

电子直线加速器驱动的光中子源装置的研制

王宏伟^{1,2,3} 陈金根^{1,2,3} 蔡翔舟^{1,2,3} 林作康^{1,2} 马余刚^{1,2,3} 张桂林^{1,2} 李琛^{1,2}
方德清^{1,2,3} 张松^{1,2} 张国强^{1,2} 曹喜光^{1,2} 钟晨^{1,2} 卢飞^{1,2} 曹云^{1,2} 胡瑞荣^{1,2}
金江^{1,2} 胡建辉^{1,2} 陈伟良^{1,2} 黄建平^{1,2} 王纳秀^{1,2,3} 韩建龙^{1,2} 康国国^{1,2}
杜龙^{1,2,3} 王玉廷^{1,2,3} 朱亮^{1,2,3} 常乐^{1,2} 周晨升^{1,2,3}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

3 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 核反应堆的安全运行、新一代反应堆设计以及核废料处理等需要精确的中子核数据。光中子源联用飞行时间谱(Time of Flight, TOF)测量是最精确的中子能量测量技术,在热中子和共振中子能区的截面测量中发挥了非常重要的作用。钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)项目中 15 MeV 电子加速器驱动的光中子源装置(TMSR Photo-Neutron Source Phase 1, TPNS1)是专为钍-铀循环核数据测量设计和建造的,它位于中国科学院上海应用物理研究所嘉定园区内。第一阶段采用 15 MeV 电子直线加速器(LINAC)驱动,第二阶段拟建造电子能量约 100 MeV (TPNS2)驱动的光中子源。前者建成后可提供飞行路径 5 m、通量约 $10^4 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的连续能量中子束(白光中子)及约 1 MeV 低能伽马射线,它们分别用于测量中子反应截面和伽马辐照研究,这是国内首台用于核数据测量的白光中子源。

关键词 光中子源, 钍铀循环, 核数据, 飞行时间, 中子探测器

中图分类号 TL816⁺.3, TL375.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.100522

中子截面数据库在相当多的科研和技术领域发挥着重要的作用,例如,核能产生、工业应用、核天体物理、核科学及核医学等方面。反应堆用中子截面测量涉及到了一个非常宽的中子能量范围,从热中子 0.025 eV 到 20 MeV,跨度约为 9 个数量级,其中热中子和共振中子能区截面(0.025 eV–1 keV)在核反应堆设计及中子应用研究中具有非常重要的作用,特别是第四代新型反应堆设计中,此能区的一些高精度中子截面数据的需求尤为紧迫。钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)的研究涉及到大量的、不同于铀-钚循环的钍-铀循环链核素(图 1),以及高温状态下的熔盐材料、包壳材料、控制棒材料、反应堆毒素/产物等。它们中很多核素的中子截面还不完备,或者精确度较低,因此需要高精度的中子截面测量作为数据评价依据。例如 ²³²Th 的俘获截面精度在 20%–30%,对于 TMSR 的堆芯设计和安全评估影响甚大,²³²Pa 的截面数据较少,评价数据分歧显著等,因此宽能量范围的中子源是

开展中子截面测量的基础^[1]。

国际上用于核数据测量的中子源主要分为三类:第一类是采用质子或者氘束轰击轻靶,产生单能或者千电子伏能量的快中子束,如德国 FRANZ 装置采用 ⁷Li(p,n)⁷Be 反应产生 1–500 keV 的中子能量^[2];第二类是电子加速器驱动的光中子源装置,如比利时的 GELINA^[3]、德国 nELBE^[4]、韩国 PNF^[5–6]以及日本的 KURRI 装置^[7]等,均能提供较宽能量的白光中子;第三类是散裂中子源装置,如 nTOF^[8]、中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)^[9]装置等,提供约兆电子伏能量范围的中子。目前电子加速器驱动的白光中子源在热中子及共振中子能区范围内的应用非常广泛,占据了绝对优势,它利用电子韧致辐射产生的伽马射线诱发中子,再联用飞行时间谱(Time of Flight, TOF)测量技术,可以提供高通量、连续的中子能谱,可获得高能量分辨的热中子及共振能区的中子截面,具有其它加速器产生的单能中子源无法替代的优势。

中国科学院战略性先导科技专项资助项目(No.XDA02010100)、973项目(No.2013CB834405、No.2010CB833005)、国家自然科学基金(No.11075195)和青年基金项目(No.11305239)资助

