

## Kernekraft – Brændselskredsløbet.

Energien i en kernereaktor kommer fra omdannelse af atomkernemasse, vi kender Einsteins energi-masse ækvivalens:  $E = m \cdot c^2$ .

Der er altså IKKE tale om en forbrænding af C, derfor ingen CO<sub>2</sub> til atmosfæren.

”Brændslet” i kernereaktoren er oftest en blanding af 2 radioaktive Uran isotoper U-235 og U-238. Brændselsprocessen er ofte cirkulær, måske endda dobbelt cirkulær i fremtiden.

**Front End kæden** er kæden før ”brændslet” når reaktoren, altså fra minedrift til reaktor.

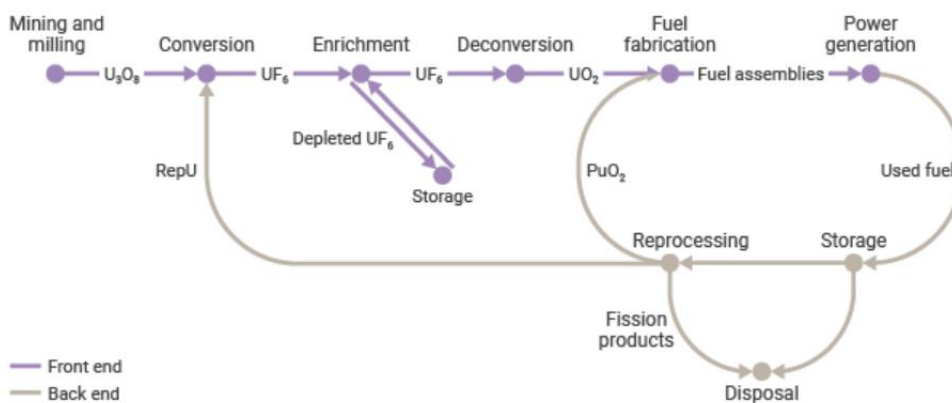


Fig. 1 Nuclear Fuel Cycle ("kerne brændsel cyklus") NFC. Kilde: <https://world-nuclear.org/>

Bemærk at den cirkulære oparbejdning foregår ved, at nyt ”brændsel” kan suppleres med restprodukter fra kernereaktionen f.eks.  $PuO_2$  til såkaldt MOX ”brændsel”.

Det bemærkes også, at Uran er bundet som oxid i jorden, og at ”brændslet” undergår flere trin inden Urandioxid som pulver bearbejdes til ”piller og stave” der kan monteres i reaktoren.

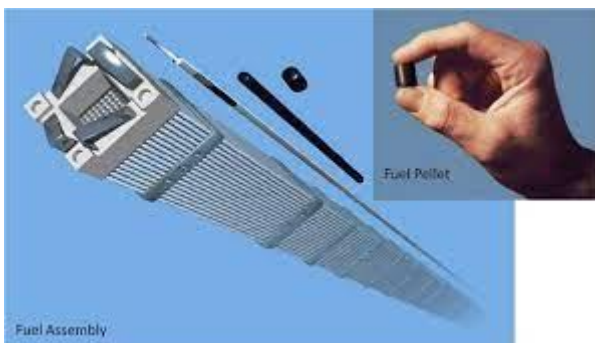


Fig. 2 Nuclear Fuel pellets to rods ("brændsel" stave). Kilde: <https://nuclear.duke-energy.com/>

Undervejs i forarbejdningsprocessen skabes Uranhexafluorid, som er produktet der beriges, hvilket betyder, at mængden af den Uran isotop (U-235) der kan spaltes og frigive energi, øges fra 0,7 % i jorden til ca. 3,5% i "brændslet".

Bemærk at det alene er de 3,5% der kan omdannes til energi.

Konverteringsprocessen foregår industrielt.

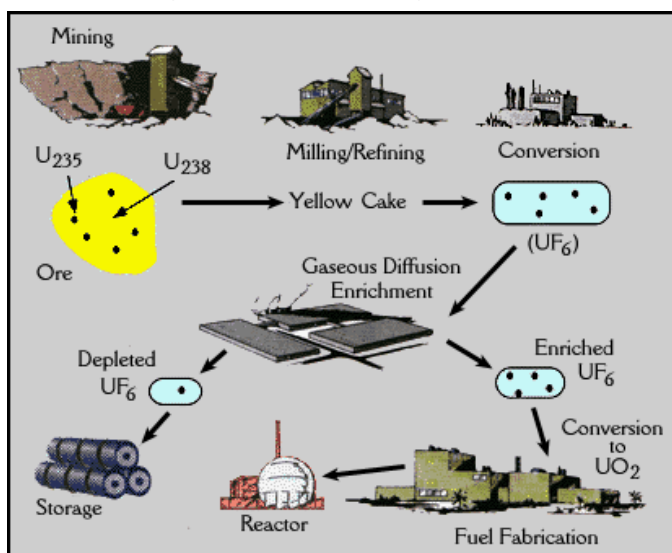


Fig. 3 Nuclear Fuel Processes ("kerne brændsel fremstilling"). Kilde: <https://web.evs.anl.gov>

Bemærk, at der er tale om fabrikation og konvertering som indgår i en industriel sammenhæng og som er forudsætningen for drift af kernekraftværker.

