

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**KEVYTVESILAITOSTEN REAKTORIPAINESÄILIÖIDEN  
SÄTEILYHAURASTUMINEN**

**IRRADIATION EMBRITTLEMENT OF REACTOR PRESSURE  
VESSELS IN LIGHT WATER REACTORS**

Lappeenrannassa 24.11.2009

0261440 Lauri Pyy Ente 5

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO</b> .....	2
<b>1 JOHDANTO</b> .....	5
<b>2 REAKTORIPAINESÄILIÖ</b> .....	5
<b>2.1 Reaktoripainesäiliömateriaalit</b> .....	7
<b>3 SÄTEILYFYSIIKKA, HIUKKASTEN JA VALIAINEEN REAKTIOT</b> .....	9
<b>3.1 Varaukselliset hiukkaset</b> .....	9
<b>3.2 Sähkömagneettinen säteily</b> .....	10
<b>3.2.1 Klassinen sironta</b> .....	11
<b>3.2.2 Fotosähköilmiö</b> .....	11
<b>3.2.3 Comptonin ilmiö</b> .....	12
<b>3.2.4 Parinmuodostus</b> .....	12
<b>3.2.5 Fotodyinreaktiot</b> .....	12
<b>3.3 Neutronit</b> .....	12
<b>3.3.1 Elastinen sironta</b> .....	13
<b>3.3.2 Epäelastinen sironta</b> .....	14
<b>3.3.3 Aktivoitumisreaktiot</b> .....	14
<b>4 SÄTEILYN AIHEUTTAMIEN VIKOJEN SYNTYMISEN MEKANIikka</b> .....	15
<b>5 HILAVIRHEET</b> .....	18
<b>5.1 Pisteviat</b> .....	18
<b>5.2 Viivamaiset viat</b> .....	19
<b>5.3 Tasomaiset virheet</b> .....	21
<b>6 TESTIMENETELMIÄ SÄTEILYHAURASTUMISEN TODENTAMISEEN</b> .....	22
<b>6.1 Vetokoe</b> .....	22
<b>6.2 Charpy-iskukoe</b> .....	22
<b>6.3 Pudotusvasarakoe</b> .....	24
<b>6.4 Murtumismekaaniset kokeet</b> .....	25
<b>7 TRANSITIOILAMPOTILAN MUUTOS SÄTEILYN VAIKUTUKSESTA</b> .....	26
<b>8 REAKTORIPAINESÄILIÖN SÄTEILYALTISTUKSEN LASKEMINEN</b> .....	27
<b>9 ERI SEOSAINEIDEN VAIKUTUS SÄTEILYHAURASTUMISEEN</b> .....	29
<b>9.1 Kupari</b> .....	30
<b>9.2 Fosfori</b> .....	30
<b>9.3 Typpi, tina ja arseeni</b> .....	31
<b>9.4 Nikkeli</b> .....	31
<b>9.5 Mangaani</b> .....	31
<b>10 SÄTEILYN VAIKUTUKSET MATERIAALIEN OMINAISUUKSIIN</b> .....	31
<b>10.1 Mekaaninen lujuus</b> .....	32
<b>10.2 Sitkeys</b> .....	33
<b>10.3 Kovettuminen</b> .....	34
<b>10.4 Virumisominaisuudet</b> .....	34
<b>10.5 Paisuminen</b> .....	35
<b>10.6 Korroosio</b> .....	36
<b>11 HEHKUTTAMINEN</b> .....	36
<b>11.1 Loviisa 1-yksikön reaktoripainesäiliön hehkuttaminen</b> .....	36
<b>12 YHTEENVETO</b> .....	38
<b>LÄHTEET</b> .....	39

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	massaluku	[-]
Al	alumiini	[-]
As	arseeni	[-]
C	hiili	[-]
CF	kemiallisen koostumuksen kerroin	[-]
Cr	kromi	[-]
Cu	kupari	[-]
E	energia	[eV]
$\bar{E}$	keskimääräinen energia	[eV]
FF	säteilyaltistuskerroin	[-]
H	vety	[-]
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	vetyperoksidi	[-]
K <sub>ic</sub>	murtumisitkeys	[MPa·m <sup>0.5</sup> ]
Mn	mangaani	[-]
Mo	molybdeeni	[-]
n	hilasiirtymien lukumäärä	[-]
n	neutroni	[-]
N	typpi	[-]
Ni	nikkeli	[-]
O <sub>2</sub>	happi	[-]
OH	hydroksyyli	[-]
p	protoni	[-]
P	fosfori	[-]
RT	referenssitransitiolämpötila	[°C, K]
S	rikki	[-]
Si	pii	[-]
Sn	tina	[-]
t	aika	[s]
T	lämpötila	[°C, K]
v	kineettinen energia	[eV]
V	vanadiini	[-]

## kreikkalaiset

$\alpha$	parametri	[-]
$\gamma$	gammasäteily	[-]
$\Phi$	neutronivuo	[1/m <sup>2</sup> s]
$\phi$	neutronivuo	[1/m <sup>2</sup> s]

## alaindeksit

0	murtumissitkeyden transitiolämpötilan muutos
1	ennen
2	jälkeen
41J	41 joulea
68J	68 joulea
d	kynnysarvo
min	minimi
ndt	transitiolämpötila
NDT	transitiolämpötila
s	sironta
$\gamma$	gamma

## lyhenteet

AISI	American Iron and Steel Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
dpa	displacements per atom
FEM	Finite Element Method
IAEA	International Atomic Energy Agency, Kansainvälinen atomienergiajärjestö
IVO	Imatran Voima Oy
NDT	Nil Ductility Transition temperature, lämpötila, jonka alapuolella metalli on murtumahauras
PKA	Primary Knock-on Atom
SKA	Secondary Knock-on Atom
USE	Upper Shelf Energy

VVER Vodo-Vodjanyi Energetičeskij Reaktor, venäläinen kevytvesijähdytteinen painevesireaktori

## 1 JOHDANTO

Reaktoripainesäiliö on kevytvesireaktoreiden tärkein painelaite. Reaktoripainesäiliömateriaalin haurastumista neutronisäteilyn vaikutuksesta kutsutaan säteilyhaurastumiseksi. Tässä työssä käydään läpi syitä säteilyhaurastumiseen ja mitä vaikutuksia säteilyhaurastumisella on reaktoripainesäiliömateriaaleille.

## 2 REAKTORIPAINESÄILIÖ

Reaktoripainesäiliö on kaikkein tärkein yksittäinen komponentti ydinvoimalaitoksella. Sen tehtävänä on toimia reaktorin sisäosien kiinnityksenä, pitää lämpöä kehittävät polttoaineput paikallaan sekä ohjata sydämen jäähdytevirtausta siten, että polttoaineen riittävä jäähdytys on turvattu kaikissa tilanteissa. Koska reaktoripainesäiliötä ei voi käytännössä korvata, sen käyttöikä määrittää samalla koko laitoksen käyttöiän. Painesäiliön pettäminen aiheuttaisi primääripiirin vuodon ja mahdollisen sydämen sulamisen.

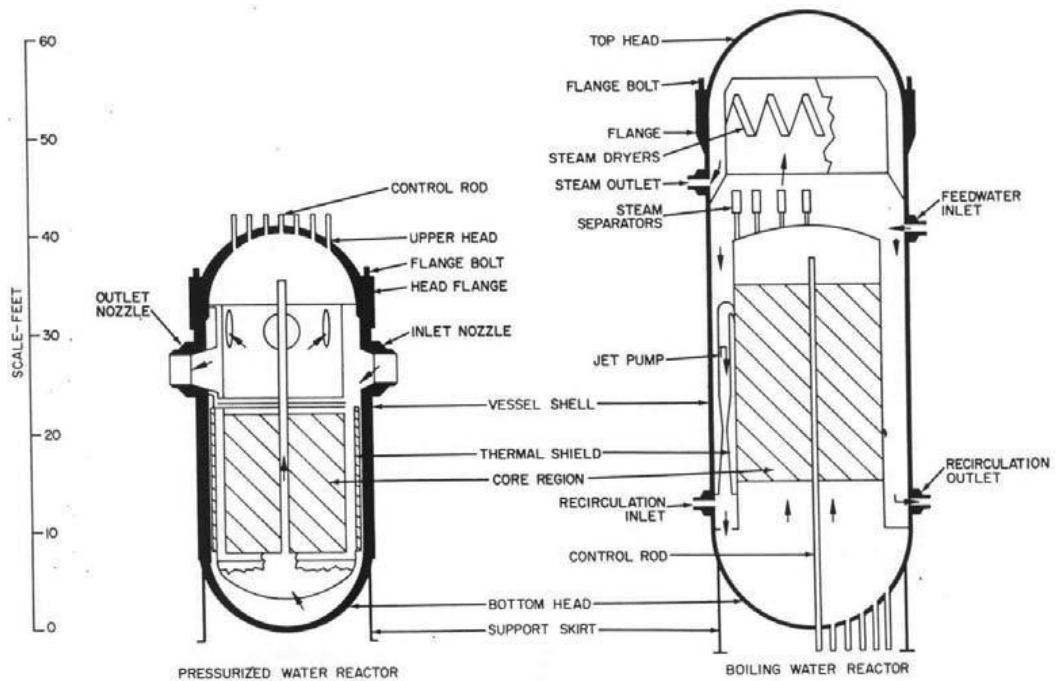
Reaktoripainesäiliöt suunnitellaan käyttöiältään laitoistyyppistä riippuen 30–40-vuotiaiksi. Nykyisissä uusissa laitoksissa reaktoripainesäiliöt voidaan suunnitella kestäväksi jopa 50–60 vuoden käyttöaika. Ydinvoimalaitosten käyttöikäen piteneminen saattaa nostaa reaktoripainesäiliöiden käyttöiän lähelle 60 vuotta myös vanhoissa laitoksissa.

Reaktoripainesäiliöt länsimaisissa ja venäläisissä kevytvesilaitoksissa eroavat rakenteeltaan ja käytetyiltä materiaaleiltaan toisistaan. Reaktoripainesäiliöt rakennetaan yleensä useasta sylinterimäisestä osasta, jotka hitsataan yhteen. Puolipallon muotoinen alaosa hitsataan sylinterimäiseen pystyosaan. Puolipallon muotoinen yläosa kiinnitetään sylinterimäiseen keskiosaan yleensä pulttaamalla, jotta painesäiliön sisälle olisi mahdollista päästä, esimerkiksi vuosihuollon aikana tapahtuvassa polttoaineen vaihdossa. Vanhoissa ennen vuotta 1972 suunnitelluissa länsimaisissa kevytvesilaitoksissa, reaktoripainesäiliön sylinterit saattavat olla vielä rakennettu erillisistä valssatuista levyistä, joten painesäiliössä voi esiintyä poikittaishitsisaumojen lisäksi pystysuuntaisia hitsisaumoja.

Länsimaisia painesäiliöitä ovat suunnitelleet ja valmistaneet muun muassa Babcock & Wilcox Company, Combustion Engineering, Inc ja Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Venäläisten VVER-laitosten painesäiliöt suunnitteli OKB Gidopress, joka oli kaikkien entisen Neuvostoliiton alueen VVER-laitosten pääsuunnittelija. (IAEA, 3–9)

Painevesi- ja kiehumusvesireaktorien painesäiliöt eroavat toisistaan lähinnä kokonsa puolesta. Kiehumusvesireaktorien painesäiliöt ovat halkaisijaltaan suurempia johtuen jäähdytteenkierrosta. Kiehumusvesilaitosten painesäiliöiden sisälle on rakennettava vedenerotin ja höyrykuivain, jotta reaktorista lähtevä höyry olisi tarpeeksi kuivaa. Vedenerottimen ja höyrykuivaimen sijoittaminen painesäiliön sisälle nostaa painesäiliön korkeutta. Kuvassa 1 on hahmotettu suhteellisesti samalla termisellä teholla käyvän painevesi- ja kiehumusvesilaitoksen painesäiliöiden kokoeroa (painevesilaitoksen painesäiliö vasemmalla).



**Kuva 1.** Painevesi- ja kiehumusvesireaktorin suhteellinen kokoero samalla termisellä teholla (IAEA, 9)

Kiehumusvesilaitokset toimivat pienemmässä käyttöpaineessa, joten kiehumusvesilaitoksen painesäiliön seinämänpaksuuden ei tarvitse olla niin suuri kuin painevesilaitoksissa. Jäähdytteen määrä sydämen ja painesäiliön seinämän välissä on suurempi kiehumusvesilaitoksissa, joka pienentää painesäiliön seinämän neutronialtistusta. Taulukossa 1 on esitetty yleisimpiä mittoja erilaisille paine- ja kiehumusvesilaitosten painesäiliöille. (Kalli, 108).

