

国内外几台重离子加速器的屏蔽计算综述

李桂生

(中国科学院近代物理研究所)

从六十年代末期开始,国际上几个先进实验室着手建造重离子加速器以及开展重离子物理实验研究以来,目前建成的重离子加速器有:法国 GANIL 的重离子加速器,英国达里斯波里的超高压串列静电加速器;联邦德国 GSI 的 UNILAC-SIS-ESR 重离子加速系统;美国 LBL 的重离子加速器(SUPERHILAC 和 BEVALAC);日本东京理化所的 RIKEN,东京大学核研究所的高能重离子装置(NUMATRON)和我国兰州近代物理研究所的 HIRFL 等。

理论和经验证明,对中能区以上($E_n > 50\text{MeV/A}$)的重离子加速器,中子是主要的屏蔽对象。有人认为:“在设计几百 MeV 能量范围内的回旋加速器屏蔽层时,有关的辐射仅仅是由次级中子的产生所引起的,……适合于衰减这些中子的屏蔽体,将大于屏蔽带电粒子或屏蔽由高能 γ 射线所产生的电磁级联所需的”^[1]。随着加速能量的降低, γ 射线对剂量的贡献将越来越大,甚至超过中子对剂量的贡献。

因此,重离子加速器的屏蔽计算,主要考虑的是中子的屏蔽。当然,也有考虑了 γ 剂量所贡献的。下面,对 NUMATRON、UNILAC-SIS-ESR、RIKEN 和 HIRFL 的屏蔽计算作一简要介绍和比较。

一、高能重离子加速器的屏蔽

NUMATRON 加速较轻重离子(^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{20}Ne)的最高能量是 1.47GeV/A ,最大流强在 10^{11}n/s 数量级;UNILAC-SIS-ESR 加速 ^{20}Ne 离子到 $\sim 1\text{GeV/A}$,最大流强为 $5 \times$

10^{11}n/s 。二者均属高能重离子加速器。

1. NUMATRON 的屏蔽^[2]

NUMATRON 的屏蔽计算以单核能为 1.47GeV ,流强为 10^{11}n/s 的 ^{12}C 离子与 U 靶的重离子反应产生的中子作为屏蔽对象。由于缺少高能 ^{12}C 的中子产额数据,所以可用高能质子反应的实验数据近似求得 1.47GeV/A ^{12}C 轰击 U 靶的中子产额。

屏蔽计算采用 Moyer 模型,把高能重离子反应发射的中子分为三类:级联中子、蒸发中子和裂变中子。该模型仅考虑 $E_n > 150\text{MeV}$ 的中子。因为 Moyer 认为,在几个平均自由程之后,中子能谱达到平衡,而中子的衰减是由 $E_n > 150\text{MeV}$ 的中子快分量来决定的;在 150MeV 以上,中子的非弹性截面基本上是不变的。这时,中子的迁移平均自由程为:

$$\lambda(E) = \lambda(\text{常数}) \quad (E) > 150\text{MeV}$$

$$\lambda(E) = 0 \quad (E) < 150\text{MeV}$$

即屏蔽不计及低能($E_n < 150\text{MeV}$)分量中子。

如果流强为 $N \text{ n/s}$ 的重离子束,打在靶上某一点的积分中子通量($E_n > 150\text{MeV}$)是:

$$\varphi_r(E_n > 150\text{MeV}) = \frac{(1-p) \cdot N \cdot n(E_n > 150\text{MeV}) \cdot f(\theta) \cdot d}{(a+d)^2 \cdot \text{Cosec}^2\theta} e^{-\frac{d}{\lambda \sin\theta}}$$

式中 $f(\varphi)$ 是能量大于 150MeV 中子的相对角分布,

d 是混凝土屏蔽层厚度,

a 是靶子距屏蔽墙的距离,

λ 是中子的衰减长度,

p 是加速器中损失的束流份额,

$n(E_n > 150\text{MeV})$ 是 ^{12}C 轰击 U 靶时的中子产额。

计算取屏蔽外表面上中子剂量当量率限值为 0.8mrem/h ，若距靶 3m 外设混凝土屏蔽，则靶厅束流前向应设置 7.8m ，侧向应设置 6.3m 。

若重离子束有 40% 的束流均匀地损失在加速管道上，则加速管道的屏蔽厚度为 3.3m 混凝土或 1m 混凝土 + 2.7m 泥土。

2. UNILAC-SIS-ESR 的屏蔽^[2]

联邦德国 GSI 的重离子实验装置，是由重离子直线加速器 (UNILAC)、重离子同步加速器 (SIS) 和实验贮存环 (ESR) 组成的重离子加速系统。UNILAC 可以把 U 离子加速到 20MeV/A ，SIS 可以把 Ne 离子加速到 2GeV/A 和 U 离子 1.1GeV/A ，而 ESR 的终端能量对 Ne 是 $\sim 1\text{GeV/A}$ ，对 U 是 $\sim 0.6\text{GeV/A}$ ，离子束流强在 10^{11} 数量级。