第一作者:王宏伟,男,1971年出生,2002年于中国科学院近代物理研究所获博士学位,研究员, E-mail: wanghongwei@sinap.ac.cn

收稿日期:2014-05-12, 修回日期:2014-06-05

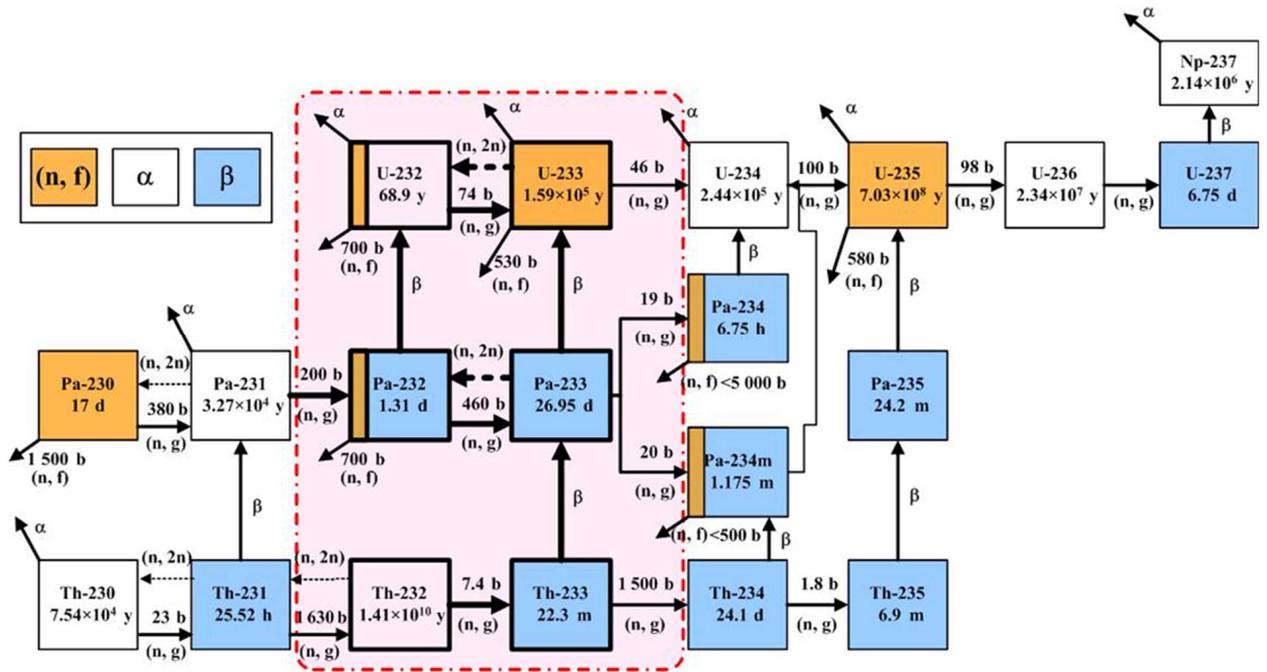


图 1 钍-铀循环反应链 虚线框内为 TMSR 中 Th-U 循环的转化路径
Fig.1 Thorium-uranium cycle chain. Virtual line shows the important transfer path in TMSR.

1 TPNS1 装置设计及物理参数

15 MeV 电子加速器驱动的光中子源装置 (TMSR Photo-Neutron Source Phase 1, TPNS1) 建造在中国科学院上海应用物理研究所嘉定园区, 利用原有的中子发生器大厅(8 m×11 m), 经过适当的改造以后可以满足辐射防护及接地等要求, 从而减少土建的时间。但是较小的室内空间也限制了电子束能量和飞行路径的拓展。TPNS1 建成后将主要侧重于总截面和俘获截面的核数据测量、某些中子/伽马辐照的研究以及开展相关的中子探测器和反应堆用中子探测器的研制和刻度等, 图 2 给出了 TPNS1 的装置布局效果图。

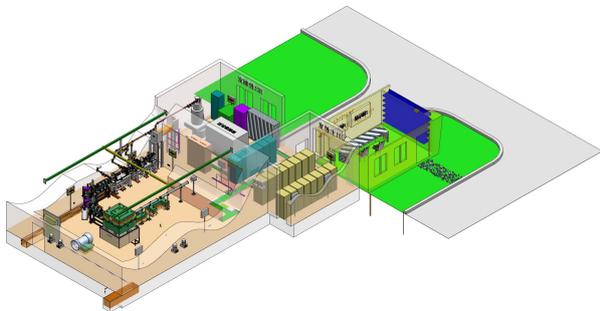


图 2 TPNS1 装置效果图
Fig.2 TPNS1 impression drawing.

