

加速器辐射防护



OCPA2010

王庆斌/**IHEP**

2010年8月

加速器辐射防护

- 射线与物质的相互作用
- 加速器的辐射源
- 加速器的辐射屏蔽与防护
- 加速器的辐射监测
- 加速器的非辐射危害和防护
- 加速器的安全

一 射线与物质的相互作用

□ 射线与物质的相互作用分为：

- 带电粒子与物质的相互作用；
- 不带电粒子与物质的相互作用；

□ 带电粒子可以引起物质的电离和激发

- 电离是高速带电粒子在某一壳层电子旁掠过时，由于库仑引力的作用，使电子获得能量而脱离原子核束缚成为自由电子的过程。
- 激发是获得能量的电子，从较低能级跃迁到较高能级的过程。

□ 不带电粒子可以引起物质的电离和激发

- 不带电粒子，中子和光子不能引起物质电离，但它们在物质作用时会产生次级带电粒子，进而再引起物质的电离，X射线和 γ 射线都是光子。

一 射线与物质的相互作用（续1）

□ 光子与物质的相互作用有三种机制：

- 光电效应 (photoelectric effect)：一个光子由于从原子中打出一个轨道电子而损耗掉其全部能量的过程；
- 康普顿散射 (Compton scattering)：光子在自由电子上散射，并给与自由电子以一定的动能。光电效应和康普顿散射二者之间本质上的不同，在于光电效应中光子完全消失了；而在康普顿散射中光子被保留下来，不过其能量要比入射光子的能量低。
- 电子对效应 (Pair production)：光子被核场吸收产生出一对正负电子对。

一 射线与物质的相互作用（续2）

- 中子与物质作用的对象是原子核，而不是核外电子。
- 中子与原子核作用的形式有三种：
 - 弹性散射；
 - 非弹性散射；
 - 中子俘获。
- 快中子在轻介质中主要通过弹性散射损失能量；
- 在重介质中通过非弹性散射损失能量；
- 中子俘获是中子的能量被原子核吸收后放出一个或几个光子的过程。
- 中子能量损失的过程称为中子的慢化，在轻介质材料中（如聚乙烯和石蜡）中子的慢化进程被加快，所以用聚乙烯和石蜡屏蔽中子的效果比较好。

二 加速器的辐射源

- **瞬时辐射**在加速器运行时产生，关机后即消失。瞬时辐射又包括**初级辐射**和**次级辐射**。
 - **初级辐射**指被加速的带电粒子；
 - **次级辐射**指带电粒子与靶材料或加速器结构材料相互作用产生的X射线和中子等。

- **剩余辐射**是辐射与周围物质相互作用产生的感生放射性材料放出的辐射（如 β 、 γ 等）。
 - 随加速器运行时间的增加而累积；
 - 加速器停机后仍然存在；
 - 随加速器关机时间的增长而减弱。

2.1 瞬时辐射

- **带电粒子**：电子、质子、氦、氟和其它重离子，总是定向运动的，通常被聚焦为直径约1-2毫米的一股束流射向靶区。
- **X射线**：加速的电子或离子能使阻止物质的原子中的电子从轨道上逸出，这时可以产生特征X射线，但其能量一般低于几十KeV，强度也比韧致辐射小很多。X射线是由原子核外层电子引起的辐射。
- **韧致辐射**：带电粒子（尤其是电子）通过物质时，在原子核的强电场附近突然减速或突然偏转而产生的电磁辐射。韧致辐射能谱是一个连续谱，分布范围从零到电子最大动能。

2.2 电子和光子（高能电子加速器）

- 高能电子与物质相互作用，主要通过**碰撞和辐射**这两种基本过程损失能量。
- 在低能情况下，**碰撞损失**是主要的；在高能情况下，**韧致辐射**是主要的。
- **韧致辐射**是电子同原子核发生非弹性碰撞引起的。电子撞击原子核导致电子减速和能量损失，因而引起放射性的发射。
- 随着穿入介质层深度的增加，粒子即次级正负电子和光子总数将剧烈增加。在电子-光子发展过程中，粒子总数增加而其平均能量降低。当级联到达介质一定深度时，正负电子和光子总数达到极大值。然后电子、光子能量进一步降低而使整个过程停止。**整个过程就象是光子、电子和正电子的瀑布**，因此被叫做**电磁簇射** (electromagnetic shower or electromagnetic cascade)

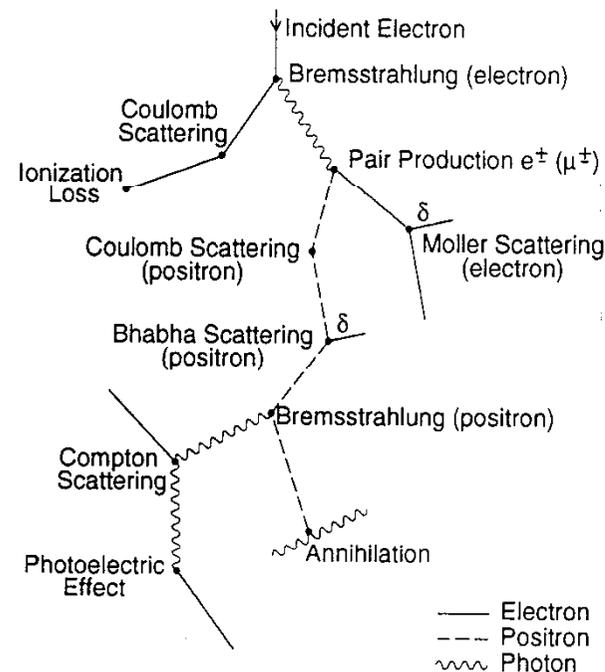


图 一个电子打靶引起的电磁簇射的简图

电子和光子（续）

- 初级电子必须具有足够高的能量，才能产生电磁簇射。这一能量我们称之为临界能量。在这一能量点上，由辐射引起的平均能量损失等于由于电离引起的平均能量损失。

→ 临界能量：
$$E_c(\text{MeV}) = \frac{800}{(Z+1.2)}$$

→ Z是靶材料的原子序数。

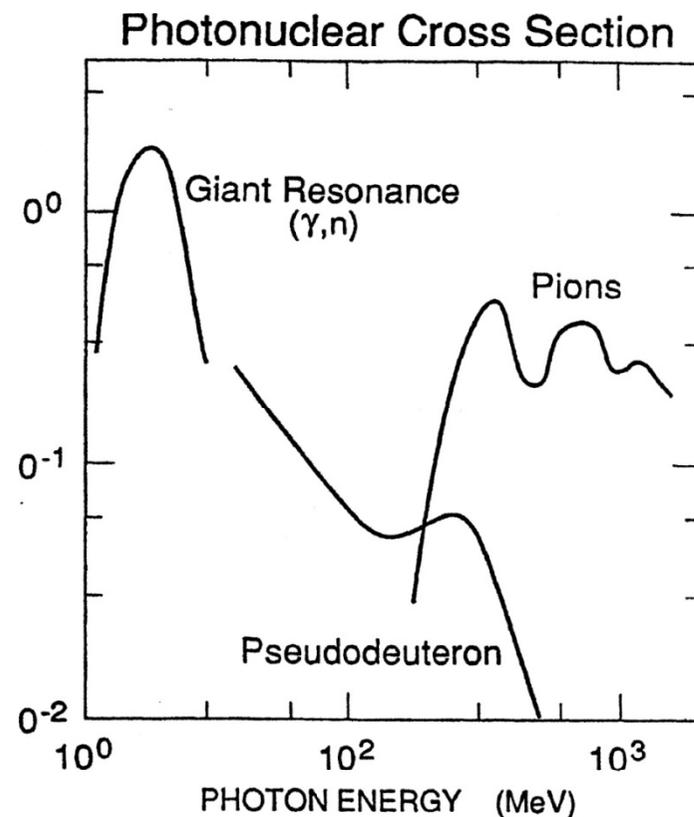
- 在电磁簇射中产生的光子能量是一个连续谱，最高能量为初级粒子能量。对于一个薄靶，光子能量的谱分布为 $\mathbf{1/E^2}$ ，对于一个厚靶，光子能量的谱分布为 $\mathbf{1/E}$ （E是光子能量）。

- 对于给定的靶物质，粒子经过一定的厚度，由于产生韧致辐射，平均电子能量减少到它最初能量的 $\mathbf{1/e}$ 。我们将这一长度叫做给定物质的辐射长度 $\mathbf{X_0}$ （通常以 $\mathbf{g/cm^2}$ 作单位）

→ 在**高能**范围内：
$$X_0(\text{g/cm}^2) = 716A \frac{Z(Z+1)}{\ln\left(\frac{183}{\sqrt[3]{Z}}\right)}$$

