

One Design of the Neutron Generator for BNCT

Wenqiang Li¹, Bin Liu¹, Jing Tu²

¹School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

²Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi

Email: liwenqiang@ncepu.edu.cn

Received: Aug. 17th, 2017; accepted: Aug. 29th, 2017; published: Sep. 4th, 2017

Abstract

In order to improve the efficiency of epithermal neutron produced by Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), we used MCNP code to establish a new type neutron generator based on Low energy electron accelerator and calculated neutron flux under each parameter of the structure model, which makes us find the optimal parameter that can maximize the flux of epithermal neutron. We also calculated the neutron energy spectrum based on optimal parameter. Preliminary simulation results show that the neutron flux of the neutron generator meets the requirement of BNCT.

Keywords

Boron Neutron Capture, Neutron Generator, MCNP, Flux

一种用于BNCT的中子产生器设计

李文强¹, 刘 滨¹, 屠 荆²

¹华北电力大学核能科学与工程学院, 北京

²西北核技术研究所, 陕西 西安

Email: liwenqiang@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2017年8月17日; 录用日期: 2017年8月29日; 发布日期: 2017年9月4日

摘 要

为提高BNCT(硼中子俘获治疗)的超热中子产生效率, 利用蒙特卡洛程序MCNP设计了一种基于低能电子

加速器驱动中子产生器的结构, 并对该结构模型各参数下的中子通量进行对比计算, 找到能使超热中子通量达到最大值的最佳参数, 并且计算了最佳模型下的中子能谱。初步模拟计算结果显示, 该中子产生器的中子通量达到BNCT要求。

关键词

硼中子俘获治疗(BNCT), 中子产生器, MCNP, 中子通量

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1936 年美国科学家 G. L. Locher 首次提出硼中子俘获治疗(boron neutron capture therapy BNCT) [1] 这一新的概念之后, 人们就开始关注这一全新的癌症治疗方案的研究。根临床试验记录显示, 运用 BNCT 方法来治疗脑胶质瘤的患者效果比较理想, 是目前治疗胶质瘤的较可行的方法。

2. BNCT 的基本原理

硼中子俘获治疗的原理就是利用 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 这一反应, 先将含有 ^{10}B 的药物注射进入病人的血液, ^{10}B 可以集中在肿瘤细胞的区域, 然后用热中子或者超热中子束轰击病变器官组织, 与同位素 ^{10}B 发生上述反应从而产生 α 粒子, 它具有较高的 LET (传能线密度), 从而把能量刚好沉积在大约一个肿瘤细胞的直径范围内, 因此它仅作用于肿瘤细胞, 不损伤周围的健康细胞, 最终选择性的将肿瘤细胞杀死[2]。这种治疗方法分为两步: 1) 先在患者体内注入含有 ^{10}B 的亲肿瘤细胞药物。这种化学药物有选择性的聚集在肿瘤细胞中。2) 用中子束照射肿瘤区域。此中子束对含有 ^{10}B 的肿瘤细胞具有致命的作用, 但是对正常的细胞只有很少的伤害[3]。

在自然界中稳定的 ^{10}B 占 20%左右, 它与热中子的反应截面非常大, 能达到 3800 靶, 并释放 α 射线和 ^7Li , 其反应方程式为: $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} (0.84 \text{ MeV}) + ^4\text{He} (1.47 \text{ MeV}) + \gamma (0.48 \text{ MeV})$ 。硼中子俘获治疗的一大关键问题是中子的来源, 由于这种反应所要求的中子能量为热中子, 而中子进入人体组织之后能量会迅速衰减, 要保证能有足量的热中子与肿瘤细胞中的硼发生反应, 必须利用能量为数千电子伏特的超热中子, 超热中子到达肿瘤部位时会减速成为热中子[4]。

