TEKST NR 30 1980

OLUF DANIELSEN

FUSIONSENERGIEN---

ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION

TEKSTER fra

IMFUFA ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER
INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

TEKSTER fra IMFUFA Roskilde universitetscenter.

1/78 "TANKER OM EN PRAKSIS" - et matematikprojekt
Anne Jensen, Marianne Kesselhahn, Lena Lindenskov og Nicolai Lomholt.
Vejleder: Anders Madsen.

2/78 "OPTIMERING" - Menneskets forøgede beherskelsesmuligheder af natur og samfund.
Projektrapport af Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen, Gert Kreinøe og Peter H. Lassen. Vejleder: Bernhelm Booss

3/78 "Opgavesamling", breddekursus i fysik.
Lasse Rasmussen, Aage Bonde Kræmmer, Jens Højgaard Jensen.

4/78 "Tre essays" - om matematikundervisning, matematiklæreruddannelsen og videnskabsrindalismen.
Mogens Niss.

5/78 "BIBLIOGRAFISK VEJLEDNING til studiet af DEN MODERNE FYSIKS HISTORIE"
Helge Kragh.

6/78 "Nogle artikler og debatindlæg om - læreruddannelse og undervisning i fysik, og - de naturvidenskabelige fags situation efter studenteroprøret"
Karin Beyer, Jens Højgaard Jensen, Bent C. Jørgensen.

7/78 "Matematikkens forhold til samfundsøkonomien"
B.V. Gnedenko.

8/78 "DYNAMIK OG DIAGRAMMER". Introduktion til energy-bond-graph formalismen.
Peder Voetmann Christiansen.

9/78 "OM PRAKSIS' INDFLYDELSE PÅ MATEMATIKKENS UDVIKLING"
Motiver til Kepler's: "Nova Stereometria Doliorum Vinarioum"
Projektrapport af Lasse Rasmussen.
Vejleder: Anders Madsen.

10/79 "TERMODYNAMIK I GYMNASIET"
Projektrapport af Jan Christensen og Jeanne Mortensen
Vejledere: Karin Beyer og Peder Voetmann Christiansen.

11/79 "STATISTISKE MATERIALER"
red. Jørgen Larsen.

12/79 "Lineære differentialligninger og differentialligningssystemer"
Mogens Brun Heefelt.

13/79 "CAVENDISH'S FORSØG I GYMNASIET". Projektrapport af Gert Kreinøe.
Vejleder: Albert Chr. Paulsen.

14/79 "Books about Mathematics: History, Philosophy, Education, Models, System Theory, and Works of Reference etc. A Bibliography".
Else Høyrup.

15/79 "STRUKTUREL STABILITET OG KATASTROFER i systemer i og udenfor termodynamisk ligevægt". Specialeopgave af Leif S. Striegler.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.

../.

FUSIONSENERGIEN ---
ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION.

Oluf Danielsen,
Roskilde Universitetscenter,
februar 198o.

Et sammendrag -
og nogle spørgsmål.

Fusionsforskningen har ca. 1/4 århundrede på bagen. Ressourcemæssigt er dens perspektiv: rigeligt med energi til alle i fremtiden. Endnu tilbagestår det endelige og overbevisende videnskabelige gennembrud; men punktet forventes at være nået i løbet af 198o-erne.

Men hvordan vil en energiproducerende fusionsreaktor påvirke omgivelserne ? Håndteringen af store mængder radioaktive materialer udgør en potentiel fare for miljøet. Kæmpemagnetsystemerne påvirker det daglige arbejdsmiljø. Fusionskraften har sit affaldsproblem. Fusionskraften vil forstærke udviklingen med stadig større kraftværksenheder. I laserudgaven er fusionskraften stærkt i familie med den militære udnyttelse: endnu mere avancerede brintbomber er perspektivet. Danmark er lille i forhold til fusionskraften. Det betyder nye teknologisk-økonomisk dikterede bindinger på dansk energipolitik.

Det overordnede spørgsmål er dog: Kan samfundene styre adgangen til de ubegrænsede energimængder ? Vil energiforbruget blot fare deruda'langs vækstkurverne ? Det er billedligt talt som at lukke en alkoholiker ind på Tuborgs lager og bede ham holde styr på sit ølforbrug. Det er på tide at begynde at diskutere fusionskraftens pres på miljø, mennesker og samfund.

INDHOLD.

Atomkernernes bindingsenergi 1
De energiproducerende fusionsprocesser 3
Fusionsplasmaets energibalance 5
Brændselsressourcerne. 7
Udviklingen af fusionssystemerne igennem tiden . 12
Fusionsreaktoranlæggene. 13
Radioaktivitet i fusionsreaktorer. 21
Miljøpåvirkninger ved daglig drift 24
Uheld ved fusionsreaktorer 26
Andre fusionsreaktorsystemer 27
Fusionsenergiens gennembrud 32
Fusionskraft - BIG technology. 36
Fusionskraft i dansk energi- og industripolitik. 37
Fusionsenergien i international sammenhæng . . . 39
Atomkraftsamfundet 40
Referencer 42
Note om sammenligning af fissions- og fusions-
reaktorers miljøbelastning 45
Appendices 46

Overall, I hope that the environmental effects of Fusion Power will be readily accepted; but that will not occur unless we in the fusion community are alert to the public concern and diligent in developing the engineering capability and biological effects data which will allow us to design and operate power fusion reactors with minimum threat, and prove to the public that we have done so.

Edwin E. Kintner,
Director, Division of Magnetic Fusion Energy
United States Energy Research and Development Administration,
Washington D.C.

in Proceedings of the 9th Symposium on Fusion Technology,
Commission of the European Communities 1976.

Atomkerneenergi kan udvindes på to forskellige måder. Der frigøres fissionsenergi, når de tungeste grundstoffers atomkerner spaltes. Ved sammensmeltning af de letteste grundstoffers atomkerner frigøres der fusionsenergi.

Atomkernernes bindingsenergi.

Grundstofferne er opbygget af atomer. Hvert atom består af en kerne og et elektronsystem. Atomkernen er opbygget af positivt, elektrisk ladede protoner og elektrisk neutrale neutroner. Elektronerne er negativt, elektrisk ladede. Antallet af elektroner og protoner er det samme i et neutralt atom. Antallet af protoner bestemmer, hvilket grundstof der er tale om. Der forekommer forskellige varianter af det samme grundstof. Forskellen kommer frem ved at neutrontallet varierer. De forskellige varianter af et grundstof kaldes isotoper. Et grundstof kan symbolsk skrives som X^A_Z. Her er z atomnummeret; det er lig antallet af protoner. A er massetallet. Det er antallet af protoner og neutroner. Neutronernes antal er derfor: N = A - Z. For X indsættes grundstoffernes kemiske symboler. U for uran, H for brint, He for helium osv.

Atomer kan reagere på to måder. Reaktioner, der involverer elektronsystemet, er kemiske reaktioner. Reaktioner, hvor protoner og neutroner reagerer, kaldes for kernereaktioner. Elektriske ladninger med modsat fortegn tiltrækker hinanden. Det er de elektriske kræfter - Coulombkræfterne - der fastholder elektronsystemet omkring kernen. Kernen selv, der består af positivt ladede protoner og elektrisk neutrale neutroner, holdes sammen af kernekræfterne. Disse kræfter er så stærke, at de kan holde sammen på positivt ladede protoner, der frastøder hinanden elektrisk. Den energi, som holder kernepartiklerne sammen, kaldes bindingsenergien. Ifølge Einstein er masse og energi proportionale størrelser. Når der ved en kernereaktion frigøres energi, betyder det altså, at de indgående kerners masser har ændret sig. Enhver stabil

atomkerne må have en masse, M, der er mindre end summen af masserne af de Z protoner og N neutroner, hvoraf den er opbygget. Forskellen er massedefekten, ΔM

$$\Delta M = \left(Z \cdot M_p + (A-Z) \cdot M_N \right) - M$$

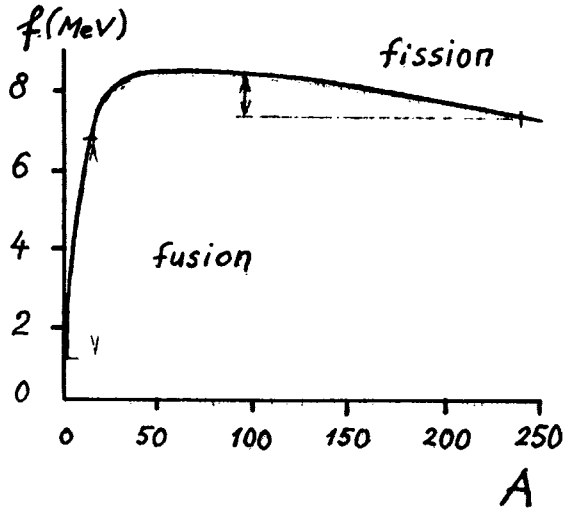
M_N er neutronens masse; M_p er protonens masse. Den frigjorte energimængde, ΔE svarende til massedefekten er

$$\Delta E = \Delta M \cdot c^2$$

hvor c er lystes hastighed; Bindingsenergien pr kernepartikel er

$$f = \frac{Z \cdot M_p + (A-Z) \cdot M_N - M}{A} c^2$$

Som funktion af massetallet A får vi en kurve f(A). Det er en empirisk kurve, der har et bredt maksimum omkring A = 6o. I området fra A = 4o - 1oo er kernepartiklerne altså stærkest bundet i kernerne. Jo større en kernes bindingsenergi pr kernepartikel er, jo mere stabil er den. Det betyder, at der skal tilføres en stor energimængde for at erstatte den massedefekt, der svarer til at opsplitte kernen i frie kernepartikler.



Af kurven fremgår det, at der er principielt to forskellige måder at frigøre atomkerneenergi på. Enten ved at spalte en tung atomkerne, som f.eks. uran i to eller flere middeltunge atomkerner(fission) eller ved at opbygge en atomkerne af de letteste kerner, som f.eks. brint og helium(fusion).

De energiproducerende fusionsprocesser.

Fusionsprocesserne foregår på solen. Brintkerner smeltes sammen til heliumkerner ved de meget høje temperaturer. Noget lignende sker i brintbomben. Her opnås de høje temperaturer, der er nødvendige for at reaktionerne kan foregå, ved eksplosion af en fissionsbombe(atombombe) bestående enten af uran eller plutonium. I fusionsreaktoren skal de energiproducerende processer foregå både selvgenererende og kontrolleret. At de skal være selvgenererende betyder, at der skal komme et energioverskud ud af det, når de forløber. I laboratoriet kan man i dag etablere fusionsprocesser ved at accelerere de indgående kerner så meget, at de reagerer ved sammenstød. Nettoresultatet er imidlertid, at energien brugt til at accelerere kernen overstiger energiudbyttet ved fusionsprocesserne. Det koster energi at få processerne til at forløbe.

På solen er omstændighederne med den høje temperatur sådan, at fusionsprocesserne her er selvgenererende. Anderledes sagt: her brænder fusionsbrændslet(brinten) af sig selv med stor energioverskud til følge. I brintbomben forløber processerne også. Men de forløber ukontrolleret og medfører en meget kraftig eksplosion. I fusionsreaktoren er kravet altså, at processerne skal forløbe med energioverskud på en kontrolleret måde.

Solprocesserne er

$$p_1^1 + p_1^1 \rightarrow D_1^2 + e_1^0 + \gamma$$

$$D_1^2 + p_1^1 \rightarrow He_2^3 + \gamma$$

$$He_2^3 + He_2^3 \rightarrow He_2^4 + p_1^1 + p_1^1$$

To brintkerner(protoner) p_1^1 smelter sammen til deuterium D_1^2(tung brint). Som biprodukt dannes positroner, e_1^0 der er partikler med masse som elektronen, men med en positiv ladning og neutrinoer, ν . Det er partikler, der bevæger sig med lyshastigheden; de har ingen hvilemasse og er uladede. Den dannede deuteriumkerne reagerer videre med endnu en brintkerne. Helium-3 bliver resultatet. Desuden frembringes der elektromagnetisk stråling, γ . Endelig reagerer to heliumkerner, He_2^3 med hinanden. Der dannes He_2^4, der er den stabile heliumisotop, og flere protoner. Bruttoresultatet er altså, at der dannes heliumkerner af brintkernerne. Desuden udsendes der lys(elektromagnetisk stråling) og neutrinoer. Positronerne omdannes ved sammenstød med elektroner til elektromagnetisk stråling.

Fusionsreaktorprocesserne er, 1)

$$D_1^2 + D_1^2 \longrightarrow (T_1^3 + 1{,}01\,MeV) + (p_1^1 + 3{,}03\,MeV) \qquad (1)$$

$$D_1^2 + D_1^2 \longrightarrow (He_2^3 + 0{,}82\,MeV) + (n_0^1 + 2{,}46\,MeV) \qquad (2)$$

$$D_1^2 + T_1^3 \longrightarrow (He_2^4 + 3{,}54\,MeV) + (n_0^1 + 14{,}06\,MeV) \qquad (3)$$

$$D_1^2 + He_2^3 \longrightarrow (He_2^4 + 3{,}67\,MeV) + (p_1^1 + 14{,}67\,MeV) \qquad (4)$$

Deuterium, D_1^2 forbrændes efter reaktionerne (1) og (2). Der dannes tritium, T_1^3 og helium-3, He_2^3. Desuden bemærkes det, at den ene mulige reaktion giver ladede partikler, protoner, medens den anden giver neutroner. Den dannede tritium og helium-3 brænder med deuterium. Herved dannes der helium-4, He_2^4 samt flere protoner og neutroner. Den først fungerende fusionsreaktor vil blive en deuterium-tritium (D-T) reaktor. Det hænger sammen med, at det er lettere at opnå de fysiske tilstande, der er nødvendige for reaktion, i denne brændselsblanding end i den rene deuterium-blanding. Fusion kan også opnås med de lidt tungere grundstoffer lithium, beryllium og bor. Det er grundstofferne nr. 3,4 og 5. Deres anvendelse i fusionsreaktorer ligger imidlertid "ude bag" brint og heliums anvendelse.

Fusionsplasmaets energibalance.

For at få fusionsprocesserne til at forløbe skal de foregå ved høj temperatur.Materiens tilstand kan betragtes som en balance mellem de bindingskræfter, der holder stoffernes atomer sammen, og atomernes bevægelse forårsaget af varmetilstanden. Når temperaturen af et fast stof øges, bliver varmebevægelserne stærkere. Efterhånden bliver de så intensive, at bindingskræfterne ikke længere kan holde sammen på det faste stof. Det smelter og går på væskeform. Ved yderligere opvarmning begynder væsken at koge. Den overgår til gasform. Atomerne kan nu bevæge sig frit imellem hinanden med vilkårlige afstande, der kun er bestemt af det rum, gassen opholder sig i. En fortsat opvarmning fører til, at gaspartiklerne får så store hastigheder, at de ved kollissioner med hinanden slås i stykker i de elektriske bestanddele - de ioniseres. Der dannes et plasma, som består af lige så mange positivt ladede ioner som negativt ladede elektroner. Varmes et plasma op til nogle millioner grader kolliderer ionerne så voldsomt med hinanden, at atomkernerne begynder at reagere med hinanden. Kerneomdannelsesprocesser begynder at finde sted.

For at et plasma kan reagere - brænde - skal temperaturen altså være høj. Antændelsestemperaturen,T er forskellig for forskellige plasmaer. For deuterium-tritium plasmaet, (D-T plasmaet) ligger den på ca. 4o millioner grader. Det rene deuterium plasma(D-D plasmaet) har en antændelsestemperatur på ca. 4oo millioner grader, altså lo gange højere end for D-T plasmaet. Det er én af grundene til, at deuterium-tritium foretrækkes i den første fusionsreaktor. Antændelsestemperaturen ligger lavest for dette plasma.

Antændelsestemperaturen eller selvgenerationspunktet bestemmes af reaktorens energibalance. Den ved kernereaktionerne frigjorte energi skal dække både den udtagne energi og alle energitabene. Den udtagne energi er den energi, som kan anvendes til givne, praktiske formål. Den kan typisk foreligge som elektricitet. Energitabene består af reaktor-konstruktionsafhængige tab og tab ved udstråling

fra plasmaet. De konstruktionsafhængige tab er varmetab ved energiomdannelsesprocesser og tab forårsaget af manglende stabilitet af plasmaet.Når de positive ioner og de negative elektroner rammer hinanden i plasmaet bremses de. Ved sådanne ion-ion, ion-elektron og elektron-elektron sammenstød tabes der energi. Den udsendes som elektromagnetisk stråling i røntgenområdet og i det ultraviolette område. Den kaldes med en samlet betegnelse for bremsestråling. Andre og mindre betydende tab fremkommer ved cyklotronstråling. Den eksisterer på grund af de reagerende plasmapartiklers spiralbevægelser langs de magnetfeltlinier, som holder plasmaet sammen. Antændelsestemperaturen er den temperatur i plasmaet, hvor plasmareaktionernes energifrigørelse balancerer med strålingstabene. Det er en nødvendig betingelse, at temperaturen i plasmaet bringes op over antændelsestemperaturen; men det er ikke en tilstrækkelig betingelse. Problemet består i at holde plasmaet samlet længe nok til at reaktionerne kan foregå.

