

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 normaalkäytön 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 työpäristä 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.  $^{60}\text{Co}$ -nuklidia voidaan valmistaa aktivoimalla luonnon kobolttia (100 %  $^{59}\text{Co}$ ) 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  $^{60}\text{Co}$ :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  $^{60}\text{Co}$ -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  $^{60}\text{Co}$ :lle on  $\Gamma_{\delta} = 308 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Gy m}^2}{\text{MBq h}}$ . Lyijyn tiheys on  $\rho = 11,35 \text{ g}/\text{cm}^3$ .  $^{60}\text{Co}$  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 sekundäärifotoneita eli lyijyssä sironneita primäärigammoja, karakteristista röntgensäteilyä ja parinmuodostusta seuraavia annihilaatiogammoja. Ota sen jälkeen sekundäärifotonit huomioon käyttäen annosnopeuden lisäyskertoimia [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
	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)