由于硼中子俘获治疗需要大量的超热中子, 国内外对于中子源大部分研究都集中在核反应堆, 质子加速器或者自发裂变中子源 ^{252}Cf 这三种方法上面[5] [6] [7] [8]。而本文运用蒙特卡罗程序 MCNP 来模拟建立一个基于低能电子加速器驱动中子发生器模型, 使之产生 1 keV~10 keV 的中子通量并记录下来。其原理为利用能量 5 MeV 的电子束轰击钨靶, 电子与靶核发生相互作用时会损失能量, 能量损失的方式有主要两种, 一种就是电离能量损失, 另一种就是辐射能量损失, 其中辐射能量损失就是发生韧致辐射作用产生光子 γ 射线[9], γ 射线再与重水发生光核反应产生一定能量的中子。

3. 光核反应基本原理

γ 射线与靶核发生反应产生中子的过程称之为光核反应。这个过程中 γ 射线本身必须要有一定的阈能才能使反应进行下去, 如果被吸收的 γ 射线的能量大于靶核里中子与其他核子之间的结合能, 那么在反

应过程中是有可能产生中子的。总体来说,对于低质量靶($A < 40$),一般光核反应产生中子所要求的 γ 射线能量值为 $8\sim 19$ Mev,而对于重核来说就需要 $6\sim 8$ Mev的能量[10]。有两个靶核素例外,一个是 ${}^9\text{Be}$,其 γ 射线的阈能为 1.666 Mev,另一个是 ${}^2\text{H}$,其阈能为 2.226 Mev。本文所使用的靶即为重水 ${}^2\text{H}_2\text{O}$,因为电子加速器的能量为 5 Mev,打出的光子能量最大值不超过 5 Mev,使用重水是最好的方式。原理图如下图1所示。

4. 中子源模型设计

H. Feizi 和 A. H. Ranjbar [11]用 FLUKA 软件设计了一个高能电子加速器驱动的中子产生器,电子束能量为 100 MeV,其模型见参考文献[5]。其原理是将高能电子束打向钨靶,然后发生韧致辐射作用产生高能光子,一部分光子进入钨靶后面的铀块区再与铀原子核发生作用从而产生中子。另一部分高能光子与靶核会发生三种效应,分别是康普顿散射,电子对效应以及光电效应,这三种作用均会产生电子,而电子又能继续与靶核发生韧致辐射,从而产生光子使得效应循环发生,最终使得高能电子加速器的中子产额更高。由于铀属于重金属,光子要与铀核发生碰撞产生中子需要很高的能量,铀块后面放置了一个薄铍层,目的是为了能使产生的低能 γ 射线到达铍层后与之发生反应产生低能中子。

H. Feizi 等设计的中子产生器模型特点就是能够产生大量的高低能中子,但是需要用到 100 MeV的电子束,因而电子加速器的成本高。本文设计的中子产生器模型目的是主要产生能量为 1 keV ~ 10 keV的能在硼中子俘获治疗领域使用的超热中子,使用的电子束能量为 5 MeV,中子产额较 H. Feizi 等设计的模型低,而优点就是就是发射电子束的低能电子加速器的成本低且获得的中子的能量大部分都是在超热中子以下,能够用于硼中子俘获治疗。该中子产生器初始模型外观如图2所示,其中最外层部分是反射层,中层部分是重水池,最里层就是钨靶。

5. 模拟计算分析

模型中的钨靶的半径为 5 cm,厚度为 3 cm,重水池的半径为 15 cm,反射层厚度为 5 cm。反射层材料采用的是石墨,因为石墨在温度为 293 k的条件下对中子的宏观吸收截面为 $3.2 \times 10^{-3}/\text{cm}$,而宏观散射截面为 $38.5/\text{m}$,是良好的中子反射材料。为了计算并进行参数对比,从而得到整个模型的最优参数,使得中子通量达到最大值,我们用 MCNP 程序分别模拟计算了不同参数值下中子的面通量计数。方法就是首先模拟计算出四个参数的单一变量下的最大中子通量数值得出最佳参数值,然后综合两个参数值进行计算验证是否能得出最大中子通量。下面所有图片中纵轴上面的中子通量均为归一化计数。