Men hvordan holde et så varmt plasma indespærret i et reaktionskammer ? Alle metaller er for længst smeltet ved så høje temperaturer. Et magnetfelt påvirker en strøm af ladede partikler. Da et plasma består af ladede partikler, skal fusionsreaktoren ved hjælp af et passende konstrueret magnetfelt holde sammen på dem længe nok til at fusioneringen kan finde sted. Tætheden af plasmaet, dvs. antallet af positive ioner pr volumenenhed og den tid - sammenholdstiden - det er nødvendigt at holde plasmaet sammen, er afgørende for, om fusionsprocesserne kan foregå med energioverskud. En fysiker ved navn Lawson har vist, at det er produktet af tætheden,n og sammenholdstiden, t, der er afgørende for, om plasmaet brænder med energioverskud.

> "Når temperaturen T overskrides indebærer dette nødvendigvis ikke, at en selvgenererende reaktion kan starte i plasmaet. En udstrømning af varm plasma, som kommer i kontakt med reaktionskammerets omgivende vægge, påvirker nemlig kraftigt energibalancen. Dette indebærer, at der findes en mindsteværdi for produktet af plasmatætheden n og indeslutningstiden t, som må overskrides

for at en tabt partikelmængde under sit ophold i reaktionsområdet kan nå at bidrage til reaktionerne med en energimængde, der svarer til dens egen bevægelsesenergi." 2)

For et deuterium-tritium plasma er Lawson-kriteriet

$$n \cdot t \geqq 10^{20} \text{ ioner} \cdot \text{sek} / m^3$$

For det rene deuteriumplasma er det tilsvarende produkt af tæthed og tid

$$n \cdot t \geqq 10^{21} \text{ ioner} \cdot \text{sek} / m^3$$

I begge tilfælde skal produktet være opfyldt ved mindst antændelsestemperaturen. Det lavere tal, Lawson-kriteriet har for deuterium-tritium plasmaet sammenholdt med det rene deuteriumplasma gør, at D-T plasmaet foretrækkes i de første fusionsreaktorer.

Brændselsressourcerne.

Deuterium: Tung brint, D_1^2 er en naturligt forekommende isotop af brint. I naturlig brint er der o,o15% tung brint. Det betyder, at havenes vand indeholder brændslet deuterium. Verdenshavene rummer $1{,}37 \cdot 10^9$ km^3 vand. Det vejer $1{,}37 \cdot 10^{18}$ tons, 3). Brint udgør 1/9 af vand: H_2O $(2 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 18)$ Deuteriummængden i verdenshavene er således:

$$m_{Deut} = \frac{1{,}37 \cdot 10^{18}}{9} \cdot \frac{0{,}015}{100} = \underline{2{,}28 \cdot 10^{13} \text{ tons}}$$

Ved fusionering af 1 kg deuterium dannes der en energimængde på $2 \cdot 10^8$ kwh (se appendix 1). Ved fusionering af verdenshavenes deuterium dannes der en energimængde på:

$$2{,}28 \cdot 10^{13} \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^8 \text{ kwh} = \underline{4{,}56 \cdot 10^{24} \text{ kwh}}$$

Omregnes til energimængden 1Q = $2{,}93 \cdot 10^{14}$ kwh svarer den totale fusionsenergi til:

$$\frac{4{,}56}{2{,}93} \cdot 10^{10} \, Q = \underline{1{,}56 \cdot 10^{10} \, Q}$$

Det samlede, årlige energiforbrug i verden var i 197o-ernes slutning af størrelsesordenen o,2 Q. Deuterium i verdenshave-

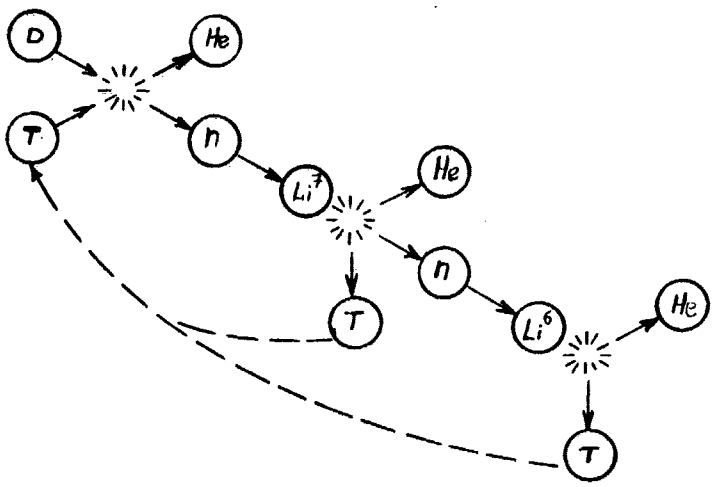
ne vil kunne dække et sådant energiforbrug i

$$\frac{1{,}56}{0{,}2} \cdot 10^{10}\ \text{år} \simeq 10^{11}\ \text{år}$$

Det vil sige i loo ooo ooo ooo år eller med andre ord i loo **milliarder år.** Ressourcemæssigt er deuterium en løsning på energiproblemerne på ubestemt tid. Deuterium er en ubegrænset ressource. Deuterium kan købes på markedet som tungt vand, D_2O. Af dette udvindes deuterium rent ved elektrolyse. På grund af lettilgængeligheden vil prisen på deuterium formodentligt holde sig ret konstant over tiden, 4).

<u>Tritium</u>: Naturligt forekommer den supertunge brintisotop, T_1^3 **så godt** som ikke. Der findes ialt kun ca. lo kg i hele verden fordelt i luften og i vandet. Denne tritium er dannet af den kosmiske stråling i atmosfæren. Det rækker kun til forsyning af en D-T reaktor i ca. én måned, 5). Kunstigt kan tritium fremstilles ud fra lithium ved processerne

$$Li_3^6 + n_0^1 \longrightarrow T_1^3 + He_2^4 + 4{,}8\ MeV$$
$$Li_3^7 + n_0^1 \longrightarrow T_1^3 + n_0^1 + He_2^4 + 2{,}5\ MeV$$



Neutronerne, som produceres ved D-T fusionen, kan forårsage begge Lithium reaktionerne. Der er dog den mulighed, at én enkelt fusionsneutron kan udløse begge processer. Det sker når én fusionsneutron starter Li^7-reaktionen. Denne reaktion producerer selv én neutron yderligere, som så kan inducere Li^6-reaktionen. Sådanne overvejelser har betydning for neutronøkonomien i reaktoren og dermed evnen til at producere tilstrækkeligt tritium til fusionsprocessen. Det skulle være muligt ved hjælp af det anviste skema at skaffe tritium nok til D-T reaktionen, 6).

Lithium: Lithium er en brændselsressource til fusionsreaktorerne; men i modsætning til deuterium er den begrænset. Lithium reserverne i den vestlige verden er blevet opgjort af en kommite nedsat af de amerikanske videnskabs og ingeniørakademier samt af de amerikanske energiforskningsmyndigheder. Kommiteen blev nedsat i 1975. I 1978 forelå dens resultater.

Lithium forekomsterne i den vestlige verden, 7)

Kendte reserver, ialt	2o321oo tons
heraf i USA	3757oo tons
Skønnede ressourcer + kendte reserver . .	1o6471oo tons
heraf i USA	35649oo tons

Forekomsterne findes i Chile, Argentina, Brasilien, Australien, Sydvest Afrika, Zaire og Zimbabwe(Rhodesia). Desuden findes der lithium i havvand. Der findes o,17 gram lithium pr m^3 havvand, 8). Verdenshavenes rumfang er $1,37 \cdot 1o^{18}$ m^3. Det samlede lithium indhold er derfor

$$m_{Li} = 1,37 \cdot 10^{18} \cdot 0,17 \cdot 10^{-6} \text{ tons} = \underline{2,33 \cdot 10^{11} \text{ tons}}$$

Lithium findes ca. loo gange mindre koncentreret i havvand end deuterium. Imidlertid er udvindelsesmetoderne ukendte og under alle omstændigheder meget mere bekostelige end tilfældet er det med deuterium.

Tages havindholdet med er lithium som deuterium en ubegrænset ressouce. I teoretisk forstand er dette korrekt. Det svarer lidt til, at en af verdens største, kendte uranforekomster ligger i det mellemste Sverige; men en udvinding af denne uran vil betyde, at store dele af Mellemsverige skal knuses - så spredt forekommer uranatomerne i fjeldet. Men teoretisk er uranen der. På samme måde med havenes indhold af lithium. Elektrolyse af tungtvand er en anderledes ligetil proces. Derfor er havindholdet af deuterium lettilgængeligt.

Et regneeksempel: Baseret på især amerikanske Tokamak-fusionsreaktorer skønnes brændselskravene til, 9)

deuterium	o,o6 - o,2 tons/ GW(e)
lithium	5oo - 12oo tons/ GW(e)

Antages en fusionsudbygning på looo GW(e), svarende til ca. to gange den installerede effekt i USA i 1978, så betyder det et maksimalt lithiumforbrug på

$$1200 \cdot 1000 = \underline{1.200.000 \text{ tons Li}}$$

Det svarer til ca. 1/3 af USA's skønnede og kendte lithium ressourcer. De samlede skønnede og kendte ressourcer ville slå til overfor et sådant program i

$$\frac{10\,647\,100}{1\,200\,000} \simeq 9 \text{ år}$$

Der er altså grænser for lithiumforbruget; men hvad siger lithiumindustrien til den situation ?

Lithium industrien.

Lithium metallet blev opdaget i 1817 af en svensk geolog. Første gang det blev isoleret var i 1855. Den kommercielle produktion indledtes i 1925 i Tyskland og i 1927 i USA. De store selskaber i lithiumindustrien i dag er Foote Mineral Company(startet i 193o) og Lithium Corporation of America.

Det sidstnævnte er et Gulf datterselskab, der indledte sin virksomhed under anden verdenskrig. Industrien domineres af de amerikanske selskaber, der også er aktive i Latinamerika, 1o).

Lithiums første anvendelse var - i form af lithiumhydroxid - til absorption af CO_2 fra udåndingsluften i undervandbåde. I 195o-erne gav det amerikanske brintbombeprogram lithiumindustien et opsving, der var så stort, at der efter den bratte vækst var etableret en 5oo % overkapacitet. Det førte til, at opstartede aktiviteter i Canada, Italien, Vesttyskland, Japan og England blev indstillet igen. Indtil i dag har lithiumindustriens problem ikke været ressourcernes størrelse, men markedets omfang. Lithium anvendes til mange forskellige ting i dag. Det bruges i aluminiumindustrien, i glas- og keramikindustrien, til smøremidler og maling, til syntetisk gummi, til medicin og til batterier. Alene en succesfuld udvikling af lithium-svovl batterier til opbevaring af strøm i elektriske biler og på kraftværker kan betyde et lithiumforbrug på 5oo ooo tons i år 2ooo. Hertil kommer så fusionsreaktorernes forventede lithiumforbrug.

I dag finder så godt som hele den vestlige verdens produktion sted i USA. Tallene de seneste par år er:

1976: 35oo tons lithium
1977: 47oo tons lithium

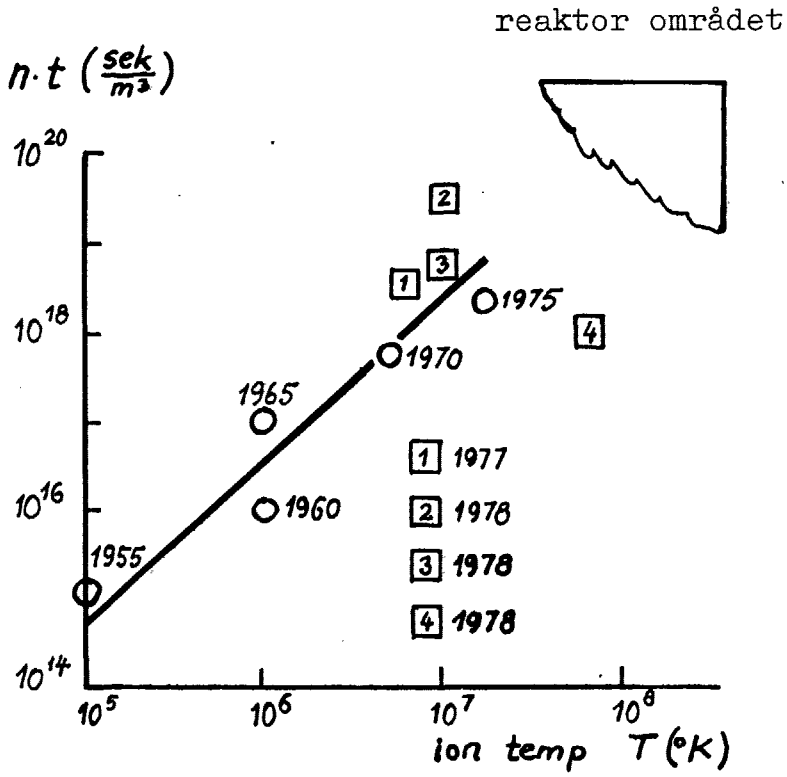
Det før skitserede lithiumforbrug til et amerikansk fusionsprogram på 1ooo GW(e): 1 2oo ooo tons svarer til

$$\frac{1.200.000}{4700} \simeq 255 \text{ år}$$

Altså 255 års produktion på 1977 niveauet. Fusionsprogrammerne vil med andre ord forudsætte en kraftig vækst i lithiumindustrien.

Udviklingen af fusionssystemerne igennem tiden.

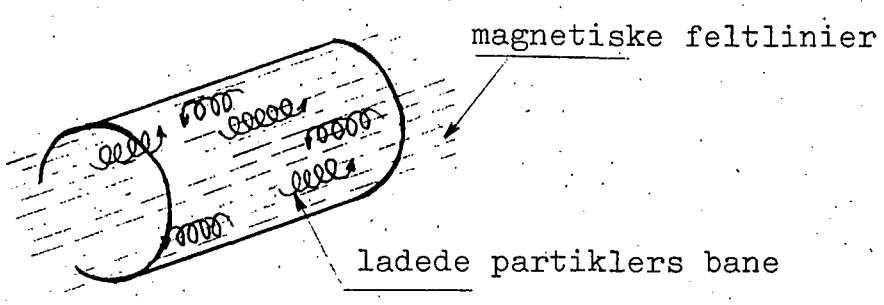
Fusionsenergien blev første gang af USA i 1952 frigjort ved sprængning af en brintbombe. Der var tale om, at en atombombe(fissionsbombe) ved sprængning skabte så høje temperaturer, at fusionsprocesserne i brintbomben kunne forløbe. Sovjet fulgte efter med sin første brintbombe i 1953, England i 1957. Fusionsforskningen foregik hemmeligt i militært regi. Men fra og med den anden FN konference om atomenergi i Geneve i 1958blev fusionsforskningsresultaterne gjort offentligt tilgængelige af de lande, der havde fusionsforskningsprogrammer. Siden da er der sket stadige fremskridt i retning af realiseringen af den selvgenererende, kontrollerede fusionsproces. Fusionsforskningens resultater kan opregnes ved at notere udviklingen i størrelsen af Lawson-produktet. Det er produktet af plasmatætheden, n (ioner/m^3) og sammenholdstiden, t (sek). Tætheden gange den tid, det er muligt at holde plasmaet sammen, siger som vist (appendix 2) noget om, hvor langt fra eller tæt ved et selvgenererende, kontrolleret fusionsplasma, man er. Hertil kommer udviklingen i plasmatemperaturen. Den skal som vist op på 10^7 - 10^8 grader Kelvin, for at fusionsreaktionen kan forløbe.