2.3 中子（电子加速器产生的中子）

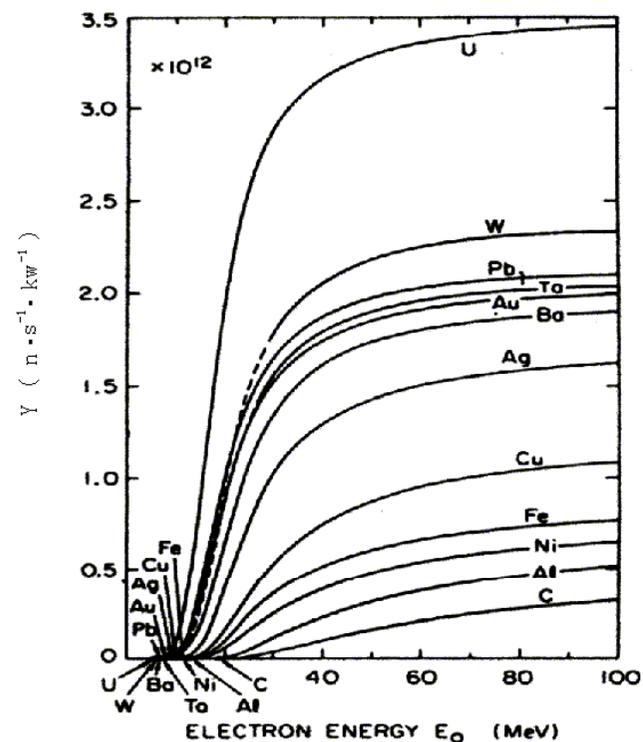
- 电子加速器产生的中子大多是由两个过程引起的。
- 光子能量低于30MeV时，光致蜕变在所谓“巨共振”区域内占主导地位。其最大生成截面约为1~2mb/n。巨共振中子的能量大约为几个MeV。
- 大约在30MeV和100MeV能量之间，原子核内部的核子对（准氘核）的光致蜕变是重要的中子来源。
- 当光子能量大于产生 π 介子的阈能时，有高能中子产生。产生 π 介子的阈能大约为150MeV。
- 电子或轫致辐射与任何物质相互作用产生中子的起始能量，对于轻核大约为10~19MeV，对于重核为4~6MeV。



中子的产生截面和光子能量的关系

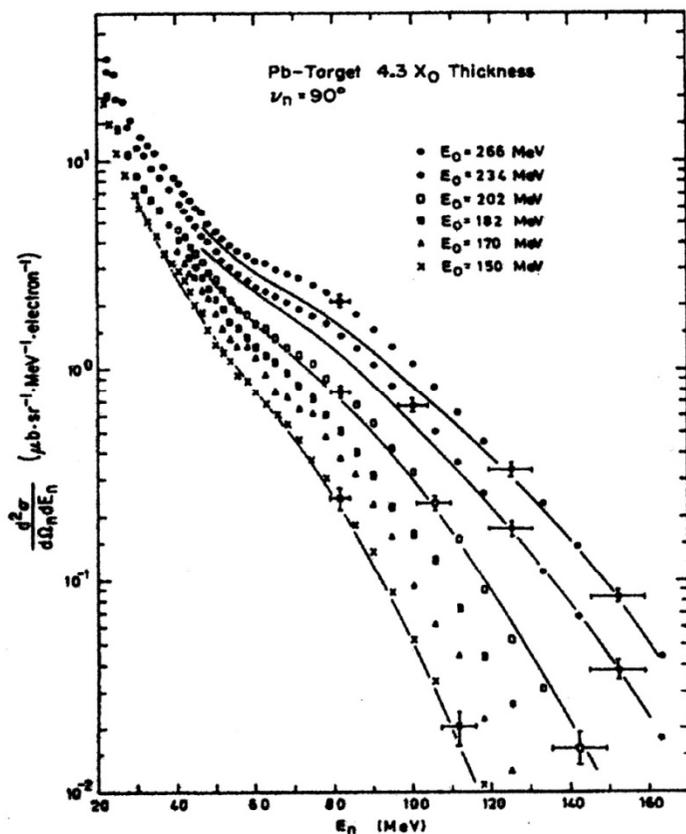
中子（续1）

- 右图给出了单位束流功率下，伪氙核中子的产额与电子初始能量的关系。当光子能量大于30MeV时，发生伪氙核反应，产生伪氙核中子。它不考虑靶的自吸收。
- 从图中可以看出，单位束流功率的伪氙核中子产额基本上是个常数，在能量更高的情况下，进行外推，也不会产生多大的误差。

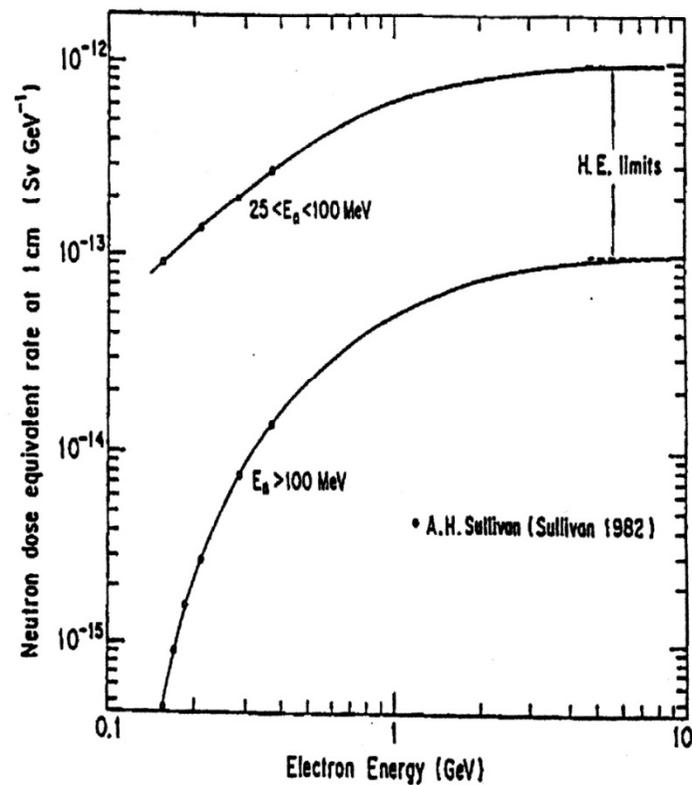


中子的产额与电子能量的关系

中子 (续2)



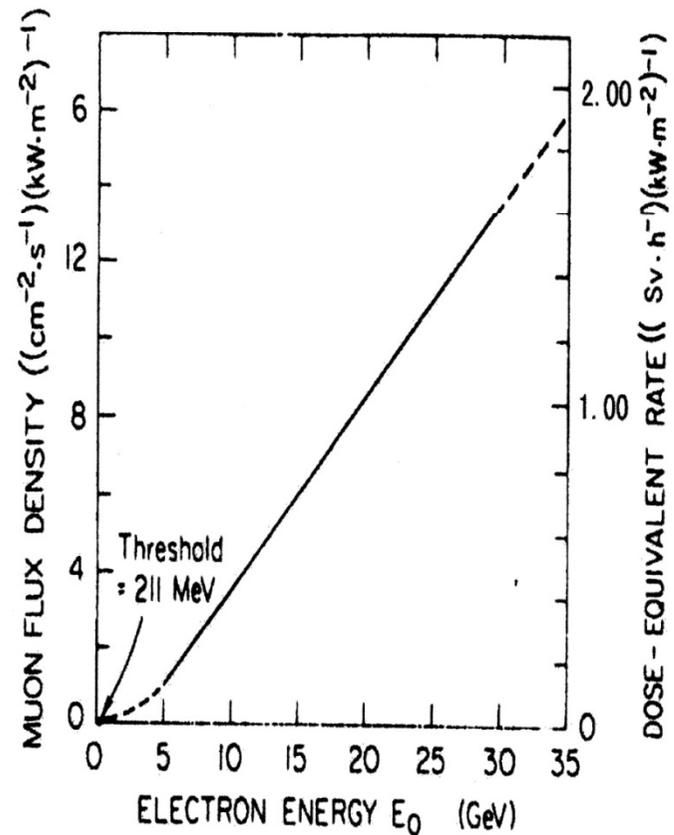
高能电子打厚铅靶时的中子谱



高能电子打厚铜靶时中子的剂量贡献

2.4 μ 子

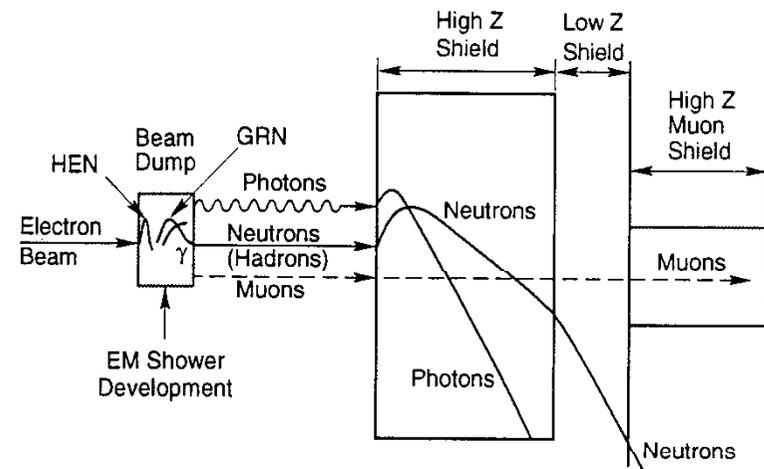
- 当电子能量大于211 MeV时，在靶核库仑场作用下，会产生 $\mu^+ - \mu^-$ 对，其过程类似于正负电子对的形成。
- 右图表示单位束流功率电子束轰击铁靶时，在束流方向，距靶1 m处产生的 μ 子注量。 μ 子绝大部分集中在束流前进方向，对于几米厚的屏蔽体之外，它大约分布在直径仅为10-20 cm的范围内。



