

核聚变实验装置HT-7U及大厅活化分析

513-518

黄群英

TL631.24

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 使用一维 S_N 离散坐标法输运程序ANISN、活化计算程序AFDKR并使用一维球几何模型对HT-7U装置主要部件及混凝土屏蔽墙的活化进行了计算和分析,给出了中子能谱、 γ 能谱、大厅内外剂量率空间分布及放射性水平的分布,对HT-7U装置的主要中子学参数及周围居民接收剂量水平给出了定量的分析。

① **关键词** HT-7U装置, 活化, 剂量率, 托卡马克装置, 活化分析
中图分类号 TL77, X334, TL84

HT-7U装置是一具有非圆截面的环形超导托卡马克, D-D放电运行时将产生一定量的D-D聚变反应中子和少量D-T聚变反应中子, 这些中子将会与真空室及其外围组件发生核反应而引起这些材料的活化, 这将影响到装置的维修方案尤其是在两次放电间隙的维修, 包括合适的进入大厅时间、允许的逗留时间等, 也将影响到区域监测系统的设计。放电期间, 任何人员不许进入大厅。HT-7U装置对公众的剂量主要来自于放电期间中子及其诱发 γ 射线进入周围环境引起的剂量及少量氚排放, 对工作人员的剂量主要来自于维修过程。

HT-7U装置的主要参数见表1。

表1 HT-7U装置的基本参数
Table 1 Main parameters of HT-7U device

大半径 Major radius/m	17
小半径 Minner radius/m	0.4
拉长比 Elongation	2.0
中子产额 Yield of neutrons/ $n \cdot s^{-1}$	1×10^{15}
其中, D-D中子比例 Fraction of neutrons/%	97
D-T中子比例 Fraction of photons/%	3
典型放电脉冲长度 Typical discharge time/s	2×10^{-4}
最大放电脉冲长度 Maximum discharge time/s	10^3
年累计最大D-D放电运行时间 Maximum discharge time per year/s	10^5

本工作着重考虑大厅内外剂量分布及活化特性随时间的变化, 这些都将影响到工作人员及周围居民接收剂量的水平。

1 计算模型、程序及数据库

为了考虑屏蔽设计的安全, 本工作使用一维球几何模型对HT-7U装置进行了中子输运及活化的计算, 球心取在装置赤道面与中心螺管轴线交叉处, 即装置几何中心。托卡马克