**Taulukko 1.** Paine- ja kiehutusvesilaitosten painesäiliöiden tunnuslukuja (Kalli, 49, 108; TVO, 14)

Laitostyyppi	Sähköteho [MW]	Suunnittelu- paine [bar]	Korkeus [mm]	Seinä- mä- paksuus [mm]	Halkaisija [mm]
EPR	1600	176	12 708	250	4 885
VVER-440	440	138	13 570	140	3 540
Westinghouse (PWR)	900	171.3	12 000	200	3 987
Westinghouse (BWR)	1000	85	20 800	140	6 400

## 2.1 Reaktoripainesäiliömateriaalit

Länsimaisissa kevytvesireaktoreissa painesäiliömateriaaliksi on yleisesti valittu niukkahiilinen ferriittinen teräs, jossa ferriittinen rakenne on stabiloitu mangaani tai mangaani-molybdeeni –lisällä, jolloin samalla lujuus lisääntyy. Neuvostoliittolainen painesäiliöteräs eroaa länsimaisesta pääasiassa kromi-molybdeeni- tai vanadiiniseostuksensa johdosta. Ferriittisissä teräksissä kiderakenne on tilakeskinen kuutio. Ferriittikiteet liuottavat hyvin vähän hiiltä. Ferriittiset terästen kovuus kasvaa hiilipitoisuuden mukana, ja se on: 0,15 % pehmeille teräslaaduille, 0,15-0,25 % keskihiiliteräksille ja 0,25-0,6 % koville teräksille. (Kalli, 26-28)

Länsimaisten kevytvesilaitosten ja venäläisten VVER-laitostyyppien painesäiliöt eroavat toisistaan niin koon kuin materiaalien puolesta. Venäläisissä laitoksissa materiaalivalintoihin vaikuttivat muun muassa se, että painesäiliöt oli suunniteltava niin, että ne oli mahdollista siirtää rautateitse tai maanteitse. Tästä syystä VVER-laitosten painesäiliöiden halkaisija oli normaalia pienempi. Halkaisijan pienentyminen altisti samalla painesäiliön seinämän kovemmalle ja suuremmalle neutronivuolle sydämen kohdalla. Koska painesäiliöt kuljetettiin maitse, oli painesäiliön massaa rajoitettava seinämäpaksuutta pienentämällä. Pienennetty seinämäpaksuus vaati normaalia lujempien materiaalien käyttöä.

Länsimaisissa laitoksissa käytettyjä teräslaatuja ovat muun muassa amerikkalaisissa laitoksissa käytetyt SA 302 GR B, SA508 C1 2, SA508 C13 ja SA 533 GR B, saksalaisissa



laitoksissa käytetyt 22NiMoCr37 ja 20MnMoNi55 ja ranskalaisissa laitoksissa käytetty 16MnD5. Venäläisissä laitoksissa käytettyjä teräslaatuja ovat 15Kh2MFA (VVER-440) ja 15kh2NMFA (VVER-1000). Taulukossa 2 ja 3 on esitetty erilaisten painesäiliöissä käytettyjen teräslaatuojen kemiallisia koostumuksia.

**Taulukko 2.** Reaktoripainesäiliöterästen kemiallinen koostumus hiilestä kromiin (IAEA, 11)

Teräslaatu	Massaosuus [%]					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
SA 302 GR B	0,25	0,30	1,50	0,0035	0,040	
SA 508 Cl2	0,27	0,35	0,90	0,025	0,025	0,45
SA 533 GR B	0,27	0,40	1,50	0,035	0,040	
22NiMoCr37	0,23	0,35	1,00	0,012	0,008	0,50
20MnMoNi55	0,23	0,30	1,50	0,012	0,008	0,20
16MnD5	0,22	0,30	1,60	0,02	0,012	0,25
15Kh2MFA	0,18	0,60	0,37	0,025	0,025	3,00
15kh2NMFA	0,18	0,60	0,37	0,020	0,020	2,30

**Taulukko 3.** Reaktoripainesäiliöterästen kemiallinen koostumus molybdeenistä arseeniin (IAEA, 11)

Teräslaatu	Massaosuus [%]							
	Mo	Ni	V	Cu	Al	Sn	N	As
SA 302 GR B	0,60							
SA 508 Cl2	0,70	0,90	0,05					
SA 533 GR B	0,60	0,70						
22NiMoCr37	0,60	1,20	0,02	0,12	0,050	0,011	0,013	0,036
20MnMoNi55	0,55	0,80	0,02	0,12	0,040	0,011	0,013	0,036
16MnD5	0,57	0,80	0,01	0,20	0,40			
15Kh2MFA	0,80	0,40	0,35					
15kh2NMFA	0,70	1,50	0,10					

Painesäiliöiden osien yhteen hitsaamiseen käytetään jauhekaari- ja puikkohitsausmenetelmiä. Hitsauslangan pitää olla kupari-, fosfori- ja nikkelpitoisuuksiltaan mahdollisimman alhainen, koska niiden määrät vaikuttavat säteilyhaurastumisnopeuteen. Hitsisaumojen säteilyhaurastumista arvioidaan juuri kyseisten pitoisuuksien mukaan. 1970-luvulla hitsilangat pinnoitettiin kuparilla

sähkönjohtavuuden lisäämiseksi. Kuparipinnoite estä myös varastoinnin aikana syntyvän kosteuden aiheuttaman korroosion. Kun kuparipitoisuuden huomattiin vaikuttavan säteilyhaurastumisnopeuteen, kiellettiin kuparipinnoitteen käyttö hitsilangassa kokonaan.

Painesäiliön sisäpinta, eli pinta joka on kosketuksessa jäähdytteenä toimivan veden kanssa, pinnoitetaan ruostumattomalla teräksellä korroosion estämiseksi. Länsimaisten laitosten pinnoite on yleensä 3–10 mm:ä paksu, kun taas VVER-laitoksissa pinnoite on  $8 \pm 1$  mm:ä paksu. Länsimaisissa laitoksissa käytetään pinnoitteena joko AISI 308 tai AISI 309 ruostumattomia teräksiä. VVER-laitoksissa pinnoite on kaksiosainen. Ensimmäinen kerros on materiaaliltaan Sv 07Kh25N13 ja toinen kerros Sv 08Kh18N10G2B. (IAEA, 10–18)

### **3 SÄTEILYFYSIKKA, HIUKKASTEN JA VÄLIAINEEN REAKTIOT**

#### **3.1 Varaukselliset hiukkaset**

Varauksellisiksi hiukkasiksi kutsutaan hiukkasia, jotka omaavat sähköisen varauksen. Sähköisen varauksen omaavia hiukkasia ovat elektroni, positroni, protoni ja alfa-hiukkanen eli heliumatomin ydin.

Varaukselliset hiukkaset ovat suoraan eli välittömästi ionisoivaa säteilyä. Kun varauksellinen hiukkanen etenee väliaineessa, menettää se energiaa liiketilan muutoksen takia. Tämä aiheuttaa väliaineessa muutoksia, koska menetetty energia siirtyy väliaineeseen. Energia siirtyy monin eri tavoin väliaineeseen ja on monimutkainen tapahtuma, jossa syntyy suuri määrä ioneja ja atomien viritystiloja. Kiteisessä aineessa, kuten reaktoripainesäiliöteräksessä, aineen kiderakenteeseen tulee paikallisia muutoksia. Suurin osa siirtyneestä energiasta muuttuu kuitenkin lämmöksi.

Ioneja syntyy kahdella eri tavalla. Jos atomi menettää vuorovaikutuksessa elektronin, tulee siitä positiivinen ioni. Ytimen varaustila on siis positiivinen johtuen protonien ylimäärästä elektroneihin nähden. Elektronin liittyessä varauksellisesti neutraaliin atomiin, tulee siitä negatiivinen ioni, koska elektroneja on ylimäärä verrattuna ytimen protonilukuun.

Varaukselliset hiukkaset synnyttävät hidastuessaan myös sekundäärisäteilyä. Energian siirron takia syntyvät atomien viritystilat purkautuvat erilaisin tavoin. Viritystilat

purkautuvat karakteristisena röntgensäteilynä tai Augerin elektroneina. Nopean varauksellisen hiukkasen, lähinnä elektronin tai positronin, hidastuessa syntyy jarrutussäteilyä, joka on sähkömagneettista säteilyä. Yleensä se on gammasäteilyä. Alfa-hiukkasten nopeus on usein liian pieni synnyttämään jarrutussäteilyä.

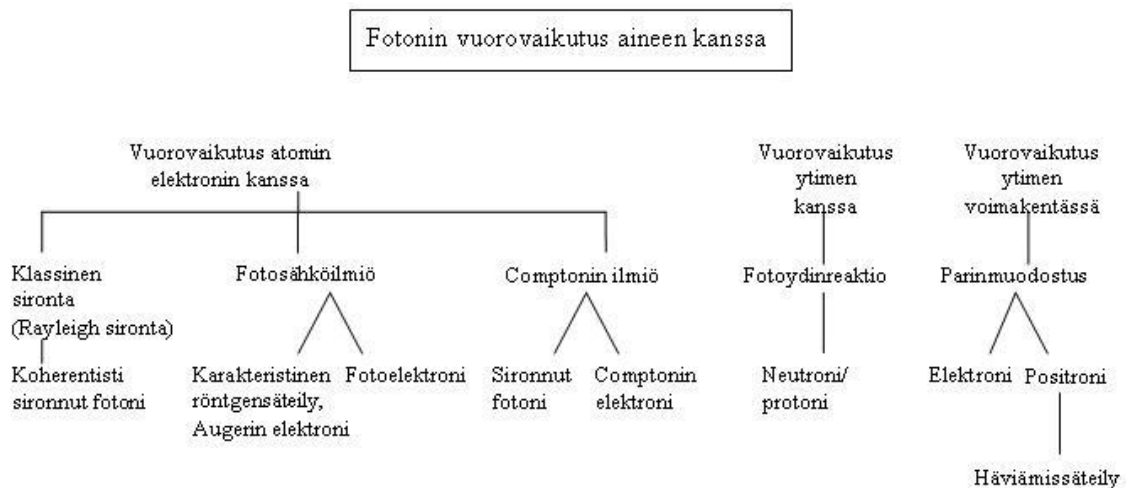
Alfasäteily, joka koostuu siis alfa-hiukkasista, on tiheään ionisoivaa säteilyä. Alfa-hiukkasessa on kaksi protonia ja kaksi neutronia. Alfa-hiukkanen hidastuu nopeasti ja sen kantama on lyhyt. Alfa-hiukkanen menettää energiaa epäelastisissa törmäyksissä väliaineen elektronien kanssa. Alfa-hiukkasen massa on huomattavan paljon suurempi kuin elektronin, eli noin 7 000-kertainen, joten se kulkee suoraan väliaineessa. Väliaineatomien kanssa alfa-hiukkanen vaikuttaa vasta hidastumisen loppuvaiheessa, kun se ei ole enää ionisoitunut ja sen nopeus on pieni.

Beetasäteily on nopeista elektroneista ja positroneista koostuvaa ionisoivaa säteilyä, jonka kantama on paljon suurempi kuin alfasäteilyllä. Painoerosta johtuen beetahiukkasen kulku väliaineessa on erilaista kuin alfahiukkasen. Koska beetahiukkasen, elektronin tai positronin, massa on suunnilleen sama kuin väliaineen elektronien tai paljon pienempi kuin väliaineen atomin massa, on beetahiukkasen rata mutkitteleva. Beetahiukkasen muodostuessa sen liikenopeus on lähellä valonnopeutta. Väliaineessa beetahiukkasen nopeus saattaa olla jopa suurempi kuin valonnopeus. Valonnopeuden ylittyessä väliaineessa beetahiukkanen lähettää Tseherenkovin säteilyä. Beetahiukkaset menettävät energiaansa sirotessaan epäelastisesti väliaineen elektroneista ja ytimistä. Hidastumisen aikana syntyy ionipareja ja atomin viritystiloja, jotka siis purkautuvat eri tavoin. Elektronien hidastuessa lähelle lepotilaa syntyy negatiivisia ioneja. Positronin hidastumisen loppuvaiheessa positroni yhdistyy elektroniin, jolloin hiukkaset häviävät ja niiden massaa vastaava energia vapautuu häviämisen eli annihilaatiosäteilynä. Yhdistymisessä syntyy kaksi fonia, joiden energia on beetahiukkasen lepoenergia 511 keV. Beetahiukkanen saattaa menettää koko energiansa yhdessä törmäyksessä, jolloin syntyy suurienergistä jarrutussäteilyä. (Toivonen et al., 69–76)

### **3.2 Sähkömagneettinen säteily**

Ionisoiva sähkömagneettinen säteily on epäsuorasti ionisoivaa säteilyä. Se synnyttää vuorovaikutuksessa aineen kanssa ionisoivaa säteilyä. Sähkömagneettinen säteily (gamma-

tai röntgensäteily) voi olla vuorovaikutuksessa ydintä tai elektroneja ympäröivän sähkömagneettisen kentän tai ydinvoimien aiheuttaman kentän kanssa. Vuorovaikutus voi olla elastinen tai epäelastinen sironta tai absorptio. Kuvassa 2 on esitetty merkittävimmät fotonin vuorovaikutukset ja niissä syntyvät hiukkaset.



**Kuva 2.** Fotonin vuorovaikutukset aineen kanssa (Toivonen et al., 77)

### 3.2.1 Klassinen sironta

Klassinen sironta (Rayleighin sironta) on fotonin elastista sirontaa lujasti sitoutuneesta elektronista. Sironnassa koko atomi ottaa vastaan rekyylienergian ja fotonin energia ei merkittävästi muutu. Tällä sironnalla on merkitystä vain, kun fotonin energia on pieni. Sironnan vaikutusala on verrannollinen järjestysluvun neliöön.

