

1. (a) Miten suojaudutaan termisiltä neutroneilta?
(b) Miten suojaudutaan 14 MeV:n fuusioneutroneilta?
(c) Miten suojaudutaan 10 GeV:n fotoneilta?
(d) Miten suojaudutaan 100 GeV:n hadroneilta?
2. (a) Suomen uudelle noin 1600 MWe:n ydinvoimalaitosyksikölle on asetettu työntekijöiden kollektiivisen säteilyannoksen suunnittelurajaksi normaalikäytön aikana 0,5 manSv vuodessa yhden GW:n nettosähkötehoa kohti keskiarvoistettuna laitoksen suunnitellun käyttöiän yli. Voimalaitosyksikön suunniteltu käyttöikä on 60 vuotta. Oletetaan, että työntekijöiden kollektiivinen annos pysyy juuri suunnittelurajalla. Kuinka monta työpäivää kuolemaan johtavaa syöpätapausta olisi tämän perusteella odotettavissa säteilytyöntekijöiden joukossa?
(b) Oletetaan edelleen, että a-kohdan ydinvoimalaitoksella työskentelee sen käyttöiän aikana keskimäärin 1000 työntekijää vuosittain. Laske kuinka monta kuolemaan johtavaa syöpätapausta aiheutuisi 1000 ihmisen joukossa, jotka altistuisivat 60 vuotta Suomessa esiintyville luonnon säteilylähteille keskimääräisellä tasolla.
3. ^{60}Co -nuklidia voidaan valmistaa aktivoimalla luonnon kobolttia (100 % ^{59}Co) termisessä ydinreaktorissa. Reaktion kokonaisvaikutusala $\sigma = 111 \text{ b}$ ($\text{b} = \text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Laitamme 3,3 g kobolttinäytteen reaktoriin, jonka neutronivuo $\phi = 10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2\text{s})$. Kobolttin tiheys on $8,9 \text{ g}/\text{cm}^3$ ja ^{60}Co :n puoliintumisaika on 5,27 vuotta.
(a) Mikä on näytteen saturaatioaktiivisuus?
(b) Kuinka kauan kobolttinäytettä on säteilytettävä, jotta sen aktiivisuus saadaan 10 prosenttiin saturaatioaktiivisuudesta.
4. Suunnittele kuljetuspakkaus 3,7 TBq:n ^{60}Co -lähteelle käyttäen absorbaattorina lyijyä.

Mitoitusohje: Annosnopeus pakkauksen ulkopinnalla ei saa ylittää 2 mSv/h eikä yhden metrin päässä pakkauksesta 0,1 mSv/h.

Irtotietoja: Kermanopeusvakio ^{60}Co :lle on $\Gamma_{\delta} = 308 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Gy m}^2}{\text{MBq h}}$. Lyijyn tiheys on $\rho = 11,35 \text{ g}/\text{cm}^3$. ^{60}Co lähettää hajotessaan kaksi gammaa energioiltaan 1,17 MeV ja 1,33 MeV. Lyijyn massavaimennuskerroin 1,25 MeV:n gammoille on $0,0595 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Strategia: Laske ensin tarvittava lyijypaksuus huomioimatta sekundäarifotoneita eli lyijyssä sironneita primäärigammoja, karakteristista röntgensäteilyä ja parinmuodostusta seuraavia annihilaatiogammoja. Ota sen jälkeen sekundäarifotonit huomioon käyttäen annosnopeuden lisäykertoimia [STUK-kirja 2, luku 8, taulukko 8.1 ja 8.2].

Väli- aine	Energia (MeV)	1	2	$\frac{\mu_0 R}{4}$	7	10	15	20
Vesi	0,255	3,09	7,14	23,0	72,9	166,0	456,0	982,0
	0,5	2,52	5,14	14,3	38,8	77,6	178,0	334,0
	1,0	2,13	3,71	7,68	16,2	27,1	50,4	82,2
	2,0	1,83	2,77	4,88	8,46	12,4	19,5	27,7
	3,0	1,69	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17,0
	4,0	1,58	2,17	3,34	5,13	6,94	9,97	12,9
	6,0	1,46	1,91	2,76	3,99	5,18	7,09	8,85
	8,0	1,38	1,74	2,40	3,34	4,25	5,66	6,95
	10,0	1,33	1,63	2,19	2,97	3,72	4,90	5,98
	Lyijy	0,5	1,24	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65
1,0		1,37	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86
2,0		1,39	1,76	2,51	3,66	4,84	6,87	9,00
3,0		1,34	1,68	2,43	3,75	5,30	8,44	12,3
4,0		1,27	1,56	2,25	3,61	5,44	9,80	16,3
5,1		1,21	1,46	2,08	3,44	5,55	11,7	23,6
6,0		1,18	1,40	1,97	3,34	5,69	13,8	32,7
8,0		1,14	1,30	1,74	2,89	5,07	14,1	44,6
10,0		1,11	1,23	1,58	2,52	4,34	12,5	39,2