收稿日期: 2000-04-05

装置沿径向分区及尺寸见表2。所使用的计算程序与数据库包括中子输运计算程序及相应数据库、活化计算程序及相应数据库,下面分别进行介绍。

表2 各区材料成分及尺寸
Table 2 Compositions and dimensions of HT-7U

区号 Zone No.	名称 Components	材料成分 Material/%	密度 Density/g·cm ⁻³	厚度 Thickness/cm	径向尺寸 Radius/cm
1	空隙 Central hole	真空 Vacuum	0.0	56.9	56.9
2	PF线圈 PF coil	CICC ¹⁾	2.2	16.1	73.0
3	中心螺管 Solenoid	316ss	8.0	1.7	74.7
4	空隙 Gap	真空 Vacuum	0.0	2.5	77.2
5	线圈盒 Box of TF coil	316ss	8.0	6.0	83.2
6	TF线圈 TF coil	CICC	2.2	25.3	108.5
7	线圈盒 Box of TF coil	316ss	8.0	2.5	111.0
8	空隙 Gap	真空 Vacuum	0.0	2.0	113.0
9	内氮屏 Inner nitrogen shield	316ss	8.0	0.3	113.3
10	液氮 Liquid N ₂	N ₂	0.808	1.9	115.2
11	内氮屏 Inner nitrogen shield	316ss	8.0	0.3	115.5
12	空隙 Gap	真空 Vacuum	0.0	3.0	118.5
13	硼水盒 Box of borated water	316ss	8.0	0.75	119.25
14	硼水层 Borated water	2.2%B + 97.8%H ₂ O	1.01	5.0	124.25
15	硼水盒 Box of borated water	316ss	8.0	0.75	125.0
16	内第一壁 First wall	316ss	8.0	1.0	126.0
17	刮削层 Scrape-off-layer	真空 Vacuum	0.0	9.0	135.0
18	等离子体 Plasma	真空 Vacuum	0.0	80.0	215.0
19	刮削层 Scrape-off-layer	真空 Vacuum	0.0	61.4	276.4
20	第一壁 First wall	316ss	8.0	1.0	277.4
21	硼水盒 Box of borated water	316ss	8.0	0.75	278.15
22	硼水层 Borated water	2.2%B + 97.8%H ₂ O	1.01	5.0	283.15
23	硼水盒 Box of borated water	316ss	8.0	0.75	283.9
24	空隙 Gap	真空 Vacuum	0.0	10.0	293.9
25	内氮屏 Inner nitrogen shield	316ss	8.0	0.3	294.2
26	液氮 Liquid N ₂	N ₂	0.808	1.9	296.1
27	内氮屏 Inner nitrogen shield	316ss	8.0	0.3	296.4
28	空隙 Gap	真空 Vacuum	0.0	5.0	301.4
29	线圈盒 Box of TF coil	316ss	8.0	2.5	303.9
30	TF线圈 TF coil	CICC	2.2	25.3	329.2
31	线圈盒 Box of TF coil	316ss	8.0	3.5	332.7
32	空隙 Gap	真空 Vacuum	0.0	18.7	351.4
33	外氮屏 Outer nitrogen shield	24%316ss + 76%N ₂	2.534	2.5	353.9
34	空隙 Gap	真空 Vacuum	0.0	18.7	372.6
35	外真空杜瓦 Cryostat	316ss	8.0	2.5	375.1
36	空隙 Gap	空气 Air	1.7×10 ⁻²	724.9	1100.0
37	水泥墙 Concrete wall	混凝土 ²⁾ Concrete	2.26	200.0	1300.0
38	外界环境 Environment	空气 Air	1.7×10 ⁻²		

1) CICC成分:30%He + 40%Cu + 5%316ss + 15%NbTi + 10%C₂₂H₁₀O₆N₂

密度:4.4g/cm³;计算中TF线圈、PF线圈的占空比取为50%

1) Components of CICC: 30%He + 40%Cu + 5%316ss + 15%NbTi + 10%C₂₂H₁₀O₆N₂

Density: 4.4g/cm³; Volumetric fractions of TF and PF coils are considered as 50%.

2) 混凝土成分:核子数密度构成(核子数/cm³)^[1], 2) Composition of concrete: nucleon number (1/cm³)^[1]

H: 1.38×10²² O: 4.59×10²²

Al: 1.74×10²¹ Si: 2.02×10²²

1.1 中子学计算程序及相应数据库

本工作使用中子学领域内广泛应用的一维 S_N 离散坐标法输运程序ANISN^[2]及UW库^[3]进行中子学计算和分析。UW库包含48种核素的25群中子、21群 γ 的96种截面值。

D-D放电时产生的D-D反应中子能量为2.45MeV(对应UW库的第15群中子)、D-T反应中子能量为14.1MeV(对应UW库的第1群中子),计算中考虑了3%的D-T反应中子。中子剂量率及中子诱发次级 γ 射线剂量率可通过由此计算得出的中子、 γ 射线通量值及中子、 γ 射线通量密度对剂量当量的转换因数^[4]而计算得出。为方便处理与分析中子学计算结果,此部分已编入ANISN程序中。

1.2 活化计算程序及相应数据库

本工作使用改进后的FDKR^[5,6]程序即AFDKR程序及其配套数据库进行活化计算与分析。它可用于聚变、裂变、聚变-裂变混合堆的活化及放射性计算。其配套数据库包含581种核素的46群中子、43群 γ 的有关衰变核数据和截面数据。

此程序根据装置几何、材料和运行参数以及由ANISN程序计算的中子通量而进行活化计算。由于ANISN、AFDKR两程序所使用的数据库对应的能群不一样,已在ANISN程序中加入将中子能群从25群结构处理成AFDKR程序使用的46群结构的子程序。