5.1. 不同厚度的钨靶对中子通量计数的影响

钨靶作为与电子发生碰撞发生韧致辐射作用的物质,其厚度会对中子通量计数产生影响,图3是改变钨靶的厚度后 MCNP 对 10 keV中子进入重水池侧曲面的平均通量计算,采用是 F2 计数卡。可以看到,在钨靶的厚度为 $0.02\sim 0.08$ cm范围时,中子的通量是逐渐增加的,而厚度增加到 0.08 cm时通量达到峰值。随着钨靶厚度的继续增加,中子通量又开始迅速减少。当电子束向钨靶照射时,由于电子接近原子核,

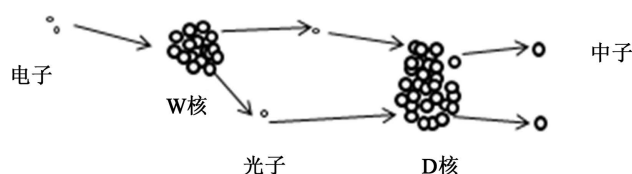


Figure 1. Schematic diagram of neutron generator
图1. 中子产生器原理示意图

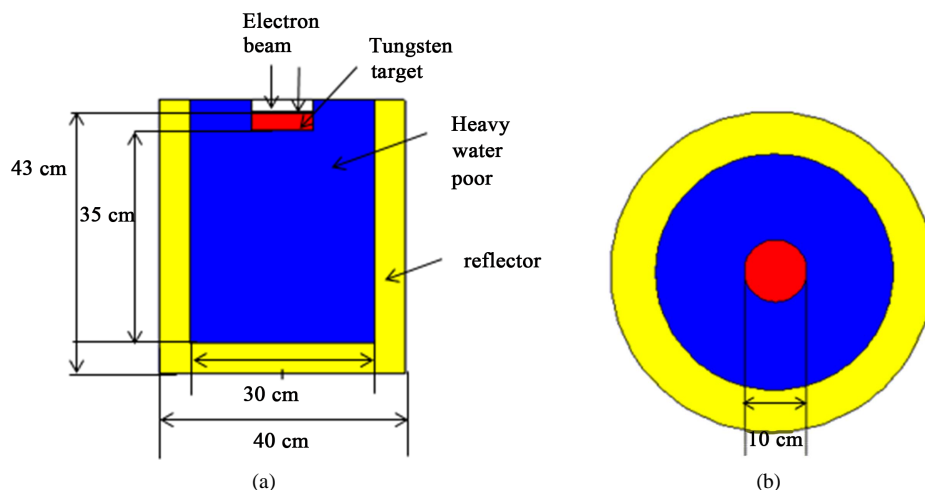


Figure 2. Geometric figure of neutron generator
图 2. 中子产生器几何图

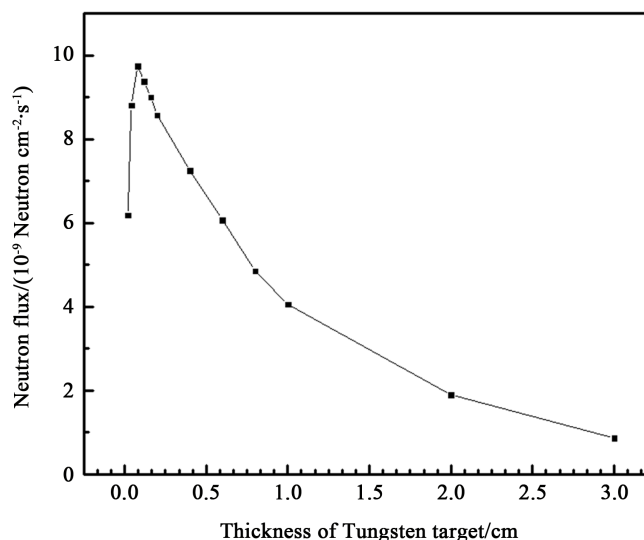


Figure 3. Neutron flux for different thickness of Tungsten target
图 3. 不同厚度钨靶对应的中子通量