### 3.2.2 Fotosähköilmiö

Fotosähköilmiössä fotoni luovuttaa koko energiansa atomin elektronille. Tästä seuraa, että elektroni sinkoutuu ulos atomista ja saa liike-energiakseen fotonin energian vähennettynä elektronin sidosenergialla. Elektronin jättämä aukko täyttyy ylempältä kuorelta siirtyvällä elektronilla. Samalla vapautuu karakteristista röntgensäteilyä tai, varsinkin kevyillä aineilla, Augerin elektroni.

### 3.2.3 Comptonin ilmiö

Comptonin ilmiössä fotonin siroaa elektronista, jonka sidosenergia on paljon pienempi kuin fotonin energia. Fotonin energia siirtyy sellaisenaan elektronin liike-energiaksi. Energian menetys riippuu sirontakulmasta ja fotonin alkuperäisestä energiasta ja se on suurin takaisinsironnassa, jolloin sirontakulma on  $180^\circ$ . Comptonin ilmiöstä seuraa aina sironneena jatkava fotonin ja irronnut elektroni.

### 3.2.4 Parinmuodostus

Kun fotonin energia ylittää arvon 1,022 MeV, ytimen voimakenttään joutunut fotonin voi hävitä. Sen energiasta syntyy elektroni ja positroni. Tämän vuorovaikutuksen täytyy tapahtua jonkun hiukkasen sähkömagneettisessa kentässä, jotta liikemäärä säilyisi. Parinmuodostuksessa syntyneet positroni ja elektroni menettävät energiaansa beetasäteilyn tavoin. Positronin menettäessä tarpeeksi liike-energiaansa (lähes kaiken) se yhdistyy elektroniin ja syntyy häviämisseiteilyä, eli annihilaatiosäteilyä. Häviämisseiteilyssä syntyy kaksi 511 keV:in energialla toisistaan vastakkaisiin suuntiin lähtevää fotonia.

### 3.2.5 Fotoydinreaktiot

Jos fotonin energia on tarpeeksi suuri, voi se ytimeen absorboituessaan aiheuttaa neutronin tai protonin irtoamisen. Tällaisilla fotoydinreaktioilla on nukleonien sidosenergiasta aiheutuva kynnysenergia. Kynnysenergia on useimmilla teknisesti tärkeillä aineilla luokkaa 10–15 MeV. Protonin irtoaminen ytimeistä on mahdollinen, mutta sen kynnysenergiat eri aineille ovat huomattavasti neutronin irtoamista suurempia. Eli reaktion  $(\gamma, p)$  kynnysenergia on huomattavan paljon suurempi kuin reaktion  $(\gamma, n)$ . Fotoydinreaktioiden vaikutusalat ovat pieniä verrattuna muihin vuorovaikutuksiin. (Toivonen et al., 77–82)

## 3.3 Neutronit

Neutroneilla ei ole sähköistä varausta ja täten niillä ei ole Coulombin vuorovaikutuksia elektronien ja ytimien kanssa. Tämä on yksi syy miksi neutronit tunkeutuvat syvemmälle väliaineeseen kuin varaukselliset hiukkaset. Neutronien ja ytimien väliset ydinvoimat määräävät neutronien käyttäytymisen väliaineessa.

Neutronien ja ytimien välisiä reaktioita ovat elastinen ja epäelastinen sironta, ydinreaktioista mm.  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$  -reaktiot. Fissio kuuluu myös neutronien ja ytimien välisiin reaktioihin. Neutronit ovat sähköisesti varauksettomia hiukkasia, joten ne eivät aiheuta väliaineessa suoraan ionisaatiota. Törmäyksissä syntyneet varaukselliset hiukkaset ja gammakvantit sekä rekyylienergiaa saavat ytimet voivat normaaliin tapansa aiheuttaa sekä ionisaatiota että virittäytymistä. Neutronisäteily on siis epäsuorasti ionisoivaa säteilyä. Neutronien ja ytimien vuorovaikutukset riippuvat voimakkaasti neutronien energiasta.

### 3.3.1 Elastinen sironta

Neutroneilla on syntyessään suhteellisen suuri energia. Kun neutronit liikkuvat väliaineessa, menettävät ne energiaa törmäyksissään väliaineen ytimiin. Toisin sanoen neutronit hidastuvat. Kun neutroni joutuu ytimen voimakenttään ja sen liiketila muuttuu, luovuttaa se osan liike-energiasta ytimelle. Elastisessa sironnassa osa neutronin liike-energiasta voi siirtyä ytimen liike-energiaksi kokonaisliike-energian pysyessä muuttumattomana. Klassisen mekaniikan avulla voidaan osoittaa, että hidastuminen on sitä tehokkaampaa mitä kevyempi sirottajaydin on. Energianmenetys riippuu myös sirontakulmasta. Mitä suurempi on sirontakulma, sitä suurempi on energianmenetys. Esimerkiksi neutronin osuessa vety-ytimeen menettää neutroni keskimäärin noin puolet liike-energiastaan, koska neutronin ja vety-ytimen massa on lähes sama. Jos neutroni jatkaa sironnan jälkeen rataansa alkuperäiseen suuntaan, ei sen liike-energia muutu lainkaan. Jos neutroni siroaa vasten tulosuuntaansa vety-ytimeistä, on se luovuttanut vety-ytimelle kaiken liike-energiansa.

Pienin liike-energian arvo  $E_{\min}$ , jonka neutroni voi saada elastisen sironnan jälkeen voidaan laskea yhtälöstä (1) :

$$E_{\min} = \alpha E_1, \quad (1)$$

jossa  $E_1$  on neutronin liike-energia ennen sirontaa ja  $\alpha$  parametri, joka voidaan määrittää yhtälön (2) mukaan:

$$\alpha = \left( \frac{A-1}{A+1} \right)^2, \quad (2)$$

jossa  $A$  on ytimen massaluku, josta neutroni siroaa.

Jos sironta on isotrooppista, eli yhtä todennäköistä kaikkiin suuntiin, kuten usein voidaan olettaa, voidaan neutronin keskimääräinen liike-energia,  $\overline{E}_2$ , sironnan jälkeen laskea yhtälöstä (3):

$$\overline{E}_2 = \frac{1}{2}(\alpha + 1)E_1. \quad (3)$$

### 3.3.2 Epäelastinen sironta

Epäelastisella sironnalla tarkoitetaan törmäystä, jossa osa neutronin liike-energiasta kuluu ytimen siirtämiseen viritystilaan. Epäelastista sirontaa voidaan merkitä  $(n,n')$ -reaktiona. Neutronin osuessa kohdeyttimeen muodostuu virittäytynyt väliydin. Väliydin lähettää välittömästi neutronin, jonka energia  $E_2$  on pienempi kuin tulevan neutronin energia  $E_1$ . Energioiden erotus virittää ytimen. Viritystila laukeaa ytimen lähettäessä gammakvantin, jonka energia on  $E_\gamma = E_1 - E_2$ . Epäelastisen sironnan tapahtumiseksi täytyy tulevan neutronin liike-energia olla suurempi kuin kohdeytimen alin viritysendergia. Kynnysenergia epäelastiselle sironnalle on keskiraskaissa aineissa luokkaa 0,1–1 MeV ja keveille ytimille muutama MeV.

Neutronin hidastuminen jatkuu niin kauan kunnes se absorboituu väliaineeseen, karkaa siitä tai joutuu termiseen tasapainoon väliaineen atomien kanssa. Ajallinen kesto neutronin hidastumiseksi termiseksi on luokkaa alle yksi millisekunti. Neutronin menettämä energia siirtyy epäelastisessa sironnassa osittain sirottavan ytimen liike-energiaksi. Tämän takia rekyyliydin pystyy aiheuttamaan useita satoja sekundääritapahtumia väliaineessa. Tämä aiheuttaa hilavirheiden muodostumista metalleissa.

### 3.3.3 Aktivoitumisreaktiot

Neutronin ja ytimen vuorovaikutus saattaa johtaa siihen, että ydin sieppaa neutronin, mutta hajoo jollain muulla tavalla kuin emittoimalla yhden neutronin. Tällaisia neutronin

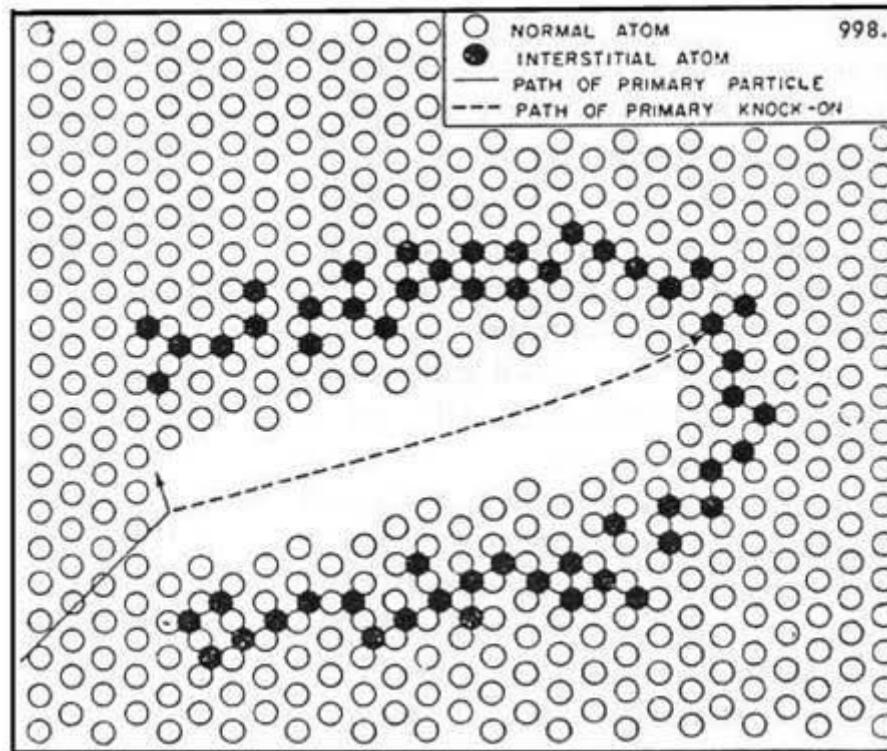
absorboitumisreaktioita ovat muun muassa  $(n,\gamma)$ -,  $(n,p)$ -,  $(n,\alpha)$ - ja  $(n,2n)$ - reaktiot. (Toivonen et al., 82–86)

## 4 SÄTEILYN AIHEUTTAMIEN VIKOJEN SYNTYMISEN MEKANIikka

Kiinteissä materiaaleissa, jotka altistuvat tarpeeksi voimakkaalle neutronisäteilylle, tapahtuu kidehilan muutoksia. Kun neutroni törmää kidehilan atomiin, saattaa se siirtyä hilapaikaltaan pois. Tällaista hilapaikaltaan siirtynyttä atomia kutsutaan PKA:ksi (Primary Knock-on Atom). Jos törmäyksessä neutronin siirtämä energia ylittää niin sanotun kynnsarvon,  $E_d$ , siirtyy atomi hilapaikaltaan pois.  $E_d$  on esimerkiksi puhtaalle raudalle noin 40 eV. Kynnsarvon ylittyessä PKA siirtyy pois hilapaikaltaan ja jatkaa liikettään kidehilassa. Törmäyksessä PKA:n saamaa kineettistä energiaa kutsutaan rekyylienergiaksi.