GSI 的加速器屏蔽计算，是由法国辐射屏蔽专家 MARCEL M. BARBIER 进行的。计算采用 Madey 理论^[4]，从计算重离子反应的中子多重性 (一次核相互作用中产生的中子数) 出发，利用了出射中子角分布的实验规律，略去 $E_n = 100\text{MeV}$ 以下中子对剂量的贡献，计算的各种入射重离子轰击不同靶核时 SIS 和 ESR 的最大混凝土屏蔽厚度如图 1 所示。计算取距靶 10m 处屏蔽外表面上中子剂量当量率限值为 2.5mrem/h 。

此外，MARCEL M. BARBEES 还计算了 ESR 三个实验区的屏蔽厚度：

$5 \times 10^{11}\text{n/s}$ 实验区：束流前向混凝土屏蔽 7m ，束流侧向混凝土屏蔽 3m ；

10^8n/s 实验区：束流前向混凝土屏蔽 4m ，束流侧向混凝土屏蔽 2m ；

10^6n/s 实验区：束流前向混凝土屏蔽 2m ，束流侧向混凝土屏蔽 1m 。

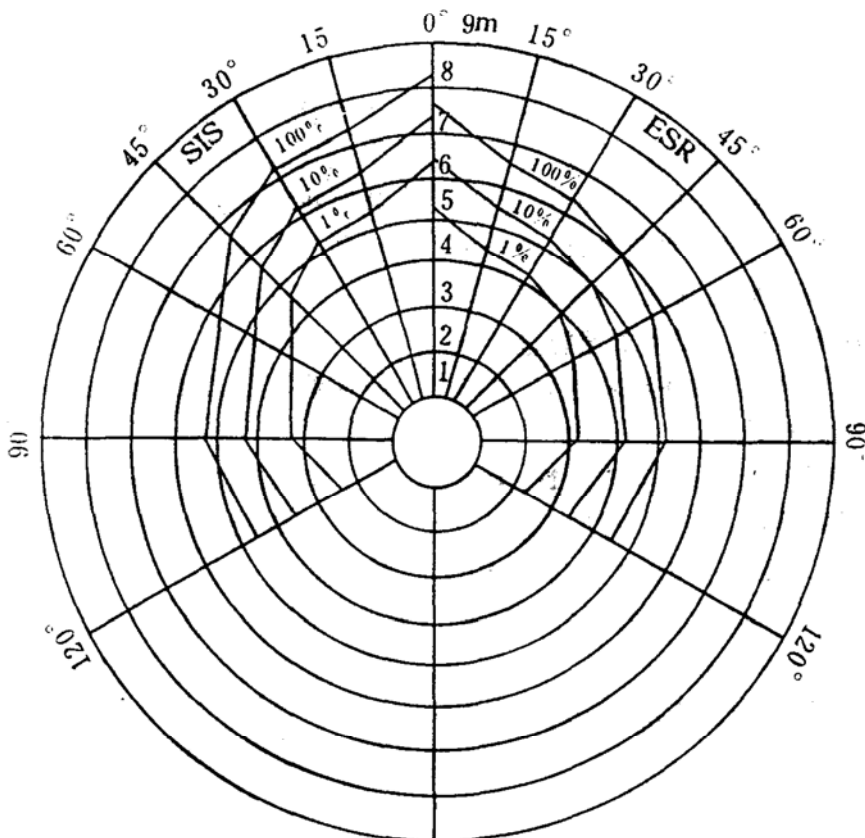


图 1 SIS 和 ESR 实验区混凝土屏蔽厚度的极坐标图

考虑到束流在输运线上的损失,在劈束器和分析狭缝处为 10%,这里的混凝土侧向屏蔽厚度为 2.85m,顶部为 1m;在引出区的束流损失~2%,这里的混凝土侧向屏蔽为 2.15m,顶部为 0.62m。

二、中能重离子加速器的屏蔽

日本东京理化所的 RIKEN 和我国兰州近代物理所的 HIRFL 运行在中、低能区($E_p < 200\text{MeV/A}$),但屏蔽计算是按中能重离子反应进行的。

1. RIKEN 的屏蔽^[3]

RIKEN 加速重离子的能量是 135MeV/A 的较轻重离子,而加速较重重离子的能量低于此值。其屏蔽计算是根据 $6 \times 10^{11}\text{n/s}$ 、135MeV ^{12}C 轰击 Fe 靶的中子谱(该中子谱是由理论计算的 100MeV/A $^{12}\text{C}+\text{Fe}$ 反应的中子谱近似估算的),忽略了 35MeV 以下中子的贡献,利用一维分离坐标代码 ANISN 和中子能量从热能到 400MeV、 γ 能量从 10KEV 到 14MeV 的中子-光子多组截面库 DLC-87/HILD 完成。