μ 子产生的剂量贡献

2.5 典型高能电子加速器的屏蔽

- 图中给出了一个典型高能电子加速器的屏蔽。
- 高原子序数材料不能有效衰减中子，但是可以通过非弹性散射降低中子的能量。
- 使用含氢的低原子序数材料能更有效地屏蔽中子。
- 混凝土对光子的 λ_{\min} 为 $42\text{g}/\text{cm}^2$ ，对巨共振中子 (GRN) 衰减长度为 $30\text{g}/\text{cm}^2$ 。
- 30cm厚的混凝土可以有效地衰减5倍光子剂量率和10倍中子剂量率。因此一个储存环的屏蔽墙通常用混凝土制成。



典型高能电子加速器屏蔽

2.6 加速器的感生放射性（剩余辐射）

- 感生放射性多数是由中子引起的；
- 感生放射性的种类取决于加速粒子的种类、能量、束流强度、靶材料的性质、以及运行时间长短等多种因素；
- 从核反应的阈能来看，能够直接产生感生放射性核素的被加速带电粒子能量多数需要在5-10MeV以上(氘的阈值2.23 Mev，铍的阈值为1.67 Mev)，随着射线照相和辐射加工事业的发展，能量超过10 MeV的加速器不断增加。
- 较大型的研究装置，常常需要进行加速器部件的维修和维护，以及设备的升级等因素，因此感生放射性是工作人员受射线照射的主要原因。

三 加速器的辐射屏蔽和防护

3.1 屏蔽计算方法简介

- 所有的屏蔽计算通过三种途径解决
 - 实地测量
 - 数值求解Boltzmann方程
 - 蒙特卡罗模拟计算 (Monte-Carlo)

- 实地测量可以获得准确可靠的第一手数据，通过这些数据，总结出经验公式，发展为唯象学 (phenomenon) 模型，即通过实验测量，确定粒子迁移 Boltzmann 方程系数。在特定条件下，变系数方程变为长系数方程，进行求解。唯象学模型广泛应用于屏蔽设计中。缺点是对几何结构和辐射源复杂、屏蔽材料多样的情况，唯象模型计算误差很大。随着计算机技术的发展，将蒙特卡罗方法编入计算机程序来模拟粒子输运过程的辐射剂量，从而达到优化设计屏蔽的目的。

3.1 屏蔽计算方法简介

经验公式计算

出发点一点核模型方程:

$$H(E_p, \theta, d/\lambda) = r^{-2} H_0(E_p, \theta) e^{-d/\lambda} \quad (3.9)$$

$H(E_p, \theta, d/\lambda)$: 当入射质子能量为 E_p 时, 与束流方向成 θ 角的屏蔽深度为 d 处的剂量当量;

$H_0(E_p, \theta)$: 参数, 当入射质子能量为 E_p 时, 可以外推到屏蔽深度为 0 时的距点源为单位长度, 与束流方向成 θ 角的剂量当量;

r : 源到屏蔽点的距离;

λ : 剂量当量在屏蔽层中的有效衰减长度。

3.1 屏蔽计算方法简介

经验公式的计算特点

- **计算相对简单**：不需要大型计算机来算，甚至手工也可以计算。
- **辐射实际应用**：对简单的屏蔽（主体屏蔽）非常有用，计算准确。特别是经过蒙特卡罗模拟计算的经验公式，实际应用更为广范。
- **使用条件严格**：有一定的限制条件。如粒子种类、入射角度、能量范围等限制。
- 常用经验公式有：
 - 电子加速器：Jenkins, Sakano, shield11
 - 同步辐射：Photon, Stac8
 - 质子加速器：Moyer, Tesch

3.1 屏蔽计算方法简介（续2）

蒙特卡罗模拟计算（Monte-Carlo）的优点

- **直观性**：可以直接给出剂量分布图和能谱及剂量谱曲线
- **准确性**：物理模型正确，粒子数目足够多，可以得到想要的精度
- **范围广**：模拟的粒子种类多，能量大
- 主要程序有：
 - **EGS** **Electron Gamma Shower**
 - **MORSE** **Multi group Oak Ridge Stochastic Experiment Code**
 - **PHOTON** **Photon Code**
 - **MCNP** **Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code**
 - **FLUCK、HELIC、CASTM、LAHET、TOMAT、GEANT**等

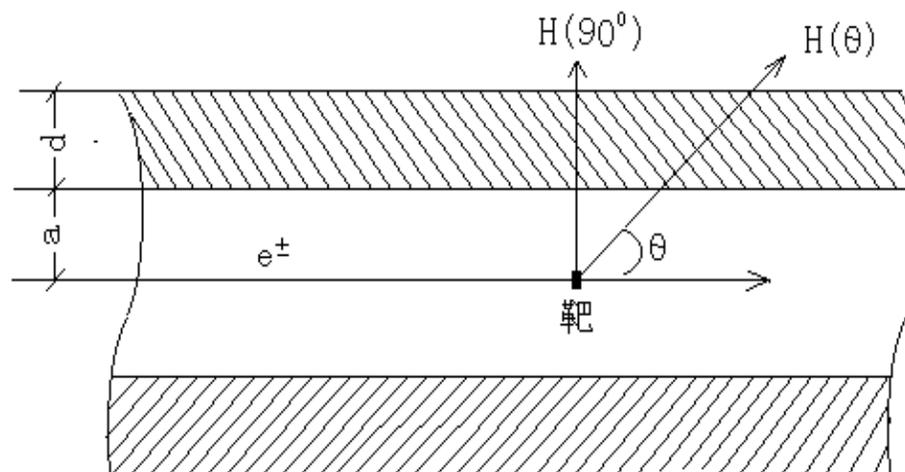
3.1 屏蔽计算方法简介（续3）

蒙特卡罗模拟计算（Monte-Carlo）的缺点

- **收敛速度慢**：单纯以增加抽样粒子个数来减小误差计算量很大，对维数少于三维的问题，用其他方法好；
- **误差具有概率性**：不是一般意义上的误差；
- **计算结果与系统大小有关**：一般在十个自由程左右，蒙特卡罗方法计算较为满意，而对于大系统或小概率问题，计算结果往往比真值低。

3.2 辐射屏蔽计算举例

- 加速器主体屏蔽计算模型
- 以高能电子加速器为例



θ : 靶与屏蔽体外剂量点连线与束流之间夹角 (度)

a : 靶到屏蔽体内表面的距离 (cm)

d : 屏蔽体厚度 (cm)

3.2 辐射屏蔽计算举例（续1）

在加速器屏蔽体外部，采用Jenkins公式计算由单个电子打靶产生的中子剂量当量 H_n ，用下式计算：

$$H_n = 10^{-13} E_0 \left(\frac{\sin \theta}{a+d} \right)^2 \times \left[\frac{13.7 \exp\left(-\frac{\rho d}{\lambda_1 \sin \theta}\right)}{A^{0.65} (1-0.72 \cos \theta)^2} + \frac{4.43 \exp\left(-\frac{\rho d}{\lambda_3 \sin \theta}\right)}{A^{0.37} (1-0.75 \cos \theta)} + 4.94 z^{0.66} \exp\left(-\frac{\rho d}{\lambda_2 \sin \theta}\right) \right] (\text{Sv/e})$$

式中： E_0 ：入射电子的能量（GeV）
 θ ：靶与屏蔽体外剂量点连线与束流之间夹角（度）
 a ：靶到屏蔽体内表面的距离（cm）
 d ：屏蔽体厚度（cm）