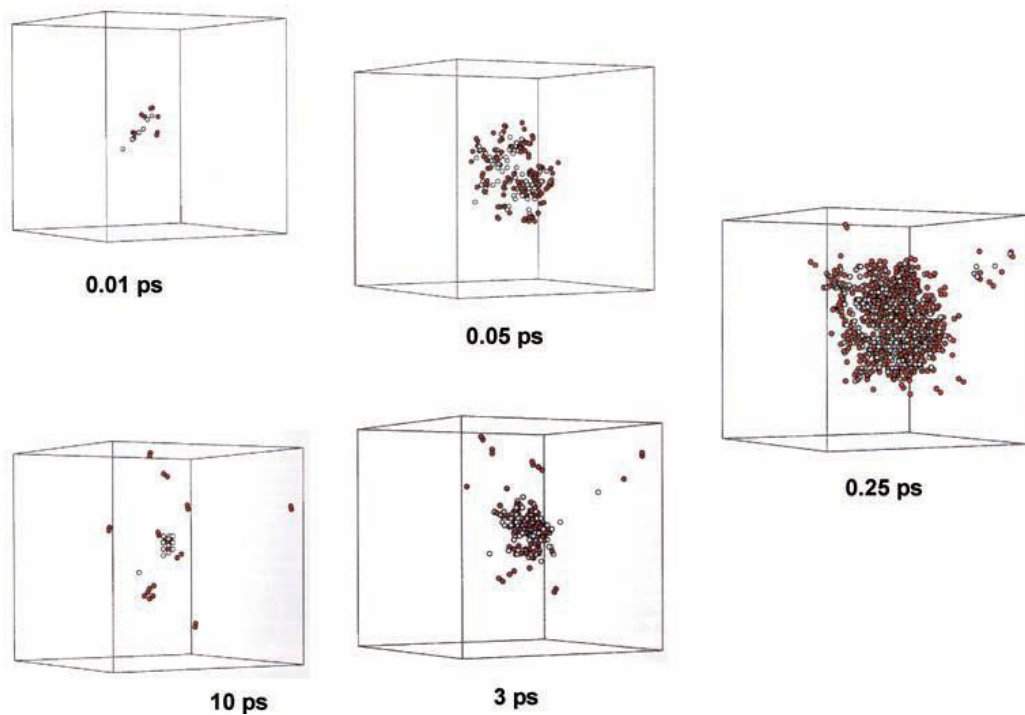
Hilapaikaltaan siirtymisen jälkeen PKA hidastuu ja menettää energiaansa vuorovaikutuksessa materiaalin elektronien ja muiden atomien kanssa. PKA voi siis aiheuttaa sekundaaritörmäyksiä jos sen siirtämä kineettinen energia ylittää  $E_d$ :n. PKA:n hilapaikaltaan siirtämään atomia kutsutaan SKA:ksi (Secondary Knock-on Atom). Siirtyneet SKA:t menettävät energiaansa samoin kuin PKA:t. Törmäykset jatkuvat niin pitkään kun kynnsenergiaa ei enää ylitetä. Törmäyksissä voi siis syntyä tertiärisiirtymisiä ja niin edelleen. Neutronin aiheuttamien hilapaikoiltaan siirtyneiden atomien joukkoa kutsutaan törmäyskaskadiksi. Kun törmäyskaskadiin osallistuvien atomien kineettinen energia on vaimentunut törmäyksissä tasolle, jossa ne eivät aiheuta enää uusia hilapaikkasiirtymisiä, tulee niistä välisija-atomeita kidehilaan. Hilapaikat, josta törmäyskaskadin atomit siirtyivät, jäävät vakansseiksi. Suurin osa törmäyskaskadin synnyttämistä välisija-atomeista ja vakansseista rekombinoituu keskenään, mutta osa aiheutuneista pistevioista jää pysyvästi kidehilaan. Atomien uudelleenjärjestyminen törmäyskaskadissa ei juuri vaikuta säteilyhaurastumiseen, mutta syntyneet pysyvät pisteviat sen sijaan vaikuttavat säteilyhaurastumiseen. Diffuusion takia pisteviat kerääntyvät yhteen ja muodostavat pistevikojen rykelmiä. Nämä rykelmät ovat pääsyyinä säteilyhaurastumiseen ja aiheuttavat muun muassa materiaalin kovenemista. Törmäyskaskadi on havainnollistettu kuvaan 3.





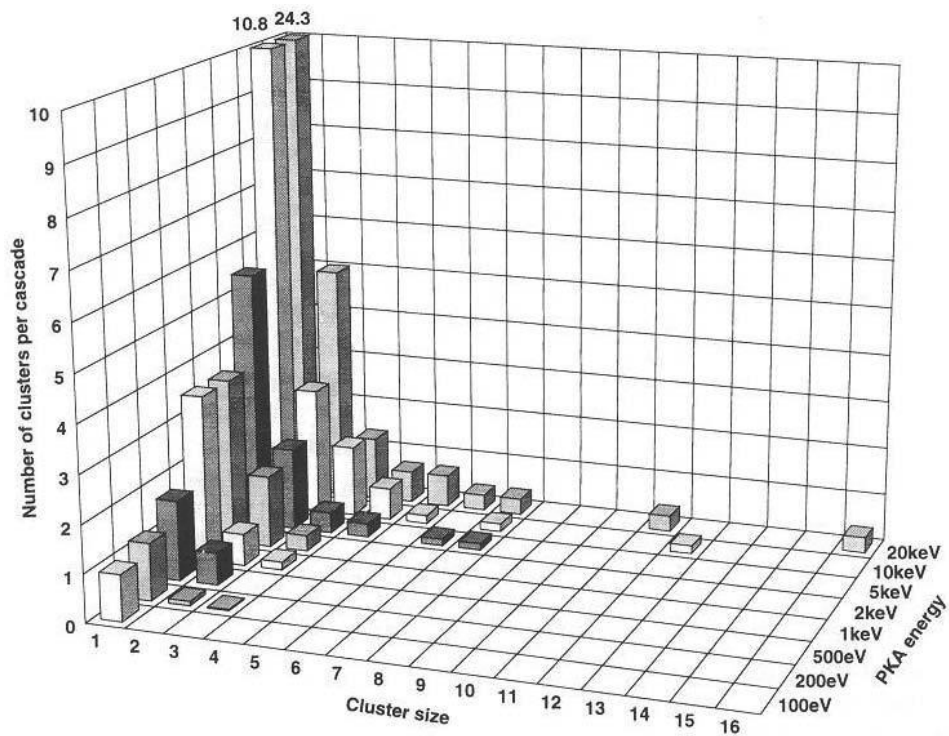
**Kuva 3.** Törmäyskaskadi (IAEA, 68)

Törmäyskaskadien kokeellinen tutkiminen on mahdotonta, koska sen kesto on vain joitain pikosekunteja ( $10^{-12}$  s). Samoin törmäyskaskadi levittäytyy vain muutaman nanometrin alueelle. Tästä syystä törmäyskaskadien tutkimus perustuu tietokonesimulointeihin. Ensimmäiset simuloinnit tehtiin jo 1960-luvulla ja ne ovat parantuneet tietokoneiden laskentatehon myötä. Koodeja, joilla simuloiteja tehdään, ovat muun muassa MARLOWE, TRIM, INCAS, MOLDY, MDCASK ja DYMOKA. Simuloinneilla on saatu miten törmäyskaskadin syntyminen etenee eri parametrien vaikutuksesta. Simulointitulokset ovat osoittaneet, että törmäyskaskadin syntyprosessi jakautuu kahteen osaan. Törmäysvaihe, jossa siis PKA jatkaa törmäyksiään kidehilassa, kestää muutaman pikosekunninkymmenyksen. PKA:n energia jakautuu toisiin atomeihin useissa törmäyksissä, jossa ne jättävät hilapaikkansa. Törmäyskaskadin keskelle syntyy vakanssien ja välisija-atomien joukko, jota ympäröi välisija-atomien muodostama kuori. Rekombinaatiovaiheessa suurin osa välisija-atomeista palaa hilapaikoilleen, mutta osa pistevioista jää kidehilaan. Rekombinaatiovaihe kestää joitain pikosekunteja. Törmäyskaskadin syntyminen tietokonesimulaatiolla on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Tietokoneella simuloitu törmäyskaskadin synty ja sen eteneminen ajallisesti (IAEA, 69)

Tietokonesimulaatioiden perusteella on havaittu, että seosaineet, kuten kupari, nikkeli ja mangaani, eivät merkittävästi vaikuta törmäyskaskadin törmäys- ja rekombinaatiovaiheisiin. Törmäyskaskadin koko on riippuvainen PKA:n energiasta ja törmäyskaskadin koko kasvaa kun PKA:n energia kasvaa. PKA:n energian kasvaessa törmäyskaskadi saattaa jakautua kahteen osaan. Törmäyskaskadin synnyttämät pysyvät piste- ja atomijoukot saattavat kerääntyä yhteen joukoiksi. Mitä suurempi PKA:n energia on, sitä suurempia ovat pysyvien pistevikojen joukot. Pistevikajoukkojen (cluster) ja niiden määrän käyttäytyminen suhteessa PKA:n energiaan on esitetty kuvassa 5. (IAEA, 66–70)



Kuva 5. Pistevikajoukkojen määrien ja kokojen suhde PKA:n energian funktiona (IAEA, 70)

Mitä suurempi on törmäävän neutronin energia, sitä suuremman vahingon se saa aikaan kidehilassa. Neutronit, joiden energia on yli 1 MeV:n, on valittu tästä syystä selittämään haurastumisilmiöitä länsimaisissa painesäiliöteräksissä. VVER-laitoksissa otetaan huomioon neutronit, joiden energia on yli 0,5 MeV. (IAEA, 47)

## 5 HILAVIRHEET

Kiinteän aineen hilaan muodostuu säteilyn vaikutuksesta hilavirheitä. Hilavirheinä voidaan pitää pistevikoja, viivamaisia vikoja ja tasomaisia vikoja.

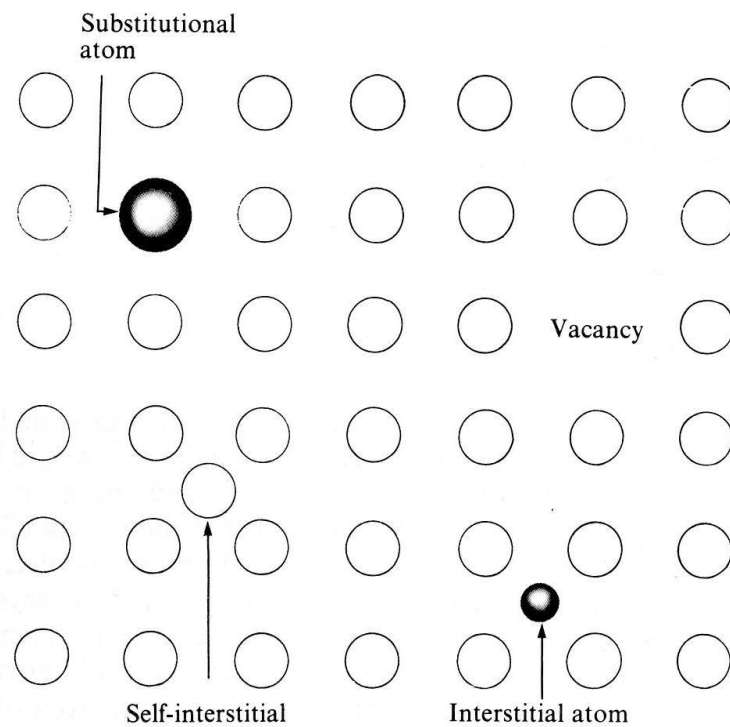
### 5.1 Pisteviat

Pistevika on hilarakenteen vika. Pistevioiksi kutsutaan hilapaikaltaan siirtynyttä atomia, tyhjää hilapaikkaa tai hilapaikassa olevaa vierasta atomia.

Hilapaikkojen väliin siirtynyttä atomia, oli se sitten vieras atomi tai homogeenisen aineen atomi, kutsutaan välisija-atomiksi. Vieraat atomit, ovat ne sitten tahallaan lisättyjä tai epäpuhtausatomeja, voivat sijaita siis joko kidehilapaikassa tai sitten välisijassa. Jos vieras

atomi sijaitsee hilapaikassa, kutsutaan sitä korvaussija-atomiksi. Välisijassa sijaitsevaa vierasta atomia voidaan kutsua epäpuhtausatomiksi. Mitä pienempi vieraan atomin koko on, sitä suuremmalla todennäköisyydellä se sijaitsee välisijassa.

Vakanssi, eli siis tyhjä paikka hilassa, on joskus synnynäisenä vikana kiderakenteessa. Jos se syntyy hilapaikastaan siirtyneen atomin tilalle, kutsutaan tällaista vakanssi-välisija-atomia -paria Frenkelin pariksi. Kuvassa 6 on esitetty erilaiset pisteviat.



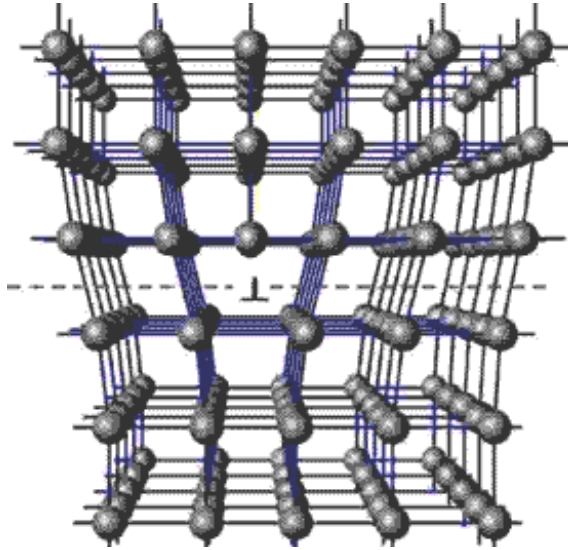
**Kuva 6.** Erilaisia pistevikoja (Andersson et al., 152)

Kuvan pistevikojen suomennokset: Substitutional atom = epäpuhtausatomi, Self-interstitial ja Interstitial atom = välisija-atomi ja Vacancy = vakanssi. (Andersson et al., 155–157)

## 5.2 Viivamaiset viat

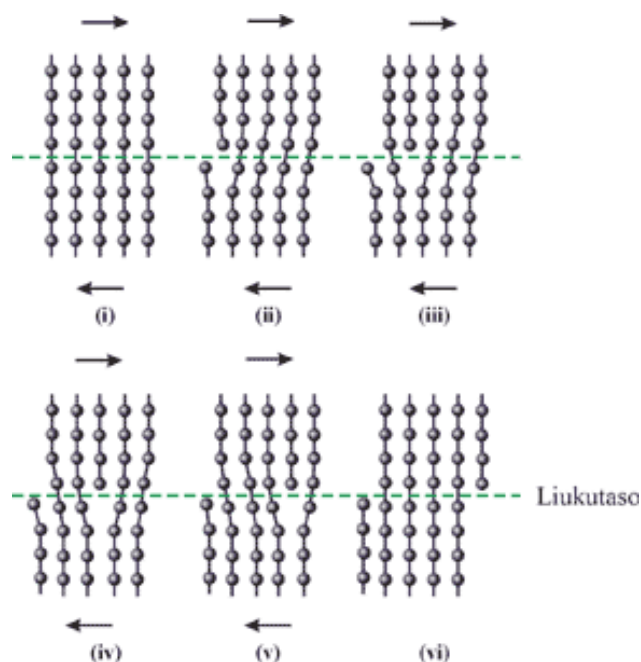
Viivamaiset viat ovat pitkiä yksiulotteisia vikoja. Viivamaisia vikoja kutsutaan myös dislokaatioiksi. Erilaisia dislokaatioita voi olla särmä- ja ruuvidislokaatio.