装置中电子直线加速器的电子能量为 15 MeV (未来可扩展到较高能量 30–150 MeV), 脉冲宽度为 3 ns–3 μs 可调 (适合不同能量区域的中子分段测量), 脉冲频率为 1–266 Hz 可调 (避免热中子为下一个脉冲周期的快中子覆盖), 平均脉冲电流 0.5 mA, 最大功率为 7.5 kW (中子的产额正比于电子束的流强), 电子束轰击钨靶 (W-Tungsten, 圆柱形) 由韧致辐射产生伽马射线, 然后通过(γ, n)反应产生中子, 初级中子及伽马射线的峰值能量约 1 MeV, 经过适当的慢化后可以得到热中子及连续的中子能谱^[10–11](图 3), 中子总产额约为 $1.2 \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 TOF 飞行路径 5 m 处 (实验室空间限制) 的中子通量可以达到约 $10^4 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

2 电子直线加速器设计

电子直线加速器(LINAC)由上海光源自由电子激光部设计^[12], 加速器由电子枪、s 波段预聚束器 (工作频率 2 865 MHz)、16 腔行波聚束器 (Travelling wave buncher)、偏转磁铁和聚焦磁铁等构成。电子具有三个可调的脉冲宽度范围: 3–10 ns、15–30 ns、0.5–3 μs, 能量分散度小于 1%, 平均流强 0.5 mA, 靶前电子束斑直径为 40–50 mm, 近高斯分布。

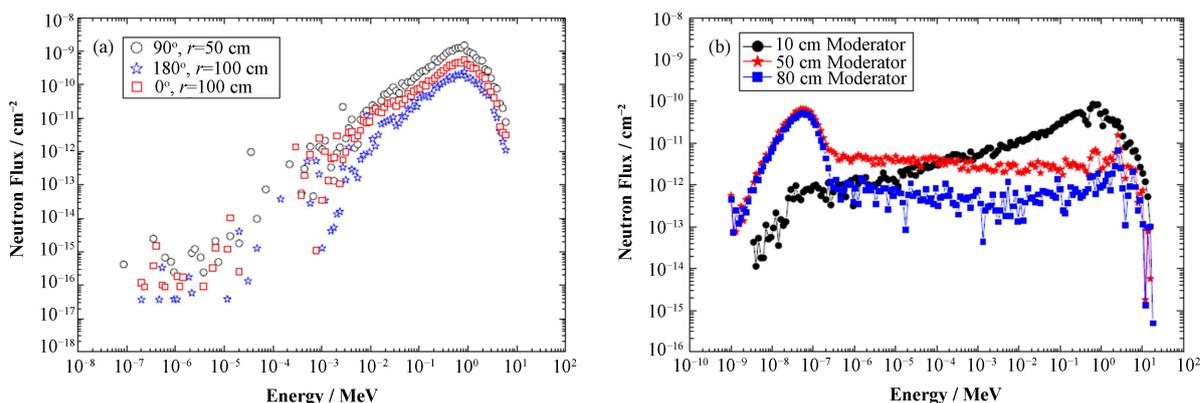
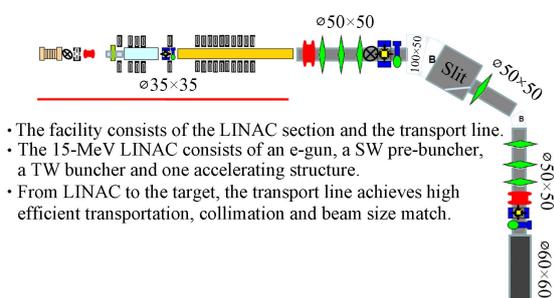


图3 MCNPX 模拟的不同飞行距离处的中子能谱(a)及慢化中子谱(b)
 Fig.3 Neutron spectra at different flight paths (a) and moderated spectra (b) simulated by MCNPX .



