

Foto af ESS-faciliteten, som den tager sig ud i skrivende stund, med den nu delvist underjordiske tunnel og servicebygninger til højre. De mange byggekraner i baggrunden er ved target-bygningerne. Den røde pil markerer selve acceleratoren. Foto: Perry Nordeng



KUNSTEN AT BYGGE VERDENS MEST EFFEKTFULDE ACCELERATOR

Om forfatterne



Søren Pape Møller er centerleder ved Institut for Fysik og Astronomi og leder synkrotronstrålingsacceleratoren ASTRID2. Søren Pape Møller har deltaget i ESS-projektet siden starten i 2010 og er ansvarlig for det danske bidrag til acceleratoren i ESS.
fyssp@phys.au.dk



Heine Dølrath Thomsen har været med i ESS siden 2010 og har designet dele af ESS-acceleratoren og specielt stået for design, specifikation, test og nu indkøb af komponenter til de danske acceleratorkomponenter.
heine@phys.au.dk

For at kunne producere neutroner til brug i den kommende forskningsfacilitet European Spallation Source i Sverige er det nødvendigt at bygge verdens mest effektfulde accelerator. Og det er en teknisk bedrift, der byder på mange udfordringer.

Danmark er sammen med en række andre lande i gang med at bygge verdens stærkeste neutronkilde, *European Spallation Source*, i Lund i Sverige. Det vil give forskere nye muligheder for videnskabelige opdagelser inden for områder som materialer, energi, sundhed, miljø, kulturarv og fundamental fysik.

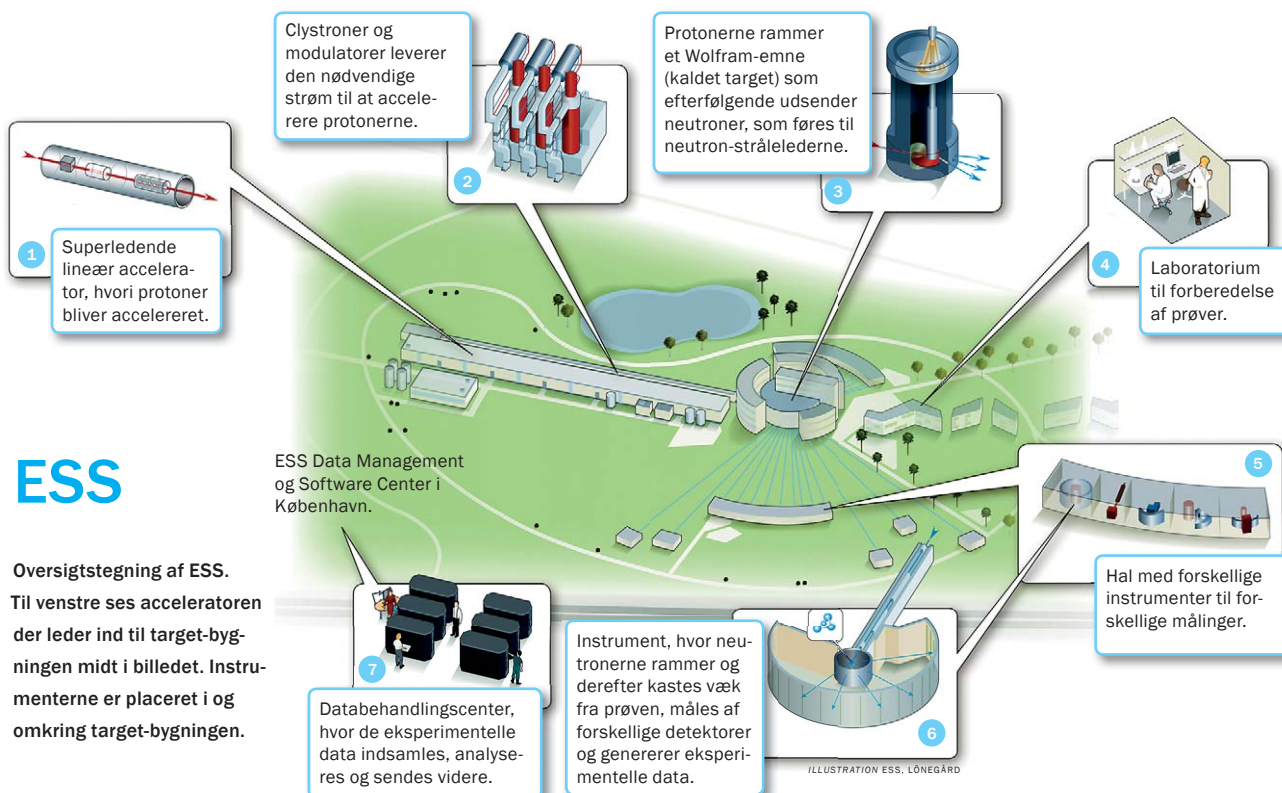
Som tidligere omtalt her i bladet står danske forskere for flere af de planlagte neutroneksperimenter. Men danske forskere er også involveret i designet af den avancerede accelerator, der er forudsætningen for, at der kan produceres mange