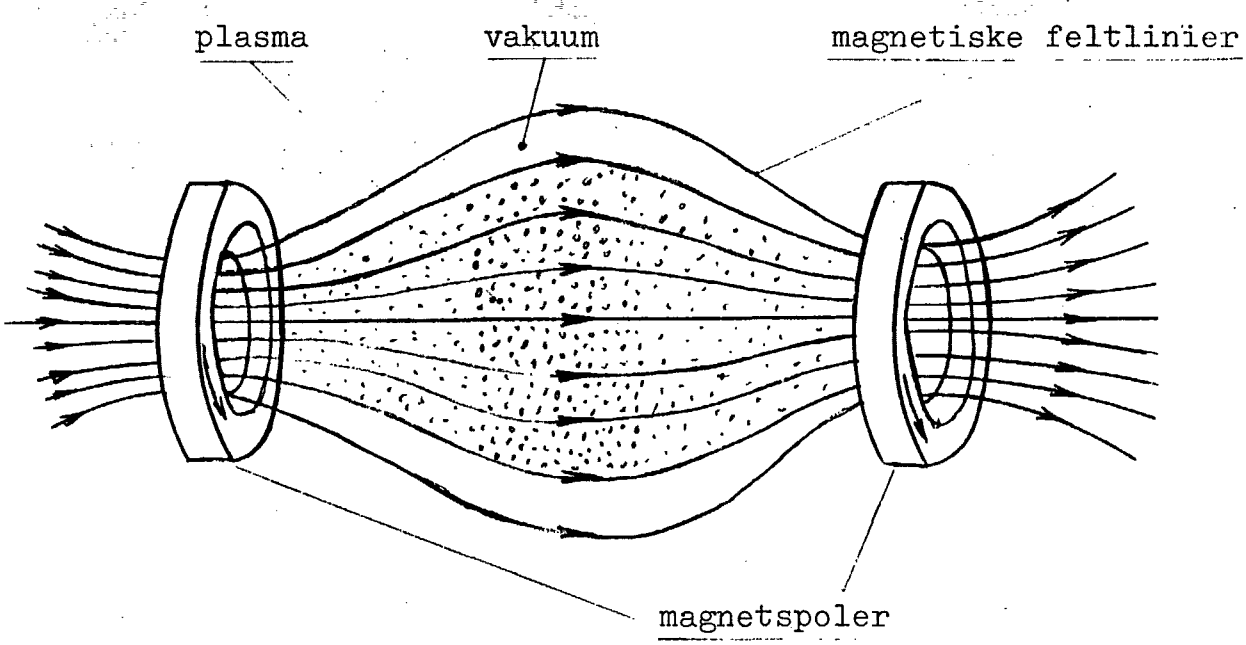
Det fremgår af figuren, at der er sket store fremskridt i opnåelsen af højere og højere temperaturer, 11). Fra 10^5°K i 1955 er temperaturen i 1978 bragt op i reaktorområdet, 10^7 - 10^8 °K. Dette resultat indeholdt dog ikke samtidig et tilstrækkeligt højt Lawson-produkt. Forbedringer af Lawson-produktet har klart fundet sted. Fra ca. 10^{15} sek/m^3 i 1955 til 10^{19} sek/m^3 i 1978. Forskningsresultaterne i [2] og [4] er således hver for sig tæt ved de nødvendige kriterier for at fusionsprocessen kan forløbe med energioverskud.

Fusionsreaktor anlæggene.

For at fusionsprocesserne kan forløbe skal temperaturen være nogle hundrede millioner grader Kelvin. Hertil kommer, at den høje temperatur og den nødvendige tæthed gør, at plasma-trykket er på op til 100 atmosfæres tryk,(appendix 3). Eftersom alle metaller er smeltede ved nogle tusinde grader forekommer det umiddelbart umuligt at at konstruere et reaktionskammer, hvor fusionsprocesserne kan forløbe. Det er imidlertid sådan, at ved så høje temperaturer befinder de reagerende grundstoffer sig i plasmatilstanden. Det vil sige, at de er ioniserede: elektronerne er slået løs fra kernerne. Problemet består derfor i at indeslutte en gasblanding af ladede partikler, nemlig de positive kerner og de negative elektroner. I princippet kan indeslutningen af plasmaet foretages i et passende konstrueret magnetfelt. Det er muligt, fordi elektrisk ladede partikler påvirkes af magnetiske feltlinier. I et homogent magnetfelt vil ladede partikler bevæge sig i spiraler langs med feltlinierne,(appendix 3).



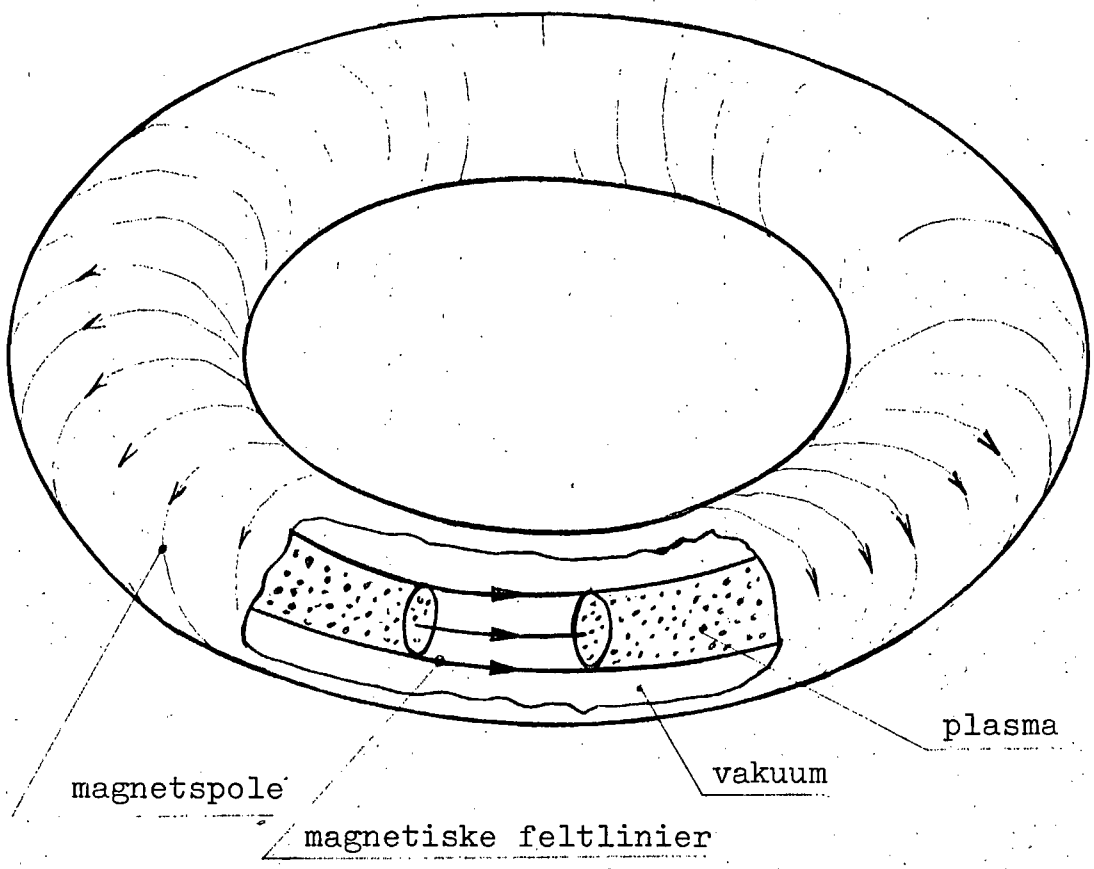
I et magnetisk spejlfelt vil de ladede partikler bevæge sig frem og tilbage mellem magnetspolerne. Det vil de, fordi feltet er stærkest i enderne. Den resulterende kraft på de ladede partikler vil i enderne sende partiklerne ind i "beholderen" igen. De ladede partikler reflekteres i enderne analogt med lys, som reflekteres, når det rammer et spejl. Spejlfeltet er en åben magnetfeltkonfiguration.



Åben magnetflaske med magnetisk spejlfelt

En anden magnetfeltkonfiguration, der igennem årene har været brugt til at holde plasmaet sammen med, er den torusformede magnetiske "flaske". Torusformen er bilslangens form. Her løber magnetfeltlinierne rundt i lukkede ringe. Det er altså en lukket magnetfeltkonfiguration, hvor de ladede partikler bringes til at spiralisere rundt langs cirkelbanerne.

Der har været og er mange andre magnetfeltkonfigurationer i gang i fusionsforskningen end de her opregnede. Fælles for dem alle er grundideen om at holde plasmaet samlet ved en magnetisk indeslutning.



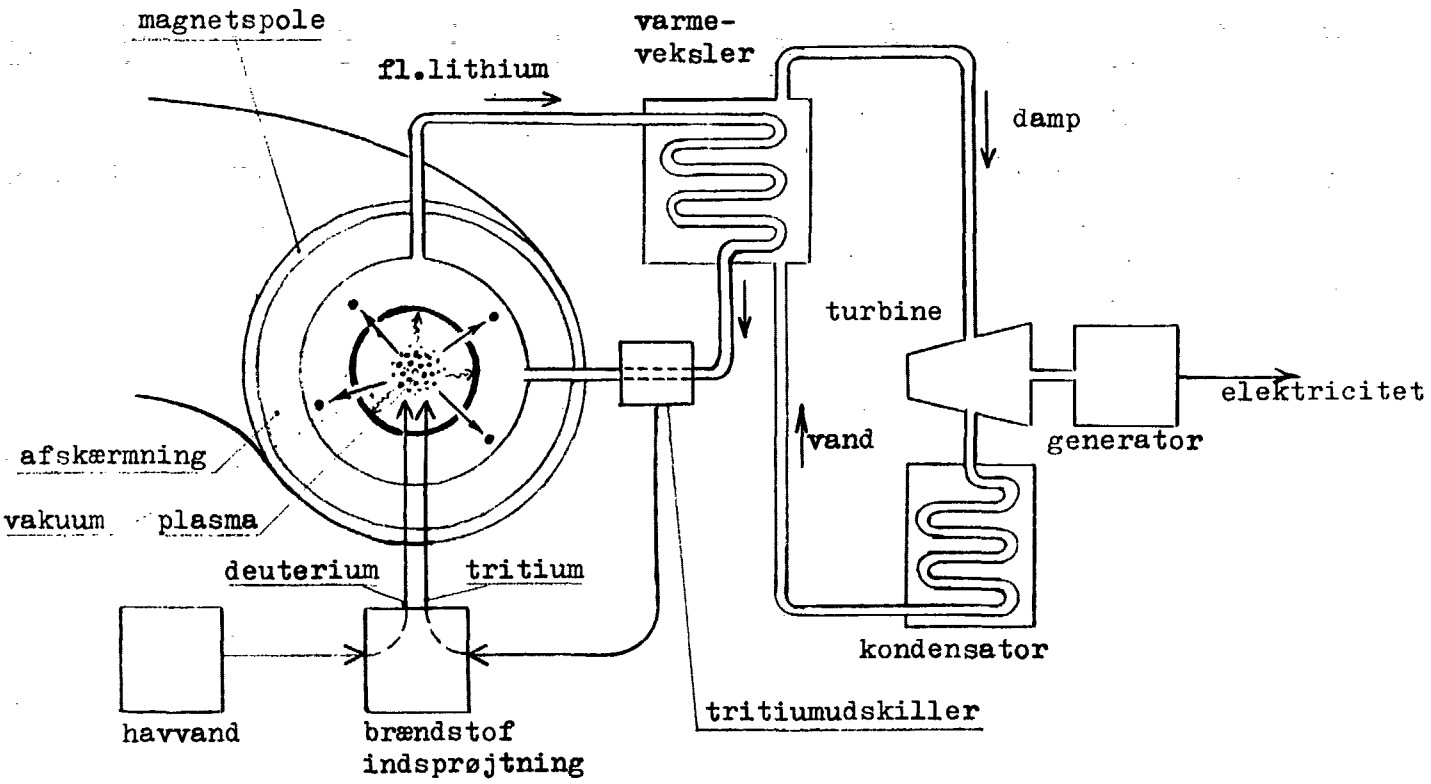
Lukket magnetisk flaske dannet af et torusformet magnetfelt.

Den forsøgsreaktor, der i dag tegner til at skulle blive den første energiproducerende fusionsreaktor, er den såkladte Tokamak reaktor.Den har en torusformet magnetfeltkonfiguration. Oprindeligt var det i Sovjetunionen, denne forsøgsreaktor blev udviklet; men i dag er den bygget i forskellige størrelser i så godt som alle de lande, der driver fusionsforskning. Nedenfor gennemgås principperne for en sådan reaktors virkemåde. Desuden diskuteres teknologiske problemer forbundet med realiseringen af den energiproducerende Tokamak reaktor.

Ser vi tilbage på de energiproducerende processer, så vil deuterium-tritium processen (D-T processen) skulle udgøre grundlaget for den først fungerende Tokamak fusionsreaktor. Denne proces er

$$D_1^2 + T_1^3 \rightarrow (He_2^3 + 3{,}54\ Mev) + (n_0^1 + 14{,}06\ Mev)$$

De højenergetisk neutroner bærer ca. 8o% af energiproduktionen:(14,o6/ 17,6o = o,8). Reaktoren producerer elektricitet ved at neutronernes bevægelsesenergi omdannes til varmeenergi, som så igen i et turbine-generator system fremstiller elektriciteten.



Principdiagram af fusionskraftværk. 12)

I princippet fungerer fusionsreaktoren ved, at der injiceres brændsel: deuterium og tritium. I fusionskammeret holder magnetfeltlinierne tæthed og tid passende stor. Der opvarmes til den nødvendige temperatur. Fusionsprocesserne forløber med det resultat, at der produceres neutroner og helium-3. Den flydende lithium bremser(modererer) de hurtige neutroner. Som kølemiddel flyder lithium rundt i det primære(inderste) kredsløb. I varmeveksleren afgiver det opvarmede flydende lithium varme til det sekundære(ydre) vandkredsløb. Der fremstilles damp. Denne damp driver turbinen, som igen driver generatoren,

der fremstiller elektricitet. Dampen omdannes til vand i kondensatoren. Foruden sin funktion som moderator og kølemiddel fungerer lithium også som tritium-formeringsmateriale(breeding materiale). I tritium adskilleren separeres lithium og tritium fra hinanden. Lithium føres videre i det primære kredsløb. Tritium injiceres som fusionsbrændsel. Så vidt så godt i princippet: fusionsenergien omdannet til elektricitet via varme.

Der er imidlertid en række problemer af såvel plasmafysisk som teknologisk art forbundet med realiseringen af den beskrevne energiproduktionsproces. I de forløbne år har der været og fremover vil der være problemer med realiseringen af fusionsenergien. Her behandles følgende problemer:

- instabiliteter i magnetfeltkonfigurationerne
- opvarmning og brændselsforsyning
- materialer til at konstruere reaktorerne af
- magnetsystemernes konstruktion
- energiomsætningssystemerne

Instabiliteterne.

Umiddelbart forekommer det ligetil, at de ladede partikler i plasmaet vil spiralisere rundt langs magnetfeltlinierne i toruskonfigurationen. Imidlertid skaber de mange positivt og negativt ladede plasmapartikler ved deres bevægelser strømme og felter, som tenderer til at ødelægge den oprindelige magnetfeltkonfiguration. Det viser sig som svingninger i plasmaet, der begynder at lække ud af magnetfeltet og ramme væggene i reaktionskammeret. Derved afkøles plasmaet og det bliver umuligt at opfylde Lawson kriteriet, med mindre der gøres noget for at ophæve lækagen. De mekanismer, der får plasmaet til at lække ud af magnetfeltet, kaldes instabiliteter. Et af hovedproblemerne for fusionsforskningen har derfor igennem årene været at konstruere magnetfelter med en sådan form, at instabiliteterne undertrykkes. Når Tokamak-reaktoren med det torusformede magnetfelt anses for den første realistiske "reaktorkandidat", skyldes det bl.a., at det er lykkedes

at begrænse instabiliteterne i Tokamak-opstillingen.

Opvarmning og brændselsforsyning.

Plasmabrændslet bestående af D-T blandingen kan opvarmes på flere måder. En måde er at sende en stærk elektrisk strøm gennem plasmaet. Det sker i Tokamak'en. Der finder en opvarmning sted, fordi plasmaet besidder en elektrisk modstand (ohmsk modstand) imod strømmen. Strømmen kan være en jævnstrøm eller en langsomt varierende vekselstrøm. Imidlertid kan ohmsk opvarmning af et plasma ikke bringe temperaturen helt op i reaktorområdet. En anden måde at opvarme et Tokamak D-T plasma på er at indsprøjte intense stråler af neutrale brintatomer. De neutrale brintatomer påvirkes ikke af magnetfeltet. Derfor finder de let vej ind i magnetfeltkonfigurationen. Ved kollissioner slås elektroner løs fra de neutrale atomer. De nu ioniserede brintkerner bremses ned, mens de overfører deres energi til plasmapartiklerne. Denne opvarmningsmetode er blevet udviklet siden 196o-erne. Fra 197o-ernes begyndelse blev den mere udbredt. I 1978 lykkedes det i USA med denne metode at nå en temperatur på mere end 6o millioner grader Kelvin. Det var første gang, at et Tokamak plasma således nåede op over antændelsestemperaturen, dvs. ind i reaktorområdet, 13).