I "front end" af brændselskredsløbet er produktet således sektioner af rør fyldt med urandioxid UO<sub>2</sub> piller, som er radioaktivt "brændsel".

Bemærk ligeledes at restproduktet "Depleted UF<sub>6</sub>" som hovedsageligt består af isotopen U-238, klassificeres som low level nuclear waste, med en aktivitet lige over baggrundsstrålingen. Kilde: <https://www.iaea.org/topics/spent-fuel-management/depleted-uranium>

Uran 238 er et metal med en høj densitet. Det lagres eller benyttes til forskellige formål.

**Back End kæden** omfatter processerne, efter at "brændslet" har undergået kernereaktion, dvs. er spaltet og har frigivet termisk energi. Restbrændslet recirkuleres som MOX eller genbearbejdes og indgår i andet loop og genberiges.

Nu betragtes 1 ton beriget brændsel, idet fig. 4 viser den kernefysiske proces og fig. 5 viser materialeregnskabet "før og efter" over en 3-årig periode med 1 ton "brændsel".

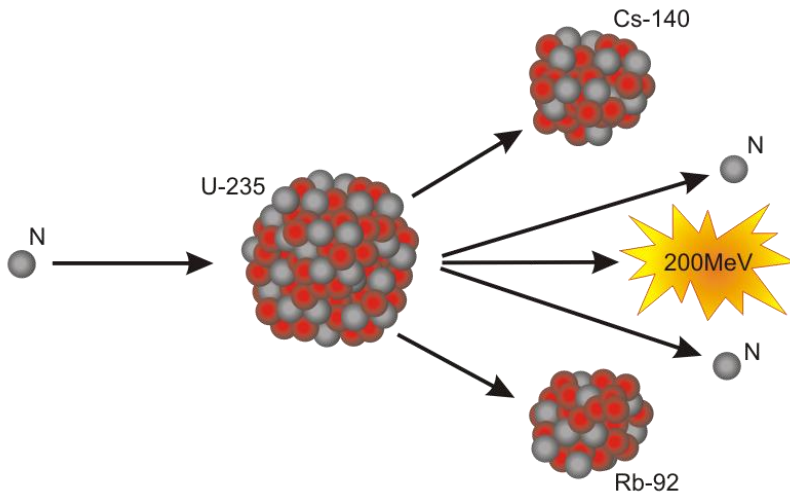


Fig. 4 I kernereaktoren spaltes U-235 isotopen ved optagelse af en neutron.

Kilde: <https://www.nuklearesicherheit.de/en/science/physics/nuclear-fission/>

Bemærk at kerneprocessen holdes i gang ved at kontrollere nettoantallet af neutroner. Og bemærk, at 1 gram "brændsel" med 3,5% U-235, indeholder ca.  $10^{20}$  kerner.