2 计算结果与分析

2.1 中子学计算结果与分析

对以上介绍的模型进行中子学及活化计算时,考虑TF线圈的占空比为50%。

参照TPX和KSTAR设计,在装置中设置双层不锈钢作容器的硼水层,其厚度及硼浓度应根据超导体对核热的耐受程度、实验大厅及环境对辐射剂量的要求限值、维修剂量限值等确定。在此采用厚度5cm,使用的浓缩 B^{10} 的浓度取22g/L(其中 B^{10} 原子数占98%, B^{11} 原子数占2%)。由于水和 B^{10} 的独特中子学性能,硼水层的存在降低了核热在TF线圈上的沉积,使核热负荷减少约3倍左右。

2.1.1 中子通量、光子通量分布。中子通量、 γ 通量随径向距离的空间分布见图1。总的来说,在装置内部, γ 通量比中子通量小4倍左右,但在屏蔽墙外, γ 通量比中子通量高2—3个量级。这主要是由于慢化中子在屏蔽墙中发生(n, γ)吸收反应生成了新的 γ 射线的缘故。

2.1.2 中子能谱、 γ 能谱分布。为了比较中子能谱在屏蔽墙内外的分布情况,分别给出离开装置真空室壁外侧0.1m、离开屏蔽墙外侧0.1m处空气中的中子、 γ 能谱分布,见图

2—3。从图2—3可看出:大厅外总中子通量的主要贡献来自于热中子,另外在2MeV左右有一个小峰;在真空室外起主要贡献的中子能量跨度很大,即从2MeV左右能量中子一直到热中子。 γ 射线能量主要在11MeV以下,且在1MeV和8MeV能量附近有能量峰值。辐射监测

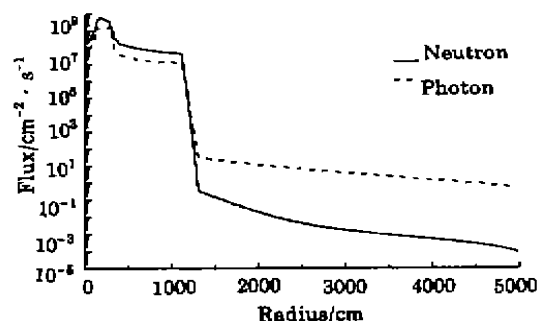


图1 中子、光子通量随径向距离的分布

Fig.1 Neutron and Gamma fluxes as a function of radius

系统仪器的选取应考虑这些特点。

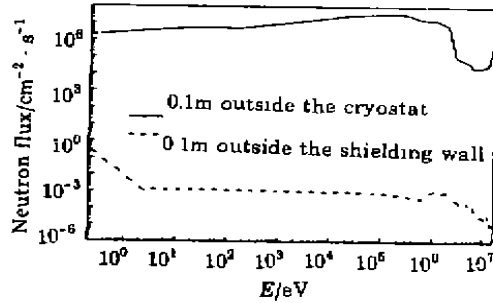


图2 屏蔽墙内外中子能谱

Fig.2 Neutron spectrum inside and outside the shielding wall

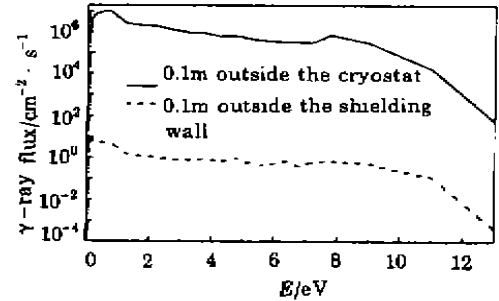


图3 屏蔽墙内外光子能谱

Fig.3 Gamma spectrum inside and outside the shielding wall

2.2 剂量率计算结果与分析

2.2.1 运行期间的剂量率分布。 HT-7U装置运行期间由D-D反应中子、D-T反应中子及其诱发γ射线所引起的剂量率见图4。为表达方便，这里的剂量率实指为剂量当量率。从图4可以看出：装置大厅内剂量率主要来源于中子剂量率；经过2m厚屏蔽墙的屏蔽后，中子剂量率、γ剂量率均大大降低，分别降低约8和5个量级，所以屏蔽墙的作用是十分明显的；屏蔽墙外侧0.1m处空气中的剂量当量率为 2.0×10^{-10} Sv/s，即0.0067mSv/a(在年累计放电时间 10^5 s和人员的滞留因子为33%的情况下)。这是符合我国放射性防护规定放射性场所周围居民年接收剂量应小于0.1mSv/a的要求^[7]；环境中，γ剂量率比中子剂量率约高2个量级。