- The facility consists of the LINAC section and the transport line.
- The 15-MeV LINAC consists of an e-gun, a SW pre-buncher, a TW buncher and one accelerating structure.
- From LINAC to the target, the transport line achieves high efficient transportation, collimation and beam size match.

图4 TPNS1 直线电子加速器^[10]
 Fig.4 The TPNS1 electron LINAC^[10].

3 中子产生靶及屏蔽壳

中子产生靶为圆柱形天然钨靶，直径 60 mm，厚度 48 mm，纯度 98%，底端用特殊方法焊接在铜冷却座上。产生靶腔体外壳为内径 72.8 mm、厚度 5 mm 不锈钢真空管道，它和电子加速器管道末端直接相连，中子产生靶及铜冷却座上设计安装了 13 只热偶温度计，用来测量中子产生靶及冷却座的温

度变化，同时监控电子束在靶上的偏移情况。冷却座外接去离子冷却水管。为避免长时间辐照后去离子水的活化，冷却水内部独立循环，并通过一个冷却泵实现温度控制。整个中子产生靶包围在一个由铝、聚乙烯和混凝土组合而成的屏蔽壳中，上部设计为可开启模式，便于安装及检修时打开，从内到外分别为铝板(5 cm)、聚乙烯(15 cm)、铅块(20 cm)和铝板(5 cm)组成；屏蔽壳下部为混凝土底座(图 5)。在垂直电子束的 90°方向预留最大直径 20 cm 的中子引出口，在电子束平行的下游位置，预留直径 5 cm 的伽马引出口。TPNS1 调试期间，中子及伽马引出口设置中子探测器(⁶LiI 晶体^[13])、伽马探测器(NaI(Tl))以及液闪探测器(EJ301)、³He 正比计数管^[14]和中子/伽马剂量检测仪。在 TOF 路径终点放置具有良好屏蔽的⁶LiI 中子探测器(以后拟采用 BC702 探测器或锂玻璃探测器)作 TOF 中子时间信号终止探测器。

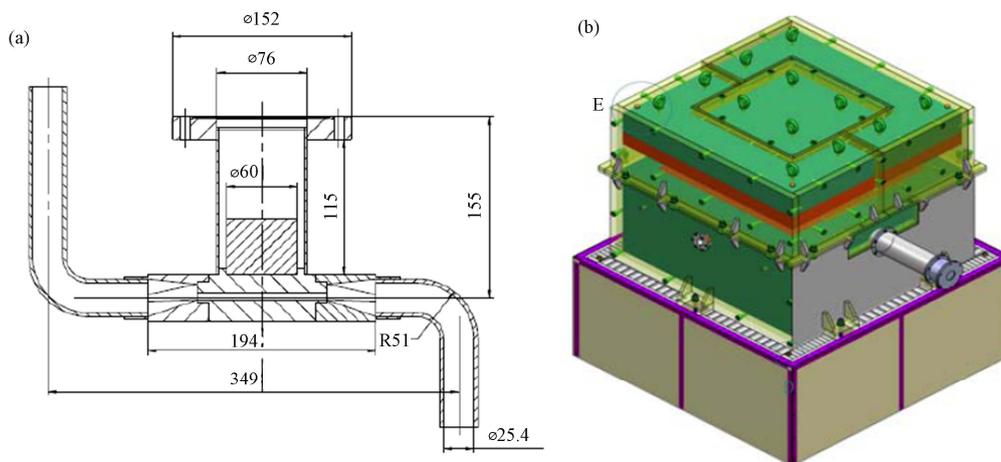


图5 中子产生靶(a)和屏蔽壳示意图(b)
 Fig.5 Scheme of neutron producing target (a) and screening shell (b).