neutroner til eksperimenterne. Acceleratoren vil kunne levere den hidtil største effekt af en partikelstråle (5 MW) fra en accelerator. Udover at acceleratoren vil være en interessant maskine rent teknisk, vil den nødvendige teknologimodning og erfaring også være interessant for andre acceleratorprojekter, for eksempel til strålebehandling af kræftpatienter.

Neutroner fra reaktorer og accelerators

Hvis man har brug for neutroner til forskningsformål er der i princippet to forskellige kilder til at skaffe disse: kernereaktorer eller accelerato-

rer. Neutroner dannes i stort antal i reaktorer på de atomkraftværker, der producerer en væsentlig del af verdens elektricitet. I reaktorer spaltes tunge atomkerner som uran til lettere kerner under frigivelse af energi. Desuden udsendes der ved hver kernespaltning et overskydende antal neutroner, der kan give anledning til nye kernespaltninger, men som altså også kan bruges til forskningsformål. Igennem tiden er der blevet bygget et antal dedikerede forskningsreaktorer. Danmark har haft og har stadig en stærk position inden for materialeforskning med neutroner, hvilket stammer tilbage fra brugen af de i 2001 luk-



kede reaktorer på Risø. Den mest intense neutronstråling fra en reaktor findes i dag ved forskningsreaktoren ILL i Grenoble i Frankrig.

Frie neutroner kan også produceres ved såkaldt spallation, hvor man bombarderer atomkerner med andre lettere kerner. Herved udsendes der også et stort antal neutroner. Konkret foregår det ved at beskyde et tungt materiale, for eksempel wolfram, med en stråle af protoner ved høj energi. Sådanne acceleratorbaserede neutronkilder – kaldet spallationskilder – er blevet udviklet gennem de seneste tiår. Her kan vi nævne ISIS i England og den nuværende mest intense kilde *Spallation Neutron Source*, SNS, i USA – og selvfølgelig den kommende *European Spallation Source* (ESS) i Lund i Sverige.

Mange fordele ved spallation

En fordel ved spallationsprocessen er, at den ikke kan løbe løbsk – den stopper, når beskydningen med protoner standses. Denne sikkerhedsmæssige fordel anses for væsentlig i forhold til en reaktor. Yderligere produceres der meget

mindre radioaktivt materiale i en spallationskilde end i en reaktor. Endnu en fordel ved at anvende acceleratoren er muligheden for at accelerere pulserede stråler. Dette resulterer i pulserede neutronstråler, der med fordel kan udnyttes i selve neutroneksperimenterne, idet energien af neutronerne herved kan måles ved at bestemme deres flyvetid.

Hvor antallet af producerede neutroner, der kan bruges i et givet eksperiment fra en reaktor, menes at have nået sin praktiske og tekniske grænse for mange år siden, så er dette ikke tilfældet for en spallationskilde. Det skyldes især, at der er et uudnyttet potentiale af acceleratoren. Den kommende ESS forventes således at kunne producere neutronintensiteter, der er mindst en størrelsesorden højere end de hidtil bedste kilder.