速度和方向都会发生很大的变化, 在这个过程中部分电子与靶核发生韧致辐射作用, 从而产生了 γ 光子。一定厚度的钨靶对电子发生韧致辐射作用的概率是有益的, 因为靶厚度增加, 靶核的数量就会增加, 电子束与靶核发生作用的概率随之增加。但是一旦靶厚度增加到了了一定的程度之后, 电子由于与靶核发生碰撞导致能量损失, 使得电子不足以穿透前面的靶核与内层的靶核发生作用, 与此同时由于韧致辐射作用产生的光子要穿透靶核进入重水池, 也会导致能量的损失。能量低的光子与氘核发生光核反应产生中子的概率降低, 因此两个方面的作用导致钨靶的厚度的增加不会持续增加对中子通量的计数。

5.2. 钨靶的半径对中子通量的计数产生的影响

当电子束向钨靶照射时, 电子会与靶核发生碰撞损失部分能量, 运动方向发生改变, 部分电子可能运动到钨靶半径边缘发生韧致辐射, 因此要确定最佳钨靶半径, 使得电子与钨靶能发生最多的作用从而得到最大的中子通量计数, 同时可以节省材料钨的使用, 图 4 是改变钨靶半径时得到的中子通量曲线图。

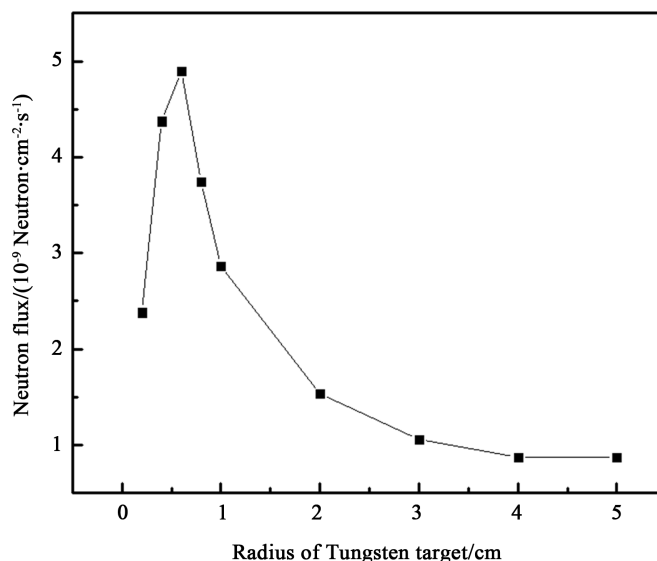


Figure 4. Neutron flux for different radius of Tungsten target

图 4. 不同半径钨靶对应的中子通量

从图 4 中可以看出在 0~0.6 cm 之间的范围内, 钨靶的半径越大时, 中子通量的计数是越大的, 然而钨靶的半径超过 0.6 cm 之后, 随着半径的增大, 中子通量的计数逐渐减少。显然这个计数是合理的, 在 0~0.6 cm 的半径范围内, 由于电子与靶碰撞之后能量逐渐减少, 运动方向发生改变, 但仍然足以穿过半径的范围发生韧致辐射作用而产生光子, 光子进入重水池之后发生光核反应产生中子。随着钨靶超过临界半径之后, 电子的能量减弱不足使电子达到更宽的范围来与靶核发生作用, 此时钨靶会成为光子进入重水池的屏障, 使得能进入重水池的光子减少, 从而发生更少的光核反应。

5.3. 重水池半径对中子通量的影响

电子与钨靶发生韧致辐射作用产生光子后, 光子进入重水池与重水中的氘核发生作用产生中子, 由于光子或者中子在重水中运动时速度和方向会发生改变, 因而重水池的半径会对中子通量产生影响。图 5 是用 MCNP 来计算不同厚度的重水池下中子通量的曲线。可以看出当重水池的半径增加时, 中子通量变化并不是呈现一个线性变化, 在半径从 6 cm 增加到 8 cm 时, 中子通量逐渐增加, 而随着半径超过 8 cm, 中子通量开始下降, 其中当半径增加到 11 cm 比 10 cm 略微增加一点, 到后面中子通量逐渐减小。