2.2.2 装置部件自屏蔽效果分析。 为了考查HT-7U装置部件的自屏蔽作用，将前述中子学计算模型简化为除硼水区及屏蔽墙外无任何装置部件材料。将此模型的剂量率计算结果与前面的结果绘于图5以便比较。可以看出装置自身各部件的总屏蔽效果可使总剂量率下降5倍左右。

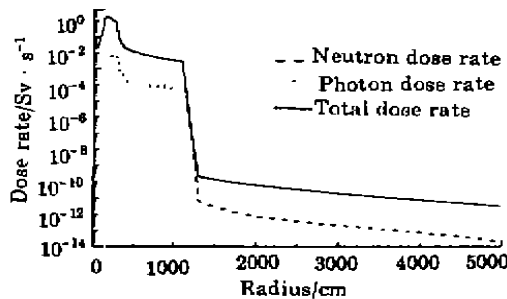


图4 剂量率随径向距离分布

Fig.4 Dose rates as a function of radius

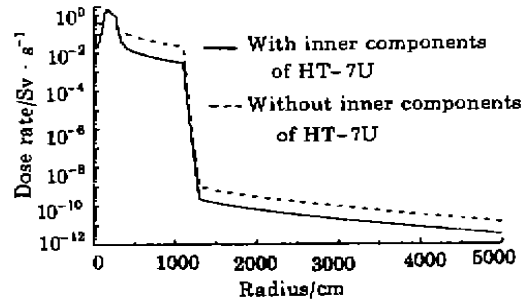


图5 HT-7U装置自屏蔽效果

Fig.5 Self-shielding effect of HT-7U components

2.3 活化计算结果与分析

2.3.1 放射性。 分别计算HT-7U连续放电 2×10^2 s、 10^3 s及 10^5 s时整个装置的活化，并将结果绘于对数坐标系(见图6)。为便于看出其变化规律，将 2×10^2 s、 10^3 s放电时的结果绘于线性坐标系(见图7)。其中， 2×10^2 s放电方案是HT-7U典型放电脉冲长度， 10^3 s为最大放电脉冲长度，为考查多次脉冲放电后的累计放射性水平上线， 10^5 s则为假设的连续放电时间

(实际年累计放射性将必定小于此种情况的放射性水平)。

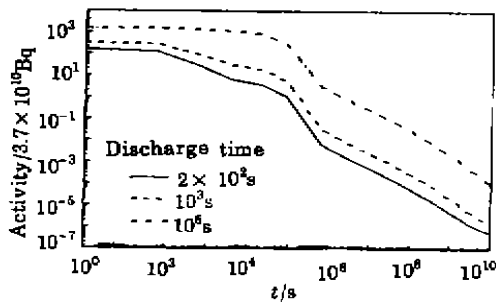


图6 一定放电时间后活化放射性随时间变化
Fig.6 Activities as a function of time

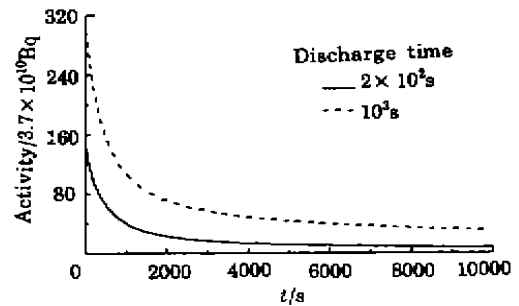


图7 一定放电时间后活化放射性随时间变化
Fig.7 Activities as a function of time

连续放电时间的长短对整个装置的活化影响很大。放电时间越长，活化放射性越高。

活化放射性随装置停止放电后时间呈下降趋势。且当停止放电后时间在约 10^3 s内其下降速率为最快。维修时至少在停止放电后 10^3 s之后进入大厅较为合适。而允许的逗留时间则需根据进一步的光子输运计算和实测结果而确定。