For højenergetiske protoner, der skydes ind i en tyk wolframblok, er antallet af producerede neutroner stort set proportionalt med protonenergien. Derfor kunne man tro, at det gælder om at give protoner

så høj energi som muligt for at producere flest muligt neutroner. Men jo højere energi, protonerne har, jo længere trænger de ind i wolframblokkene, og derfor er alt for store protonenergier ikke optimalt. Simuleringer viser, at udbyttet af brugbare neutroner er størst ved en protonenergi på cirka 2 GeV, hvor der frigives 30-40 neutroner per indkommende proton. For at producere en neutronstråle med høj intensitet, skal vi altså især maksimere intensiteten af protonstrålen, og her er ambitionen en protonstråle med en effekt på hele 5 MW.

Acceleratoren i ESS

Der findes i dag flere typer af acceleratoren, der kan levere protoner med en energi på 2 GeV. I ESS er valget faldet på en såkaldt lineær radiofrekvensaccelerator (se boks), hvor svingende elektriske felter accelererer partiklerne successivt af flere gange. Ved at gøre den største del af acceleratoren superledende, holdes den forholdsvis kort (den bliver dog stadig 500 meter lang) og langt mere effektiv, om end den også bliver dyrere i konstruktion. Det spares dog hurtigt hjem på et

Princippet i en lineær radiofrekvens-accelerator

I den 500 meter lange accelerator i ESS øges protonernes energi af flere på hinanden følgende radiofrekvens-acceleratorer. I hver af disse sender man radiobølger, typisk på flere hundrede millioner svingninger per sekund (MHz), og man opnår svingende elektriske (og magnetiske) felter mellem de ophængte elektroder. En proton, der ankommer i accelerationsgabets til det rette tidspunkt, vil blive udsat for et fremadrettet elektrisk felt, altså en fremadrettet kraft, og derved øges protonens hastighed; den accelereres. Da protonerne således bevæger sig hurtigere og hurtigere gennem acceleratoren, skal længden af elektroderne øges for en fast frekvens. Ved udgangen af ESS acceleratoren har protonerne en hastighed meget tæt på lysets hastighed på 300.000 km/s. Protonstrømmen i pulsen vil være 62,5 mA. I ESS har man valgt de to radiofrekvenser 352 og 704 MHz. Dette vil bundte protonerne til 352 MHz, hvor hvert bundt vil være omkring et nanosekund langt.

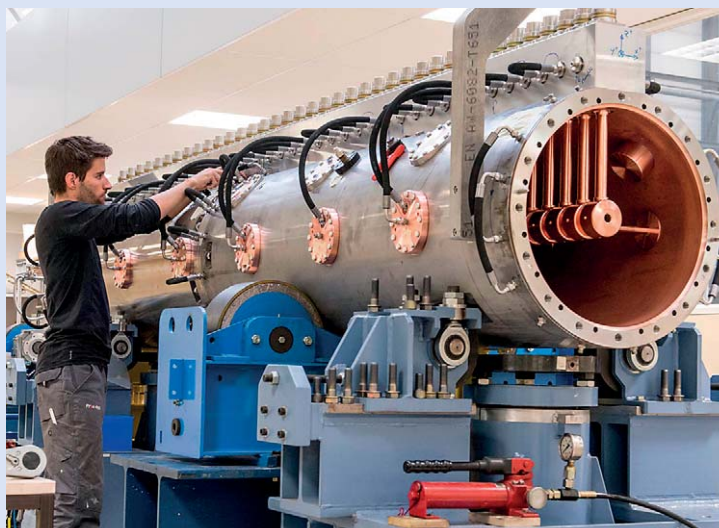
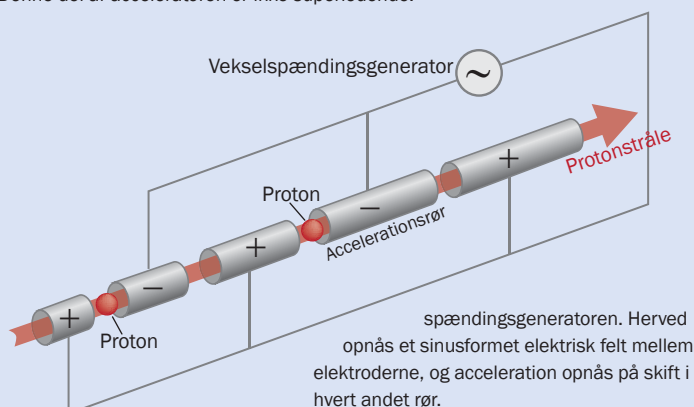