使用条件：用于 θ 在 $20^\circ \sim 160^\circ$ 之间

3.2 辐射屏蔽计算举例（续2）

在加速器屏蔽体外部，采用Jenkins公式计算由单个电子打靶产生的光子剂量当量 H_γ ，用下式计算：

$$H_\gamma = 10^{-13} E_0 \left(\frac{\sin \theta}{a+d} \right)^2 \times \left[\frac{133 \exp\left(-\frac{\mu \cdot \rho d}{\rho \sin \theta}\right)}{(1-0.98 \cos \theta)^2} + 0.267 \exp\left(-\frac{\rho d}{\lambda_1 \sin \theta}\right) \right] (Sv/e)$$

其中： μ ：屏蔽材料对光子的衰减系数（ cm^{-1} ）， $\mu=0.056\text{cm}^{-1}$ (混凝土)

ρ ：屏蔽材料的密度（ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ）

λ_1 ：屏蔽材料对高能中子的吸收长度（ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）， $\lambda_1=120\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$ (混凝土)

λ_2 ：屏蔽材料对中能中子的吸收长度（ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）， $\lambda_2=55\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$ (混凝土)

λ_3 ：屏蔽材料对低能中子的吸收长度（ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）， $\lambda_3=30\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$ (混凝土)

使用条件：用于 θ 在 $20^\circ \sim 160^\circ$ 之间

3.2 辐射屏蔽计算举例（续3）

- **Jenkins**公式一般适用于 θ 在 $20^\circ \sim 160^\circ$ 之间。
- 对于束流下游（即 $\theta \sim 0^\circ$ ）方向屏蔽墙，则利用Sakano公式计算。

$$H(d, D, \omega) = H_0 \exp[-0.19 \times (\omega - 1.0)] \\ \times D^{-2} \times \left(\frac{E_e}{100}\right) \exp(-\mu_{att} \rho d) \text{ (Sv per electron at 1m)}$$

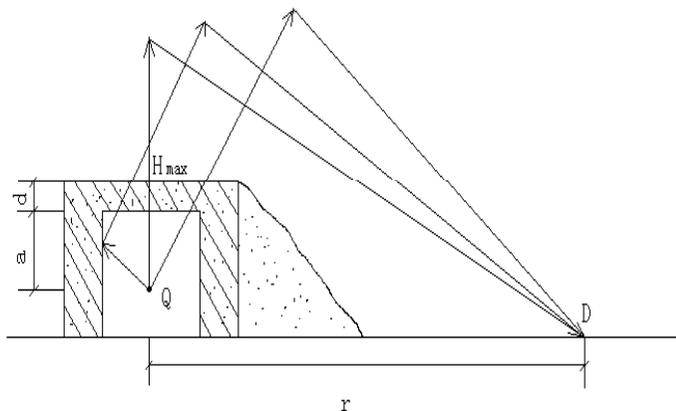
$$H_0 = 1.0 \times 10^{-12} \quad (E_e > 200 \text{ MeV}) \\ = 4.0 \times 10^{-13} \quad (E_e \leq 200 \text{ MeV}) \\ \text{(Sv per electron)}$$

- **D**: distance from the target to the surface of shield(m),
- ω : path length in the target,
- **t**: target thickness (cm),
- Φ : angle between the target surface and the electron beam,
- μ_{att} : attenuation coefficient in cm^2g^{-1}

3.2 辐射屏蔽计算举例（续4）

天空反散射剂量

- 加速器产生的辐射源通过屋顶泄露，再经过大气的反散射返回至加速器周围的地面附近，有时会形成较强的辐射场，这种现象称为天空反散射。



天空反散射的计算模型

中子剂量：

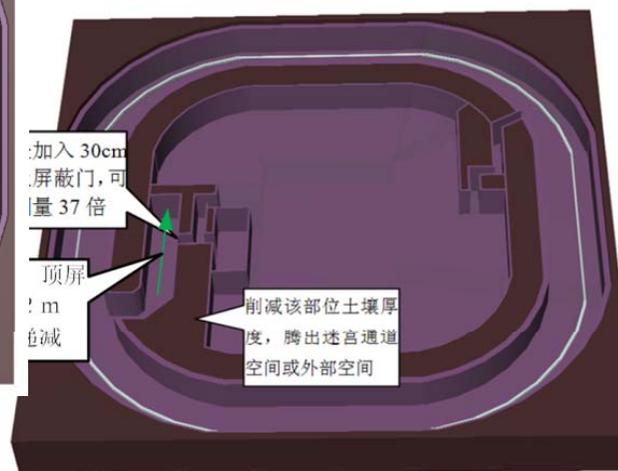
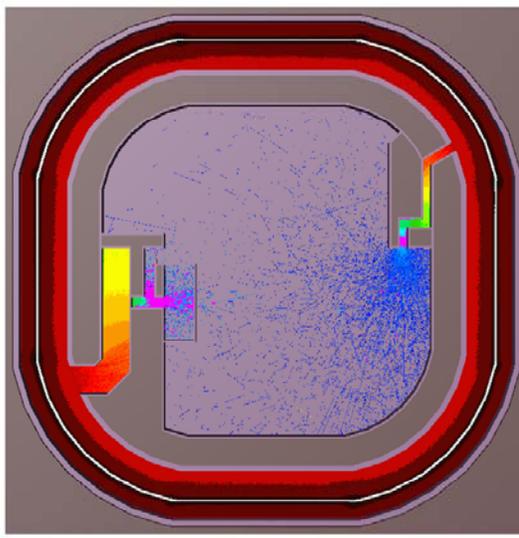
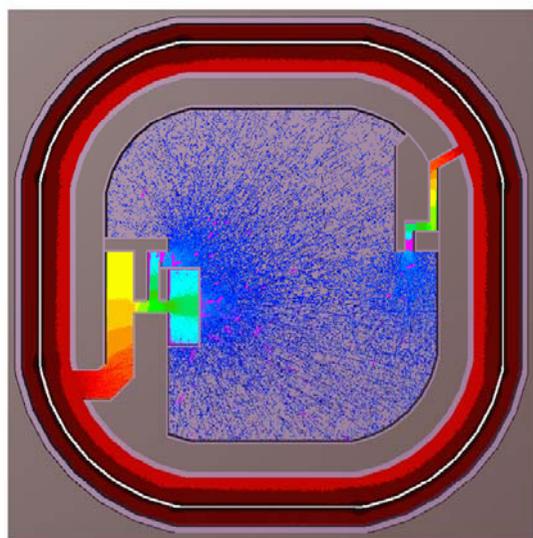
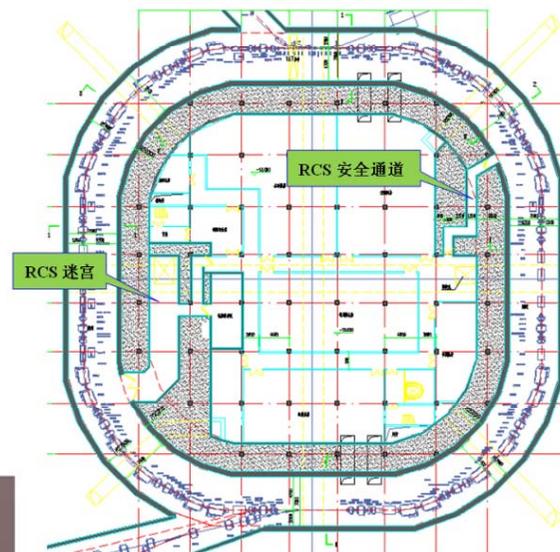
$$D(n) = \frac{B_n}{16} H_{\max}(n) h \cdot \left(\frac{a+d}{r}\right)^2 \exp\left(-\frac{r}{\lambda_n}\right) (\mu S v / a)$$

光子剂量：

$$D(\gamma) = B_\gamma \left(\frac{a+d}{r}\right)^2 H_{\max}(\gamma) \cdot h \exp\left[-\frac{r-(a+d)}{\lambda_\gamma}\right] (\mu S v / a)$$