RIKEN 的屏蔽计算采用了两种模型,其一同心球模型,其二是双层平板模型。根据计算,得出两种用于屏蔽设计的图表。共实验区的屏蔽由束流捕集器和实验小区屏蔽墙组成。如图 2 所示的屏蔽结构和剂量率限值,其屏蔽要求在表 1 中列出。

表 1 RIKEN 靶厅屏蔽厚度(图 2)

参考点及剂量当量率限值	A	B	C
混凝土屏蔽墙(m)	3	3	2.5
重混凝土束流捕集器(m)	1.83	0.8	1.22

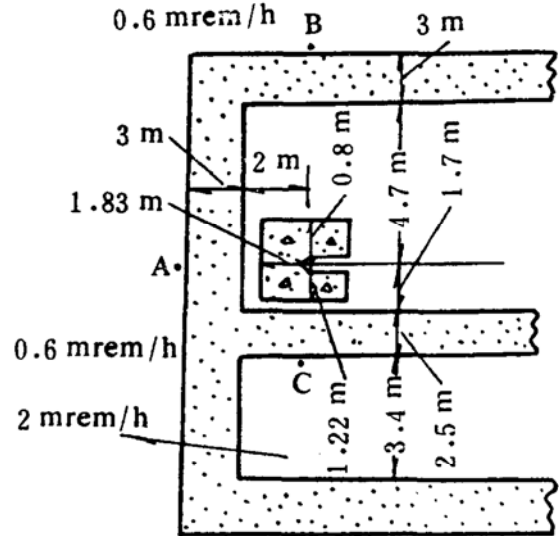


图 2 RIKEN 屏蔽结构和剂量当量率限值

2. HIRFL 的实验靶区屏蔽计算

HIRFL 可加速从 C-Ta 的重离子,最高加速能量为 120MeV/A,束流强度 $\sim 10^{11}\text{n/s}$ 量级。

HIRFL 实验大厅内有八个实验终端设备,分成八个实验小区。我们根据 100MeV/A ^{12}C 轰击 C 靶时的中子谱和中子产额,利用轻核反应实验数据,近似求得 100MeV/A ^{12}C 轰击 Cu 靶的中子产额,并以 $3.9 \times 10^{11}\text{n/s}$ 为入射束的这一反应为例,将出射中子分为 $E_n > 20\text{MeV}$ 、 $E_n = 20-100\text{MeV}$ 和 $E_n > 100\text{MeV}$ 三个能区和 $0^\circ-15^\circ$ 、 $15^\circ-30^\circ$ 、 $30^\circ-60^\circ$ 、 $60^\circ-120^\circ$ 和 $120^\circ-180^\circ$ 五个出射方向,按中子在物质中的衰减规律计算了实验小区混凝土活动屏蔽厚度^[6],局部屏蔽厚度和局部屏蔽+混凝土活动屏蔽的屏蔽厚度^[7],其部份结果见表 2。

此外,我们还用 Madey 理论,以 $4 \times 10^{11}\text{n/s}$ 、100MeV/A $^{12}\text{C}+\text{Cu}$ 的重离子反应为例,计算了实验靶区的混凝土屏蔽。计算结果和文献[6]的结果同时绘制在图 3 中^[8]。

表 2 HIRFL 屏蔽计算部分结果

		局部屏蔽厚度,cm	混凝土活动屏蔽厚度,cm	屏蔽总厚度,cm
活动屏蔽	束流前向 (0°-15°)		450	450
	束流侧向 (60°-120°)		150	150
50cm 混凝土 局部屏蔽	束流前向	50	350	400
	束流侧向	50	90	140
30cmFe+30cm 混 凝土局部屏蔽	束流前向	60	330	390
	束流侧向	60	30	90
50cmFe+50cm 混 凝土局部屏蔽	束流前向	100	260	360
	束流侧向	100	—	100