Men hvordan fyres der i en fusionsreaktor, dvs. hvordan bringes deuterium og tritium brændslet ind gennem magnetfelterne til det varme plasmaområde ? Pillemetoden arbejdes der med bl.a. på Risø i Danmark. En nedfrosset brændselspille på op til nogle milimeter i størrelse bestående af mange molekyler skydes ind i det varme plasma. Ved sammenstød med plasmapartiklerne etableres vekselvirkningen. Blandt problemerne med brændselspåfyldningen er, at få pillen accelereret op på en tilstrækkelig hastighed. Samtidig skal pillen være frosset ned til nogle få grader over det absolutte nulpunkt for at deuterium og tritium er på fast form. Endelig er der plasmafysiske problemer med at forstå vekselvirkningen mellem pille og plasma, 14). Der findes andre metoder til både opvarmning og brændselspåfyldning end de her omtalte.

Konstruktionsmaterialer og magneter.

Betragtes fusionsreaktionskammeret nærmere bliver det hurtigt klart, at der stilles meget betydelige krav til holdbarheden af de materialer, reaktoren skal konstrueres af. Temperaturfordelingen ud gennem fusionsreaktoren siger alene noget om de krav, der må stilles til materialerne. I plasmaområdet er temperaturen omkring 100 millioner grader; det flydende lithium er ca. 1000 grader. Vandafskærmningens temperatur er ca. 120 grader. Endelig skal temperaturen på de supraledende magneter være ca. -270 grader Celsius. Intet mindre end en overgang fra solens temperaturer til noget nær det absolutte nulpunkt i en og samme maskine, 15). Den indre væg i reaktorkammeret(first wall) skal på den ene side kunne modstå et betydeligt neutronbombardement. På den anden side må den ikke reagere med 1000 ° C varmt flydende lithium. Vandafskærmningen skal standse neutronstrømmen, så den ikke ødelægger de store, supraledende magneter, der holder sammen på plasmapartiklerne.

> "Evnen til at konstruere og drive supraledende magnetspoler af op til 10 meters størrelse med felter på 8 - 12 tesla... skal etableres. Det er målsætningen for programmet til udvikling af supraledende magnetsystemer." 16)

Kravene til magnetsystemerne, her formuleret af et forskningsprojekt på Oak Ridge Laboratoriet i USA er store. Det drejer sig om at finde de rigtige legeringer, der kan blive supraledende: niobium-titan og niobium-tin er blandt de mulige legeringer. For at legeringerne skal blive supraledende, dvs. få en helt forsvindende elektrisk modstand, skal de køles meget langt ned. Det kræver fastholdelse af temperaturer, som ikke er mange grader over det absolutte nulpunkt på - 273 C. Den supraledende tilsatnd gør, at energitabene forbundet med de store strømstyrker, der skal til for at generere de stærke magnetfelter, er små. Og der er virkeligt tale om kæmpemagneter, såvel i geometrisk omfang som i feltstyrke, sammenlignet med konventionelle magneter.

Energiomsætningen.

I deuterium-tritium processen dannes der neutroner. Via et lithium og et vandkredsløb omdannes neutronernes bevægelsesenergi til varmeenergi, dvs. til damp som driver den turbine der trækker den elektriske generator. Energiomdannelsen er altså: fusionskerneenergi - bevægelsesenergi - varmeenergi - bevægelsesenergi - elektrisk energi. I det rene deuteriumplasma og i deuterium-helium-3 plasmaet omdannes en del af fusionskerneenergien til bevægelsesenergi af ladede partikler, nemlig protoner. Det gør det i princippet muligt at lave elektricitet direkte, dvs. uden at gå "omvejen" af varmeenergi. Energiøkonomisk er den direkte omdannelse bedst. Princippet i den er at opsamle de positive protoner og de negative elektroner på hver sin "elektrode". Så når disse mere avancerede fusionsprocesser kan foregå, kan energiomdannelsesprocesserne finde sted med en bedre energiøkonomi end i D-T reaktionen, der bliver den første reaktorproces.

Radioaktivitet i fusionsreaktorer.

Når en fusionsreaktor er i drift, dannes der radioaktive stoffer i den. Der dannes først og fremmest tritium. Men også de materialer, reaktoren er bygget af, bliver radioaktive ved driften, idet de er udsat for stråling. De gennemgåede forhold gælder fortsat for en Tokamak fusionsreaktor. For sammenligning med fissionsreaktorer, se noten side 45.

Tritium blæses ind som brændsel. Ved fusioneringen med deuterium forbruges tritium. Til frembringelsen af en energimængde på 1000 MW(th)·dag (= 1000·24 MW(th)·h) forbruges ca. 0,14 kg tritium, 17). Men brændselssystemet skal rumme og håndtere mere end den mængde, da kun en brøkdel af den indblæste tritiummængde brændes af ved hver passage af fusionskammeret. Hvis kun 1% afbrændes, svarer det til 14 kg tritium pr dag pr 1000 MW(th). Hvis reaktoren er på 5000 MW(th) og hvis det tager 6 timer for det ikke afbrændte tritium at passere igennem hele reaktorens brændselssystem: injektor, opsamlings- og rensningssystem, så bliver det en tritiummængde på

$$14 \cdot 5 \cdot \frac{6}{24}\ kg \simeq \underline{17{,}5\ kg}$$

Der er altså 17,5 kg tritium samtidig til stede i brændselssystemet ved en reaktor på 5000 MW(th).

Tritiummængden i formeringsmediet og i seperationsenheden afhænger af, om der er tale om fast eller flydende lithium. Er der tale om flydende lithium, vil der i formeringsmediet være ca. 2 kg tritium pr 1000 MW(th). Formeres tritium fra faste lithiumforbindelser er der tale om ca. 25 kg tritium pr 1000 MW(th). I seperationsenheden er de tilsvarende tal 0,1 kg tritium/1000 MW(th) for flydende lithium og 0,003 - 0,08 kg tritium/1000 MW(th) for faste lithiumforbindelser, 18). Det er nødvendigt at have et tritium lager i reserve i reaktoren svarende til fra 1/3 op til én dags forbrug i tilfælde af, at hovedsystemet ikke virker i en kortere periode. Med 1% afbrænding var det ca.14 kg tritium pr dag pr 1000 MW(th). Reservelageret sættes derfor

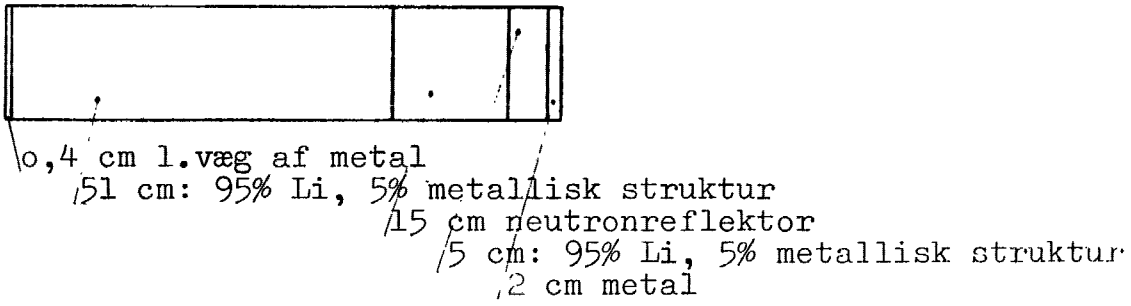
til fra 5 til 14 kg tritium pr looo MW(th), 19). Den samlede tritiummængde bliver således

	kg pr looo MW(th)
Brændselssystemet	3
Formeringsmedie og seperationsenhed . . .	o,5 - 2
Reservelageret.	5 - 14
total	8 - 19

Et afrundet tal for den totale tritiummængde vil være lo kg tritium pr looo MW(th). Med faste lithiumforbindelser som formeringsmedium vil tritiummængderne nok kunne formindskes, men om nogen radikal nedsættelse af tritiummængderne i en Tokamak reaktor vil der ikke være tale. Desuden er det ret sandsynligt, at den første energiproducerende fusionsreaktor vil blive en deuterium-tritium fyret Tokamak reaktor med flydende lithium som formerings-, moderator- og kølemateriale. De lo kg tritium pr looo MW(th) er den potentielle tritium-fare, en fusionsreaktor indebærer. Noget andet er de måder, den tritium kan komme i forbindelse med omgivelserne på. Det diskuteres nedenfor i afsnittene om den daglige drfit og ikke-rutine udslippene.

Radioaktivitet i konstruktionsmaterialerne.

Ved deuterium-tritium fusioneringen frigøres ca. 8o% af energien som 14 MeV hurtige, energirige neutroner. Neutronernes kinetiske energi omsættes i reaktorskallen ved at neutronerne nedbremses(modereres). Reaktorskallen skal foruden at være konstruktionsbestanddel i reaktoren nedbremse neutroner og formere tritium. Reaktorkonstruktionen umiddelbart udenom fusionskammeret er opbygget af en række lag.



Det her refererede eksempel er en Tokamak reaktor på 5o25 MW(th) med en neutroneffekt på 1,25 MW/m^2, 2o). Ved neutronindfangning vil konstruktionselementerne blive radioaktive i løbet af kort tid efter opstarten. Det sandsynlige konstruktionsmateriale er rustfrit stål. Der er mange års erfaringer med brug af rustfrit stål i atomkernereaktorer. Der eksisterer en industri, som kan levere millioner af tons rustfrit stål af kvalitetsstandard.

> "Reaktoraktiveringsproblemet kan ikke løses ved at vælge nogle ikke-aktiverbare stoffer fra det periodiske system uden at tænke på hvordan reaktoren kan bygges af dem.", 21)

Det er med andre ord ikke tilstrækkeligt, at der teoretisk set er materialer, som ikke forbliver radioaktive så længe som rustfrit stål. I tabellen er radioaktivitetens afklingning med tiden vist for rustfrit stål og for forskellige legeringer.

materiale	t=o	1 dag	1 år	loo år
rustfri stål	loo	68	29	$5\ 10^{-3}$
legering,TZM	125	83	$4\ 10^{-2}$	$7\ 10^{-3}$
legering,V-2oTi	27	6,6	o,31	10^{-37}
legering,Al2o24	44	8,7	o,3	$1\ 10^{-5}$
legering,Nb 125	158	94	$6\ 10^{-4}$	$1\ 10^{-5}$
nat. uran		$6\ 10^{-6}$		

Max radioaktivitet i 1. væg efter 2 års operationstid med en neutronstrøm på 1,25 MW/m^2.
radioaktiviteten målt i Ci/cm^3 af materialet.

Efter loo år er radioaktiviteten af Al- og Nb-legeringerne på samme niveau som naturligt uran, og endnu lavere for V-Ti legeringen. Derimod er aktiviteten af rustfrit stål på det tidspunkt ca. looo gange større end for naturligt uran. Eftersom den første væg er så kraftigt udsat for

neutronbestråling skal den med få års mellemrum udskiftes. Det betyder, at betydelige mængder radioaktivt rustfrit stålmateriale skal oplagres, så ingen mennesker udsættes for farlig bestråling. Med de mængder, der er tale om og med den tid, de skal opbevares, er der her reelt tale om fusionsenergiens affaldsproblem.

Miljøpåvirkninger ved daglig drift.

Ved den daglige drift af et fusionskraftværk vil der være en miljøpåvirkning på grund af radioaktiv bestråling. Hertil kommer påvirkningen fra de kraftige magnetfelter, der er nødvendige for at holde fusionsplasmaet sammen.

Tritiumstrålingen udgør den største påvirkning af såvel arbejdsmiljøet på kraftværket som af det ydre, omgivende miljø. Tritium er den supertunge brintisotop. Den indeholder en proton og tre neutroner i kernen. Den er radioaktiv, idet den udsender β-stråling. Den omdannes med en halveringstid på 12,3 år.

$$T_1^3 \rightarrow He_2^3 + \beta_{-1}^0 + 18{,}6\ keV$$

Tritium opfører sig kemisk som brint. I stedet for almindeligt brint, H_2 kan der dannes tritium-hydrogengas, HT. I stedet for vand, H_2O, dannes der tritieret vand, HTO. Det er sjældnere, at tritium optræder på formerne T_2 og T_2O. Tritium kan erstatte brint,H i både organiske og uorganiske forbindelser. Problemet med tritium i et fusionskraftværk er først og fremmest, at det forekommer i stor mængde; ca. lo kg svarende til en radioaktivitetsmængde på lo^8 Ci. Tritium kan diffundere igennem metal. Det gør det vanskeligt at indespærre det effektivt. Tritieret vand er vanskeligt at adskille fra normalt vand. Alt ialt udgør tritium et problem, der kræver teknologisk avancerede løsninger: pumper, rørsystemer og opbevaringssystemer, som er tætte.

" Almindeligt brintgas,H_2 ophobes ikke, når det inhaleres og absorbers ikke gennem huden i nævneværdig omfang. I modsætning hertil inkorporeres vand,H_2O i kroppens vand, når det inhaleres og når det absor-

> beres gennem huden. Indtag af tritieret vand fra omgivelserne følger også med drikning af vand og via vandindholdet i føden." 22)

Tritium optræder i kroppen , når der slippes tritium løs i omgivelserne. Det vil finde sted ved en fusionsreaktor. I varmeveksleren vil der til kølevandet slippes ca. 3oo Ci løs pr dag. Det vil være som HTO. Det er ca. 2o gange mere tritium i kølevandet på en fusionsreaktor end på en 1. generationsletvandsreaktor af trykvandstypen. Ved diffusion gennem beskyttelsessystemerne vil tritium på formen HT eller som gasformig HTO slippe ud i atmosfæren. Det giver med Tokamak-en ca. 15o ooo Ci HTO pr år, 23). Det daglige tritiumudslip betyder således en belastning af det ydre miljø. Der er mulighed for optagelse af det radioaktive tritium i den menneskelige organisme. Tritiumbestråling vil også udgøre en belastning i arbejdsmiljøet.

Påvirkningen fra de hurtige, energirige neutroner og fra felterne fra de store magneter vil også være medbestemmende for arbejdsmiljøets udseende. Om fusionsneutronerne hedder det hos Häfele m.fl.:

> "Fusionsneutronernes store gennemtrængningsevne og reaktorens komplekse geometri gør det vanskeligt fuldstændigt at afskærme reaktorens umiddelbare omgivelser. Tilstrækkelig afskærmning kan derimod opnås, så at doserne udenfor reaktorbygningen kan gøres passende små. Neutronbestråling vil således udgøre en arbejdsmiljøbelastning, men ikke en belastning af offentligheden." 24).

Om magnetsystemerne hedder det:

> "Magneterne på typiske Tokamak reaktorer vil frembringe magnetfelter som rækker langt udenfor reaktorens område. . . Varige påvirkninger af fusionsarbejdere fra felter på tiervis af gauss kan forventes. Kortvarige påvirkninger fra meget stærkere felter er mulige. De fysiologiske konsekvenser af fortsatte magnetfeltpåvirkninger er ikke kendte." 25)

Magnetfelter påvirker elektriske strømme. I den menneskelige organisme transporteres mange slags ioner. Det sker i blodkredsløbet og det sker i nervesystemet. I både rummedicinen og arbejderbeskyttelsen interesserer man sig for elektromagnetiske felters biologiske virkninger. Virkningerne afhænger af feltstyrken, af frekvensen, af feltretningen og af varigheden af bestrålingen, 26). Der er lavet undersøgelser på dyr.

Epidemiologien søger at opgøre virkningerne på arbejdere, som i mange år har været udsat for feltpåvirkninger. Eventuelle virkninger på lang sigt, herunder genetiske ændringer, diskuteres, 27). Alt ialt tegner det billede sig, at viden om elektromagnetiske felters virkning på mennesker er begrænset og utilstrækkelig. I metalindustrien er arbejderne forsøgspersoner. Det vil de ansatte på fusionskraftværkerne også blive , især på den baggrund, at magnetfelterne er af stor styrke.

Uheld ved fusionsreaktorer.

Udslip af skadelige stoffer kan foruden ved daglig drift finde sted, hvis der indtræffer et større uheld i reaktoren. Idet der fortsat refereres til en Tokamak reaktor kan følgende hændelser indtræffe i en uheldssituation:

- frigivelse af tritium
- frigivelse af radioaktivt materiale indeholdt i reaktorkonstruktionsmaterialet
- frigivelse af ikke-radioaktive, men skadelige stoffer

En type uheld er svigt i magnet og vakuumsystemerne. Store supraledende magneter i funktion er belastet af enorme, mekaniske kræfter. En fejl i magneterne kan medføre svære beskadigelser af reaktorkomponenter med ødelæggelse af beskyttelsesstrukturer som resultat. Det kan medføre lithiumbrande. Lignende konsekvenser vil vakuumsystemfejl, jordskælv, tornadoer, flystyrt og sabortage have. En anden uheldstype er tab af kølemiddel. Den slags uheld vil typisk føre til lokale beskadigelser inden for kraftværkets mure. Det kan dog tænkes, at sådanne uheld i anden omgang kan medføre gennembrydning af beskyttelsesstrukturerne ledsaget af lithiumbrande.