4 设备安装、初步测试结果和讨论

2013年5月TPNS1的基建和水电改造完成,新铺设地线、改造实验厅内的电源和电缆地沟、安装了冷却水和强排风设施、提高了地面承重标准、新建了迷宫墙和局部屏蔽墙以及增加中央控制室等。2014年1月所有设备包括电子直线加速器、中子产生靶及冷却系统,中子实验终端均已作好了开机前检验。2014年1月20日开始加速器试束,实验终端本底及中子/伽马监控,图6给出了低功率电子束轰击下, ${}^6\text{LiI}$ 探测器测量到的中子产额。

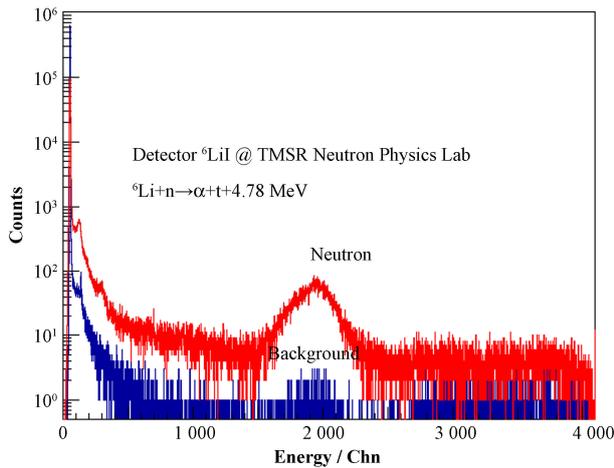


图6 2014年1月TPNS1调试中的中子计数率测量谱
Fig.6 Neutron counting rate of first test run taken in Jan. 2014.

表1给出了电子重复频率为10 Hz条件下, ${}^6\text{LiI}$ 热中子探测器实际测量得到的热中子计数率情况,以及估算在7.5 kW条件下能得到的热中子计数率及通量,考虑到中子能谱分布和加速器优化参数以后,可以得到约 $10^4 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的总中子通量,和蒙特卡罗理论模拟计算的结果相近。

5 结语

中国科学院上海应用物理研究所TMSR先导专项研究课题已经初步完成了国内首台用于核数据测量的光中子源装置的建设,目前正在开展装置的调试任务。从初步测量的数据结果分析来看,能够达到预期的设计指标,利用该装置提供的白光中子和5 m TOF飞行路径,开展TMSR相关的核数据测量是可行的。装置建成后将主要集中在热中子和慢中子能区,特别是共振区中子截面的测量,为TMSR评价数据库提供可靠的总截面和俘获截面测量数据,同时开展常规中子探测器,TMSR反应堆用高温中子探测器的研制和刻度工作,还可以进行一些伽马和中子的辐照实验,为用户提供多用途的中子物理实验平台。

表1 调试束流参数及中子通量估算
Table 1 Parameters of electron beam and estimated neutron flux.

名称 Names	数值 Values
电子束能量 Beam energy	15 MeV
脉冲宽度 Pulse width	0.5 μs
重复频率 Repetition Frequency	10 Hz
峰值电流 Peak current	1.6 nC
电子枪功率 Power of electron gun	0.24 W
传输效率 Transmission efficiency	30%
实际靶上功率 Power in target	0.072 W
${}^6\text{LiI}$ 探测器面积 Area of ${}^6\text{LiI}$ detector	12.566 cm^2
测量时间 Measured time	$\sim 450 \text{ s}$
伽马口热中子产额	$\sim 50 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$
Yield of thermal neutron at gamma exit	
中子口热中子产额	$\sim 98 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$
Yield of thermal neutron at neutron exit	
5 m处热中子产额	$\sim 3 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$
Yield of thermal neutron at 5 m	
名称 Names	估算数据 Estimated values from above data
假设靶上束流功率	7 500 W
Power in target supposed	
伽马口热中子产额	$5.21 \times 10^6 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$
Yield of thermal neutron at gamma exit	
中子口热中子产额	$1.02 \times 10^7 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$
Yield of thermal neutron at neutron exit	
5 m处热中子产额	$3.48 \times 10^5 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$
Yield of thermal neutron at 5 m	
5 m处热中子通量	2.77×10^4
Flux of thermal neutron at 5 m	$\text{n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$

致谢 感谢同韩国浦项 PNF 人员的技术交流和有益讨论,感谢西北核技术研究所和上海新漫传感技术有限公司在中子探测器及中子放射源刻度方面提供的帮助。

参考文献

- 江绵恒,徐洪杰,戴志敏.未来先进核裂变能-TMSR核能系统[J].中国科学院院刊,2012,27(3):366-374
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366-374
- FRANZ[EB/OL]. <http://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/franz/>, 2014
- GELINA[EB/OL]. http://irmm.jrc.ec.europa.eu/about_IRMM/laboratories/Pages/gelina_neutron_time_of_flight_facility.aspx, 2014
- nELBE[EB/OL]. <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=317>, 2014