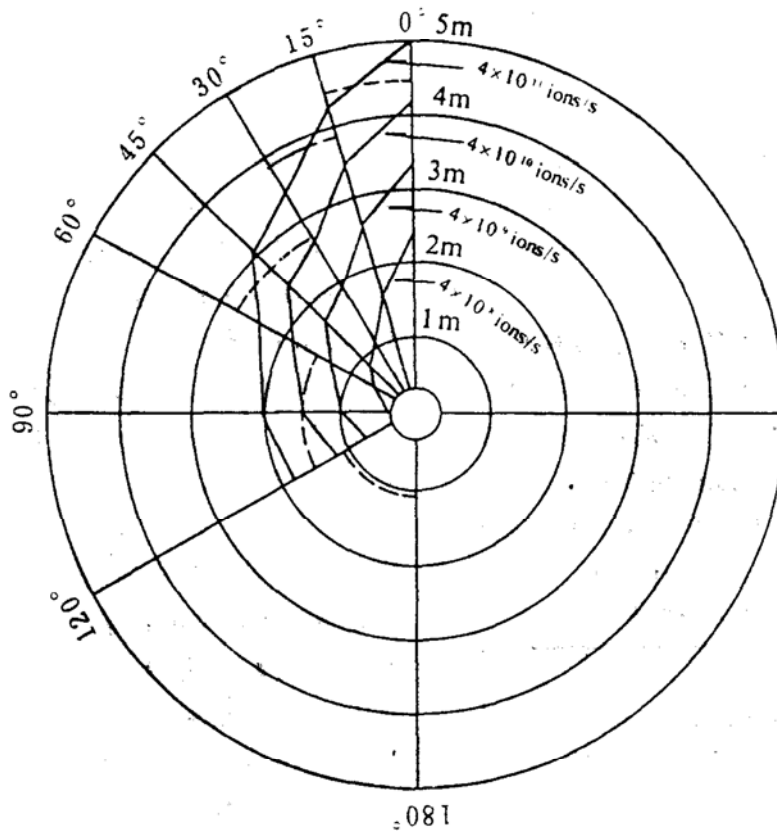


图 3 HIRFL 实验小区混凝土屏蔽厚度的极坐标图

(——)取自文献[8]

(---)取自文献[6]

三、结果比较与评述

综上所述,四台加速器采用不同的屏蔽计算理论和计算方法,由于条件,如离子束能量、强度、屏蔽结构和屏蔽设计的剂量标准各不相同,只能按高能区和中能区加速器实验靶区屏蔽作一大致比较。

1. NUMATRON 的离子能量略高于 ESR,但流强却略低,屏蔽计算的剂量标准也低于 ESR。因此,其前向屏蔽略大于 ESR(分别为 7.8m 和 7m),这是合理的,但侧向屏蔽远大于 ESR(分别为 6.3m 和 3m)。

2. RIKEN 的入射离子能量和流强均高于 HIRFL,而屏蔽设计的剂量标准是后者的 1/4,其前向总混凝土(重混凝土折合成普通混凝土)原约为 5.7m,侧向约为 4.2m,若 HIRFL 以 0.6mrem/h 的剂量标准设计,前向混凝土屏蔽~5.3m,侧向~2.3m^[8]。可见二者的前向屏蔽是基本相当的,但 RIKEN 的侧向屏蔽远大于 HIRFL。

3. 我们和联邦德国的屏蔽设计剂量标准均取 2.5mrem/h,而日本的剂量标准远小于此值,这是因为前二者是用于实验小区的屏蔽设计,后者是用于实验大厅的屏蔽设计。对实验小区的屏蔽设计,日本采用 2mrem/h。

4. 日本的两台加速器,侧向屏蔽计算都得出比较保守的结果,屏蔽厚度远大于同类加速器的侧向屏蔽。

5. HIRFL 实验小区的屏蔽用了两种不同的屏蔽计算方法,两组结果(图 3)在 0°-60°范围内完全相同,在大角度处略有差别,这是因两种计算中采用的角分布函数不同而引起的。

四、结语

这里仅对两台高能重离子加速器和两台中能重离子加速器的屏蔽计算作了比较,我们将进一步收集调查其他重离子加速器的屏蔽计算结果,把我们的屏蔽计算建立在更加可靠的基础上。

参考文献

- [1] H. W. 帕特森 R. H. 托马斯,加速器保健物理,原子能出版社,1983。
- [2] Study Group of NUMATRON, NUMATRON - High - Energy Heavy - Ion Facility, Institute for Nuclear Study, University of TOKYO, Japan, 1977。
- [3] Marcel M. Barbier, SIS - ESR Shielding, Radioactivity and Decommissioning, Technical Report MMB-27。
- [4] R. Madey et al., Physical Review C, Vol. 28 No. 2 706(1983)。
- [5] T. Shikata et al., Shielding Calculation of Neutrons for the RIKEN Ring Cyclotron Facility, (日本东京理化所资料)
- [6] 李桂生、郑华智,重离子核反应中的中子辐射屏蔽计算,(原子能科学技术)待发表。
- [7] 李桂生,重离子核反应中的中子辐射局部屏蔽,(原子能科学技术)待发表。
- [8] 李桂生,中能重离子反应的中子屏蔽,(核技术)待发表。