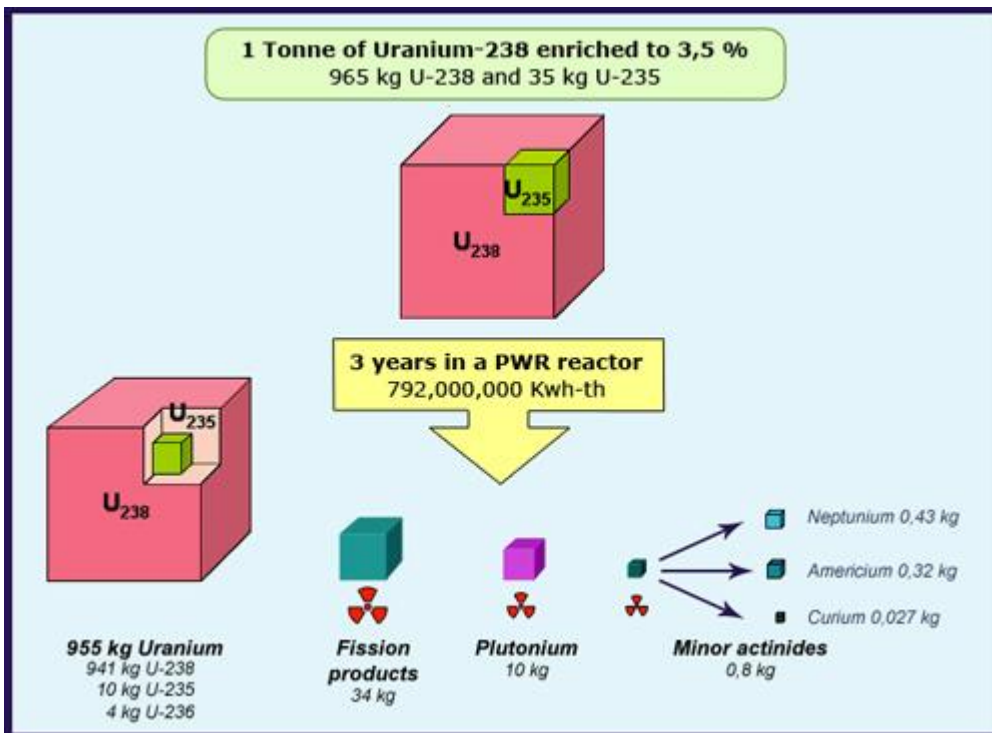


Fig. 5 Omformning af 1 ton U-235. Kilde: [https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Reactor\\_Spent\\_Fuel.htm](https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Reactor_Spent_Fuel.htm)

Figuren viser, at 1 ton "brændsel" efter endt periode i reaktoren har afgivet 792 mio. kWh i termisk varme. Det svarer til ca. 265 mio. kWh eller 0,265 TWh elektrisk energi.

Bemærk at hovedparten er U-238 og kun under 45 kg er reelle bi-produkter (Nuclear waste), hvoraf ca. 10 kg i form af Pu-239 er genanvendeligt og 35 kg er reelt affald.

Eksemplet tager udgangspunkt i Generation II kernekraftværker.

**Samlet set** vil det cirkulære materiale flow foregå som dobbelt cirkulært genbrug.

Det er beregnet i et casestudy, der vurderer 38 Generation III reaktors output.

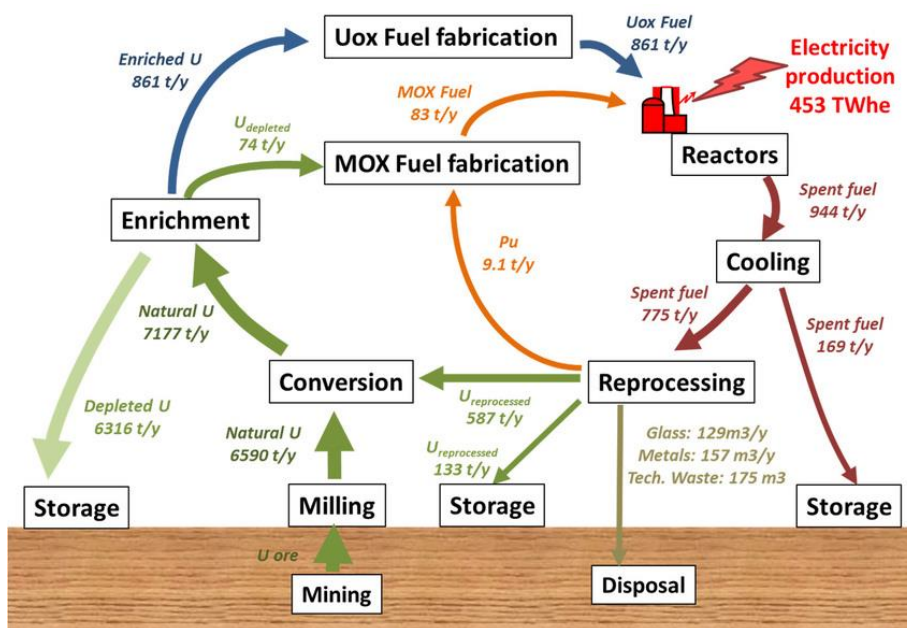


Fig. 6 viser det kvantificerede materiale flow før og efter en årlig elektrisk energiproduktion på 453 TWh. Altså et stort antal kernekraftværker. Kilde:

[https://www.researchgate.net/publication/319916884\\_Assessment\\_of\\_the\\_Anticipated\\_Environmental\\_Footprint\\_of\\_Future\\_Nuclear\\_Energy\\_Systems\\_Evidence\\_of\\_the\\_Beneficial\\_Effect\\_of\\_Extensive\\_Recycling](https://www.researchgate.net/publication/319916884_Assessment_of_the_Anticipated_Environmental_Footprint_of_Future_Nuclear_Energy_Systems_Evidence_of_the_Beneficial_Effect_of_Extensive_Recycling)

Udgangspunktet er en "Burn-Up-Rate" (BUR) på 55 GWd/ton U fra den seneste 3. generation European Pressurized (Water) Reactor. Nuværende gennemsnitlige BUR er på 40 GWd/ton U. Nyttetvirkningen antages at være 36% og tilgængelighedsfaktoren 85%.