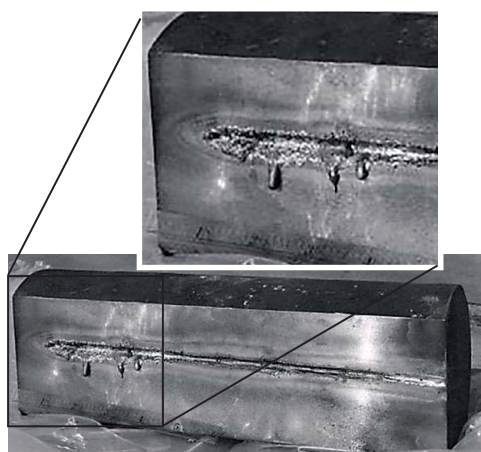
Foto: Maximilien Brice/CERN

En radiofrekvensaccelerator fra CERN (LINAC4) meget lig den, der bliver bygget til ESS. De individuelle på hinanden følgende accelerationsrør, der er ophængt i en kobberstang fra oven, ses tydeligt i begyndelsen af acceleratoren. Denne del af acceleratoren er ikke superledende.



Princippet i en radiofrekvensaccelerator af den type, der bygges til ESS ved de lave energier. Hvert andet rør forbindes til den ene pol, og de andre rør til den anden pol i veksel-

spændingsgeneratoren. Herved opnås et sinusformet elektrisk felt mellem elektroderne, og acceleration opnås på skift i hvert andet rør.



Da protonstrålen langs acceleratoren i ESS er uhyre intens og kun få millimeter stor, vil selv små relative tab på et hvilket som helst sted forvolde stor skade på udstyr ved at inducere stor radioaktivitet eller endda smelte det ramte materiale. På billedet ses en 30 cm lang kobberblok, der er ramt af en 2 mm stor partikelstråle med en effekt på 0,5 MW – den smelter igennem på cirka 1 sekund! Derfor ofres der stor opmærksomhed på at minimere tab af protonstrålen i ESS. Foto: L. Keller et al., SLAC.

lavere elforbrug. Den pulserede accelerator leverer hvert sekund 14 pulser, der hver især har en varighed på 2,86 ms.

Protonerne starter deres rejse i en ionkilde, hvor en tynd brintgas ioniseres til brintkerner (=protoner) og ekstraheres ved en energi på 75 keV. Herefter fortsætter protonerne rejsen gennem en række sektioner af forskellige radiofrekvensacceleratorer, som trinvis accelererer dem op til deres slutenergi på 2 GeV. Til slut transporterer og fokuserer et system af elektromagneter protonstrålen fra den underjordiske accelerator de 4,5 m op til jordens overflade, hvor strålen rammer et stort, roterende target af wolfram i et nøje planlagt mønster (se boks).

Gennem hele acceleratoren transporteres partikelstrålen i et lufttomt vakuumssystem for ikke at kollidere med luftens atomer.

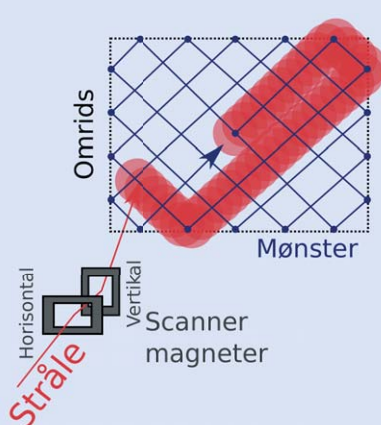
Et kæmpe wolfram-hjul

Ligesom det er en stor udfordring effektivt at producere en protonstråle med en effekt på 5 MW, er det også en udfordring at designe, bygge og vedligeholde en blok af et materiale, et "target", der kan håndtere den store effekt og belastning fra protonstrålen. Tidligere faciliteter har anvendt stærkt vandkølede targets af bestandige metaller med meget højt smeltepunkt som wolfram. Den i dag mest intense neutronkilde, SNS i USA, bruger endda et target af flydende kviksølv. Protonstrålen rammer her en stråle