5.4. 反射层的厚度对中子通量计数的影响

此模型的反射层是由石墨组成的, 由于 MCNP 是在重水池的边缘曲面来计数中子通量, 而反射层能够与中子发生碰撞从而改变中子的运动方向, 因此改变反射层的厚度会对中子通量计数产生影响。图 6 是不同厚度的反射层下对中子通量的计数。可以看到, 在反射层厚度在 0~30 cm 的范围内, 反射层厚度增加, 中子通量增加, 而厚度达到 30 cm 之后, 中子的通量则不再变化。由于 γ 光子与重水中的氘核发生反应产生中子, 一部分中子会在重水里面运动, 当运动到达重水池的边缘后会继续进入石墨反射层, 石墨的核子会与中子发生碰撞, 此时中子的方向会转向重水池, 所以会增加这部分中子的计数。当反射层的厚度增加一定的程度时, 对中子通量的增加是有益的, 然而一旦达到临界厚度 30 cm 时, 中子通量计数不会增加, 达到最大值就不再变化。这是因为中子在石墨层里面运动会与核子发生散射碰撞, 自身的能量部分传递给石墨核子, 从而速度减少无法反射回重水池, 此时再增加反射层的厚度对反射中子也是没有意义的。

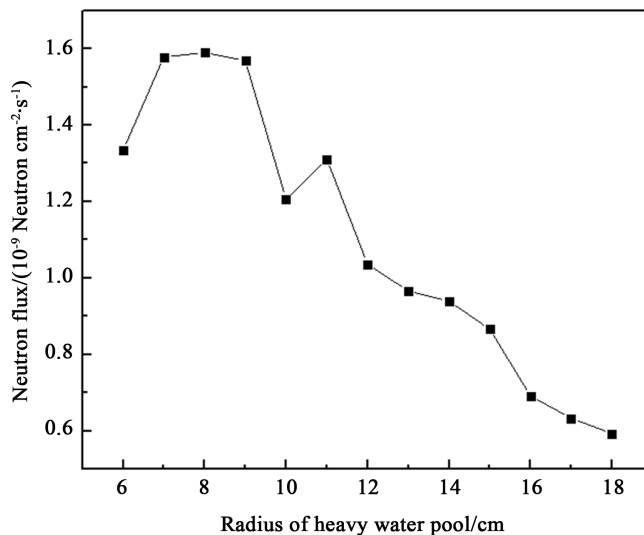


Figure 5. Neutron flux for different radius of heavy water pool
图 5. 不同半径重水池对应的中子通量

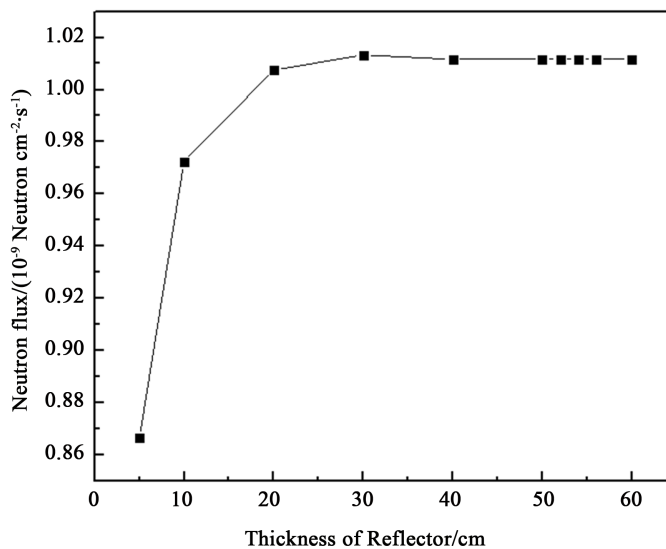


Figure 6. Neutron flux for different thickness of reflector
图 6. 不同厚度反射层对应的中子通量

5.5. 重水池的深度对 neutron 通量计数的影响

在这个模型中，给出的重水池的深度是 35 cm，为了验证中子通量在重水池侧面哪个深度位置上可以达到最大值，将重水池在 Z 轴上划分成 7 个等份，分别来计算中子通量，模型如图 7 所示。