CSNS迷宫和安全通道的结构设计

按照不同能量、**1W/m**均匀束损模式，依据**2.5 μ Sv/h**的迷宫入口剂量限值和基建要求进行结构屏蔽设计。



CSNS-beam dump: 中子和光子剂量图（球形切片几何模型）

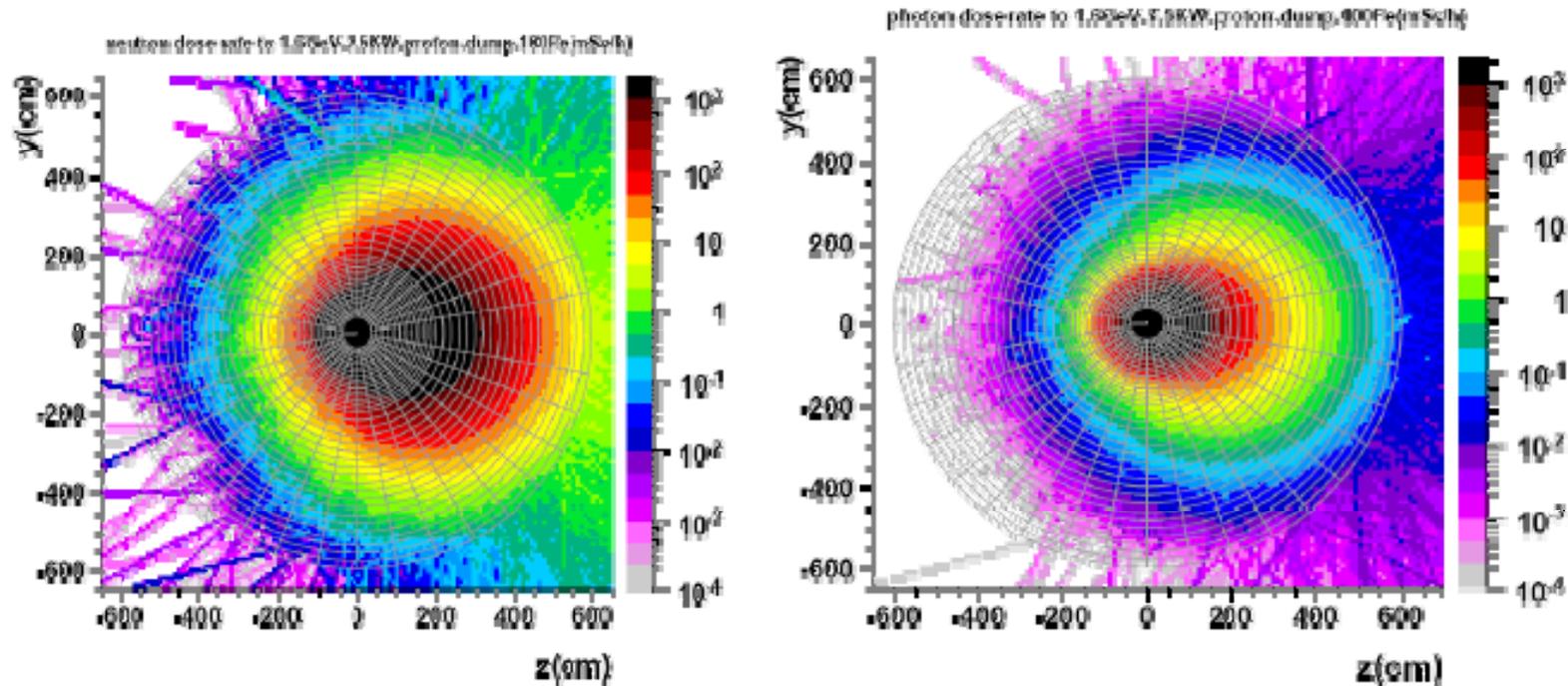
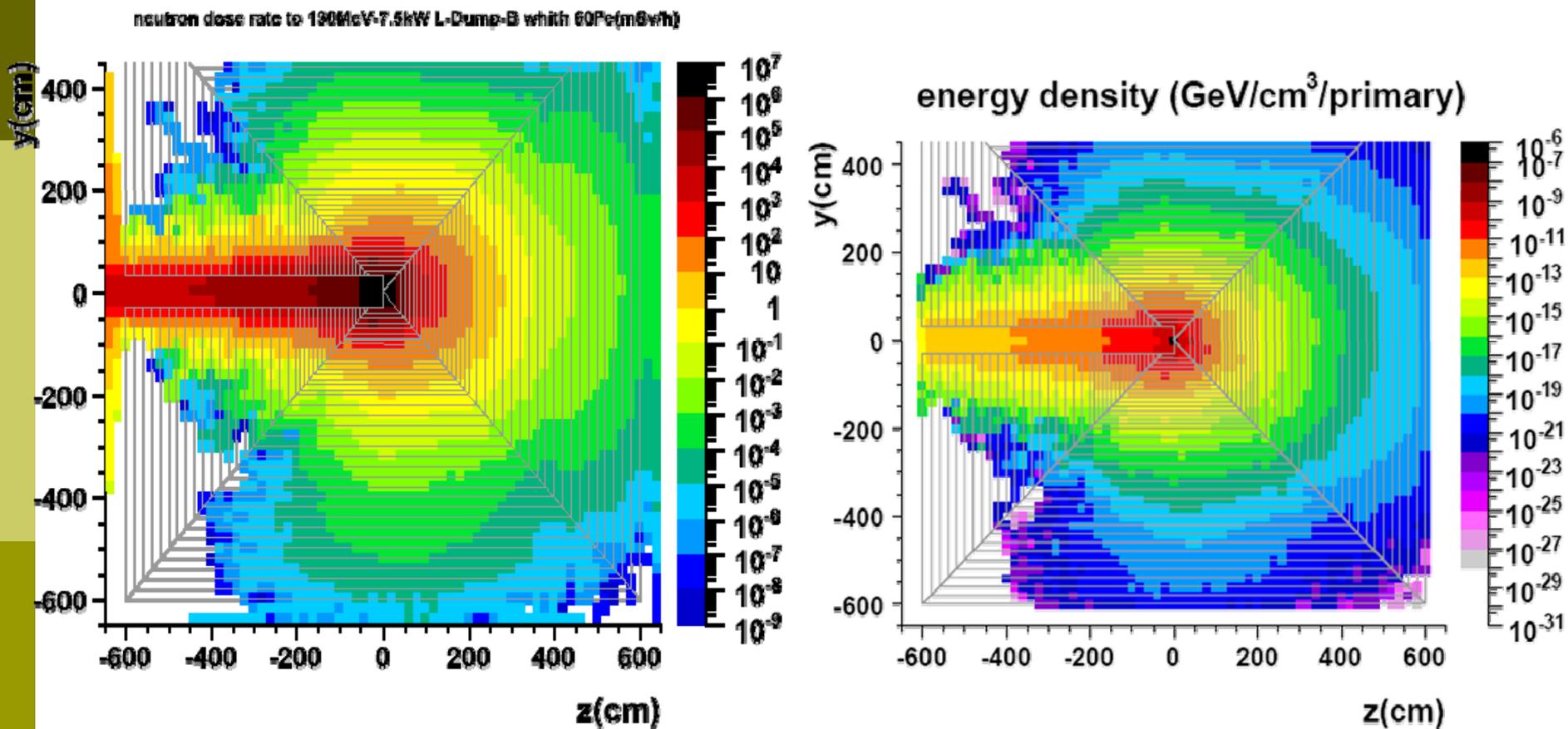


图 4.8 铁厚 100cm 时 1.6GeV-7.5KW 的 beam dump 的球形切片几何模型里的中子和光子剂量分布图（由图可以看出，光子剂量约为中子的 1/50，且比中子更具前向性）

CSNS-beam dump: 中子和光子剂量图（梯形切片几何模型）



铁厚 60cm时130MeV-7.5kW 的 L-Dump-B的中子剂量和能量沉积

3.3 孔道、迷道、防护门—孔道

- 加速器的通风管道、水管、电缆管道、辐照材料的传输管道等可能穿越屏蔽墙，所以加速器屏蔽设计时必须考虑这部分的剂量贡献。因此，这些管道设计的取向应尽可能避开束流方向或辐射发射率峰值的方向。为了防止辐射经管道的泄露，管道应取“S”形或“U”形，在地沟的入口或出口应有一定厚度的屏蔽盖板。
- 填塞孔洞时，混凝土块之间的垂直缝隙最好都用灰浆填充。也可以用砂袋作防护体，砂袋防护体既克服了防护体形状不规则的问题，又给维修、改造等工作提供了极大的方便和灵活性。

3.3 孔道、迷道、防护门—迷道

- 迷道（迷宫）是供人员进出加速器隧道及搬运小型仪器使用。
- 迷道（迷宫）的设计与建筑物的布局有关，但迷道（迷宫）口位置应尽可能避开来自靶上的直接辐射，或应避开辐射发射率峰值的方向。迷道（迷宫）一般都拐几个弯，并且在满足使用的条件下，迷道（迷宫）的截面应尽可能小一些，有时为了节省建筑费用或空间，或者为了补偿由于通道造成的屏蔽墙效果的降低，在迷道（迷宫）口还可以设置附加屏蔽。辐射经过迷道的泄漏主要是中子。每处迷道（迷宫）皆采用三阶结构。实际上，当中子经过二阶迷道的衰减后，剂量即降到工作人员允许水平。