2.3.2 BHP(潜在生物危害因子)。BHP是指将给定放射性物质用水或空气稀释到允许的放射性浓度时所需的空气或水的体积。计算公式为

$$BHP = I/MPC_{\text{空气}} \quad (1)$$

式中， I 为给定核素的放射性，单位为Bq； $MPC_{\text{空气}}$ 为给定放射性核素在空气或水中的最大允许放射性浓度值，单位为Bq/cm³。在AFDKR程序中给出了有关数据(按照美国联邦法规制定)。

HT-7U装置总BHP随停止放电后时间的变化见图8。其变化趋势与放射性变化趋势类似，其最大值出现在停止放电0时刻，小于 50km^3 空气，且核的寿命均很短。

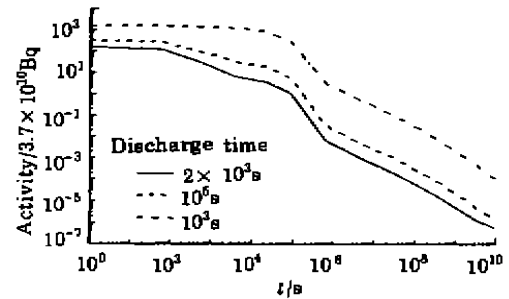


图8 一定放电时间后BHP随时间变化
Fig.8 BHP as a function of time

3 结论

(1) 在HT-7U装置年累计放电 10^5 s和居民滞留因子为33%的情况下，居民可接收的最大剂量当量率为 0.0067mSv/a ，符合我国放射性防护规定的要求。

(2) 2m厚屏蔽墙起到了很好的屏蔽作用。

(3) 装置自身各部件的自屏蔽效果可使总剂量率下降5倍左右。

(4) 连续放电时间的长短对整个装置的活化影响较大。放电时间越长，活化越严重。

(5) 装置活化放射性在停止放电 10^3 s内下降速率为最快。维修时至少应在装置停止放电 10^3 s之后进入大厅较为合适。而允许的逗留时间则需根据进一步的 γ 输运计算和实测结果而确定。

参 考 文 献

- 1 Shaeffer N M. Reactor shielding for nuclear engineers (translated into Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 1983
- 2 Engle W W. A user's manual for ANISN. USAEC Report K-1693 (1967); ANISN-ORNL, A One-dimensional discrete ordinates transport Code, Oak Ridge National Laboratory Report CCC-254, 1973
- 3 Perry R T, Mosos C A. A Combined P₃ VITAMIN-C, MACKLIB-IV, Coupled 25 Neutron-21 Gamma Group Cross Section Library — The UW Cross Section Library, UWFD-390, University of Wisconsin, 1980
- 4 Patterson H W, Thomas R H. Accelerator health physics (translated into Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 1983
- 5 YANG Yanxi, FENG Kaiming, HUANG Jinhua. A user's manual for activation calculation code FDKR on fission reactors, fusion reactors, fusion-fission hybrid reactors (in Chinese), Southwestern Institute of Physics, 1987
- 6 YANG Yanxi, FENG Kaiming, HUANG Jinhua. AF-DCDLIB: data library for actinides and fission products (in Chinese), Southwestern Institute of Physics, 1987
- 7 ZAI Xingyao. Nuclear radiation physics (in Chinese), Xi'an Jiaotong University, 1993

Activation analysis on HT-7U fusion experimental device

HUANG Qunying

(*Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

Abstract

Activation, dose rate and self-shielding effect of HT-7U device were calculated and analyzed by using one-dimensional discrete coordinate transport calculation code ANISN and the activation calculation code AFDKR with their data libraries based on one-dimensional model. Neutron spectrum, induced γ spectrum and their dose rate to the neighbour inhabitants and activity level were given and estimated.

Key words HT-7U device, Activation, Dose rate

CLC TL77, X334, TL84