表 1 给出了经过 MCNP 计算后的 7 个深度区间的中子通量，从中可以看到，在深度范围在 25~30 cm 时深度有最大值。

经过上面的计算，可以给出钨靶的半径为 0.6 cm,厚度为 30 cm 时理论上中子通量将达到最大值。为了验证综合上面单一最佳参数是否真实可靠，我们将两个参数同时改变来计算中子通量。图 8 给出在初始模型的其他参数不变，而钨靶在厚度以及半径同时变化时记录的中子通量。可以看到，当钨靶厚度在 0.08 cm 时，中子通量明显比其他靶厚度时要大，并且当钨靶半径增加到 0.6 cm 时，中子通量为最大值，

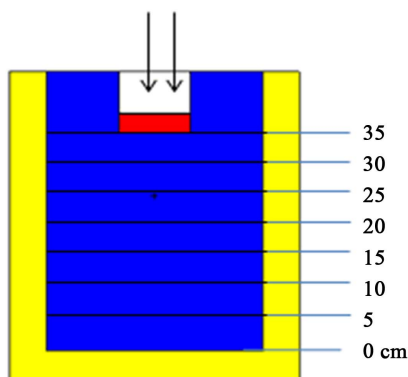


Figure 7. Depth division diagram of heavy water pool
图 7. 重水池深度划分图

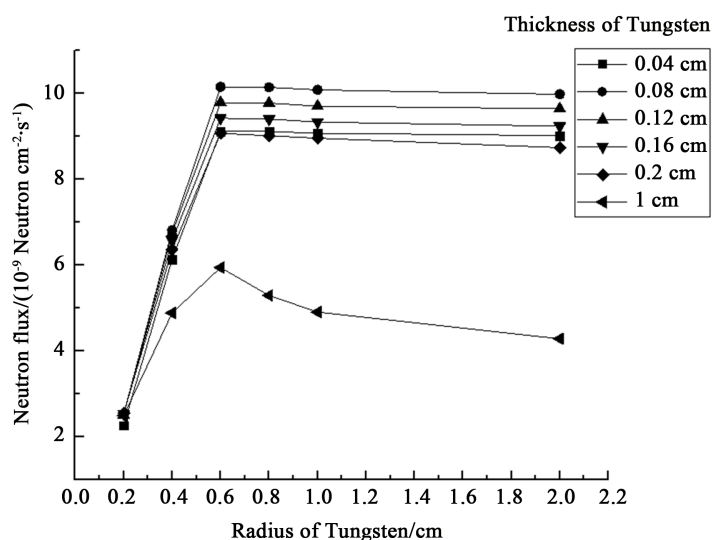


Figure 8. Neutron flux for different thickness and radius of Tungsten target
图 8. 不同厚度和半径钨靶对应的中子通量

Table 1. Neutron flux varies with heavy water pool depth
表 1. 中子通量随重水池深度变化值

重水池深度 Depth of heavy pool water/cm	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	35~40
中子通量 Neutron flux/ $10^{-9} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	0.2558	0.4234	0.5375	1.0537	1.1974	1.5958	1.1576

当半径超过 0.6 cm 时，中子通量逐渐减小。这两个参数结合起来可以得出，当钨靶的半径达到 0.6 cm，厚度在 0.08 cm 时中子通量有最大值，这一结果与前面的改变单一参数时是相符合的。

另一方面，重水池的半径与反射层的厚度同时变化也会对中子通量计数发生作用。为了验证上面综合单一变量是否能达到最佳效果，用 MCNP 模拟计算同时改变这两个参数时的中子通量计数，结果见图 9，当反射层厚度超过 30 cm 时，厚度为 32 cm 和 36 cm 的曲线基本重叠，说明反射层的厚度达到 30 cm 时中子通量已经达到最大值。图 8 给出的最大中子通量参数为重水池半径是 8 cm，反射层半径是 30 cm，与图 5 和图 6 所模拟的结果是相符合的。