3.3 孔道、迷道、防护门—防护门

- 在加速器隧道出入口处为了防止辐射泄露一般应采用防护门。防护门的厚度应与相邻的屏蔽墙具有同等的屏蔽效果。门和墙之间还需要有足够的搭接，以减小散射辐射的泄漏，通常门的两侧和顶部，门和墙的搭接至少为缝隙的10倍。为了减小通过门底部的辐射反射，还应采用其他密闭缝隙的方法。常用的防护门有水门、混凝土门、铁门，或铁板与铅板的组合门。
- 防护门的材料应根据辐射粒子的不同使用不同的材料。例如对一般中子屏蔽的防护门就可以采用15 cm的石蜡和2 cm的铅复合组成。

3.4 加速器的感生放射性及其防护

- **产生的机理**：由于电子与介质作用产生韧致辐射，生成的高能光子（一般要大于10 MeV）与介质产生光核反应，光核反应产生的中子、介子又会引发核反应，于是在加速器的部件上产生了感生放射性。
- **产生条件**：电子或光子能量要大于10MeV。
- **感生放射性特点**：
 - 随时间的增加剂量逐渐减小，一般按指数规律变化，开始减少的快，经过一定时间后，剂量缓慢减少。
 - 加速器束流损失大的地方，感生放射性大。如BEPC中，正电子靶、束流分岔口、正负电子注入点、同步光引出处等。

3.4 加速器的感生放射性及其防护（续1）

产生感生放射性的放射性核素

在不同类型的加速器上，感生放射性产生的机理、生成的放射性核素类型、放射性强度和停机后衰变的速度，都会有很大的不同。

加速器设备（特别是加速器管）材料中主要元素有：铝、不锈钢和铜。铝、不锈钢和铜由于 (γ, n) 反应生成的子体核素都是缺中子核素，它们的特点是多为正电子衰变，而且寿命很短，很容易达到饱和值，所以在加速器刚停机时它们的影响最大。

^{25}Al	7.24	s	^{56}Ni	6.10	d
^{26}Al	7.4×10^5	a	^{57}Ni	36.0	h
^{52}Fe	8.2	h	^{57}Co	270	d
^{53}Fe	8.51	min	^{62}Cu	9.76	min
^{55}Fe	2.60	a	^{64}Cu	12.80	h

不同质子能量对316L不锈钢和Cu靶的活化分析

- 80MeV、200MeV、500MeV、1GeV、1.6GeV这几种能量的质子以1nA/m的束损流强，分别打铜靶和316L不锈钢靶时对靶造成的活化剂量，结果表明316L不锈钢活化程度比Cu高出1~2倍。

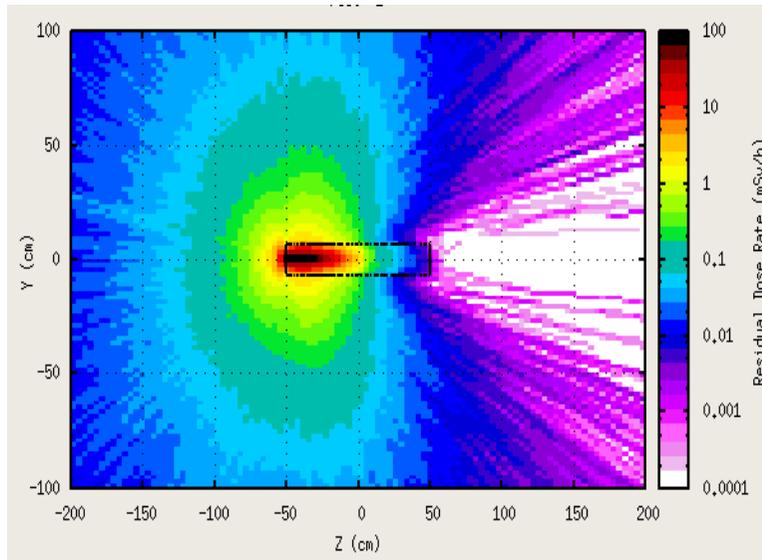
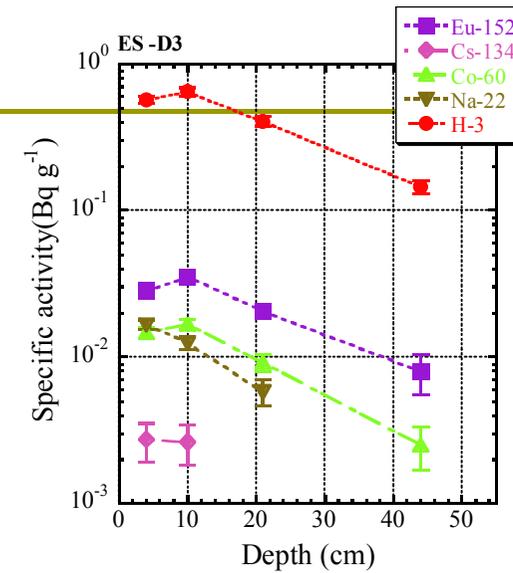
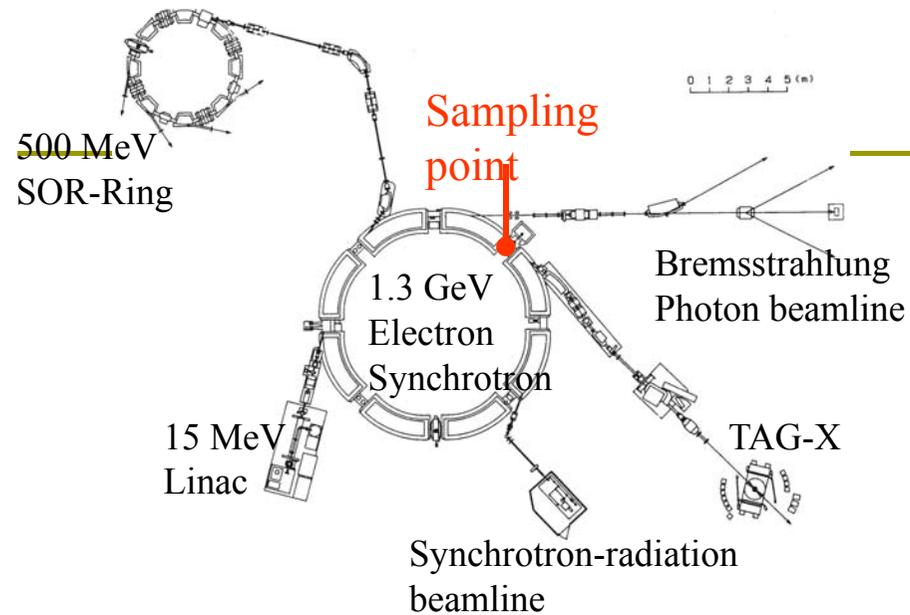


Fig.1GeV质子打铜靶，运行10年、停机4小时后的辐射场(mSv/h)

Tab.运行10year、停机4小时后，距靶30cm处的最大剂量率(mSv/h)

Proton Energy(MeV)	Maximum Dose Rate(mSv/h)	
	Cu	316L steel
80	0.036	0.11
200	0.091	0.21
500	0.17	0.40
1000	0.36	0.80
1600	0.54	1.16



Depth profiles of specific activities of ³H, ¹⁵²Eu and ⁶⁰Co induced in the shielding concrete of ES-Synchrotron

1.3 GeV Electron Synchrotron

Tanashi Branch, High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

Operation Duration: 1963~1998

Shut down: June 1999

Accelerated Particle: Electrons(1.3GeV, 0.4μA)

3.4 加速器的感生放射性及其防护（续2）

感生放射性大小的计算

活化核的放射性活度 A (Bq) 为:

$$A = N\lambda_R = wfy \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_R t_v}}{1 - e^{-\lambda_R T}} (1 - e^{-\lambda_R t})$$

式中:

N 活化核数目

w 电子束流的功率损失 (W)

f 电子能量转换成韧致辐射并被活化物质吸收的份额, 取 $f = 0.5$

y 活化核的产额

λ_R 活化核的衰变常数(s^{-1})

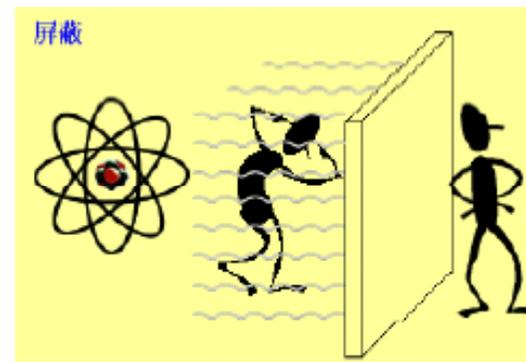
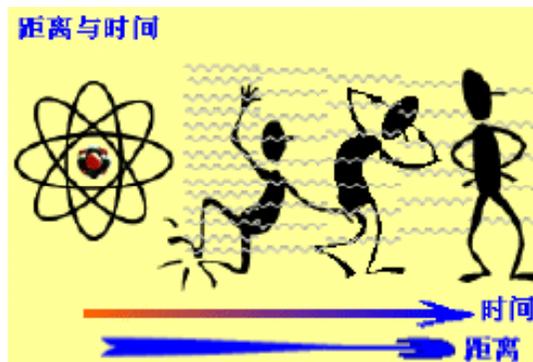
3.4 加速器的感生放射性及其防护（续3）