- 5 Kim G N, Lee Y S, Skoy V, *et al.* First experiment at the Pohang neutron facility[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2001, **38**: 14–18
- 6 Kim G N, Kovalchuk V, Lee Y S, *et al.* Measurement of photoneutron spectrum at Pohang neutron facility[J]. Nuclear Instrument and Methods A, 2002, **485**: 458–467
- 7 KURRI[EB/OL]. <http://www.rii.kyoto-u.ac.jp/en/facilities/ela>, 2014
- 8 n_TOF[EB/OL]. <http://home.web.cern.ch/about/experiments/ntof>, 2014
- 9 CSNS[EB/OL]. <http://csns.ihep.ac.cn/>, 2014
- 10 Lin Z K, Sun G M, Chen J G, *et al.* Simulation and optimization for a 30-MeV electron accelerator driven neutron source[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, **23**: 272–276
- 11 Lin Z K, Zou X, Cao Y, *et al.* Analysis of simulation for neutron target driven by 15-MeV electron beam[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, **46**(Suppl): 26–30
- 12 Zhang M, Li X, Fang W C, *et al.* LINAC design for nuclear data measurement facility[J]. Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China
- 13 杜龙, 常乐, 王玉廷, 等. ${}^6\text{Li}/{}^{\text{nat}}\text{Li}$ 闪烁体探测器效率的模拟计算及实验测量[J]. 核技术, 2014, **37**(4): 040201
- 14 刘应都, 张国强, 王宏伟, 等. ${}^3\text{He}$ 正比计数器探测效率模拟及灵敏度刻度[J]. 核技术, 2012, **35**(3): 175–178
- DU Long, CHANG Le, WANG Yuting, *et al.* Detection efficiency simulation and measurement of ${}^6\text{Li}/{}^{\text{nat}}\text{Li}$ scintillation detector[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(4): 040201
- LIU Yingdu, ZHANG Guoqiang, WANG Hongwei, *et al.* Simulation of detection efficiency for a ${}^3\text{He}$ proportional counter and its sensitivity calibration[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(3): 175–178

Development of photo-neutron facility driven by electron LINAC

WANG Hongwei^{1,2,3} CHEN Jingen^{1,2,3} CAI Xiangzhou^{1,2,3} LIN Zuokang^{1,2} MA Yugang^{1,2,3}
 ZHANG Guilin^{1,2} LI Chen^{1,2} FANG Deqing^{1,2,3} ZHANG Song^{1,2} ZHANG Guoqiang^{1,2} CAO Xiguang^{1,2}
 ZHONG Chen^{1,2} LU Fei^{1,2} CAO Yun^{1,2} HU Ruirong^{1,2} JIN Jiang^{1,2} HU Jianhui^{1,2} CHEN Weiliang^{1,2}
 HUANG Jianping^{1,2} WANG Naxiu^{1,2,3} HAN Jianlong^{1,2} KANG Guoguo^{1,2} DU Long^{1,2,3}
 WANG Yuting^{1,2,3} ZHU Liang^{1,2,3} CHANG Le^{1,2} ZHOU Chensheng^{1,2,3}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

³(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Neutron evaluated data were needed by many researches, e.g., the safety traffic of nuclear reactor, design of new generated reactor and treatment of nuclear waste. **Purpose:** The photo-neutron source driven by 15-MeV electrons LINAC in Thorium molten salt reactor (TMSR) program was designed for Th-U cycle nuclear data measurement. **Methods:** The photo-neutron source combined with time of flight (TOF) spectra is the most accurate method in neutron energy measurement, which plays a very important role in thermal and resonance neutron cross section measurement. **Results:** It locates in Jiading campus of Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP). In the first phase, a 15-MeV electron LINAC will be manufactured, and then a more high energy about 100-MeV LINAC will be used for the photo-neutron source. **Conclusion:** The facility (phase 1) will supply the 5-m TOF path and white spectrum neutron with flux $\sim 10^4 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ and low energy gamma ray $\sim 1 \text{ MeV}$, and it will be used in neutron cross section measurement and gamma irradiation study. This is the first white neutron source facility designed for TMSR nuclear data measurement.

Key words Photo-neutron source, Th-U cycle, Nuclear data, Time of Flight (TOF), Neutron detector

CLC TL816⁺.3, TL375.4