TAULUKKO 8.1 Annosnopeuden lisäyskerroin isotrooppiselle pistemäiselle säteilylähteelle äärettömän laajassa väliaineessa (Goldstein H. Fundamental aspects of reactor shielding. Addison-Wesley, 1959)

Väli- aine	Energia (MeV)	1	2	$\frac{\mu_0 R}{4}$	7	10	15
Vesi	0,5	2,63	4,29	9,05	20,0	35,9	74,9
	1,0	2,26	3,39	6,27	11,5	18,0	30,8
	2,0	1,84	2,63	4,28	6,96	9,87	14,4
	3,0	1,69	2,31	3,57	5,51	7,48	10,8
	4,0	1,58	2,10	3,12	4,63	6,19	8,54
	6,0	1,45	1,86	2,63	3,76	4,86	6,78
	8,0	1,36	1,69	2,30	3,16	4,00	5,47
	10,0	1,33	1,63	2,19	2,97	3,72	4,90
Lyijy	0,5	1,24	1,39	1,63	1,87	2,08	
	1,0	1,38	1,68	2,18	2,80	3,40	4,20
	2,0	1,40	1,76	2,41	3,36	4,35	5,94
	3,0	1,36	1,71	2,42	3,55	4,82	7,18
	4,0	1,28	1,56	2,18	3,29	4,69	7,70
	6,0	1,19	1,40	1,87	2,97	4,69	9,53
	8,0	1,14	1,30	1,69	2,61	4,18	9,08
	10,0	1,11	1,24	1,54	2,27	3,54	7,70

TAULUKKO 8.2 Annosnopeuden lisäyskerroin yhdensuuntaiselle fotonisuihkulle äärettömän laajassa väliaineessa (Goldstein H. Fundamental aspects of reactor shielding. Addison-Wesley, 1959)

Tehtävien ideat ja ratkaisuvinkit

Edellä tehtävät ovat siinä muodossa, jossa ne voisivat esiintyä kurssin tentissä. Alla on joitakin vinkkejä tehtävien ratkaisemiseksi.

1. Tässä esimerkki tyypillisestä tentissä käytetystä selitystehtävästä. Jotta pystyy kertomaan eri säteilylajeilta suojautumisesta, täytyy ensin kertoa mitä ne ovat, mistä niitä syntyy ja miten ne käyttäytyvät väliaineessa. Tietoa löytyy STUKin kirjasta 1 luvun 1 loppupuolelta.
2. Tässä tehtävässä tärkeä suure on kollektiivinen annos (STUK-kirja 1 ja 4). Lisäksi tarvitaan tietoa säteilyannoksen ja syöpäriskin yhteydestä, kun käytetään LNT-hypoteesia. STUK-kirjasta 4 löytyy paljon tietoa terveysriskeistä, mutta ICRP:n suosittelemat riskiarviot löytyvät kirjan luvusta 11.
3. Tämä on perusmallin tehtävä ei-aktiivisen näytteen säteilyttämisestä, jolla saadaan tuotettua radioaktiivisuutta (aktivointi). Kyseessä on yleisin tapa tuottaa säteilylähteitä, joten se on hyvä ymmärtää, vaikka kampuksella ei enää olekaan reaktoria, jossa tätä voi tehdä. Aktivointi käsitellään STUK-kirjassa 1 s. 35-36, mutta tämän tehtävän laskuesimerkki valaisee vähän lisää.
4. Tässä tehtävässä oleellisena asiana on oppia, miten annosnopeuden lisäyskertoimia B_D käytetään. Tehtävä ei tässä muodossaan tulisi tenttiin, mutta yksinkertaistettua versiota on esiintynyt.

Ratkaisustrategia kerrotaan tehtävänannossa. Ensin lasketaan annosnopeuksia ilman suojauksia, sitten määritetään Pb-suojaus, jolla saadaan primääri-gammoista tuleva annos halutulle tasolle, ja lopuksi sovelletaan taulukoituja annosnopeuden lisäyskertoimia ja kasvatetaan Pb-suojaa niiden mukaisesti.

Lisätietoa löytyy STUK-kirjan 2 luvusta 8.2.