Särmädislokaatiossa kiderakenteeseen syntyy ylimääräinen atomitaso. Särmädislokaatio on esitetty kuvassa 7.



**Kuva 7.** Särmädislokaatio (Materiaalit ja niiden valinta)

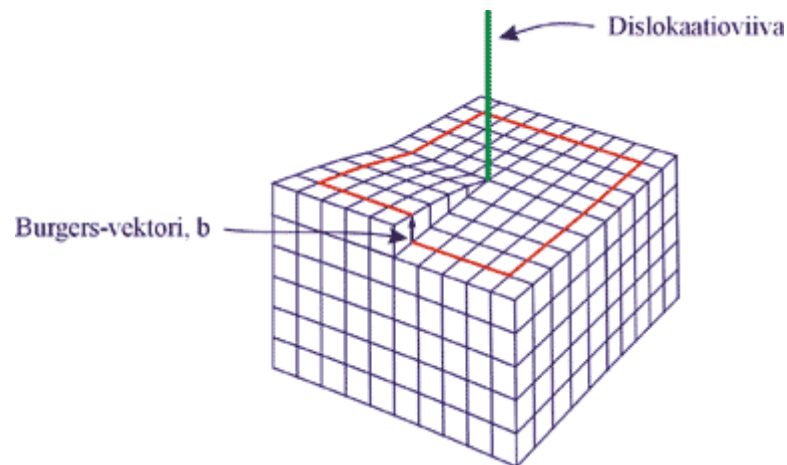
Kuvasta 7 nähdään, että leikkausviivan ylä- ja alapuoli olisivat itsessään virheettömiä kidehiloja. Nyt niiden väliin syntynyt ylimääräinen atomitaso aiheuttaa kiderakenteeseen viivamaisen virheen. Ylimääräinen atomitaso on kohtisuoraan kuvan 7 leikkausviivaa kohti. Särmädislokaatio voi liikkua metallissa, jos siihen kohdistetaan leikkausjännitystä. Särmädislokaation liike pois kiderakenteesta aiheuttaa yhden atomietäisyyden suuruisen muodonmuutoksen. Särmädislokaatio liikkuu liukutasoa pitkin niin kauan, kunnes se poistuu kiderakenteesta. Muutos on havainnollistettu kuvaan 8.



**Kuva 8.** Särmädislokaation liike liukutasossa (Materiaalit ja niiden valinta)

Muodonmuutoksen suuruutta ja suuntaa kuvataan Burgers-vektorilla. Särmädislokaatiossa Burgers-vektori on kohtisuoraan viivamaista virhettä, eli ylimääräistä atomitasoa, kohti.

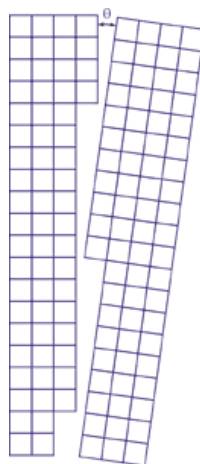
Ruvidislokaatiossa Burgers-vektori on dislokaation suuntainen. Kuvassa 9 on esitetty ruvidislokaatio. (Andersson et al., 155–171)



**Kuva 9.** Ruvidislokaatio (Materiaalit ja niiden valinta)

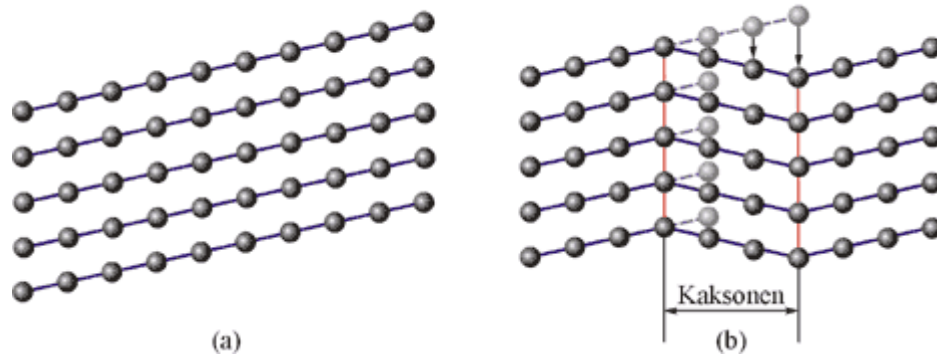
### 5.3 Tasomaiset virheet

Tasomaisia virheitä ovat raerajat ja kaksostumat. Raerajaksi kutsutaan kahden erisuuntaisen tai -laatuisen kiderakenteen välistä aluetta. Esimerkki raerajasta on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10.** Raeraja joka on muodostunut, kun kaksi kiderakennetta poikkeaa suunniltaan toisistaan (Materiaalit ja niiden valinta)

Kaksostuma on hilavirhe, jossa tason eri puolilla olevat alueet ovat toistensa peilikuvia. Kaksostumia syntyy kiteen kasvaessa tai dislokaatioiden liikuessa, kun materiaali on jännityksessä. Kaksostuma, jota kutsutaan myös kaksoseksi, on esitetty kuvassa 11. (Andersson et al., 171–174)



Kuva 11. Kaksostuma (Materiaalit ja niiden valinta)

## 6 TESTIMENETELMIÄ SÄTEILYHAURASTUMISEN TODENTAMISEEN

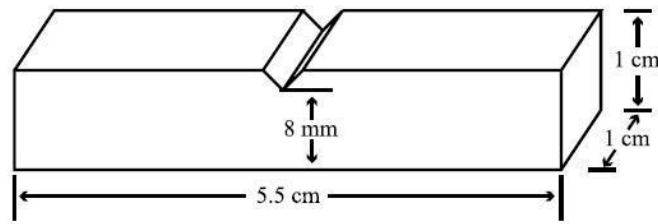
Reaktoripainesäiliöterästen mekaanisia ominaisuuksia ja transitiolämpötilan muutosta säteilytyksessä testataan muun muassa standardisoiduilla veto-, Charpy-isku-, pudotusvasara- ja murtumismekaanisilla kokeilla.

### 6.1 Vetokoe

Vetokokeessa määrätyn muotoinen koesauva vedetään poikki. Kuormitus on staattista. Vetokokeilla voidaan määrittää testikappaleen jännitys-venymä -käyrä.

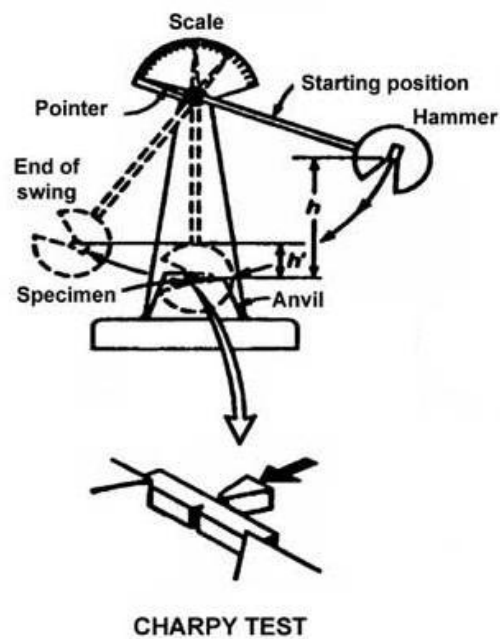
### 6.2 Charpy-iskukoe

Charpy-iskutestin testikappaleena toimii pala, jonka poikkipinta-ala on 10x10 mm ja pituus 55 mm. Kappaleen keskiosaan tehdään 2 mm:n syvyinen 45°:een avautuva v:n muotoinen leikkaus. Testikappale on esitetty kuvassa 12.



**Kuva 12.** Charpy-iskukokeen testikappale v-lovella (Was Gary S., 665)

Testi suoritetaan tukemalla kappale poikittain ja törmäyttämällä loven taakse raskas heilurivasara, jonka nopeus törmäyshetkellä on noin 5 m/s. Heiluri jatkaa matkaansa iskun jälkeen sitä vähemmän mitä enemmän testikappale on absorboinut energiaa iskussa. Absorboitunut energia voidaan lukea mittarista, joka sijaitsee mittalaitteistossa. Koelaitteisto on esitetty kuvassa 13. (Was Gary S., 664–666)

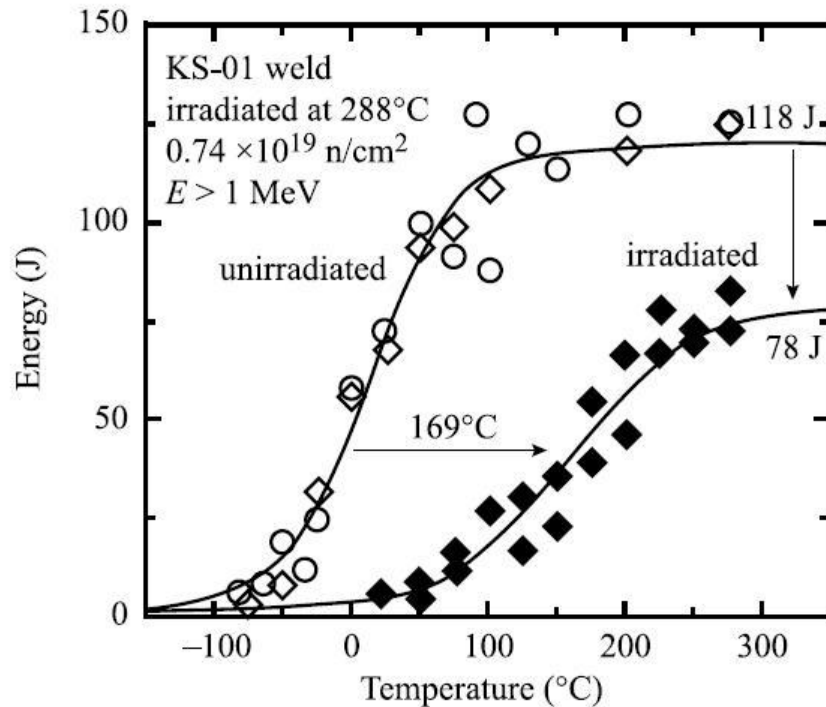


**Kuva 13.** Charpy-iskukoelaitteisto (IAEA, 27)

Charpy-iskukokeessa määritetään testikappaleen absorboima energia lämpötilan funktion. Kun testi tehdään samasta materiaalista tehdyille kappaleille, joista vain toinen on altistunut säteilylle, voidaan huomata, että säteilytetty kappale absorboi saman energian korkeammalla lämpötilalla. Kyseistä lämpötilasiirtymää kutsutaan transitiolämpötilan muutokseksi. Transitiolämpötilan muutos luetaan yleensä 41 joulun kohdalta. Tätä transitiolämpötilan muutosta, tai transitiolämpötilan säteilysiirtymää, merkitään  $\Delta T_{41}$ . Säteily vaikuttaa myös pienentäen kappaleen absorboimaan energiaa täysin sitkeän



murtuman alueella. Tätä aluetta kutsutaan USE-alueeksi (Upper Shelf Energy). Säteilyn vaikutuksesta USE-alue siirtyy pienemmille energioille. Kuvassa 14 on esitetty tyypillinen Charpy-iskukokeista saatava käyrä.

