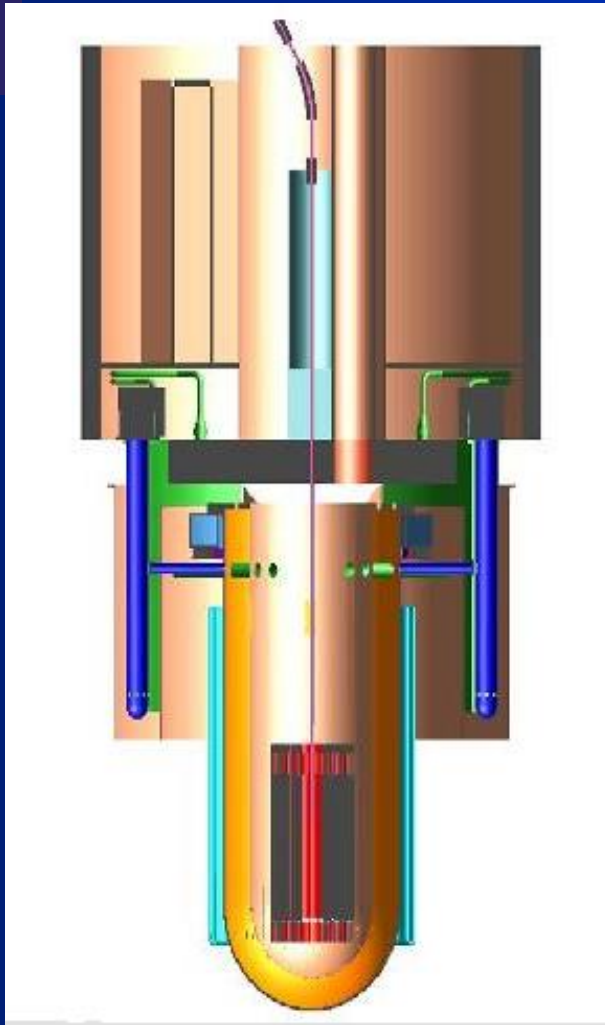
Syklotroner klarer strømstyrken (10 mA) og kan levere kontinuerlig stråle, men klarer ikke partikkelenergien 1 GeV

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

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

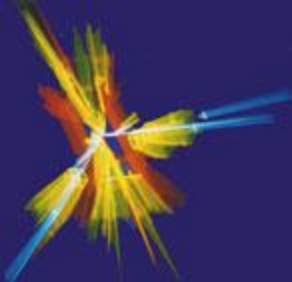
Ny akseleratorutvikling (synkrotroner) med flere injektorer er på gang

<http://www.thorea.org/publications/ThoreaReportFinal.pdf>



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

<http://www.akersolutions.com/Internet/IndustriesAndServices/Nuclear+Services/NovelThoriumReactor.htm>



November 2010:

Aker Solutions' Accelerator Driven Thorium Reactor has won the prestigious Energy Award at this year's IChemE (Institution of Chemical Engineers) Innovations and Excellence Awards.

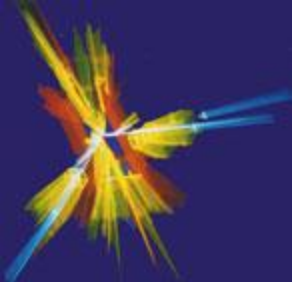
The Energy Award recognizes the best project or process to demonstrate innovation in renewable energy, alternative energy sources, efficient energy use or the development of energy production methods that reduce energy and water intensity.

Desember 2010:

en del av Aker solution som bl.a. inneholdt dette prosjektet solgt til Jacobs Engineering, USA

MEN i disse dager er Thor Energi og Scatec i ferd med å teste thoriumstaver i Haldenreaktoren.

Så Norge er fortsatt med, **men i meget liten målestokk.**



Norge ville ha muligheten til å spille en betydelig rolle som eksportør av elektrisk kraft fra:

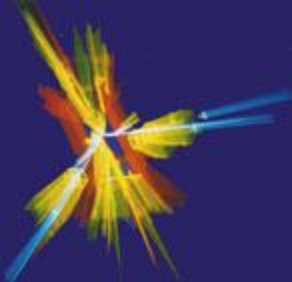
vannkraft,
vindkraft og
thoriumbasert kjernekraft

og som eksportør av teknologi i forbindelse med:

vindturbiner til havs

og i forbindelse med
thoriumbaserte kjernekraftverk

MEN da må det satses fra nå av
mens vi fortsatt har en solid økonomi



Allerede mye akkumulert erfaring med bruk av thorium og industriell produksjon av thoriumbrensel,

Så hvorfor er ikke thoriumbrensel allerede i bruk overalt?

Ting er i forandring: se for eksempel:

<http://www.itheo.org/>

<http://www.ithec.org> og

<http://indico.cern.ch/event/thec13>

OG IKKE MINST:

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, Kurtchatov 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 Lillestol, 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

Organized by iTheC, www.ithec.org, in collaboration with iTheEO, www.itheo.org