GWd står for en energimængde på GWdag, 1 GWd svarer til 24 mio. kWh.

Bemærk at af de 6590 ton naturlig Uran, deponeres 6316 ton mindre radioaktivt materiale end naturlig Uran. Resten er 169 ton brugt brændsel, 133 ton ikke- genbrugeligt "restprodukt" og 461 m<sup>3</sup> "skrald".

Skaleres Danmarks kommende el-energi behov på 80 TWh årligt vil der ved 50% dækning iflg. denne case være ca. 15 ton brugt brændsel årligt til deponi.

Med en densitet på 11 ton/m<sup>3</sup> svarer brugt brændsel til 1,5 m<sup>3</sup>. En 20-fods container indeholder 33 m<sup>3</sup>.

## Afsluttende bemærkninger.

- Ovenstående betragtninger er alene sat i forhold til produktion af elektrisk energi, ikke genbrug af termisk energi som sker i kraftvarmeværker til fjernvarme.
- Der forskes i genbrug af de tømte reserver af U-238 tilovers fra berigelsesprocessen fra tidligere tider.
- Fast Breeder reaktorer (FBR) eller fast neutron reaktorer FNR er på vej. Den teknologi vil kunne oparbejde en endnu større mængde brændsel og derved reducere overskuds brændsel yderligere, ja endda kunne benytte overskudsbrændsel fra nuværende reaktorer. De første kommercielle er på vej inden 2030, og Frankrig forventer at alle nye reaktorer er dels EPR og derefter FNR.
- Kendt Generation II teknologi indsættes i øjeblikket mange steder, ligesom Gen III nu bygges flere steder. Gen IV FNR med salt – centrale og decentrale – forventes klar i slut 2020'erne.
- Højtemperatur reaktorer (Gen. IV) vil udover et meget højt output pr. kg uran, have den fordel at kunne indsættes direkte i produktionsprocesser som Power-to-X, cementproduktion og brintproduktion alene ved brug af højtemperatur damp, og altså ikke ved el-produktion.

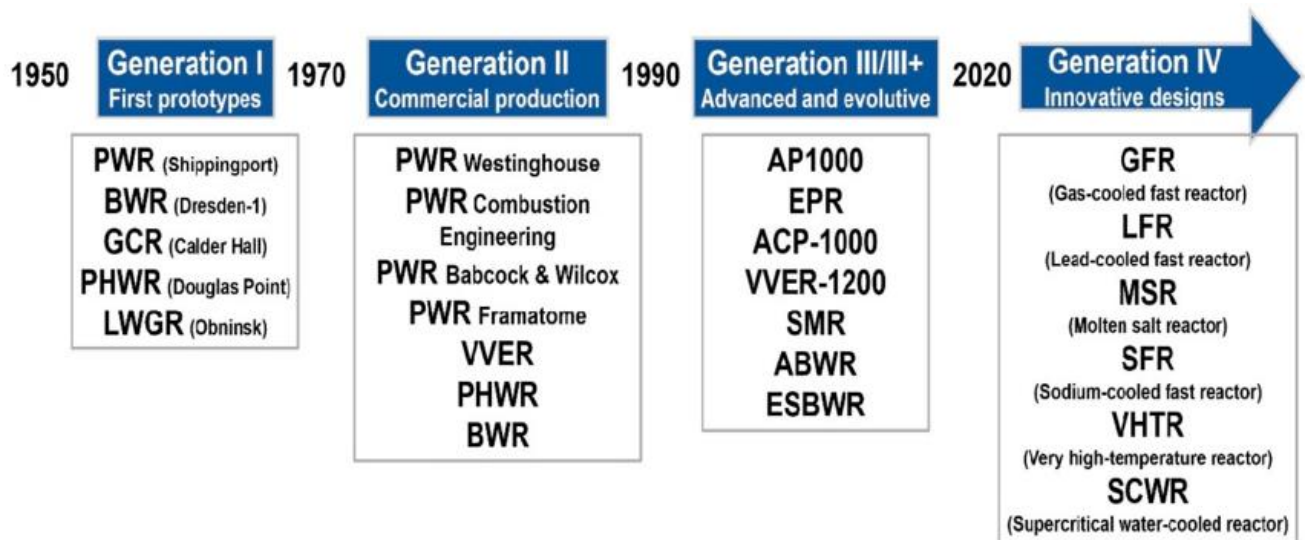


Fig. 7 Oversigt over kernereaktor teknologi.

Kilde: [https://www.researchgate.net/figure/Generations-of-nuclear-reactors-throughout-the-past-seventy-years\\_fig1\\_342527409](https://www.researchgate.net/figure/Generations-of-nuclear-reactors-throughout-the-past-seventy-years_fig1_342527409)