> "En lithiumbrand udgør nok den værst tænkelige ulykke. Lithium reagerer voldsomt og under varmeudvikling med både luft og vand. Som natrium reagerer det også med vandindholdet i cement. . . De beregnede største flammetemperaturer for både lithium-luft og lithium-cement reaktionerne er af størrelsesordenen 2500 grader Kelvin." 28).

Reaktionerne er så voldsomme, at der er tale om eksplosionsagtige forløb. Temperaturerne er over smeltepunkterne af reaktorens konstruktionsmaterialer. Der frigives radioaktive stoffer.

Andre fusionsreaktorsystemer.

Indtil nu har oplysningerne om plasmafysiske, teknologiske og miljømæssige problemer været baseret på Tokamak fusionsreaktoren. Denne reaktors fusionsplasma holdes sammen af et magnetfelt af torusform(bilslangeform). Det er en lukket reaktortype med en langsom pulseret drift. Fusionsenergien omsættes til elektricitet via varmeenergi.

I nogle udgaver af spejlfusionsreaktoren, der er en åben reaktor, som det fremgår af figuren side 14, kan fusionsenergien omdannes direkte til elektricitet. Derved opnås en bedre nyttevirkning af fusionsenergien. Det kræver imidlertid, at det er fusionsprocesser, der har elektrisk ladede partikler som reaktionsprodukter. D-D og D-He^3_2 reaktionerne frembringer protoner, som er positivt elektrisk ladede partikler. D-D reaktionen reducerer brændselsforsyningsproblemet, da denne brændselscyklus er uafhængig af lithium. Den giver mindre strålingsbeskadigelse af konstruktionselementerne, men har en højere antændelsestemperatur end D-T reaktionen. Noget lignende kan siges om D-He^3_2 reaktionen. Hvor nyttevirkningen for D-T reaktionen er ca. 65 % kan den for de andre processer med direkte omdannelse til elektricitet komme helt op på ca. 9o %, 29).

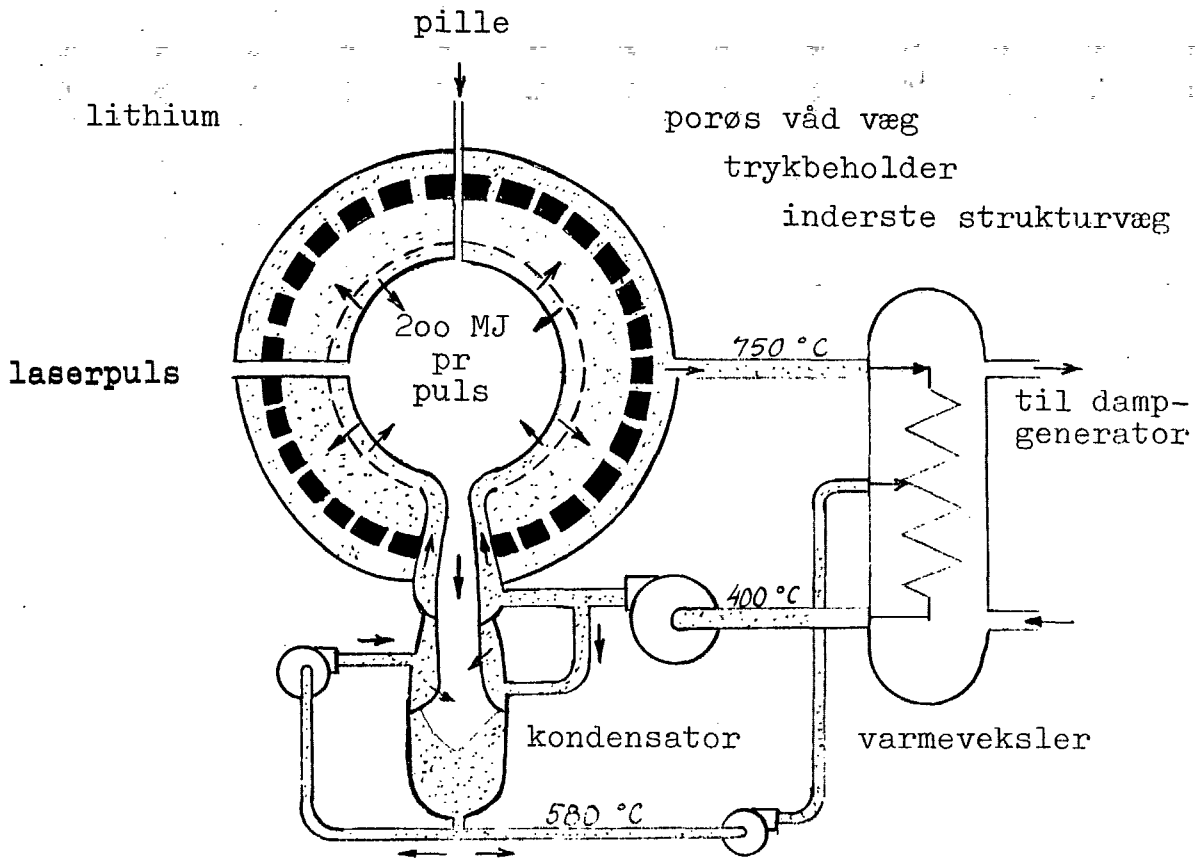
Laserfusion.

Fusionsforskningen har haft problemer med at få magnetfelterne til effektivt at indespærre det reagerende plasma. Store forbedringer er dog nået med især Tokamak reaktoren. Opvarmningen af plasmaet er et andet problemområde. I Tokamak-en benytter man bl.a. metoden med at sende en strøm af neutrale partikler ind i det brændende plasma. Laserfusion søger at løse både plasmaindespærrings- og opvarmningsproblemet på en anden måde.

> "Laserfusionens generelle princip er, at en velfokuseret puls af laserlys meget hurtigt opvarmer en pille af deuterium og tritium til temperaturer, der er høje nok til at tænde processen, inden pillen kan udvide sig af betydning. Fordi Newtons inertilov stort set bestemmer udvidelseshastigheden(ca. 1ooo km pr sek), så kaldes laserfusion ofte inertial sammenholdt fusion. En 1 mm stor pille

der udvider sig med en fart på 1000 km pr sek, vil fordoble sin størrelse på 1 nano-sekund (10^{-9} sekund). Derfor skal laserenergien afleveres meget hurtigt. 30)

Inertial sammenholdt, laseropvarmet fusionsplasma. Det er grundprincipperne.



Principdiagram for laser fusionskraftværk, 30)

Brændselspiller skydes ind i kammeret. De opvarmes af en laserstråle, som også skydes ind i kammeret. Et lithiumlag ved den porøse væg fordamper og beskytter derved den inderste væg. Det fordampede lithium opsamles i kondensatoren. Det varme lithium sendes ud gennem varmeveksleren, hvor der dannes damp til turbinen. Trykvæggen skal kunne modstå de eksplosioner, hver fusionsreaktion fører med sig.

"Sfæriske stålkedler kan udføres tykke nok til at modstå relativt små eksplosioner på 10^9 joule, svarende til 500 pund TNT." 31)

Lasersystemet består i virkeligheden ikke af én, men af mange lasere anbragt kuglegeometrisk omkring reaktionskammeret. Derved påvirkes brændselspillen lige kraftigt fra alle sider i reaktionsøjeblikket. Det er et problem at udvikle lasere, der kan give energi nok fra sig, til at tænde fusionsreaktionen. Det skal samtidig være lasere som i hurtigt pulseret takt kan gentage processen.

> " I de tidlige 197o-ere eksisterede der to slags lasere, som så ud til at kunne bringes til at levere den nødvendige effekt i hurtigt pulseret tempo. De to lasersystemer var neodymium-glas laseren og kuldioxid laseren." 32)

Det står stadig ved 197o-ernes slutning tilbage at udvikle lasersystemerne til effekter og repetionstider, der gør dem egnede til fusionsreaktordrift. Men forsknings- og udviklingsprojekter, der skal arbejde videre med opgaverne, er planlagt for 198o-erne.

Fusionshybridreaktoren.

I stedet for at fremstille elektricitet enten direkte eller inddirekte fra fusionsenergien kan fusionsenergien bruges til at fremstille ny kernebrændsel; fissilt brændsel til de eksisterende atomkraftværker.

> "Ideen med fusionshybridreaktoren er at omgive en fusionsreaktor med en kappe af uran eller thorium. Ved fusionering af tritium og deuterium dannes hurtige neutroner. Neutroner vil blive indfanget i kappen. Herved laves de fertile isotoper, thorium-232 og uran-238 om til fissile isotoper. Det resulterer henholdsvis i uran-233 og plutonium-239. Det dannede fissile materiale kan så bruges som brændsel i de eksisterende atomreaktorer." 33)

Det drejer sig i fusions-fissionsreaktoren(blandingsreaktoren) om, at danne spalteligt materiale til de eksisterende typer atomreaktorer. Processerne er:

$$U_{92}^{238} + n_0^1 \rightarrow U_{92}^{239} \rightarrow Np_{93}^{239} + \beta_{-1}^0$$
$$\hookrightarrow Pu_{94}^{239} + \beta_{-1}^0$$

$$Th_{90}^{232} + n_0^1 \rightarrow Th_{90}^{233} \rightarrow Pa_{91}^{233} + \beta_{-1}^0$$
$$\hookrightarrow U_{92}^{233} + \beta_{-1}^0$$

Det er de samme processer, som forløber i formeringsreaktorerne(breeder-reaktorerne). Imidlertid er fordoblingstiden i fusions-fissionsreaktoren 2 - 3 gange så korte som i formeringsreaktorerne. Fordoblingstiden er den tid, der medgår til at producere en mængde overskuds fissionerbart materiale af samme størrelse som den oprindeligt installerede mængde brændsel. Blandingsreaktoren kan altså hurtigere frembringe mere nyt atombrændsel end formeringsreaktoren kan.

Fusions-fissionsreaktoren fremstiller altså enten spalteligt plutonium-239 eller spalteligt uran-233 alt efter om udgangsmaterialet er uran-238 eller thorium-232. Blandingsreaktorerne gør det muligt at adskille brændselsproduktion og elfremstilling. Brændslet laves i blandingsreaktoren. Elektriciteten fremstilles i de eksisterende, konventionelle atomreaktorer. Det betyder først og fremmest en sikring af brændselsforsyningen til de eksisterende reaktortyper, når uran-235, som de brænder, er brugt op. Og det vil ske i løbet af nogle årtier. Her træder så blandingsreaktorerne til med plutonium-239 og uran-233. Disse brændsler er afhængige af mængderne af uran-238 og thorium-232; og det er der meget af - til nogle århundreder i hvert fald.

Adskillelsen af brændsel- og elfremstilling betyder også, at brændselsfremstillingen kan koncentreres til nogle få, meget store blandingsreaktoranlæg. Derved sættes der "styr" på håndteringen af de meget store mængder af plutonium, som jo også kan udgøre grundlaget for en bombeproduktion. Et enkelt blandingsreaktoranlæg kan således forsyne helt op til 16 konventionelle atomreaktorer med brændsel, 34). Et andet aspekt ved blandingsreaktorudviklingen er, at disse reaktorer i mange år efter den første reaktors opstart vil have driftforstyrrelser. Det ville betyde forstyrrelser i elfremstillingen, hvis anlæggene også fremstillede elektricitet og var koblet direkte ind på højspændingsnettet.

Af betydning for blandingsreaktorernes fremtidige udvikling er, at fusionsprocesserne energiøkonomisk godt kan forløbe under Lawson kriteriet for et "rent" fusionsplasma. Tæthed og sammenholdstid behøver ikke at blive bragt helt op på den "rene" fusionsreaktors niveau før det kan betale sig at

drive en blandingsreaktor. Det hænger sammen med, at brændselsproduktionen medvirker kraftigt til at give den samlede reaktor en overskudsenergiøkonomi, 35) Blandingsreaktoren kan derfor ses son en reaktor på vejen frem mod den "rene" fusionsreaktor. Den vil kunne bidrage til erfaringerne med drift af en fusionsreaktor. Dens hovedindsats vil dog være, at den kan skaffe brændsel til de konventionelle atomreaktorer, når det eksisterende brændsel - uran-235 - er ved at være brugt op.

Fusionsenergiens gennembrud.

Når udviklingen af fusionsreaktorerne skal sættes ind i et tidsperspektiv, deler mange artikler og rapporter op efter
- det videnskabelige gennembrud
- det teknologiske gennembrud
- det økonomisk-kommercielle gennembrud

Det videnskabelige gennembrud for fusionsudviklingen er nået på det tidspunkt, hvor det:

> " i en eksperimentel opstilling er lykkedes at kreere en kombination af brændslets tæthed, temperatur og sammenholdstid som leder til et nettooverskud af energi. . .", 36)

Mange fusionsforskere forventer, at dette tidspunkt ligger i begyndelsen af 198o-erne. Gennembruddet kommer med stor sandsynlighed i en Tokamak opstilling, men også laser fusion forventes at kunne nå det videnskabelige gennembrudspunkt i 198o-erne.

Med teknologisk gennembrud tænkes på det tidspunkt, hvor materiale- og konstruktionsudviklingen af fusionsreaktorer er gennemført. Fusionsforskere placerer dette tidspunkt i årene op imod år 2ooo. Fusionsenergiens økonomisk-kommercielle gennembrud ligger i de første årtier af det 21oo århundrede, mener forskerne:

> " først i år 2o2o -2o3o vil ca. 1o% af industrilandenes elproduktion økonomisk kunne baseres på fusionsreaktorer." 37)

Om ca. ½ århundrede kan fusionsenergien spille en rolle i elforsyningen, som er sammenlignelig med de eksisterende atomkraftværkers rolle for elforsyningen i nogle af de industrialiserede lande i dag. Det mener fusionsenergiens fortalere. Til sammenligning har det taget fissionskraftværkerne ca. 4o år at nå det stade, de er på i dag. Det videnskabelige gennembrud fandt her sted i 1942.

Når Tokamak reaktoren forventes at gennembryde det videnskabelige niveau først, skyldes det de hidtil opnåede resultater med denne fusionsreaktoropstilling. I midten af 196o-erne efter 15 års intensiv forskning i flere lande, var der endnu ikke udviklet en magnetfeltopstilling, som kunne holde et rea-

gerende fusionsplasma sammen. I slutningen af 196o-erne skete der imidlertid store fremskridt på Kurchatov Instituttet for Atomenergi i Moskva. I en Tokamak forsøgsopstilling, kaldet model T-3, lykkedes det i 1969 at opnå plasmatemperaturer, som kun lå ca. en faktor lo fra det videnskabelige gennembrud. Samtidig opnåedes et ret godt Lawson produkt, omend det ikke lå i reaktorområdet. Dette eksperiment betød gennembruddet for Tokamak opstillingen. I de efterfølgende år byggedes der uden for Sovjetunionen Tokamak reaktorer af forskellig størrelse og kunnen. Det fandt sted i USA, Europa og Japan. Igennem disse forsøg forbedredes indsigten i Tokamak-ens virkemåde og ydeevne uden at det videnskabelige gennembrud ind i reaktorområdet blev nået.

Med Tokamak-en på Princeton Universitetet i USA blev der i 1978 nået bemærkelsesværdige resultater. Princeton's Large Torus(PLT) blev sat i gang for første gang i 1976. I 1978 opnåedes der på denne Tokamak en temperatur på 6o millioner grader. Det betød, at temperaturen nu var bragt helt ind på kanten af reaktorområdet. Plasmaopvarmningen blev opnået ved at skyde neutrale brintatomer ind i fusionskammeret, 38). Problemet med PLT er, at Lawson produktet ikke også samtidigt med den høje temperatur er i kanten af reaktorområdet. På Alcator Tokamak opstillingen på Massachusets Institutet of Technology(MIT) er det i 1978 lykkedes at bringen Lawson produktet op på kanten af reaktorområdet. Til gengæld er temperaturen her lavere end i Princeton.(se punkterne 2 og 4 på figuren side 12). Indtil nu er de bedste parameterværdier for Tokamak reaktoren

Lawson produktet: $n \cdot t = 3 \cdot 10^{19}\ sek \cdot m^{-3}$

plasmatemperaturen: $T = 7 \cdot 10^{7}\ °K$

Til sammenligning er reaktorområdet:

Lawson produktet: $n \cdot t \sim 10^{20}\ sek \cdot m^{-3}$

plasmatemperaturen: $T \sim 10^{8}\ °K$

Tokamak opstillinger har således bragt resultater i reaktorområdet. Det er "blot" ikke sket samtidig i én og samme Toka-

mak opstilling. Men udbygningen af endnu større Tokamak reaktorer er i fuld gang.