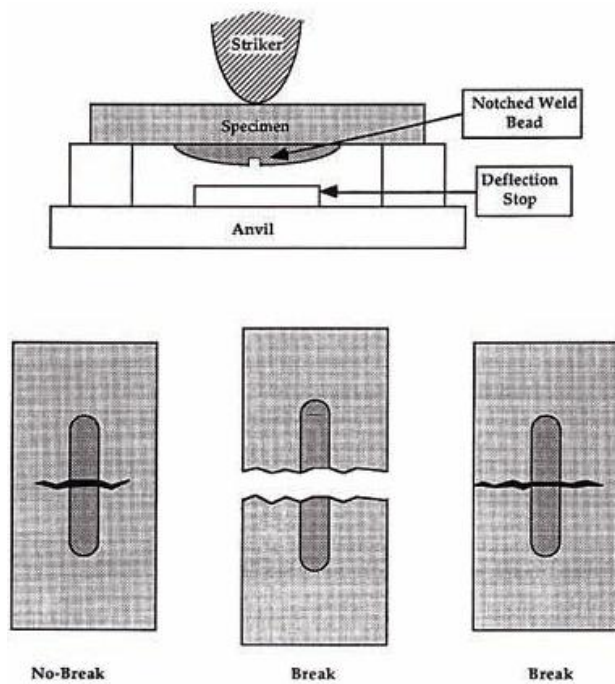


**Kuva 14.** Charpy-iskukokeen tulosten mukaan piirretty käyrä (Was Gary S., 670)

Transitiolämpötilanmuutos,  $\Delta T_{41J}$  kuvan 14 tapaukselle on 169 °C. USE-alue on siirtynyt noin 40 joulea pienemmäksi. Transitiolämpötilan muutos aiheuttaa sen, että painesäiliömateriaali voi murtua hauraasti korkeammilla lämpötiloilla kuin ennen säteilyaltistusta. (IAEA, 26)

### 6.3 Pudotusvasarakoe

Pudotusvasarakokeella määritetään materiaalin nollasitkeyslämpötilanmuutos, NDT-lämpötila (Nil Ductility Transition temperature) eli lämpötila, jossa materiaali pystyy estämään haurasmurtuman synnyn ja sen leviämisen. Pudotusvasarakokeen koelaitteisto ja testikappale on esitetty kuvassa 15.

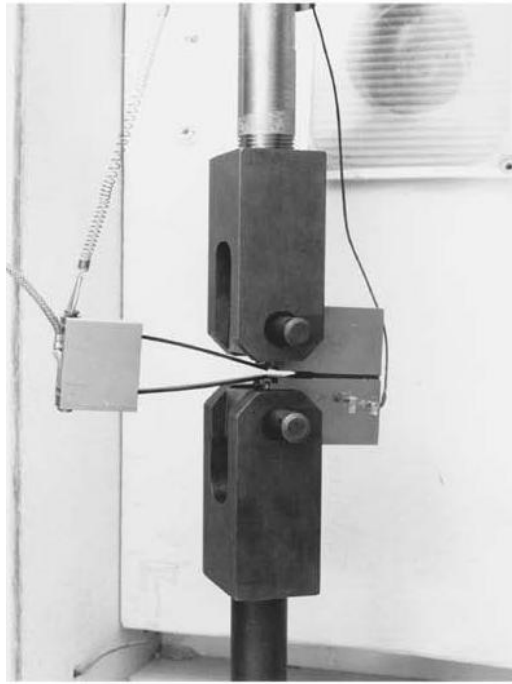


**Kuva 15.** Periaatteellinen kuva pudotusvasarakokeesta (yllä) ja testikappale sekä sen murtumatyytit. (IAEA, 28)

Koekappaleessa on lovitettu hitsi, joka on tehty hauraasta materiaalista. Hitsi aiheuttaa murtuman synnyn heti kun pudotusvasara osuu testikappaleeseen. Testillä pyritään löytämään lämpötila, jossa haurasmurtuma syntyy pienestäkin viasta, mutta jonka yläpuolella muodonmuutokset estävät haurasmurtuman synnyn. Haurasmurtumaksi tulkitaan murtuma, jossa murtumapinta on levinnyt vähintään testikappaleen toiselle sivulle. Testikappaleen lämpötilaa nostetaan aina 5 °C hyppäyksin kunnes saavutetaan lämpötila, jossa murtumaa ei enää tapahdu kahden pudotuksen jälkeen. Sitä edellinen lämpötila on kappaleen NDT-lämpötila. (IAEA, 26–29)

## 6.4 Murtumismekaaniset kokeet

Murtumismekaaniset kokeet ovat staattisia rasituskokeita, joilla mitataan erilaisia murtumisparametreja. Murtumismekaanisilla kokeilla voidaan määrittää esimerkiksi kriittisiä särökokoja materiaalille, toisin sanoen särökokoja, joita materiaali kestää murtumatta. Tärkeimpänä määritettävänä parametrina on materiaalin murtumissitkeys,  $K_{ic}$ . Tyypillinen murtumismekaanisessa kokeessa käytetty koelaitteisto ja testikappale on esitetty kuvassa 16.



**Kuva 16.** Murtumissitkeyden määrittämisessä käytetty koelaitteisto ja testikappale (IAEA, 30)

Materiaalin, jota ei ole säteilytetty, murtumissitkeys on suurempi pienemmillä lämpötiloilla kuin materiaalin, jota on säteilytetty. Säteilyn aiheuttama murtumissitkeyden lämpötilasiirtymä,  $T_0$ , saadaan kun keskimääräisille murtumissitkeysarvoille tehdään Master Curve -sovite ja katsotaan lämpötilasiirtymä keskimääräisen murtumissitkeyden arvon  $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$  kohdalta. (IAEA, 29–31)

## **7 TRANSITIOILÄMPÖTILAN MUUTOS SÄTEILYN VAIKUTUKSESTA**

Reaktoripainesäiliö haurastuu käytön aikana ja sen haurastumista pitää seurata, jotta voidaan taata, että reaktoripainesäiliö toimii tarkoitetulla tavalla koko käyttöaikansa. Haurastumista seurataan kahden pääasiallisen parametrin mukaan. Ne ovat referenssitransitiolämpötila,  $RT_{\text{ndt}}$ , ja USE-alueen siirtyminen pienemmille energioille. USE-alue on Charpy-iskukokeissa nähtävä täysin sitkeän murtuman alue.  $RT_{\text{ndt}}$  määräytyy Charpy-iskukokeen tai pudotusvasarakokeen tuloksista. USE-alueen siirtyminen ja referenssilämpötilan muutos ( $\Delta RT_{\text{ndt}}$ ) saadaan pelkästään Charpy-iskukokeista.

$RT_{\text{ndt}}$  voidaan määrittää ASME-koodin osan III mukaan seuraavasti:

$$\begin{aligned} RT_{\text{ndt}} &= NDTT && \text{jos } NDTT \geq T_{68J} - 33^\circ\text{C} \\ RT_{\text{ndt}} &= T_{68J} - 33^\circ\text{C} && \text{jos } T_{68J} - 33^\circ\text{C} \geq NDTT \end{aligned} \quad (4)$$

jossa  $NDTT$  on pudotusvasakokeesta saatu NDT-lämpötila ja  $T_{68J}$  on Charpy-iskukokeesta saatava lämpötila-arvo 68 joulen kohdalta. (IAEA, 93)

Säteilytetyn tilan  $RT_{\text{ndt}}$ :tä ei saada suoraan vaan se lasketaan yhtälön (5) mukaisesti:

$$\text{Säteilytetyn tilan } RT_{\text{ndt}} = RT_{\text{ndt}} + \Delta T_{41}, \quad (5)$$

jossa  $RT_{\text{ndt}}$  on yhtälön (4) mukainen referenssitransitiolämpötila ja  $\Delta T_{41}$  on Charpy-iskukokeesta saatava transitiolämpötilan muutos 41 joulen kohdalta. (IAEA, 104)

Jotta haurastumisen vaikutusta voidaan arvioida, on transitiolämpötilan muutokselle kehitetty korrelaatioita. Korrelaatiot ovat yleensä tehty vain tietylle painesäiliöteräkselle. Korrelaatiot ovat yleensä muotoa:

$$\Delta RT_{NDT} = CF \cdot FF, \quad (6)$$

jossa  $\Delta RT_{\text{ndt}}$  on referenssitransitiolämpötilan muutos,  $CF$  on kerroin, johon vaikuttaa painesäiliöteräksen kemiallinen koostumus ja  $FF$  on kerroin, joka ottaa huomioon säteilyaltistuksen määrän. (IAEA, 94)

## **8 REAKTORIPAINESÄILIÖN SÄTEILYALTISTUKSEN LASKEMINEN**

Reaktoripainesäiliön säteilyaltistusta voidaan laskea ja se on tärkeä tietää, koska säteilyaltistuksen kasvaessa säteilyhaurastuminen kasvaa.

Reaktoripainesäiliön seinämälle kohdistuva säteilyvuo voidaan laskea yhtälöstä (7):

$$\Phi = \int_0^{\infty} \varphi(E) dE, \quad (7)$$

jossa  $\Phi$  on säteilyvuo,  $\varphi(E)$  on vuo tietyllä energialla ja  $E$  on energia. Säteilyvuon yksikkö on  $1/\text{cm}^2\text{s}$ . Kiinteissä materiaaleissa atomin siirtämiseksi kidepaikaltaan tarvitaan tietty kynnysenergia,  $E_d$ . Jos kynnysenergia otetaan huomioon, voidaan säteilyvuo kirjoittaa muotoon:

$$\Phi_d = \int_{E_d}^{\infty} \varphi(E) dE, \quad (8)$$

jossa  $\Phi_d$  on kynnysarvoinen säteilyvuo. Yksikkö on sama kuin säteilyvuossa.

Vuo kertoo kuinka paljon säteilyä, tai paremminkin hiukkasia ja partikkeleita, osuu tietylle alueelle tietyssä ajassa. Painesäiliön säteilyaltistus on vuon ja vaikutusajan tulo ja se voidaan laskea yhtälön (9) mukaan:

$$\begin{aligned} \text{altistus} &= \int_0^t \Phi(t) dt, \\ \text{altistus} &= \Phi t \end{aligned} \quad (9)$$

jossa  $t$  on altistumisaika. Säteilyaltistumisen yksikkö on  $1/\text{cm}^2$ . Tyypillisiä arvoja neutronivuolle ja  $\gamma$ -säteilyaltistukselle eri kevytvesilaitoksille niiden käyttöiän aikana on esitetty taulukossa 5. (Rosenbaum H.S., 5–6)

**Taulukko 2.** Neutronivuon ja -säteilyaltistuksen arvoja (IAEA, 5)

Laitostyyppi	Vuo [ $1/m^2s$ ] ( $E > 1 \text{ MeV}$ )	Altistus [ $1/m^2$ ] ( $E > 1 \text{ MeV}$ )
VVER-440 (sydämen kohdalla oleva hitsausauma)	$1,2 \cdot 10^{15}$	$1,1 \cdot 10^{24}$
VVER-440 (maksimi-arvo)	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^{24}$
VVER-1000	$3 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{14}$	$3,7 \cdot 10^{23}$
PWR (Westinghouse)	$4 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{23}$
PWR (Babcock & Wilcox)	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{23}$
BWR	$4 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10 \cdot 10^{22}$

Toinen tapa säteilyaltistuksen laskemiseksi on laskea arvo, joka kertoo kuinka monta kertaa hilapaikaltaan siirtymisiä per atomi syntyy tietyllä vuolla ja altistumisajalla. Tällaista arvoa kutsutaan dpa-luvuksi (displacements per atom). Dpa-luku voidaan laskea yhtälöstä (10):

$$dpa = n_d \sigma_s \Phi t, \quad (10)$$

jossa  $n_d$  on hilasiirtymien lukumäärä törmäyskaskadissa ja  $\sigma_s$  on mikroskooppinen sirontavaikutusala. Hilasiirtymien lukumäärää törmäyskaskadissa voidaan approksimoida yhtälöllä (11):

$$n_d = \frac{0,8 \cdot v(E)}{2 \cdot E_d}, \quad (11)$$

jossa  $v(E)$  on kineettisen energian määrä, joka siirtyy törmäävältä hiukkaselta hilapaikaltaan siirtyvälle atomille. (Howe Lawrence M., 187)

## 9 ERI SEOSAINIEN VAIKUTUS SÄTEILYHAURASTUMISEEN

Kuten kappaleessa 2.1 tulee esille, ovat reaktoripainesäiliömateriaalit niukkaseosteisiä hiiliteräksiä. Raudan lisäksi teräksissä on seosaineina muun muassa kuparia, mangaania, nikkeliä ja kromia. Seosaineiden on huomattu vaikuttavan säteilyhaurastumiseen. Seosaineiden liukoisuudet painesäiliöiden käyttölämpötiloissa vaikuttavat erkaumien

syntymiseen. Erkaumia syntyy, kun pitoisuus on suurempi kuin liukoisuus. Erkaumat vastustavat dislokaatioiden liikettä ja koventavat materiaalia, koska niiden sitkeä luonne heikentyy. (IAEA, 59)

## 9.1 Kupari

Kuparin vaikutus säteilyhaurastumiseen on yksi vahingollisimmista. Vaikutus säteilyhaurastumiseen alkaa esiintyä, kun kuparipitoisuus painesäiliöteräksessä ylittää 0,04 %. Kuparipitoisuuden kasvaessa 0,1 %:iin vaikutus tulee merkittäväksi. Tästä syystä kuparipitoisuudet niin hitsi- kuin painesäiliömateriaaleissa on 1970-luvulta lähtien rajoitettu maksimissaan 0,1 %:iin. Länsimaissa, kuten Ranskassa, kuparipitoisuus on rajoitettu 0,07 %:iin. Valmistusvaiheessa kuparin liukoisuus on suurempi kuin kuparipitoisuus teräksessä, mutta käyttölämpötilassa liukoisuus puhtaaseen rautaan pienenee arvoon 0,007 %, joten kuparilla on taipumus muodostaa erkaumia tai atomirykelmiä reaktoripainesäiliöteräksessä käytön aikana. Taulukossa 6 on esitetty eri seosaineiden liukoisuuksia puhtaaseen rautaan eri lämpötiloissa. (IAEA, 59)