- 对在屏蔽良好的高能电子加速器周围工作的人员来说，感生放射性是一种不可避免的辐射源，大部分外照射剂量来源于此。
- 加速器运行期间，由于有足够的结构屏蔽，由部件产生的感生放射性不会危害在屏蔽体外的工作人员。但是停机之后，工作人员为了换靶，调节实验装置或检修加速器而进入内部时，则可能受到辐射危害。通常，在停机后感生放射性衰变得很快，在短时间内可减弱到初始值的一半，其后则缓慢衰变。所以，感生放射性的有效防护措施之一是等其衰变，在检修感生放射性较强的部件之前，应该等这些部件的放射性衰变到适当的水平后再检修。

3.4 加速器的感生放射性及其防护（续4）

□ 缩短时间、增加距离及设置屏蔽是减少外来辐射照射的基本辐射防护措施

- **时间**：受到辐射照射的时间越短，身体所受的剂量越少。
- **距离**：距离辐射源越远，所受剂量越少。
- **屏蔽**：铅板、混凝土墙或水等都可以阻挡辐射或降低辐射强度。



基本辐射防护措施

3.5.1 空气活化气载放射性产生的条件

- 加速器运行时次级辐射与空气相互作用，会产生感生放射性气体；
- 开放真空系统时，被吸附在管道内的某些放射性物质（如氙）通过解吸可能进入大气；
- 由于粉状靶的破裂或感生放射性材料的表层剥落等形成的放射性微粒或尘埃会使空气污染。

3.5.2 空气活化气载放射性核素

- 高能电子直线加速器引起空气的活化，主要来自高能韧致辐射的 (γ , n) 反应。在空气中的主要活化反应有：N-14 (γ , n) N-13, O-16 (γ , n) O-15, 以及N和O的光裂反应产生 ^{11}C 等。

放射性核素	半衰期	母体核素	平均截面(mb)
^7Be	53.3d	^{14}N	2.9
		^{16}O	2.5
^{11}C	20.4 Min	^{14}N	16
		^{16}O	8.2
^{13}N	9.96 Min	^{14}N	17
		^{16}O	3.4
^{15}O	2.03Min	^{16}O	3.4
^{41}Ar	1.83h	^{40}Ar	660

3.5.3 活化区域内的放射性总活度计算

$$A = \frac{2.6 \times 10^5 W (1 - e^{-x/385})}{1.16 \times 10^{-3} + F / 3V}$$

W—电子束功率损失率 (W)

X—韧致辐射在空气中的路程 (m)

F—活化区域的通风速率 (m³/s)

V—活化区域的空气体积 (m³)

3.5.4 空气活化气载放射性防护

- 为了控制气载放射性，需要设置通风系统。
- 通风系统的排风口应安装在建筑物外面，并远离进气口，以防止排出气体的返流污染。
- 通风设计应保证存在气载放射性区域的空气压力略低于周围其它区域的压力，以避免有害气体扩散到其它区域。
- 排风速率的设计取决于加速器的用途、气载放射性的水平，一般要求每小时换气3-5次。比较好的方法是设计几种排风速率，以便在强束流运行情况下或在人员进入这些区域前可以使用高排风速率。
- 在有可能产生较强的气载放射性时，加速器运行期间最好不要排放气体，停机后让其自然衰变一段时间再排放，这样就大大减少了放射性气体的总排放量。另外，为了减少放射性微尘的产生，进气时应先对气体进行过滤。
- 排气出口要高于附近最高建筑物5米。

3.6 冷却循环水的感生放射性的防护

- **循环水线路设计要求**：在加速器运行期间，循环水系统的某一部分可能使附近的操作人员受到照射。因此，循环水系统要尽量避开可能使工作人员受到照射的地方，或者置于屏蔽区域内。
- **循环水监测与屏蔽**：正常运行期间被活化的水对人体的危害并不重要，但是在停机后检修循环水系统时，残余放射性可能对人体造成危害。因此，应该对进入这些区域的人员进行辐射监测。必要时，可以在循环泵、热交换器和贮水箱的周围采取屏蔽措施，并放置剂量监测设备进行监测。

3.7 速调管产生的X射线

- 电子直线加速器或电子同步加速器，由速调管提供微波功率。速调管工作时脉冲电压和峰值电流一般都很高。因此，可能产生很强的X射线。
- 下式给出速调管X射线照射量率的近似估算方法：

$$X = \frac{24 \times 10^{-9} Vp}{D^2}$$

V — 速调管电压，V；

p — 速调管的平均功率，W；

D — 速调管的收集极和观察点之间的距离，m。

速调管产生的X射线能量不高，可以用铅进行屏蔽。特别指出的是，大功率速调管应安装在结构屏蔽室中。

四 加速器的辐射监测

□ 加速器辐射场的特点:

每台加速器所产生的辐射种类及其能量范围都有自己的特点，应根据具体情况选择合适的监测装置或仪器、仪表和剂量计，因为所有仪表都限于测量在一定能量范围内的某种辐射，因此，为了合理使用一种仪器或剂量计，就必须知道它的性能和局限性。

4.1 加速器辐射场的特点

- **混合辐射场**：除了能量低于10MeV的电子直线加速器外，其他加速器的次级辐射场是 γ 射线和中子的混合场。因此，当探测一种射线时，必须考虑仪器对另一种射线的**甄别能力**。
- **辐射水平量程宽**：由于加速器设施内外不同区域的辐射水平可能相差几个数量级，因此所选择的仪器要有足够宽的测量范围。
- **脉冲辐射场**：当加速器以脉冲形式加速粒子时，伴随的辐射场也是脉冲式的。
- **高频电磁场的干扰**：在有较强高频电磁场的加速器辐射场中，辐射探测仪器会受到电磁场的干扰，使其读数不可靠，甚至失效。因此，探头和电子仪器线路要采用**防电磁干扰的屏蔽措施**及很好的接地措施。使用不受电磁干扰的其它监测方法。

4.2 加速器辐射监测内容（项目）

- 环境本底低调查监测
- 工作人员个人剂量监测
- 周围环境辐射监测
- 工作场所辐射监测
- 水、气、流出物放射性辐射监测
- 维修工作中，工作人员工作场所监护监测
- 活化部件感生放射性活度与剂量监测
- 窒息气体、有毒及有害气体监测

4.3 测量仪器要求

- **抗强电磁场干扰**：在有较强高频电磁场的加速器辐射场中，辐射探测仪器会受到电磁场的干扰，导致仪器的读数不可靠，甚至失效。因此，探头和电子仪器线路要有防电磁干扰的屏蔽措施及良好的接地措施。也可以采用不受电磁干扰的其它方法进行监测。
- **甄别粒子能力**：除了能量低于10MeV的电子直线加速器外，其它加速器的次级辐射场是 γ 射线和中子的混合场。因此，当探测一种射线时，必须考虑仪器对另一种射线的甄别能力。
- **测量范围宽**：由于加速器设施内外不同区域的辐射水平可能相差几个数量级，因此所选择的仪器要有足够宽的测量范围。在很多情况下，一种型号的仪器不可能具有这样宽的测量范围，因此，一台加速器应该同时配备低辐射水平和高辐射水平的测量仪器。
- **宽能区**：由于加速器，特别是高能粒子加速器，中子、 γ 辐射的能量范围，如中子能量可从0.025eV变化到几个GeV，跨越10个量级以上，要求中子监测器能量响应范围宽。

4.3 测量仪器要求（续）

- **适合于脉冲辐射场**：加速器以脉冲形式加速粒子时，伴随的辐射场也是脉冲式的。脉冲辐射场的测量问题比较复杂，许多种类的测量仪器与加速器提供脉冲束流时间的占空比有关，有时它们不能精确地指示脉冲辐射源按时间平均的剂量率，甚至完全失效。特别是脉冲计数型的仪器，因它的死时间可能有几微秒（G-M计数管甚至更长），受占空比的影响更大。电离室型仪器受占空比的影响比较小。但是在占空比较小小时，可能出现离子复合。在可能的情况下，电离室应在足够高的电压下工作，以克服复合现象，否则，就要用理论方法或者在其工作的脉冲场内进行校准。抗强电磁场干扰：在有较强高频电磁场的加速器辐射场中，辐射探测仪器会受到电磁场的干扰，导致仪器的读数不可靠，甚至失效。因此，探头和电子仪器线路要有防电磁干扰的屏蔽措施及良好的接地措施。也可以采用不受电磁干扰的其它方法进行监测。