I perioden op til gennembruddet med PLT og Alcator har forskningen været domineret af mindre forsøgsopstillinger. I årene fremover vil udviklingen blive karakteriseret af færre og større anlæg. I 1971 var fordelingen af forskellige magnetiske anlæg, 39).

	USA	USSR	Europa	Andre
lineære anlæg	22	26	22	9
toroidale anlæg	18	13	23	8
andre	7	4	18	4

Ved 197o-ernes slutning så billedet af magnetiske fusionsanlæg således ud, 4o).

	1974	1977
Tokamak	7	14
spejlmaskiner	1	3
andre	1	5

Det fremgår af oversigterne, at det er Tokamak-reaktorerne, der bygges i disse år i fusionsforskningsprogrammerne. Oversigterne medtager kun sådanne opstillinger som kan siges at operere på den front, hvor nye forskningsresultater kan forventes at blive opnået. Økonomisk fordelte forskningsindsatsen i 1973 sig således, 41).

Sovjetunionen	37,1%
USA	15,8%
Vesttyskland	13,o%
Japan	9,3%
Frankrig	7,2%
England	4,5%
Andre lande	13,1%

Der har imidlertid været en kraftig vækst i forskningsmidlerne til fusionsenergien i årene efter olieforsyningskrisen i 1974. USA budgetterne til fusionsforskningen er optegnet i appendix D. I Europa har beslutningen om at bygge et fælleseuropæisk fusionsanlæg også betydet en udvidelse af forskningsaktiviteterne.

I 1979 påbegyndtes bygningen af den fælleseuropæiske Tokamak - Joint European Torus(JET). Reaktoren bygges i Culham i England af EF-landene og Sverige og Schweiz. Den forventes sat i drift 1982-83. Med JET reaktoren er: "det hensigten, at studere plasmaer, der er nær ved at opfylde de to betingelser", 42) - altså temperatur og Lawson produkt samtidig i reaktorområdet. I de samme år sættes endnu større Tokamak maskiner i drift i USA og Sovjet. Det drejer sig om Tokamak Fusion Test Reactor(TFTR) i Princeton, USA og Sovjets T-2o Tokamak reaktor. Med disse reaktorer er det videnskabelige gennembrud indenfor rækkevidde i løbet af 198o-erne, hævder fusionsreaktorfolk.

Efter disse reaktorer vil der i årene omkring 199o blive bygget eksperimentelle kraft-fusionsreaktorer. De vil som hovedopgave få at teste og udvikle materialer, energiomdannelsesteknik, brændselspåfyldning, udstødningsteknik m.v. De vil med andre ord skulle udføre det teknologiske gennembrud. Om denne fase af reaktorudviklingen vil forløbe nationalt eller i internationalt samarbejde diskuteres allerede i dag:

> "Gennem IAEA har russiske fusionsforskere for ca. ½ år siden (1978 min anm) fremlagt forslag om, at næste generation af Tokamak eksperimenter(generationen efter Europa's JET og eksperimenter af tilsvarende størrelse, dvs. projekter til ca. 1 milliard kroner i USA, USSR og Japan) skal planlægges og bygges i et virkeligt internationalt samarbejde." 43)

En gruppe med medlemmer fra Europa, Sovjet, USA og Japan er i gang med at definere et sådant projekt, der vil kunne blive en elproducerende prototype af et fusionskraftværk.

Efter generationen af eksperimentelle kraftreaktorer følger en generation af demonstrations-kraftreaktorer. Disse reaktorer vil producere overskudsenergi på mange hundrede megawatt.

De vil fremstille mere tritium end de forbruger og demonstrere, at håndteringen af radioaktive materialer i form af dagligt udslip og affaldsopbevaring kan gennemføres. Reaktorerne vil blive bygget omkring år 2ooo og være de sidste forløbere for egentligt økonomisk rentable fusionskraftværker, der så kan "se dagens lys" i årene 2olo . . 2o . . 3o.

Fusionskraft - BIG technology.

Allerede tidligt i Tokamak udviklingen stod det klart, at en fusionsreaktor vil blive stor sammenlignet med eksisterende kraftværker, incl. de konventionelle atomkraftværker.

> "Den totale effekt vil blive stor - sikkert mere end 1ooo MW(e) og måske 5ooo MW(e)." 44)

> "Det er en størrelse, som i energiproduktion svarer til samtlige danske kraftværkers samlede produktion i dag", 45)

> " eksperimentelle kraftreaktorer: 1o - nogle 1oo MW(th)
> prototypr demonstrationsreaktorer: 25o - 5oo MW(e)
> semi-kommercielle reaktorer: 1ooo - 15oo MW(e)"
> 46)

Laser reaktorerne: På Lawrence Livermore Laboratoriet i USA er fusionsforskningens hidtil største laser system bygget. Shiva-lasersystemet bestående af 2o neodymium-glas lasere blev taget i brug i begyndelsen af 1978. Forventningerne til Shiva er, at systemet når ca. 1% af niveauet for det videnskabelige gennembrud, 47). Men den videre laser udvikling er allerede planlagt. Det drejer sig om at nå det videnskabelige gennembrud ved bygning af endnu større og forbedrede laser systemer.

> "Nova neodymiun-glas laseren, hvis bygning påbegyndtes på Lawrence Livermore Laboratoriet i 1979 forventes sat i drift i 1984-85 . . . " 48)

Med Nova systemet, der er ca. tre gange så stort som Shiva, forventes det videnskabelige gennembrud at blive nået. Fra midten af 198o-erne kan 1oo k joule CO_2 laser systemet i Los Alamos Laboratoriet, USA også bidrage i kampen mod det videnskabelige gennembrud. I Japan, Sovjet og Frankrig er der også laser systemer under udvikling. Det drejer sig også her om

både neodymium og CO_2 lasere. Fungerende laser fusionskraftværker forventes af mange forskere at blive store enheder. De vil som Tokamak-erne blive af størrelsesordenen 1ooo MW(e) eller mere, 49).

Blandingsreaktorerne : Disse reaktorer er ikke så langt, rent udviklingsmæssigt som Tokamak- og laser-fusiosnreaktorerne. Til gengæld kræver de ikke som de andre "rene" elproducerende reaktorer et Lawson produkt i reaktorområdet. De kan med energioverskud drives med mindre værdier af plasmatæthed og sammenholdstid. Men både USA og Sovjet har undersøgelser og planlægning i gang. I USA foregår det på Argonne National Laboratoriet. I Sovjet er en 25oo MW(e) fusions-fissions hybrid reaktor af Tokamak typen under planlægning med henblik på bygning af den første kommercielle blandingsreaktor. Der er tale om at bygge en Tokamak reaktor med en kappe af uran udenom. Den årlige produktion af plutonium i denne reaktor vil blive 42oo kg, der kan bruges som brændsel i eksisterende, konventionelle atomkraftværker, 5o).

Fusionskraft i dansk energi- og industripolitik.

Sammenlignet med de eksisterende atomkraftværker på 6oo - 1ooo MW(e) vil der med fusionskraftværker blive tale om endnu større enheder. Yderligere teknologisk centralisering vil blive resultatet. For Danmark vil en satsning på fusionskraft engang i fremtiden betyde samkøring med det europæiske højspændingsnet. Det finder allerede sted i udstrakt grad. Danmark hænger elektrisk sammen med Tyskland over landegrænsen, med Sverige over Læsø og under Øresund og med Norge under Skagerak. Der findes ca. 2o kraftværker i Danmark i dag. De kan forsyne landet med elektricitet. Samkøringen har til opgave at koordinere elforbruget i de respektive lande. Køb og salg af elektricitet finder sted. Hertil kommer reservekapacitetsperspektivet. Hvis et dansk kraftværk "falder ud" på grund af driftsforstyrrelser kan et svensk, et tysk eller et norsk værk eller flere tilsammen erstatte den manglende effekt på det danske kraftværk.

Et dansk elnet baseret på fusionskraft vil højest kunne indeholde nogle få fusionskraftværker. Den sandsynlige udvikling er EF-fusionskraft. Et vesteuropæisk elnet vil kunne opbygges af de meget store fusionsenheder. I dette sammenhængende net vil det kunne lade sig gøre rent økonomisk at have reservekapacitet til rådighed. En selvstændig, dansk fusionsbaseret elforsyning vil kræve bygning af de værker, der er nødvendige for driften og så en reserveeffekt af samme størrelse. Det hænger sammen med, at når en så stor enhed falder ud, skal der en lige så stor enhed til for at erstatte den. Jo større enheder jo mere reserveeffekt. Det siger sig selv, at det er en meget kostbar løsning på kraftværkssammensætningen i et land af Danmarks størrelse.

Men Danmark hænger jo allerede sammen med nabolandene af driftsøkonomiske og forsyningssikkerhedsmæssige grunde. Og fra både Sverige og Tyskland får vi allerede atom-strøm, når disse lande i perioder leverer strøm ind på det danske net. Rigtig nok ! Men endnu er der realiteter i at tale om en dansk elektricitets planlægning. Med fusionskraftværker i den vesteuropæiske elforsyning vil udbygningsplaner og prognoser for det fremtidige forbrug skulle ske i EF-sammenhæng - af rentabilitetshensyn. Fusionskraft i Danmark betyder det modsatte af en energipolitik, der prioriterer selvstændig forsyningssikkerhed højt.

Industripolitisk vil Danmark stå svagt i konkurrencen med de store nationers industrielle formåen ved udbygning med fusionsreaktorer. Da JET projektet var vedtaget skrev en af de danske fusionsforskere, V.O.Jensen, Risø:

> "Jet-projektet er et fælleseuropæisk projekt; derfor har dansk industri og arbejdskraft ret til på lige fod med andre lande at deltage i eksperimentets opbygning." 51).

JET er et forsøgsprojekt, omend i stor skala. Det er et projekt med en årlig udgift på ca. 1500 b fr i konstruktionsfasen, 52). Alligevel lykkedes det ikke dansk industri at gøre sig gældende i det første års bygge- og udviklingsprogram.

> "Pr 31.marts 1979 havde ingen danske virksomheder sluttet kontrakt om hverken fremstilling eller afprøvning af komponenter til EF's fusionsforskningsprojekt JET i Culham i Storbrittanien." 53).

På det nævnte tidspunkt var der indgået kontrakter for ialt ca. 32o millioner kroner. England, Tyskland, Frankrig og Italien - EF's fire store - havde taget sig af den overvejende del. Det er ingen ny situation for Danmark. I 1971 blev Danmark meldt ud af ESRO, som det fælleseuropæiske rumsamarbejde dengang hed. En af årsagerne bag udmeldelsen var, at dansk elektronikindustri ikke havde formået at gøre sig gældende. Danmark blev siden optaget i det omorganiserede European Space Authority(ESA). På samme måde har dansk industri haft besvær med at bidrage til produktionen af dele til F-16 jagerbombere i det omfang, der lå i den danske regerings købsbetingelser. Også til det europæiske kerneforskningscenter, CERN i Schweiz har dansk industri først efter mange års forløb formået at bidrage med leverencer.

Der hvor energipolitikken i dag indeholder en høj grad af ressourceafhængighed med import af olie og kul, vil en atomlinie i dansk energipolitik indeholde både en ressource- og en teknologiafhængighed. Både konventionelle atomreaktorer, formerings- og fusionsreaktorer skaber en sådan afhængighed. Når hertil lægges en mulig overnational EF energiplanlægning må det konstateres, at en langsigtet energipolitik baseret på egne ressourcer og teknologi tilpasset dansk industri virkelig vil være en alternativ energipolitik.

Fusionsenergien i international sammenhæng.

Fusionsprogrammerne er vokset ud af brintbombefremstillingen. I eksisterende brintbomber "fyres" en fissionsbombe(atombombe) baseret på plutonium eller uran af for at opnå de høje temperaturer, der sætter fusionsprocesserne igang med den enorme sprængkraft til følge. Den "rene" brint bombe er en lasertændt brintbombe. Denne bomber er næppe en realitet endnu. Men det store laser fusionsforskningsprogram på Lawrence Livermore Laboratoriet har både til hensigt at udvikle kraftreaktorer og kernevåben - altså et blandet civilt og militært program, 54).

I den løbende, internationale atomdebat er spredningen af plutonium blevet draget frem, fordi det kan betyde spredning af atomvåbenfremstillingen. Præsident Carter anbefalede i 1977 en reduceret udviklingstakt af formeringsreaktorerne, som jo skal fremstille store mængder plutonium samtidig med, at de producerer elektricitet direkte til højspændingsnettet. Blandingsreaktoren er det atomteknologiske svar på Carters plutoniumbekymring. Denne reaktortype adskiller brændsels- og elfremstillingen.

> "Den kendsgerning at brændselsfabrikkerne adskilles fra elektricitetsværkerne er af stor betydning for at undgå at sprede kernevåben. Den nuværende situation vil kunne opretholdes; de lande som for tiden leverer brændsel kan fortsætte med det." 55).

En sådan udvikling vil sætte de lande, som i forvejen har det atomare lederskab i verden, i stand til fortsat at kontrollere brændselsleverencerne til de øvrige lande, som har bygget konventionelle atomkraftværker. Det er en udvikling, der både støtter FN's ikke-spredningspolitik og som funderer de eksisterende atomindustrielle dominansmønstre, som især indehaves af USA og Sovjetunionen.

Atomkraftsamfundet.

Foran er der fokuseret på, at fusionsreaktorerne vil blive bygget i endnu større enheder end de eksisterende - store - atomkraftværker. Udviklingen af dem er forbundet med den militære udnyttelse af atomkraften. Det er som om et lille land som Danmark skrumper endnu mere ind i fusionsenergisamfundet. Afstanden mellem de mange og eliten - de få - vil blive forøget. Det siger kritikerne af atomkraften. Men hvad siger anbefalerne. En af dem er Alvin M. Weinberg. Han er en af veteranerne i USA i arbejdet med udbredelsen af atomkraften. Han er grundlæggende bekymret.

> "Atomkraften er i vanskeligheder. Til trods for fortalernes forsikringer, er en væsentlig og voksende del af befolkningen usikker på den vej, der skal følges. Det nukleare moratorium er i USA blevet afvist af et totredjedelsflertal. Fortalerflertallet mener, at det er grønt lys for atomkraften. Men det er uberettiget: et energisystem som frygtes af en tredjedel af befolkningen, kan ikke overleve." 56)

Som reaktion på sin bekymring over at en tredjedel af den amerikanske befolkning kræver et midlertidigt stop for udbygningen med atomkraftforeslår Weinberg nogle retningslinier for atomkraften, 57).

- Fysisk isolering af atomkraften. lo reaktorer med tilhørende oparbejdningsanlæg og affaldsplads skal samlet lokaliseres på øde steder.
- Forøget sikkerhed på anlæggene. De ansatte, såvel lederne som arbejderne , skal underlægges sikkerhedsregler som på våbenlaboratorier og på strategiske luftvåbenbaser.
- Professionalisering af de nukleare anlæg. Bedre uddannelsesmæssig baggrund og dertil hørende højere løn skal sikre et mere velkvalificeret personale.
- Adskillelse af produktion og distribution. Atomanlæggene som fremstiller brændsel og elektricitet, skal drives af en offentlig regeringsorganisation. Distribution af elektricitet skal fortsat udføres af de private selskaber.
- Udødelige atominstitutioner. Offentlige regeringsorganisationer består. Derfor skal de tage vare på alle dele af atomkraften, som har langlivede radioaktivitetsproblemer.

Forvisning af atomkraften til ubeboede, øde steder. Professionelle, civile "atomkraftsoldater". Forsvars- og atomkraftministeriet tegner sig i Weinberghorisonten af atomkraftsamfundet. Det ser ud som om en repræsentant fra de øverste atommyndigheder i USA er enig med atomkraftkritikerne om i hvert fald dele af atomkraftsamfundets "udseende". Forskellen fremkommer ved, at Weinberg ønsker atomsamfundet ført ud i livet. Kritikerne ønsker det modsatte.

Referencer.