在修正上面的所有参数后，用 MCNP 来计算中子通量，在深度范围为 25~30 cm 时超热中子通量达到 $2.1939 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，很显然这个数值比之前给出单个或者两个最优参数时计算的中子通量更大，说明应用所有最优参数值会得到最好的结果。综合上面的研究，可以给出中子产生器的各个参数在达到表 2 给出值时会有最佳参数，图 10 给出了重水池深度在 25~30 cm 中子在 0~2 MeV 时的中子能谱。

从图 10 可以看到，中子的通量随着中子的能量的增加而减小，此时热中子的通量为最大值，超热中子通量是第二大值，中能中子和快中子通量随着能量的增加迅速减少。

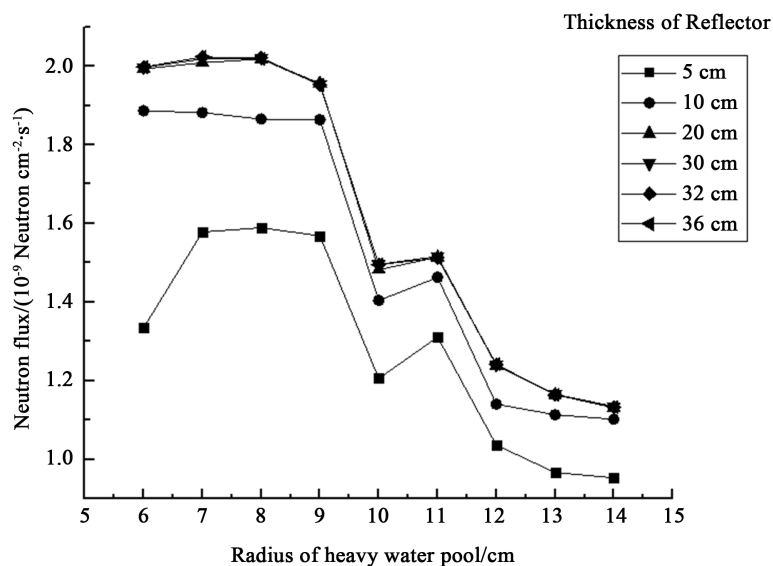


Figure 9. Neutron flux for different radius of the heavy water pool and the thickness of the reflector
图 9. 中子通量随重水池半径和反射层厚度变化曲线