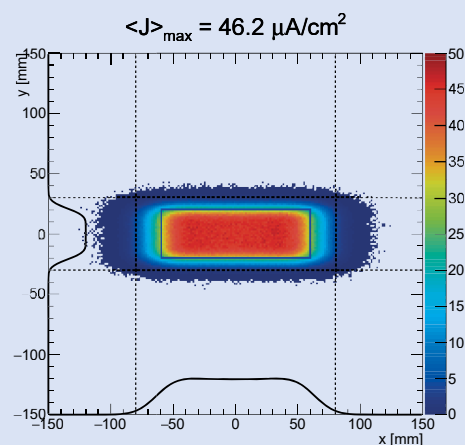
Skanneprincippet i ESS

Når protonstrålen fra acceleratoren i ESS rammer targetet i form af et stort wolfram-hjul ønsker man ideelt set, at fordelingen af protoner er så jævn som muligt. Det er nemlig den maksimale intensitet, som dikterer krav til kølesystemet samt hvor megen skade, protonstrålen inducerer i materialet. Man kan ved hjælp af komplicerede mange-pol-magneter lave den ønskede flade fordeling af protonerne på target-overfladen, men resultatet er for følsomt over for den oprindelige profil, der i en intens accelerator forventes at besidde "haler" af partikler i store afstande fra centret af strålen. Disse partikler i halerne vil af mange-pol magneter blive afbøjet til store afstande fra centret og dermed ramme omgivelserne og producere en stor mængde meget radioaktivt materiale.

Vi har derfor i stedet designet et system, hvor man ved hjælp af pulserede elektromagneter bevæger en tynd protonstråle. Princippet svarer til et gammeldags tv-apparat, hvor en elektronstråle scannes hen over billedrøret. Her skal



Hver enkelt puls af protoner skannes på overfladen af targetet af hurtige skanne-magneter, der afbøjer strålen både horisontalt og vertikalt med frekvenser på op til 40 kHz. Ved at udvælge forhold i skannefrekvenserne bevæges strålen i et fiskenet-mønster (til venstre), som gennemføres for hver puls, dvs. 2,86 ms. Herved omformes hver eneste puls effektivt til en meget flad fordeling med meget lav lokal intensitet i forhold til en tilsvarende normalfordeling af samme dimensioner. En simuleret fordeling ses til højre.



hver scanning af hele billedrøret afsluttes hurtigt nok til, at det menneskelige øje ikke kan opfatte scannemønster eller billedfrekvens. På samme måde skal scanning af hver puls af protoner ske hurtigt nok til, at hverken termiske effekter i targetet eller neutron-eksperimenterne "ser" scanningen, hvilket kræver anseelige skanne-frekvenser på op til 30-40

kHz. Ved hjælp af dette system kan man nøje skræddersy en rektangulær, flad fordeling af protonerne hen over targetet og samtidig undgå problemet med mange-pol-magneterne beskrevet ovenfor. Produktionen af disse pulserede magneter og de tilhørende strømforsyninger og vakuumkamre er vundet af det danske firma DANFYSIK i offentlig udbud.

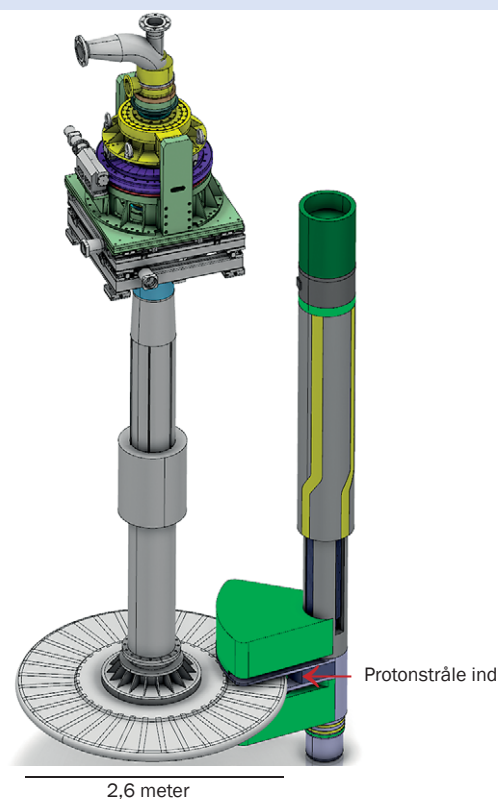
af kviksølv, der naturligvis herved opvarmes kraftigt. Den flere hundrede grader varme kviksølv samles op, køles, renses og recirkuleres tilbage i strålen i et lukket system. Dette er en teknologisk bedrift i sig selv, men formentlig vil det være svært at udvide dette koncept til højere effekter end de nuværende 1,5 MW ved SNS.