1) J.T.McMullan m.fl. : Energy, Resources and Supply, J.Wiley and Sons, 1977, 5o8 sider
2) B.Lehnert : Kontrolleret Kernefusion, Naturens Verden vol.1o, 1972, side 336 - 346.
3) N.Arley og H.Skov: Atomkraft, Gyldendal, 1974, 217 sider
4) J.N.Hartley m.fl.: Potential Lithium Requirements for Fusion Power Plants, Energy, vol.3,1978, side 337 - 346.
5) Hartley, op.cit.
6) Hartley, op.cit.
7) R.K.Evans: Lithium Reserves and Resources, Energy, vol 3, 1978, side 379 -385.
8) W.Häfele m.fl. : Fusions and Fast Breeder Reactors, International Institute for Applied Systems Analysis,(IIASA), Laxenburg, Østrig 1977, 5o6 sider.
9) Hartley, op.cit.
1o) E.P.Comer: The Lithium Industry Today, Energy, vol.3, 1978, side 237 - 24o.
11) R.S.Pease : Towards a Controlled Nuclear Fusion Reactor, IAEA Bulletin, vol.2o, no.6, 1978, side 9 -12.
12) W.C.Gough and B.J.Eastlund: The Prospects of Fusion Power, Sc. American, vol.224, 1971, side 5o -64.
13) H.P.Furth : Progress Toward a Tokamak Fusion Reactor, Sc. American, vol 241, 1979, side 39 - 51.
14) P.Nielsen og H.Sørensen: Brændselspåfyldning på kommende fusionsreaktorer, i Plasmafysik og Fusionsforskning, Risø 198o, 22 sider.
15) A.L.Hammond m.fl.: Energy and the Future, American Association for the Advancement of Science, Washington 1973, 184 sider.
16) J.M.Williams: Progress in Fusion Reactor Design and Technology, i Fusion Reactor Design Consepts, IAEA, Wien 1978, side 5 -32.
17) Häfele, op.cit.
18) Häfele, op.cit.
19) Häfele, op.cit.
2o) Häfele, op.cit.

21) Häfele, op.cit.
22) Häfele, op.cit.
23) Häfele, op.cit.
24) Häfele, op.cit.
25) Häfele, op.cit.
26) Biologiska Effekter av Elektromagnetiska Fält inom Läg och Radiofrekvensområdet, Arbetarskyddsfonden, Sveavägen 166, Stockholm, 1978, 54 sider.
27) I.L.Silver and C.A.Tobias: Magnetic Fields and Their Biological Effects, in C.A.Tobias and P.Todd(ed): Space Radiation Biology and Related Topics, Academic Press New York and London, 1974, 648 sider.
28) Häfele, op.cit.
29) G.H.Miley: Fusion Energy Conversion, American Nuclear Society, 1976, 454 sider.
3o) Hammond, op.cit.
31) Hammond, op.cit.
32) M.Stickley: Laser Fusion, Physics Today, maj 1978, side 5o - 58.
33) H.A.Bethe: The Fusion Hybrid, Physics Today, maj 1979, side 44 - 51.
34) Bethe, op.cit.
Williams, op.cit.
35) Miley, op.cit.
36) Häfele, op.cit.
37) Häfele, op.cit.
38) Furth, op.cit.
39) Gough and Eastlund, op.cit.
4o) Williams, op.cit.
41) Häfele, op.cit.
42) P.Nielsen: Fusion - Fremtidens energiforsyning , i Energiforskning på Risø, Risø-M-2126, 1978, side 111 - 117.
43) V.O.Jensen og P.Nielsen: Fusionsforskningen ind i afgørende ny fase, Ingeniøren nr.41, 13.1o.1978,
44) D.J.Rose: Controlled Nuclear Fusion: Status and Outlook, Science, vol.172, 1971, side 797 - 8o8.

45) V.O.Jensen i P.Eriksen: Fusionsforskning - et håb om at tæmme brintbombens energi, Information, 9-1o.4.1977

46) Häfele, op.cit.

47) Physics Today april 1978, side 17

48) Stickley, op.cit.

49) Häfele, op.cit.

5o) E.P.Velikov m.fl.: Fusion-Fission Hybrid Tokamak Reactor for the Production of Fissile Fuel and Electric Energy, in Fusion Reactor Design Consepts, IAEA, Wien 1978, side 4o4 - 417.

51) V.O.Jensen: Jet vedtaget efter to års forsinkelse, Ingeniøren nr.44, 4.11.1977

52) EF kommissionen: Godkendelse af JET-projektets konstruktionsfase og Forslag til Rådets Afgørelse om at indføje Jet-projektet i Fusionsprogrammet, KOM(78) 147, endelig udgave, Bruxelles 11.4.1978.
og
EF kommissionen: Meddelelse til Parlamentet og Rådet fra Kommissionen om ajourføring af JET-projektet, KOM(79) 16o endelig udgave, Bruxelles 26.3.1979.

53) M.Malzer: Ingen dansk EF kontrakt på JET, Ingeniøren nr.25, 22.6.1979.

54) Physics Today april 1978, side 17

55) Bethe, op.cit.

56) A.M.Weinberg: Outline For An Acceptable Nuclear Future, Energy, vol.3, 1978, side 599-6o6

57) Weinberg, op.cit.

Note om sammenligning af fissions- og fusionsreaktorers miljøbelastning.

Det har ikke med det fremlagte om fusionsreaktorers miljøpåvirkning været hensigten at sige, hvilken slags atomreaktorer som totalt belaster miljøet mest. Det har været meningen at påpege, at fusionsreaktorerne også rummer sikkerhedsspørgsmål og affaldsproblemer.

Om tritiumbelastningen i fusions- og formeringsreaktorer skriver Häfele m.fl.:

> "Tritiummængden i en fusionsreaktor er ca. lo ooo gange så stor som i en formeringsreaktor pr. installeret MW(elektrisk). Tritiumkontrollen i fusionsreaktorer skal derfor være lige så mange gange bedre end i formeringsreaktorer for at opnå samme belastning på miljøet fra tritium."

Om affaldsproblemet hedder det hos Häfele m.fl.:

> "Den begrænsede levetid af brændslet i fissionsreaktorer og af konstruktionsmaterialerne i fusionsreaktorer vil resultere i store mængder højradioaktivt affald (lo til loo m^3 pr GW(termisk)·år) Dette affald skal behandles omhyggeligt og opbevares i adskillige tusinde år for 1.generations - rustfri stål-konstruerede fusionsreaktorer, og mindst lo gange længere for fissionsreaktorer. Mere præcise tal kræver mere præcise forudsætninger. Opbevaringstiden kan kortes ned til ca. 5o år for konstruktionsmaterialer fra fusionsreaktorer, hvis særlige vanadium-legeringer kunne anvendes. Sandsynligheden for at anvende sådanne legeringer i de første fusionskraftreaktorer er lille, fordi meget lidt er kendt om påvirkningerne på dem fra fusionsreaktorbestrålingen. Desuden eksisterer der ingen industri, der kan fremstille de tusindvis af tons, der skal bruges i de første fusionsreaktorer."

Appendix A: De energiproducerende processer.

De energiproducerende processer i en fusionsreaktor er:

$$D_1^2 + D_1^2 \rightarrow (T_1^3 + 1{,}01\ MeV) + (p_1^1 + 3{,}03\ MeV) \qquad (1)$$

$$D_1^2 + D_1^2 \rightarrow (He_2^3 + 0{,}82\ MeV) + (n_0^1 + 2{,}46\ MeV) \qquad (2)$$

$$D_1^2 + T_1^3 \rightarrow (He_2^4 + 3{,}54\ MeV) + (n_0^1 + 14{,}06\ MeV) \qquad (3)$$

$$D_1^2 + He_2^3 \rightarrow (He_2^4 + 3{,}67\ MeV) + (p_1^1 + 14{,}67\ MeV) \qquad (4)$$

Deuterium, D_1^2 forbrændes efter (1) og (2) med dannelsen af tritium, T_1^3 og helium-3, He_2^3 til følge. Med deuterium brændes den dannede tritium og helium-3 med dannelsen af helium-4, He_2^4 som resultat. Det samlede resultat er altså, at deuterium fusionerer til helium. Anderledes sagt: i de fire reaktionsligninger fusionerer 2 protoner og 2 neutroner til helium-4.

Deuterium, D_1^2 indeholder 1 proton, p_1^1 og 1 neutron, n_0^1. Helium-4 indeholder 2 protoner og 2 neutroner. Den resulterende proces er altså:

$$D_1^2 + D_1^2 \longrightarrow He_2^4$$

Massedefekten for denne proces er:

$$\begin{aligned} \Delta M_{He} &= 2M_p + 2M_N - M_{He} \\ &= 2 \cdot 1{,}008142 + 2 \cdot 1{,}008982 - 4{,}003873 \\ &= 0{,}030375\ amu \\ \Delta M_{He} &= 0{,}030375 \cdot 932{,}472\ MeV = \underline{28{,}32\ MeV} \end{aligned}$$

Det relative energiudbytte er:

$$\frac{\Delta M_{He}}{M_{He}} = \frac{28{,}32}{4{,}003873 \cdot 932{,}472} \sim \underline{8‰} \quad (= 0{,}0076)$$

Ved fusion af 2 protoner og 2 neutroner til en heliumkerne omsættes 8 promille af massen til energi. Reagerer 1 kg vil 8 gram stof omsættes til energi. Ifølge Einsteins ligning svarer det til:

$$\Delta E = \Delta M c^2 = 8 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ kg} \cdot \left(\frac{m}{s}\right)^2$$
$$= \underline{7{,}2 \; 10^{14} \text{ Joule}} = \underline{2 \cdot 10^8 \text{ kwh}}$$

da $1 \text{ joule} = \frac{1}{3{,}6 \cdot 10^6} \text{ kwh}$

Ved fusionering af 1 kg deuterium frigøres altså $2 \cdot 10^8$ kwh kerneenergi. Brændværdien af 1 kg olie er som brændværdien af o,7 kg kul og lig med 11,6 kwh. Altså: 1 kg olie= o,7 kg kul = 11,6 kwh. I 1 m^3 havvand er der:

$$\frac{1000}{9} \cdot \frac{0{,}015}{100} \text{ kg deuterium} = 0{,}0167 \text{ kg deuterium}$$

Ved fusionering af deuteriumindholdet i 1 m^3 havvand frigøres der en energimængde på:

$$E_{deut} = 0{,}0167 \cdot 2 \cdot 10^8 \text{ kwh} = \underline{3{,}333 \; 10^6 \text{ kwh}}$$

Det svarer til $3{,}333 \cdot 10^6$/ 11,6 kg olie = $2{,}87 \; 10^5$ kg olie
og $0{,}7 \cdot 3{,}333 \cdot 10^6$/ 11,6 kg kul = $1{,}17 \; 10^5$ kg kul

Fusionering af deuteriumindholdet i 1 m^3 havvand svarer altså til afbrænding af 117 tons kul eller 287 tons olie.

Den første fusionsreaktor vil imidlertid med stor sandsynlighed blive baseret på deuterium-tritium processen, fordi denne er lettere at få til at forløbe i en reaktor. Massedefekten og dermed energifrigørelsen ved denne proces er:

$$\Delta M_{D-T} = \left[(M_D + M_T) - (M_N + M_{He-4})\right]$$

$$\Delta E_{D-T} = \Delta M_{D-T} \cdot c^2$$

Atommasserne fremgår af tabellen sidst i dette appendix.
Lyshastigheden er $c = 3 \cdot 10^8$ m/sek

$$\Delta M_{D\text{-}T} = [(2{,}014735 + 3{,}016997) - (1{,}008982 + 4{,}003873)]$$
$$= 0{,}018877 \text{ amu}$$

$$\Delta E_{D\text{-}T} = 0{,}018877 \cdot 932{,}472 \text{ MeV} = \underline{17{,}60 \text{ MeV}}$$

Energien fremkommer som reaktionsprodukternes kinetiske energi. Men hvordan fordeler den samlede, frigjorte energi sig på reaktionsprodukterne n_0^1 og He_2^4 ? Antages det, at impulsen før stødet mellem tritium- og deuteriumkernerne er forsvindende sammenlignet med situationen efter stødet, fås; idet v_N og v_{He} er hastighederne af henholdsvis neutronen og helium-4 kernen efter stødet:

$$\frac{1}{2} M_N v_N^2 + \frac{1}{2} M_{He\text{-}4} v_{He\text{-}4}^2 = 17{,}60 \text{ MeV} \qquad (I)$$

$$M_N v_N + M_{He\text{-}4} \cdot v_{He\text{-}4} = 0 \qquad (II)$$

af II fås

$$v_{He\text{-}4}^2 = \left(\frac{M_N}{M_{He\text{-}4}}\right)^2 v_N^2$$

dette udtryk indsættes i I

$$\frac{1}{2} M_N v_N^2 + \frac{1}{2} M_{He\text{-}4} \left(\frac{M_N}{M_{He\text{-}4}}\right)^2 v_N^2 = 17{,}60 \text{ MeV}$$

$$\frac{1}{2} M_N v_N^2 \left(1 + \frac{M_N}{M_{He\text{-}4}}\right) = 17{,}60 \text{ MeV}$$

$$E_N = \frac{1}{2} M_N v_N^2 = 17{,}60 \frac{M_{He\text{-}4}}{M_N + M_{He\text{-}4}} = 17{,}60 \frac{4{,}003873}{1{,}008982 + 4{,}003873}$$

$$\underline{E_N = 14{,}06 \text{ MeV}}$$

E_N er neutronens kinetiske energi. Helium-4 kernens kinetiske energi, $E_{He\text{-}4}$ bliver derfor:

$$\underline{E_{He\text{-}4}} = \frac{1}{2} M_{He\text{-}4} \cdot v_{He\text{-}4}^2 = 17{,}60 - E_N = \underline{3{,}54 \text{ MeV}}$$

Fusions-grundstoffernes procentvise isotopsammensætning og deres isotop masser.

isotop	procent	amu
n_o^1	ustabil	M_N = 1,oo8982
p_1^1	99,9851	M_P = 1,oo8142
D_1^2	o,o149	M_D = 2,o14735
T_1^3	ustabil	M_T = 3,o16997
He_2^3	1,3 10^{-4}	$M_{He}3$ = 3,o16977
He_2^4	99,9999	$M_{He}4$ = 4,oo3873
He_2^6	ustabil	$M_{He}6$ = 6,o2o474
Li_3^6	7,52	$M_{Li}6$ = 6,o17o21
Li_3^7	92,47	$M_{Li}7$ = 7,o18223
Li_3^8	ustabil	$M_{Li}8$ = 8,o25o18

Atommasse enheden amu (atomic mass unit) er her baseret på den gamle fysiske skala, hvor 1 amu er massen af 1/16 af iltisotopen O_8^{16}

$$\underline{1 \text{ amu} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

1 amu omregnes til energienheder via Einsteins ligning

$$\underline{1 \text{ amu}} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ kg m}^2/\text{sek}^2 = \underline{1{,}494 \cdot 10^{-10} \text{ Joule}}$$

1 elektronvolt (ev) = 1,6o2 10^{-19} Joule

udtrykt i millioner elektronvolt(MeV) er 1 amu:

$$\underline{1 \text{ amu}} = \frac{1{,}494 \cdot 10^{-10}}{1{,}602 \cdot 10^{-13}} \text{ MeV} = \underline{932{,}472 \text{ MeV}}$$

Appendix B: Temperatur, tæthed og sammenholdstid.

I et reagerende fusionsplasma skal de positive ioner overvinde Coulombfrastødningen imellem dem. Det er ensbetydende med en energi af størrelsen

$$E = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \; e^2}{4\pi\varepsilon_0 \cdot R_0}$$

her er Z_1 og Z_2 atomnumrene af de reagerende kerner; e er elektronens ladning og R_0 den afstand mellem de reagerende kerner, hvor frastødningskræfterne bliver dominerende, dvs. R_0 er minimumsafstanden, hvor Coulomb's lov stadig gælder. For et D-T plasma er værdierne:

$$Z_1 = Z_2 = 1$$

$$R_0 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Hertil kommer

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ Coulomb}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Et skøn over temperaturen kan fås ved at sætte Coulombenergien lig 3/2 kT, hvor T er <u>den kinetiske temperatur</u>. Den siger alene noget om partiklernes indbyrdes bevægelser. $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Joule/°K er Boltzmanns konstant.

$$E = \frac{1 \cdot 1 \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 36\pi}{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-15}} \sim \frac{3}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot T$$

$$T \sim \frac{2 \cdot 1{,}6^2 \cdot 9}{3 \cdot 5 \cdot 1{,}38} \cdot \frac{10^{-38}}{10^{-47}} = \underline{2{,}23 \cdot 10^9 \text{ °K}}$$

Overslagsberegningen viser, at et fusionsplasma for at brænde skal op på en temperatur på adskillige hundrede millioner grader. En mere nøjagtig beregning af antændelsestemperaturen skal medtage partiklernes energifordeling. De er Maxwell-fordelt. Fusions-reaktions-tværsnittene $\sigma(v)$, dvs reaktionssandsynlighederne er målt ved laboratorieforsøg; v er de reagerende partiklers relative hastighed. Middelværdien $\overline{\sigma v}$ kan udregnes , når tværsnittenes hastighedsafhængighed er kendt.