**Taulukko 3.** Eri aineiden liukoisuuksia puhtaaseen rautaan kahdessa eri lämpötilassa (IAEA, 59)

	Cu	P	N	Mn	Ni
575 °C (paino-%)	n. 0,17	n. 0,27	n. 0,12	n. 2,8	n. 5,4
290 °C (paino-%)	n. 0,007	n. 0,05	n. 0,04	n. 3	n. 4,2

## 9.2 Fosfori

Fosforin vaikutus painesäiliön säteilyhaurastumiseen huomattiin 1970-luvulla. Erilaisissa tutkimuksissa saatiin selville, että fosforinpitoisuuden ylittyessä 0,015 % sen vaikutus vahvisti Charpy-iskukokeissa saatuja transitiolämpötilojen siirtymisiä korkeammille lämpötiloille. 1970-luvulta lähtien fosforipitoisuus painesäiliöteräksissä ja hitsimateriaaleissa on rajoitettu maksimiarvoon 0,015 % ja joissain länsimaissa, kuten Ranskassa, sen maksimiarvo on rajoitettu 0,008 %:iin. Fosforierkaumien muodostuminen käyttölämpötiloissa on pientä, mutta niiden epäillään liittyvän kuparierkaumiin ja sitä kautta vaikuttavan säteilyhaurastumiseen. (IAEA, 59–60)

### 9.3 Typpi, tina ja arseeni

Typen, tinan ja arsenikin vaikutus säteilyhaurastumiseen on hyvin pientä. Typen vaikutus säteilyhaurastumiseen alle 250 °C lämpötiloissa saattaa kasvaa, joka on normaalin toimintalämpötilan alapuolella. (IAEA, 60)

### 9.4 Nikkeli

Nikkelin vaikutusta säteilyhaurastumiseen on tutkittu laajasti 1980-luvulta lähtien. Nikkelillä on suuri, mutta vielä selitystä vailla oleva vaikutus säteilyhaurastumiseen, joka esiintyy pitoisuuden ylittäessä 1 %:n. Vaikutus kasvaa entisestään kuparipitoisuuden kasvaessa. Nikkelipitoisuus käyttölämpötilassa on huomattavan paljon pienempi kuin sen liukoisuusarvo puhtaaseen rautaan, mutta nikkeli pystyy yhdistymään kuparierkaumiin ja täten lisää säteilyhaurastumista.. (IAEA, 60)

### 9.5 Mangaani

Mangaanipitoisuudet painesäiliöteräksissä ovat huomattavasti pienempiä kuin niiden liukoisuudet käyttö- ja valmistuslämpötiloissa. Mangaani pystyy yhdistymään kuparierkaumiin ja tätä kautta vaikuttamaan säteilyhaurastumiseen. Mangaanin suoraa vaikutusta säteilyhaurastumiseen ei ole tutkittu tarpeeksi ja kaikkia sen vaikutusmekanismeja säteilyhaurastumiseen ei tiedetä. (IAEA, 60)

## 10 SÄTEILYN VAIKUTUKSET MATERIAALIEN OMINAISUUKSIIN

Säteilyn vaikutukset reaktorin painesäiliön rakennemateriaaleihin riippuvat pääosin neutronivuosta, neutronien energioista, säteilytysajasta ja -lämpötilasta. Säteilytysaika tarkoittaa aikaa, jolloin materiaali on alttiina säteilylle. Säteilytyslämpötila taas tarkoittaa sitä lämpötilaa, jossa säteilytys tapahtuu. Alussa mainitut syyt vaikuttavat materiaalien fyysisiin, termisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin, joiden muuttuminen täytyy ottaa huomioon reaktoripainesäiliön suunnittelussa, käytössä ja käyttöturvallisuutta arvioitaessa. (Ma Benjamin M., 90)



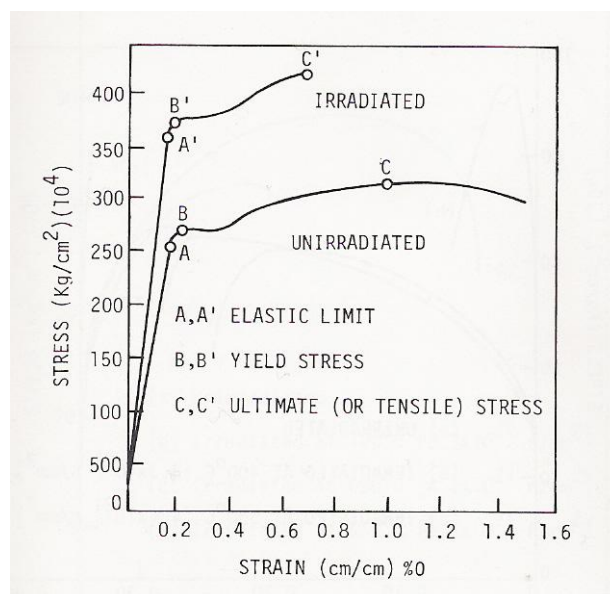
Säteily vaikuttaa materiaalien fyysisiin ominaisuuksiin lähinnä muuttamalla niiden sähkönjohtavuutta ja magneetoresistiivisyyttä. Säteily vaikuttaa sähkönjohtavuuteen nostamalla sitä ja laskemalla magneetoresistiivisyyttä. Sähkönjohtavuuden ja magneetoresistiivisyyden muutokset eivät ole tärkeitä kevytvesireaktoriympäristössä. (Ma Benjamin M., 90–94)

Säteily vaikuttaa materiaalien termisiin ominaisuuksiin lähinnä laskemalla materiaalin lämmönjohtavuutta. Lämmönjohtavuuden muutokset eivät vaikuta oleellisesti reaktoripainesäiliön toimintaan kevytvesilaitoksissa. (Ma Benjamin M., 95)

Säteilyn vaikutus materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin on painesäiliön kannalta oleellisinta.

## 10.1 Mekaaninen lujuus

Materiaalin lujuutta arvioidaan yleisesti jännitys-venymä -ominaisuuksien mukaan. Kuvassa 17 on esitetty jännitys-venymä -käyrä (stress-strain curve) tyypilliselle rakennusteräkselle.



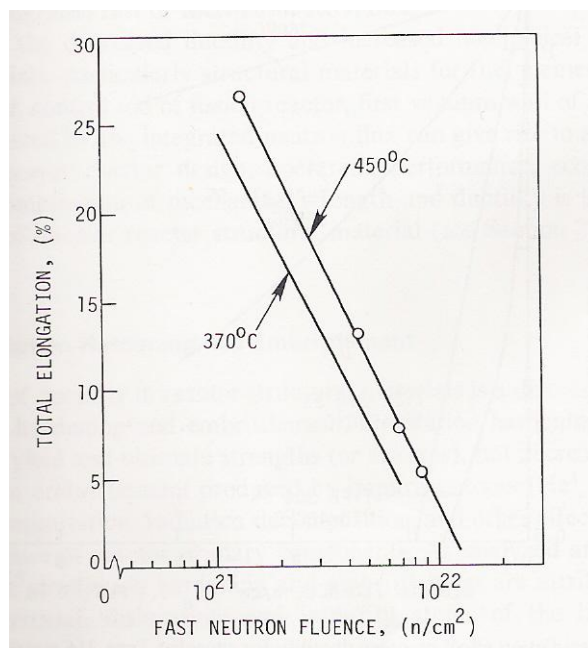
**Kuva 17.** Jännitys-venymä -käyrä (Ma Benjamin M., 97)

Kuvasta voi huomata, että säteily vaikuttaa siten, että jännitys kasvaa suhteessa venymään enemmän säteilytettyllä kappaleella (Irradiated) kuin kappaleella, jota ei ole säteilytetty

(Unirradiated). Säteilyn aiheuttama myötöjännityksen (Yield stress) ja murtojännityksen (Ultimate stress) kasvaminen lisää materiaalin lujuutta. (Ma Benjamin M., 96–101)

## 10.2 Sitkeys

Sitkeys on tärkeä materiaalin ominaisuus. Sitkeä materiaali pystyy myötämään ja muuttamaan muotoaan ennen murtumistaan. Materiaalin sitkeyttä voidaan sanoa myös materiaalin muodonmuutoskyvyksi. Sitkeyttä voidaan kuvata materiaalin prosentuaalisella venymällä tai sen prosentuaalisena poikkipinta-alan pientymisenä ennen sen murtumista. Säteily vaikuttaa materiaalin sitkeyteen pienentäen sitä. Kuvassa 18 on esitetty venymän (Elongation) käyttäytymistä säteilytettyssä ruostumattomassa teräksessä (AISI 316) kahdessa eri säteilytislämpötilassa nopeassa neutronispektrissä ( $E > 1 \text{ MeV}$ ).

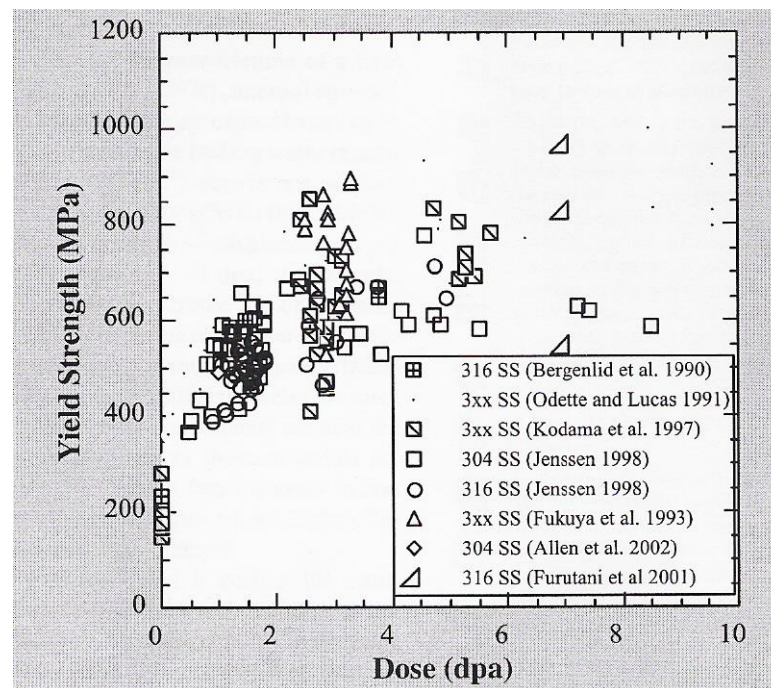


**Kuva 18.** Venymän muuntuminen säteilytyksessä (Ma Benjamin M., 101)

Kuvan 18 suorista nähdään, että venymä ennen murtumista pienenee säteilytyksen kasvaessa samalla muuttaen materiaalin sitkeysominaisuuksia. Sitkeys on yksi tärkeimmistä reaktoripainesäiliöteräksen ominaisuuksista. Sen pienentyminen heikentää painesäiliön käyttöominaisuuksia. (Ma Benjamin M., 101–102)

### 10.3 Kovettuminen

Säteilyn aiheuttama materiaalin kovettuminen nostaa myötö- ja murtolujuutta. Lujuuden kasvaminen aiheuttaa materiaalin sitkeyden pienentymistä. Toisin sanoen, materiaalin muodonmuutoskyky huononee. Sitkeyden aleneminen ja lujuuden kasvaminen aiheuttaa materiaalin haurastumista. Reaktoripainesäiliön haurastuminen puolestaan saattaa aiheuttaa sen ennen aikaisen rikkoutumisen, koska sen taipuisa luonne on pienentynyt. Materiaalin koveneminen johtuu sen mikrorakenteen muutoksista. Säteilyn vaikutus ruostumattoman teräksen myötölujuuteen (Yield Strength) säteilyannoksen (Dose) funktiona on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Säteilyn vaikutus myötölujuuteen (Allen T.R. & Busby J.T., 34)

Kuten kuvasta 19 voi huomata, lujuuden kasvaminen hidastuu selkeästi tietyn säteilyannoksen jälkeen. Säteilyannoksen kasvattaminen muutaman dpa:n jälkeen ei enää lisää myötölujuutta kuten säteilytyksen alussa. (Allen T.R. & Busby J.T., 33)