I forbindelse med ESS har man derfor genoplivet en idé fra omkring 1980. Her bruges et stort roterende "hjul" af wolfram som target. Herved får man på en effektiv måde udbredt protonstrålen over et stort areal, mens neutronerne stadig vil komme fra den lille del af targetet, der rammes af protonerne. Wolfram-hjulet i ESS er

2,6 m i diameter og vejer i alt 11 tons, hvoraf de 4,9 tons består af "wolfram-mursten". Ved en energi på 2,0 GeV trænger protonerne næsten 1 meter ind i de beskyttede blokke. Selve targethjulet roterer næsten med en omdrejning hvert andet sekund, således at hele periferien på 2,56 sekunder rammes jævnt. Protonstrålen vil i en puls (2,86 ms lang) ramme en enkelt wolfram-mursten med et tværsnitsareal på 16x6 cm², hvorved temperaturen vil øges med cirka 100 °C.

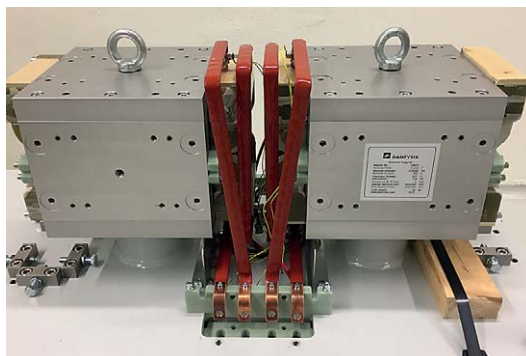
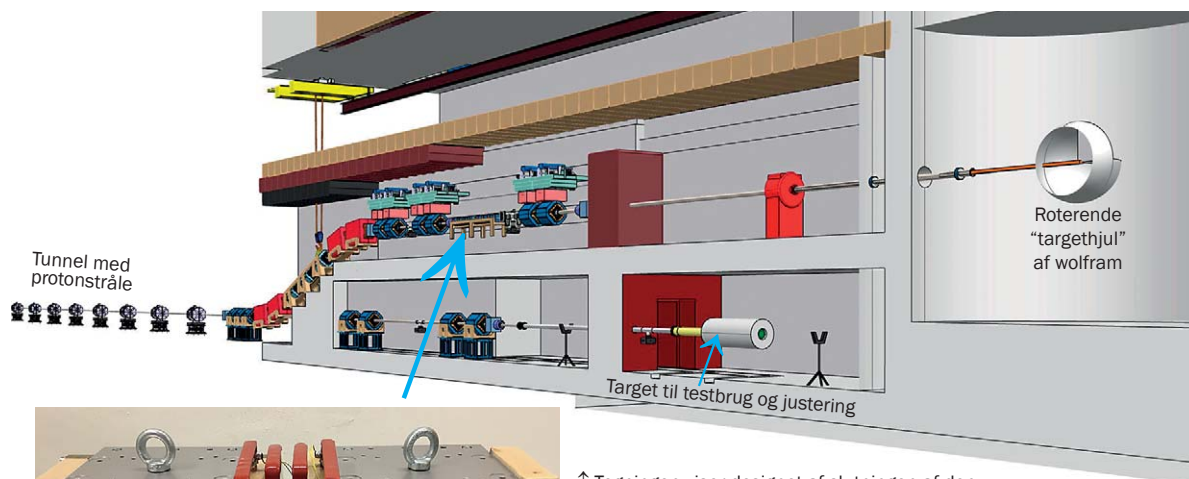
Det roterende target i ESS er et kæmpe wolfram-hjul med en diameter på 2,6 m. Hele systemet vil være pakket ind i beton- og jernblokke, neutron-moderatorer og diverse diagnostik- og forsyningskanaler.