4.4 个人剂量监测

- 在加速器上工作的运行人员、实验人员和检修人员，都应佩带相应的个人剂量计，例如，袖珍式剂量计、胶片佩章、热释光剂量计、荧光玻璃剂量计等。在进行强感生放射性部件检修时，还应该佩带局部剂量计或电子式个人剂量报警仪。
- 在常规监测中，每月或每季度对人员剂量计读数一次。在事故情况下，应模拟事故的真实情况及时确定出个人剂量。对受到事先计划的特殊照射人员，工作结束后应该对个人剂量计立即读数。
- 当怀疑或确知吸入或摄入放射性核素时，例如接触过被氚污染的元件或操作过易于剥落的加速器感生放射性部件后，还需要进行内照射个人剂量的监测，例如尿样分析或全身计数。

4.4 个人剂量监测

- **BEPCII**工程使用的是**OSL**光致发光 α 、 γ 射线个人剂量监测系统。
- **OSL**剂量计可同时给出深部**Hp(10)**、浅表**Hp(0.07)**和眼晶体**Hp(3)**三个检测量值；

射线种类	能量范围	量程
α 、 γ	5 keV 至 40 MeV	0.01 mSv 至 > 10 Sv
β	150 keV 至 10 MeV	0.01 mSv 至 > 10 Sv



4.5 环境辐射剂量监测

- 加速器建成投入运行后，要在加速器周围建立环境监测站，以监测加速器运行期间对周围环境的影响。对于高能加速器，监测站内除要设置 γ 剂量监测器外，还要设置中子剂量监测器。例如BEPC设置了四个监测站和一个参考站，参考站监测的是BEPC所在地区的本底剂量水平。

4.6 工作区域辐射剂量监测

- 开机时所有居留区和屏蔽外的辐射水平；
- 开机时产生的气载放射性水平；
- 天空反散射水平。在靠近屏蔽墙外侧的辐射水平可能较低，但由于天空反散射的影响，距屏蔽墙一定距离处辐射水平可能较高，因此天空反散射的调查要从屏蔽墙外侧开始到足够远的距离；
- 感生放射性水平。停机后加速器厅、靶室和沿束流线其它区域内的感生放射性水平，特别是感生放射性可能很强的那些部件或装置。

-
- 在进行了辐射调查后，还要对加速器的辐射防护状况作出评价，对已经发现的不安全因素，要根据具体情况采取不同的措施加以改进。
 - 对高能加速器除了进行上述监测外，还要建立固定式连续监测点。选点的原则是工作人员经常出入的场所和可能受到潜在照射危害的场所。

4.7 表面污染监测

- 在检修加速器或操作了放射性部件后，要及时进行表面污染的检查。同时，还应该对设施的污染情况进行定期调查，特别是使用氚靶和贮存氚靶的地方，不同程度地存在着氚的表面污染，必须定期检查，及时去除污染。

4.8 液态流出物的监测

- 加速器上的液态流出物主要是循环冷却水和附属的放化实验室中的放射性废水，它们通常贮存在贮水池或废水罐中，并不连续排放。在排放前首先要对水的放射性总活度进行监测，当活化比较高时，还应该对其中的核素进行分析，并对放射性微粒进行过滤，或者进行集中处理，保证排出的水中放射性浓度和排放量不超过国家或地方有关规定的限值。

五 加速器的非辐射危害和防护

- 在加速器设施上还存在着其他非辐射危害，如窒息气体、有毒有害气体、易燃易爆物品、微波、电器安全、火灾及联锁失效等。这些原因引起的事故要比辐射引起的多得多。
- 例如，1943-1964年间，美国的各类加速器主要发生251起恶性事故，其中只有3起是由辐射引起的。因此，对非辐射安全问题应引起特别注意。

5.1 窒息性气体

- 某些加速器可能使用一些窒息性气体。
- 例如用SF₆作为高压绝缘气体，虽然SF₆气体的毒性较低，在工作场所的浓度限值为1000ppm，但是在使用过程中经高压电击时，会分解出其它产物，如SF₄、S₂F₁₀、SOF₂和SO₂F₂等，这些气体是极毒的，它们空气中的浓度限值分别为0.1ppm，0.025ppm，0.1ppm和5ppm。

5.2 有毒有害气体（O₃）

- 空气在辐射照射下，会发生辐照分解现象，其主要产物是臭氧（O₃）和（NO，NO₂）。
- 臭氧会损坏人体健康，能造成眼、鼻、喉刺痛，轻者引起咳嗽、头痛、胸闷，重者会导致肺气肿和肺炎。
- 此外，臭氧还会对仪器设备产生腐蚀作用。
- 工作场所空气中O₃的浓度限值为0.3mg·m⁻³(0.14ppm)，外环境空气中的浓度限值为0.16 mg·m⁻³(0.075ppm)。

5.3 微波

- 在某些加速器上，特别是电子直线加速器上，有微波组件，如速调管、射频分离器、射频腔和连接波导等。由于这些设备的漏槽、开缝、以及法兰连接处的泄漏等，都可能产生微波的电磁辐射，工作人员有可能受到危害。处在射频电磁场中的人体能吸收一定的辐射能量，产生生物学作用，主要是热作用。
- 微波对身体健康的影响，除了引起比较严重的神经衰弱之外，最突出的是造成植物神经机能混乱，主要反应在心血管系统上，其中以副交感紧张反应为多，如心动过缓、血压下降或心动过速、高血压等。
- 微波作用也会损伤眼睛，大强度长时间的微波作用会造成眼晶体混浊，严重的导致白内障。此外，微波作用还可能使生殖系统发生轻微改变，以及造成皮肤表层或深度灼伤。

5.3.1 微波的防护

- 对微波的防护最好采用屏蔽的方法，即将电磁能量限制在所规定的空间里，屏蔽可以分电场屏蔽和磁场屏蔽两种。
- 微波作业人员还可以采取个人防护措施。个人防护用品主要有金属屏蔽服、屏蔽头盔和防护眼镜等。
- 微波设备出厂前，产生部门必须进行漏能鉴定，距外壳5厘米处，漏能值不得超过 $1 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

六 加速器安全

6.1 人身安全联锁系统（PPS）

- 加速器是一台辐射源，除了医疗用诊断和治疗加速器外，无论哪种加速器，工作人员受到初级束流或者次级束流照射后，即使时间短暂，都可能受到致命的伤害。因此，加速器运行时工作人员绝对不能进入或误入加速器厅。这就需要在加速器大厅装有可靠的人身安全联锁装置。一旦人员误入或因紧急情况（如火灾、管道漏水等）而需要进入大厅，通过保护装置的联锁机构，自动切断加速器的束流，以保障人身安全。

6.1 人身安全联锁系统（PPS）（续）

- 人身安全联锁装置要求简单、安全、可靠。
- 设计中采用：
 - **故障安全** (fail—safe)， “即使装置出现故障，仍能保证系统安全” 的准则。
 - **纵深防御** (defense in depth)， 安全保护装置应是多重的，使得即使其中一种防护措施失效，仍能达到该安全目标。

6.2 人身安全联锁系统内容（项目）

- 钥匙开关
- 门禁装置
- 光电监视装置
- 剂量报警系统
- 个人剂量报警器
- 紧急停机开关
- 实时摄象监视系统
- 信号指示系统。

6.3 加速器安全运行

- 加速器的运行既是一项技术性很强的工作，又是一项严肃的科学管理工作，它的安全状况不仅取决于各类人员的技术水平，而且取决于辐射防护安全机构的管理水平；
- 辐射防护安全机构的大小根据加速器数量和复杂程度而定。一个典型的辐射防护安全机构包括：机构负责人、辐射安全工程师、消防负责人和运行人员等；
- 辐射防护安全机构应保证工作人员人身安全、仪器设备安全和加速器周边环境辐射安全。
- 辐射防护安全机构应向每台加速器委派专职辐射防护安全员。

辐射安全机构的职责和任务

- 组织实施辐射安全计划、制定辐射安全规程；
- 定期检查和监督辐射安全装置的使用情况；
- 对有关人员进行辐射安全的教育和训练；
- 监测辐射水平，控制辐射危害，并将必要情况通知运行人员和实验人员，对重大的异常情况要及时报告主管部门；
- 审查或制定涉及辐射安全的实验方案；
- 协调运行人员、用户和辐射安全人员之间的关系。

辐射安全机构的职责和任务（续）

- 为了有效地实施辐射防护安全计划应该制定出各种规程：
 - 加速器运行的操作规程；
 - 运行人员的职责和用户须知；
 - 操作放射性材料和检修加速器的程序；
 - 换靶程序；
 - 事故情况下的应急程序；
 - 放射性材料的保管和放射性废物的处理措施；
 - 辐射监测计划；
 - 安全设备定期检查计划。



The End