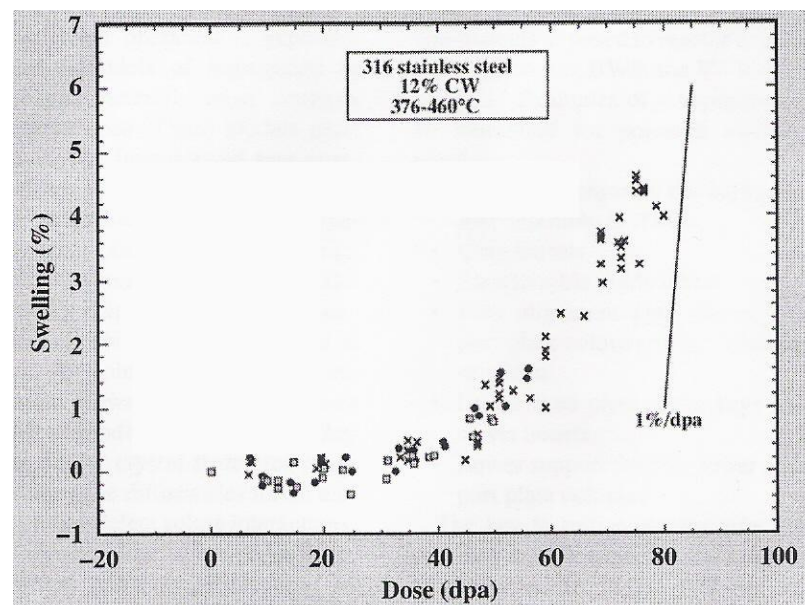
### 10.4 Virumisominaisuudet

Viruminen on hidasta, plastista ja jatkuvaa kiinteän materiaalin muodonmuutosta, joka on jatkuvan kuormituksen alaisena ja korkeassa lämpötilassa. Lämpötilasta johtuva viruminen

alkaa yleensä lämpötiloissa, jotka ovat noin 40 % materiaalin sulamislämpötilasta. Säteilytyksessä materiaalin viruminen nopeutuu, koska säteily aiheuttaa materiaalin kiderakenteeseen lisäpistevikoja ja muita kiderakenteen virheitä. (Allen T.R. & Busby J.T., 33)

## 10.5 Paisuminen

Säteily aiheuttaa vakanssien, eli tyhjien hilapaikkojen syntymistä. Diffuusion takia vakanssit kerääntyvät yhteen ja saattavat muodostaa kiderakenteeseen huokosia. Jos huokosen sisään menee kaasuatomi, esimerkiksi helium-atomi, tulee siitä kupla. Huokosten ja kuplien muodostuminen aiheuttaa materiaalin isotrooppista tilavuuden kasvua eli materiaali paisuu. Säteilyn aiheuttama paisuminen saattaa muuttaa komponenttien haluttua kokoa tai muotoa. Mahdolliset koon- ja muodonmuutokset aiheuttavat rakenteeseen jännitteitä ja lisäävät virumisnopeutta. Kuvassa 20 on esitetty ruostumattoman teräksen (AISI 316) paisuminen (Swelling) säteilyannoksen (Dose) funktiona.



**Kuva 20.** Ruostumattoman teräksen (AISI 316) paisuminen säteilyannoksen funktiona (Allen T.R. & Busby J.T., 31)

Kuvasta 20 voidaan huomata, että prosentuaalinen paisuminen ei aluksi juurikaan kasva säteilyannoksen funktiona. Tietyn säteilyannosrajan ylitys aiheuttaa lähes lineaarisen paisumisen. Alun tasaista kasvualuetta kutsutaan transienttialueeksi (transient region) ja lopun lähes lineaarista kasvua stationäärialueeksi (steady-state region). Stationäärialueella paisuminen kasvaa lähes 1 %/dpa -vauhtia. Paisumisen estämiseksi säteilyannoksen pitäisi

pysytellä transientialueella niin pitkään kuin mahdollista. Kevytvesilaitosten reaktoripainesäiliöt eivät saa stationäärialueelle ominaisia säteilyannoksia. (Allen T.R. & Busby J.T., 32–33)

## 10.6 Korroosio

Säteily aiheuttaa painesäiliön korroosiota kahdella eri tavalla. Ensinnäkin neutronisäteily hajottaa jäähdytteenä toimivaa vettä radiolyysillä vedyksi (H) ja hapeksi (O<sub>2</sub>) sekä niiden eri yhdisteiksi, kuten hydroksyyliksi (OH) ja vetyperoksidiksi (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Kyseiset aineet aiheuttavat kemiallisia reaktioita reaktoripainesäiliön pinnalla ja nopeuttavat korroosiota. Korroosio saattaa aiheuttaa jännityskorroosiomurtumista tai korroosioväsymistä. Toisekseen neutronisäteily saattaa tuhota painesäiliön pintaa suojaavan ohuen oksidikerroksen samalla paljasten tuoretta metallipintaa, joka voi edelleen korrodoitua. (Ma Benjamin M., 115–117)

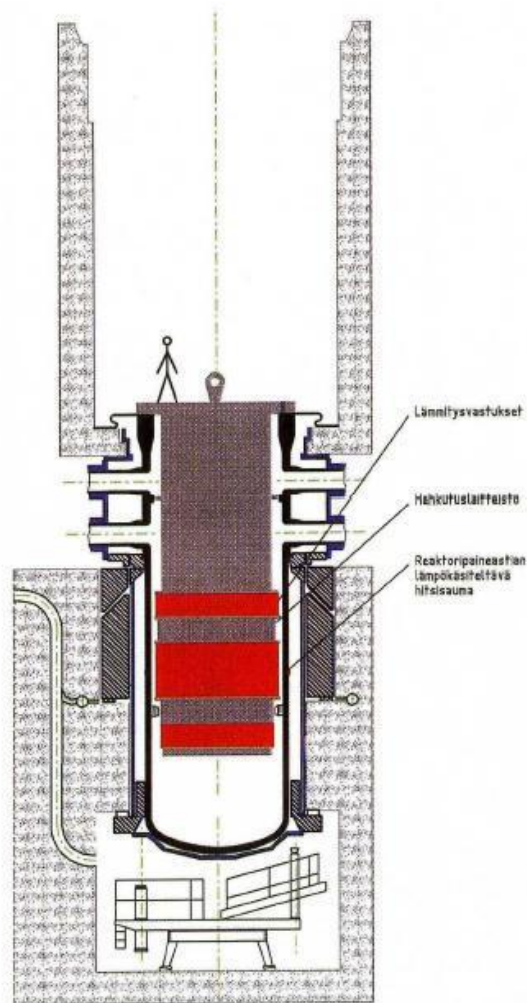
## 11 HEHKUTTAMINEN

Neutronisäteilyn vaikutuksesta haurastuneen reaktoripainesäiliön sitkeysominaisuudet saadaan palautettua lähes uutta vastaaviksi hehkuttamalla. Menetelmässä painesäiliön seinämää kuumennetaan painesäiliön sisään asennetulla lämpökäsittelylaitteistolla. Hehkutuksen korkeassa lämpötilassa (tyypillisesti välillä 430–500 °C) atomien lämpöliike on voimakasta jolloin atomit siirtyvät helpommin takaisin oikeille paikoilleen alkuperäiseen hilarakenteeseen. Myös säteilyn synnyttämien erkaumien lukumäärä pienenee hehkutuksessa merkittävästi. Hehkutus on tehty onnistuneesti 15 VVER-440-tyypin painesäiliölle, joista seitsemän on vielä toiminnassa. (IAEA, 100; Kohopää ja Jokineva, 20–23)

### 11.1 Loviisa 1 -yksikön reaktoripainesäiliön hehkuttaminen

Loviisa 1 -laitosyksiköllä havaittiin jo kolmen vuoden käytön jälkeen, että reaktorisydämen kohdalla sijaitsevan hitsisauman materiaalin transitiolämpötila oli noussut ennakoitua nopeammin. Ensimmäisenä korjaavana toimenpiteenä pienennettiin paineastian seinämään kohdistuvaa neutronisäteilyvuota korvaamalla 36 ulointa polttoaine-elementtiä teräksisillä suojaelementeillä (ns. ”dummy”-elementti).

Hehkutus suoritettiin vuonna 1996 ja siitä vastasi Skoda Nuclear Machinery Plzen Ltd -yhtiö, joka oli suorittanut vastaavanlaisen hehkutuksen kahdelle VVER-440 -reaktoripainesäiliölle Bohunicen ydinvoimalaitoksella Slovakiassa. Hehkutukseen käytettiin samaa laitetta, jota oli käytetty edellä mainituille reaktoripainesäiliöille. Laite on esitetty kuvassa 21.



**Kuva 21.** Hehkutuslaitteisto reaktoripainesäiliön sisällä (Kohopää ja Jokineva, 21)

Hehkutuslaitteen nimellisteho on 1 000 kW ja paino noin 64 tonnia. Laite koostuu kannesta, rungosta ja kolmesta eri kuumennusvyöhykkeestä, joista keskimäinen kuumentaa varsinaisen hehkutettavan alueen ja reunimaiset säätävät lämpötilajaukaumaa niin, ettei liian suuria lämpöjännityksiä pääse syntymään painesäiliön seinämiin.

Keskimäinen vastus hehkutti reaktorin sydämen kohdalla olevaa haurastunutta hitsaussaumaa ja sen välitöntä läheisyyttä 1,5 metrin korkeudelta. Hehkuttaminen

aloitettiin tyhjentämällä painesäiliö vedestä ja laskemalla laite painesäiliön sisään. Hehkutuslämpötila oli 475–500 °C ja sitä pidettiin yllä 100 tuntia. Lämpöjännitysten syntymisen estämiseksi lämpötilaa nostettiin vain 20 °C tunnissa. Hehkutuksen jälkeen painesäiliön annettiin jäähtyä kaksi vuorokautta 60 °C lämpötilaan ennen kuin se täytettiin vedellä uudelleen. Kokonaisuudessaan hehkutus kesti 12 vuorokautta.

Hehkuttamiseen oli varauduttu jo 80-luvun alkupuolella, jolloin aloitettiin tutkimukset hehkuttamisen aiheuttamista vaikutuksista painesäiliömateriaalille. Tutkimusten tarkoituksena oli määrittää hitsimateriaalin toipumiskäyttäytyminen ja varmistaa ettei hehkutuksella ole haittavaikutuksia muihin painesäiliössä käytettyihin materiaaleihin. Hehkutustapahtuman aiheuttamat mahdolliset lämpöjännitykset painesäiliölle tutkittiin ja mallinnettiin FEM-mallien (Finite Element Method) avulla. Mallinnukset varmistettiin teettämällä sama mallinnus sekä silloisen IVO International Oy:n että Skoda Nuclear Machinery Plzen Ltd -yhtiön toimesta. Mallinnuksella varmistettiin, että mahdolliset lämpöjännitykset eivät vahingoita painesäiliötä. (Kohopää ja Jokineva, 20–23)

## **12 YHTEENVETO**

Säteilyhaurastumiseksi kutsutaan painesäiliömateriaalin mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä neutronisäteilyn vuoksi. Neutronisäteily aiheuttaa painesäiliömateriaalin mikrorakenteeseen erilaisia hilavirheitä, jotka ovat pääsyynä painesäiliömateriaalin muodonmuutoskyvyn heikkenemiseen sekä muiden mekaanisten ominaisuuksien heikkenemiseen. Säteilyhaurastumisnopeuteen vaikuttavat painesäiliömateriaali, neutronisäteilyn määrä ja spektri sekä lämpötila, jossa säteilyaltistus tapahtuu. Koska reaktoripainesäiliön suureen murtumaan ei ole varauduttu ydinvoimalaitoksien turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa, sen eheyden säilymisestä on varmistauduttava äärimmäisen huolellisesti. Jotta painesäiliön turvallinen käyttö voidaan taata, on säteilyhaurastumista seurattava laitoksen koko käyttöiän ajan. Neutronisäteilyn vaikutuksesta haurastuneen painesäiliön sitkeysominaisuudet saadaan tarpeen vaatiessa palautettua lähes uutta vastaaviksi hehkuttamalla. Säteilyhaurasilmiotä on tutkittu vuodesta 1950 lähtien ja tutkimus jatkuu edelleen.

## LÄHTEET

Allen T.R. & Busby J.T. 2009. Radiation Damage Concerns for Extended Light Water Reactor Service. JOM, 2009 vol. 61, Springer Boston. s. 29–34. ISSN 1047-4838.

Andersson et al. 1985. Materials Science, Van Nostrand Reinhold. 521 s. ISBN 0-442-30626-1.

Howe Lawrence M. 2000. Irradiation Damage. Westbrook J.H. & Fleischer R.L. Basic Mechanical Properties and Lattice Defects of Intermetallic Compounds. John Wiley & Sons Ltd. s. 181198. ISBN 978- 0471611752.

IAEA. 2009. Integrity of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants: Assessment of Irradiation Embrittlement Effects in Reactor Pressure Vessel Steels. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.11. 145 s. ISBN 978-92-0-101709-3.

Kalli Heikki. 2008. Ydinvoimatekniikka 1, luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Kohopää Jyrki & Jokineva Heikki. 1996. Loviisan ykkösreaktorin turvallisuus parani hehkuttamalla. Alara. 1996 vol. 3. s. 20–23.

Ma Benjamin M. 1983. Nuclear Reactor Materials and Applications. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 610 s. ISBN 0-442-22559-8.

Materiaalit ja niiden valinta [verkkomateriaali]. 2004. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/>. [Viitattu 15.9.2009].

Rosenbaum H.S. 1975. Microstructures of Irradiated Materials. Academic Press. 173 s. ISBN 0-12-341807-0.

Toivonen et al. 1988. Säteily ja turvallisuus. Säteilyturvakeskus ja Valtion painatuskeskus. 640 s. ISBN 951-860-933-0.

TVO Oyj, Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3, esite.



Was Gary S. 2007. Fundamentals of Radiation Materials Science. Springer Berlin Heidelberg. 879 s. ISBN 978-3-540-49471-3.