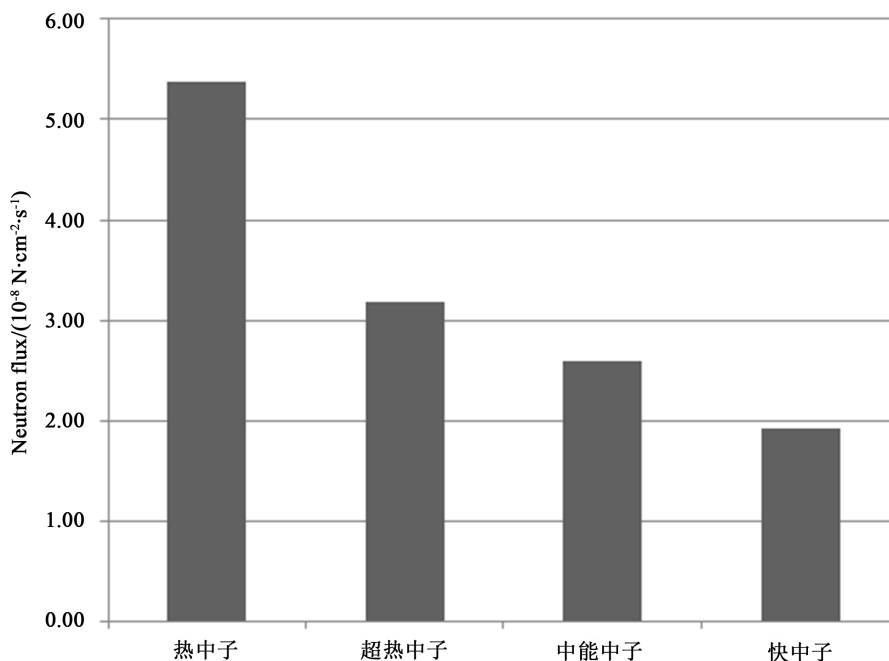


Figure 10. Neutron spectrum
图 10. 中子能谱

Table 2. Optimum parameter list of neutron generator
表 2. 中子产生器最优参数表

钨靶半径 Tungsten target radius/cm	钨靶厚度 Tungstentarget thickness/cm	重水池半径 Radius of water pool/cm	反射层厚度 Thickness of reflector/cm
0.6	0.08	8	30

6. 结语

从上面用 MCNP 软件模拟中子通量可以知道, 利用 5 MeV 的电子束来轰击钨靶, 发生韧致辐射作用产生光子最终与重水反应, 一个电子在单位面积内最多能产生 2.1939×10^8 个中子, 按照普通医用电子加速器 1 mA 的电子流, 发射的电子束每秒能产生 6.25×10^{15} 个电子, 那么在重水池的单位面积内最多每秒能产生 1.3712×10^8 个中子, 对于用于硼中子俘获治疗(BNCT)来说是可以满足应用的。目前, 对于 BNCT 的研究仍在继续, 未来的研究方向将更多的聚集在如何更精确的使射线能作用在癌细胞上面而不损害正常细胞。因此, 科学家在更努力的研究更有效的硼中子俘获治疗药物, 最终使得 BNCT 能在临床上得到广泛的应用, 为肿瘤患者带来良好的治疗效。

参考文献 (References)

- [1] Locher, G.L. (1936) Biological Effects and Therapeutic Possibilities of Neutrons. *The American Journal of Roentgenology and Radium Therapy*, **36**, 1-13.
- [2] 张晓敏, 张文仲, 骆亿生. 硼中子俘获治疗技术的研究现状[J]. 国外医学·放射医学核医学分层, 2004, 28(4): 188-191.
- [3] 曹勤剑, 郑建国, 刘立业. 硼中子俘获治疗(BNCT)及剂量测量方法[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(2): 221-223.
- [4] 罗泉勇, 朱瑞森. 硼中子俘获治疗[J]. 同位素, 2004, 17(3): 174-177.
- [5] Bisceglie, E., Colangelo, P., Colonna, N., et al. (2005) On the Optimal Energy of Epithermal Neutron Beams for BNCT. *Physics in Medicine & Biology*, **45**, 49-58. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/1/304>
- [6] Verbeke, J.M., Vujic, J. and Leung, K.N. (2000) Neutron Beam Optimization for BNCT Using the D-T High Energy Neutron Sources. *Nuclear Technology*, **129**, 257-278. <https://doi.org/10.13182/NT00-A3061>
- [7] Agosteo, S., Cutzio, G. and Nath, R. (2002) Characterization of an Accelerator-Based Neutron Source for BNCT versus Beam Energy. *Nuclear Instruments and Methods*, **A476**, 106-112.
- [8] Allen, D.A. and Beynon, T.D. (1995) Design Study for an Accelerator-Based Epithermal Neutron Beam for BNCT. *Physics in Medicine & Biology*, **40**, 807-821. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/40/5/007>
- [9] 杨朝文. 电离辐射防护与安全基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2009: 31-32.
- [10] Loi G., et al. (2006) Neutron Production from a Mobile Linear Accelerator Operating in Electron Mode for Intraoperative Radiation Therapy. *Physics in Medicine & Biology*, **51**, 695. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/3/014>
- [11] Feizi, H. and Ranjbar, A.H. (2016) Developing an Accelerator Driven System (ADS) Base on Electron Accelerators and Heavy Water. *Journal of Instrumentation*, **11**, 1.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2332-7111，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：nst@hanspub.org