Illustration: ESS



Videre læsning

I Aktuell Naturvidenskab nr. 1/2015 og 2/2015 blev der bragt en række artikler, der tog udgangspunkt i ESS og den forskning, der gør brug af neutroner.



↑ Tegningen viser designet af slutningen af den delvist underjordiske tunnel, der bringer den intense protonstråle op fra den underjordiske tunnel til target. Centralt for dette design er pulserede elektromagneter, som er udviklet i et samarbejde mellem ESS og Institut for Fysik og Astronomi og produceres af virksomheden DANFYSIK (← se foto).

Target skal derfor køles ned, inden det rammes igen en omgang senere. Det foregår med kølet heliumgas, der naturligvis recirkuleres i et system af varmevekslere. Mange tekniske udfordringer er i spil, for eksempel at få den opvarmede heliumgas i hjulet tilbage gennem det roterende hjul og aksel til kølesystemet. Her stilles der store krav til pakninger med videre. Yderligere skal hele targetsystemet kunne serviceres og udskiftes af fjernstyrede robotarme på grund af det forholdsvis høje niveau af radioaktivitet. I det hele taget bliver ESS en stor teknologisk bedrift.

Krav til protonstrålen på target

Ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, har vi stået for designet af at bringe den accelererede protonstråle fra udgangen af den underjordiske accelerator op til targetbygningen, indtil protonerne rammer target. Mange krav til den optimale størrelse, profil og diagnostik af strålen er i spil, specielt skal væsentlige tab af partikler minimeres af hensyn til uønsket radioaktiv stråling i omgivelserne. For meget stråling vil nemlig gøre servicering af komponenter besværlig, og i værste fald vil man også her kunne blive nødt til at bruge fjernbetjente,

dyre og besværlige robotarme til at servicere og udskifte komponenter.

Første del af vores projekt består i selve transporten af strålen fra accelerator til target, og det foretages af et system af dipol- og kvadrupol-elektromagneter til afbøjning og fokusering af protonerne. Dette systems overordnede design er lavet i et samarbejde mellem ESS og Institut for Fysik og Astronomi, og det danske firma DANFYSIK A/S er udvalgt til at producere disse elektromagneter.

For at opnå en jævn fordeling af protonstrålen på target har vi designet et system, hvor man ved hjælp af et system af pulserede elektromagneter bevæger en tynd protonstråle hen over target. Princippet svarer ganske til et gammeldags tv-apparat, hvor en elektronstråle skannes hen over billedrøret. Ved hurtigt at skanne protonstrålen tværs over et rektangel af de ønskede dimensioner på target opnår vi en fordeling med en næsten konstant intensitet.

Ny tidsplan – de første neutroner i 2021

I en højteknologisk facilitet som ESS er der mange udfordringer at løse, og på den baggrund kan det

ikke undre, at projektet allerede har været forholdsvis længe undervejs. ESS blev besluttet politisk i 2009, og designet startede for alvor medio 2010. Efter få år blev det annonceret, at de første neutroner ville blive produceret i 2019, men dette har dog vist sig ikke at kunne holde.

For nylig har erfaringerne fra Fukushima-atomkraftværket i Japan været med til at stille nye krav om jordskælvs- og tsunamisikring af selve target. Forventningen er i dag, at man kan levere de første neutroner i 2021 med indkøring af de første neutroninstrumenter i 2022 og start af brugerprogrammet i 2023. Faciliteten forventes at kunne levere verdens største intensitet af neutroner fra en 2-3 MW protonstråle i 2025, og efter yderligere et par år med ekstra finansiering, vil den designede effekt på 5 MW kunne være til rådighed.

ESS bliver altså om nogle år verdens "største" accelerator, ikke i partikelenergi eller i størrelse; her vinder LHC på CERN, men ESS bliver verdens mest effektfulde accelerator – altså den accelerator, der leverer den største effekt i partikelstrålen. ■