$\overline{\sigma v}$ som funktion af temperaturen.

Temp keV	D-T $cm^3 \cdot sek^{-1} \cdot 10^{-19}$	D-D $cm^3 \cdot sek^{-1} \cdot 10^{-19}$	D-He^3_2 $cm^3 \cdot sek^{-1} \cdot 10^{-19}$
1	0,07	0,002	$6 \cdot 10^{-7}$
2	3,0	0,05	$2 \cdot 10^{-4}$
5	140,0	1,5	0,1
10	1100,0	8,6	2,4
20	4300,0	36,0	32,0
60	8700,0	160,0	700,0
100	8100,0	300,0	1700,0

$1\,keV = 1{,}16 \cdot 10^7\,°K$

Reaktionshastigheden bliver

$$R_{12} = n_1 \cdot n_2 \cdot \overline{\sigma v}$$

Det er antallet af reaktioner, når tæthederne af de reagerende partikler er n_1 og n_2. Hvis der ved hver par-reaktion frigøres en energi på Q joule, så bliver energiproduktionshastigheden

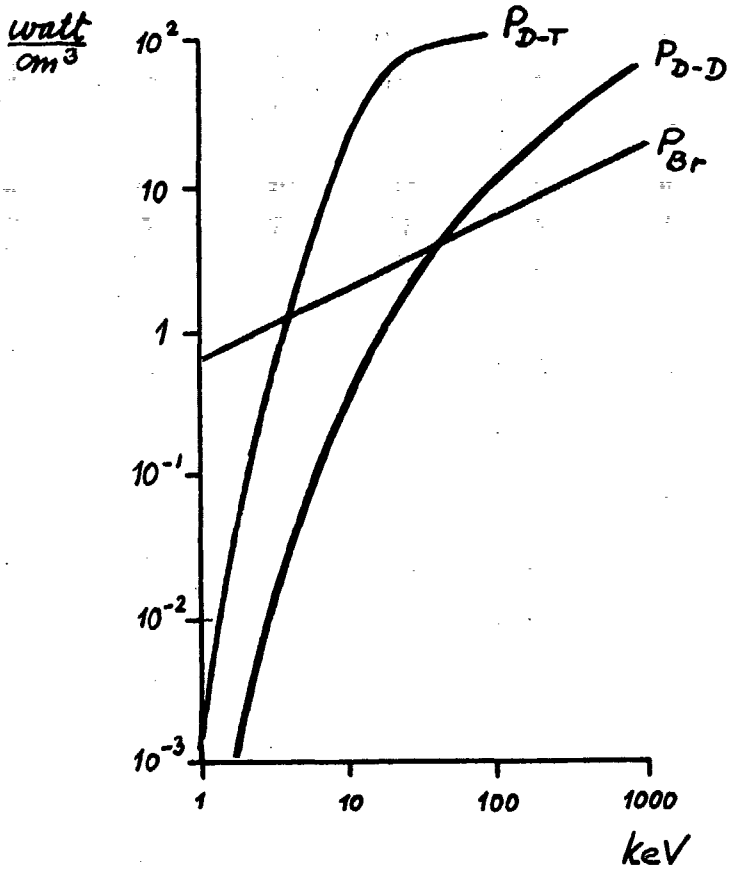
$$P_{12} = R_{12} \cdot Q = n_1 \cdot n_2 \cdot \overline{\sigma v} \cdot Q \quad \frac{watt}{cm^3}$$

Ved reaktionssammenstødene mellem positive og negative partikler sker der en opbremsning. Derved tabes der energi, som i form af bremsestråling udsendes fra plasmaet. Den udsendes som røntgen- og ultraviolet stråling, dvs. som elektromagnetisk stråling. Det gælder, at bremsestrålingen fra et plasma er givet ved

$$P_{Br} = 5{,}35 \cdot 10^{-31} n_e \sum (n_i Z^2)\, T_e^{1/2} \quad \frac{watt}{cm^3}$$

Her er T_e elektrontemperaturen i keV, n_e antallet af elektroner pr cm^3, n_i antallet af ioner med ladning Z pr cm^3. Den <u>ideale</u> antændelsestemperatur, dvs. der hvor plasmaet brænder

med energioverskud, er det punkt, hvor fusionsenergiproduktionen og bremsestrålingstabet balancerer hinanden.



Energiproduktionshastigheden fra fusion og tabene på grund af bremsestråling, som funktion af den kinetiske temperatur for en tæthed på 10^{15} kerner/ cm^3

Af figuren aflæses at den ideale antændelsestemperatur er

for D-D $\quad T_{DD} = 36\ keV = 4{,}18 \cdot 10^8\ °K$

for D-T $\quad T_{DT} = 4\ keV = 4{,}65 \cdot 10^7\ °K$

Lawson-kriteriet.

Hvis et plasma holdes sammen ved temperaturen T i t sekunder og hvis det indeholder 2 n partikler/ cm^3, så vil gennemsnitsenergien pr. partikel være $\frac{1}{2} \cdot k \cdot T$. Det forudsætter en Maxwell temperaturfordeling. Den samlede energi, der skal til for at bringe plasmaet op til temperatur T er da

$$2n \cdot 3 \cdot \tfrac{1}{2} \cdot kT = 3nkT$$

Hvis den frigjorte fusionsenergi er P_f og energitabet ved bremsestråling er P_{br}, så vil den samlede energifrigørelse i løbet af tiden t være

$$(P_f + P_{br}) \cdot t + 3nkT$$

Antages det, at 33% af denne energi kan nyttiggøres ved omdannelse, dvs. nyttevirkningen i fusionsreaktoren sættes til 1/3, så er betingelsen for reaktordrift med energioverskud

$$\frac{1}{3}\left\{(P_f + P_{br}) \cdot t + 3nkT\right\} > P_{br} \cdot t + 3nkT$$

$$\frac{1}{3} P_f \cdot t > \frac{2}{3} P_{br} \cdot t + 2nkT$$

$$\frac{\frac{1}{3} P_f \cdot t}{\frac{1}{3} P_{br} \cdot t + nkT} > 2$$

$$\boxed{\frac{\dfrac{P_f}{3n^2kT}}{\dfrac{P_{br}}{3n^2kT} + \dfrac{1}{n \cdot t}} > 2}$$

P_f og P_{br} er proportional med n^2. Derfor bestemmer T og n·t alene fusionsplasmaets opførsel. Ved temperaturer langt over antændelsestemperaturen gælder det

$$P_f \gg P_{br}$$

Lawson-kriteriet simplificeres derfor til

$$\frac{\frac{P_f}{3n^2kT}}{\frac{1}{n\cdot t}} > 2$$

$$n\cdot t > \frac{6n^2kT}{P_f} = \frac{6n^2kT}{n^2\overline{\sigma v}\cdot Q}$$

$$n\cdot t > \frac{6kT}{\overline{\sigma v}\cdot Q}$$

D-T plasma

Ved T = 10 keV er $\overline{\sigma v} = 11\cdot 10^{-17}$ cm^3/ sek

Q = 17,60 MeV = $17{,}6\cdot 10^3$ keV

$$n\cdot t > \frac{6\cdot 10}{1{,}1\cdot 10^{-16}\cdot 17{,}6\cdot 10^3} \simeq 3\cdot 10^{14}\ \frac{\text{sek}}{\text{cm}^3}$$

D-D plasma

Ved T = 100 keV er $\overline{\sigma v} = 300\cdot 10^{-19}$ cm^3/ sek

Q = 4 MeV = $4\cdot 10^3$ keV

$$n\cdot t > \frac{6\cdot 100}{3\cdot 10^{-17}\cdot 4\cdot 10^3} \simeq 5\cdot 10^{15}\ \frac{\text{sek}}{\text{cm}^3}$$

Appendix C: Ladede partikler i et magnetfelt.

Et plasma består af ladede partikler. De påvirkes af et magnetfelt. Dette bruges til at holde sammen på plasmaet, der således ikke kommer i berøring med materielle vægge i reaktionskammeret. En enkelt ladet partikel med ladning q, der bevæger sig i et elektromagnetisk felt, er påvirket af Lorentz kraften

$$\bar{F} = q(\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B})$$

Her er $\bar{E}$ den elektriske feltvektor og $\bar{B}$ den magnetiske feltvektor. $\bar{v}$ er partiklens hastighedsvektor. Hvis partiklens masse er m, fås bevægelsesligningen

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = q(\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B})$$

hvis E = o og B er konstant fås B = (o,o,B)

$$\bar{v} \times \bar{B} = \{ v_y B, -v_x B, 0 \}$$

bevægelsesligningen splitter derfor op i følgende ligninger

$$m \frac{dv_x}{dt} = q v_y B$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -q v_x B$$

$$m \frac{dv_z}{dt} = 0$$

Dette system af koblede differentialligninger har løsningerne

$$v_x = |v_x| \sin \omega_c t \; ; \quad v_y = |v_y| \cos \omega_c t \; ; \quad \omega_c = \frac{qB}{m}$$

$$v_z = |v_z| = k_{st}$$

Bevægelsen i x-y planet er en cirkelbevægelse med frekvens $\omega_c = \frac{qB}{m}$ I z-retningen er bevægelsen retlinet og konstant. Den resulterende bevægelse er en skruelinie bevægelse. Partiklerne spiraliserer rundt om de magnetiske feltlinier. Dette eksempel viser princippet hvorefter et magnetfelt kan fastholde ladede partikler. I en fusionsreaktor er der ikke tale om et homogent, konstant magnetfelt. Desuden optræder der kollektive bevægelser i plasmaet som følge af at det ikke er et én-partikel, men et mange-partikel problem.

For at skønne over megnetfeltstyrken i en fusionsreaktor betragtes trykforholdene i plasmaet. Det kinetiske gastryk svarende til plasmaets tæthed, n og temperatur,T er

$$p = n \cdot k \cdot T$$

k er Boltzmann's konstant.

Hvis plasmaet består af n_i ioner med hastigheden $\bar{v}_i$ og n_e elektroner med hastigheden $\bar{v}_e$, så vil trykgradienterne $\underline{\nabla} p_i$ og $\underline{\nabla} p_e$ fremkaldt af magnetfeltet med feltstyrke $\bar{B}$ være

$$\underline{\nabla} p_i = n_i \cdot e \cdot \bar{v}_i \times \bar{B}$$

$$\underline{\nabla} p_e = -n_e \cdot e \cdot \bar{v}_e \times \bar{B}$$

den resulterende trykgradient er derfor

$$\underline{\nabla} p = ne(\bar{v}_i - \bar{v}_e) \times \bar{B}$$

hvis antallet af elektroner og ioner er ens. e er elektronladningen. Strømtætheden $\bar{j}$ er

$$\bar{j} = n \cdot e \cdot (\bar{v}_i - \bar{v}_e)$$

hvorfor

$$\underline{\nabla} p = \bar{j} \times \bar{B}$$

ifølge Maxwell ligningen

$$\underline{\nabla} \times \underline{B} = \mu_0 \bar{j} \quad ; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Henry}{m}$$

fås

$$\underline{\nabla} p = \frac{1}{\mu_0} (\underline{\nabla} \times \underline{B}) \times \underline{B}$$

I et radialt magnetfelt simplificeres udtrykket til

$$\underline{\nabla} p = -\frac{1}{2\mu_0}\underline{\nabla} B^2$$

hvilket giver

$$\underline{\nabla}\left(p + \frac{1}{2\mu_0}\cdot B^2\right) = 0$$

Det betyder, at

$$p + \frac{1}{2\mu_0} B^2 = kst.$$

$B^2/2\mu_0$ repræsenterer et magnetisk tryk og er energitætheden af magnetfeltet. Når plasmaet udsættes for et ydre magnetfelt med feltstyrke $\bar{B}_0$, så gælder det - idet trykket på plasmaets yderside er nul

$$p + \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

$\bar{B}$ er feltet et vilkårligt sted inde i plasmaet. Det maksimale tryk i et diamagnetisk plasma bliver

$$p_{max} = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

For et brændende D-T plasma giver det, hvis tætheden er: $n = 10^{15}$ partikler/cm^3 og temperaturen: T = 10 keV

$$p = n\cdot k\cdot T = 10^{15}\cdot 10^{6}\cdot 10\cdot 1{,}602\cdot 10^{-16}\ \frac{N}{m^2}$$
$$= 1{,}6\cdot 10^{6}\ \frac{N}{m^2} \simeq 16\ atm$$

$$B_0^2 = 2p\cdot\mu_0 = 2\cdot 1{,}6\cdot 10^{6}\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}\ \frac{N}{m^2}\cdot\frac{Henry}{m}$$
$$= 4{,}02\cdot\left(\frac{Wb}{m^2}\right)^2$$

$$B_0 \simeq \underline{2\ \frac{Wb}{m^2}} = \underline{2\cdot 10^{4}\ Gauss}$$

Appendix D : Fusionsforskningen i USA.

år	magnetisk sammenholdt fusion	inertial sammenholdt fusion
	millioner dollars	
1963	2o	2
1964	21	2
1965	21	3
1966	21	3
1967	22	3
1968	23	4
1969	26	4
197o	33	5
1971	31	1o
1972	32	19
1973	45	34
1974	51	44
1975	95	58
1976	133	95
1977	23o	1o5
1978	29o	119

efter G.Yonas: Fusion Power with Particles Beams, Sc.American, vol.239, no.5, 1978, side 4o - 51.

16/79 "STATISTIK I KRÆFTFORSKNINGEN". Projektrapport af Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

17/79 "AT SPØRGE OG AT SVARE i fysikundervisningen"
Albert Christian Paulsen.

18/79 "MATHEMATICS AND THE REAL WORLD", Proceedings of an International Workshop, Roskilde university centre (Denmark), 1978. Preprint.
Bernhelm Booss & Mogens Niss (eds.).

19/79 "GEOMETRI, SKOLE OG VIRKELIGHED".
Projektrapport af Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen og Per H.H. Larsen.
Vejleder: Mogens Niss.

20/79 "STATISTISKE MODELLER TIL BESTEMMELSE AF SIKRE DOSER FOR CARSINOGENE STOFFER".
Projektrapport af Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

21/79 "KONTROL I GYMNASIET - FORMÅL OG KONSEKVENSER".
Projektrapport af Crilles Bacher, Per S. Jensen, Preben Jensen og Torben Nysteen.

22/79 "SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (1)". 1-port lineært response og støj i fysikken.
Peder Voetmann Christiansen.

23/79 "ON THE HISTORY OF EARLY WAVE MECHANICS - with special emphasis on the role of relativity".
Helge Kragh.

24a/80 "MATEMATIKOPFATTELSER HOS 2.G'ERE" 1. En analyse.
24b/80 "MATEMATIKOPFFATTELSE HOS 2.G'ERE" 2. Interviewmateriale.
Projektrapport af Jan Christensen og Knud Lindhardt Rasmussen.
Vejleder: Mogens Niss.

25/80 "EKSAMENSOPGAVER" Dybdemodulet/fysik 1974-79.

26/80 "OM MATEMATISKE MODELLER". En projektrapport og to artikler.
Jens Højgaard Jensen m.fj.

27/80 "METHODOLOGY AND PHILOSOPHY OF SCIENCE IN PAUL DIRAC's PHYSICS"
Helge Kragh.

28/80 "DIELEKTRISK RELAXATION - et forslag til en ny model bygget på væskernes visco-elastiske egenskaber".
Projektrapport, speciale i fysik, af Gert Kreinøe.
Vejleder: Niels Boye Olsen.

29/80 "ODIN - undervisningsmateriale til et kursus i differentailligningsmodeller"
Projektrapport af Tommy R. Andersen, Per H.H.Larsen og Peter H. Lassen.
Vejleder: Mogens Brun Heefelt.

30/80 "FUSIONSENERGIEN - - - ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION".
Oluf Danielsen.

31/80 "VIDENSKABSTEORETISKE PROBLEMER VED UNDERVISNINGSSYSTEMER BASERET PÅ MÆNGDELÆRE"
Projektrapport af Troels Lange og Jørgen Karrebæk.
Vejleder: Stig Andur Pedersen.

32/80 "POLYMERE STOFFERS VISCOELASTISKE EGENSKABER - BELYST VED HJÆLP AF MEKANISKE IMPEDANS-MÅLINGER OG MÖSSBAUEREFFEKTMÅLINGER".
Projektrapport, speciale i fysik, af Crilles Bacher og Preben Jensen.
Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.