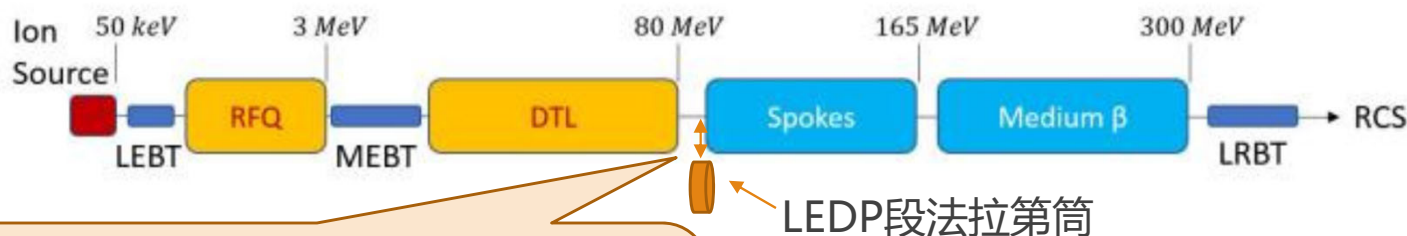


CSNS-II LEDP段法拉第筒设计讨论

束测组 黄蔚玲

2025-7-31

课题背景



LEDP过渡段:
长度: 1.86m
作用: 连接常温段与超导段, 匹配两端的真空度要求
束测元件: 2 BPMs, 1 BSM, 1 WS, 1 BCM and
a FC at exit

Table 1: Upgraded Parameters of the CSNS Accelerator

Parameter	Units	CSNS	CSNS-II
Average power	kW	100	500
Beam energy	GeV	1.6	1.6
Peak linac current	mA	15	40
Pulse length	μs	500	650
Pulse repetition frequency	Hz	25	25+25 ¹

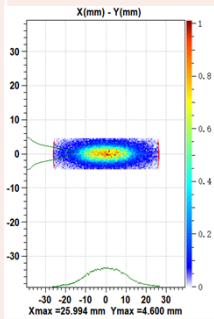
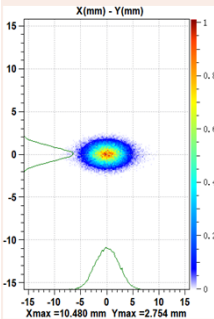
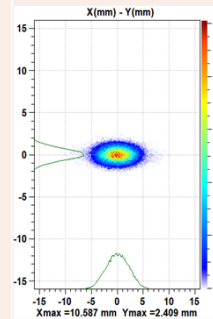
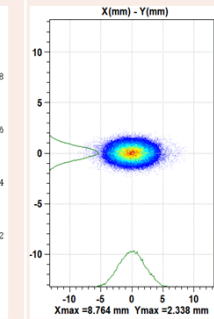
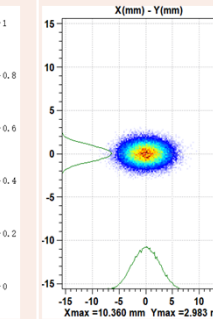
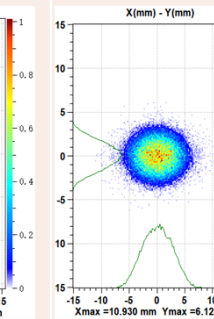
- ◆ 满足常温段调束需求 (80 MeV, 最大50 mA)
- ◆ 流强测量
- ◆ 脉冲持续时间测量(1 Hz, 50 μs)
- ◆ 吸收并安全耗散负氢束功率 (最大平均功率200 W)
FULL Average Power: $P(W) = E \cdot I \cdot PulseLength \cdot Pul.Rep.Freq.$
 $= 80 \cdot 1E6 \cdot 50 \cdot 1E-3 \cdot 50 \cdot 1E-6 \cdot 1 = 200$

1. J. Peng, et al. BEAM DIAGNOSTICS FOR CSNS-II LINAC COMMISSIONING AND OPERATION, Proc. 13th International Beam Instrumentation Conference, Beijing, 2024
2. E.M. Donegani a,*, A. Olsson a, L. Page a, M. Ruelas, Design and performance of the shielded DTL4 Faraday cup for the commissioning of the high-power ESS proton linac, NIMA, 1057 (2023) 168727

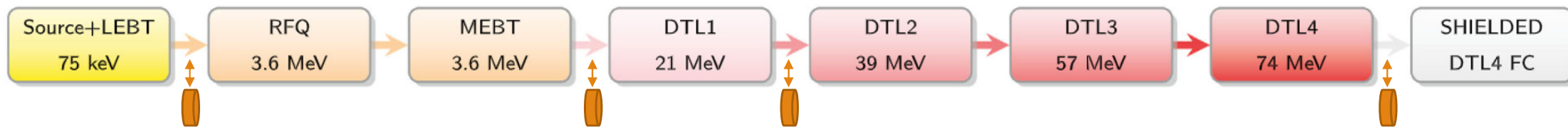
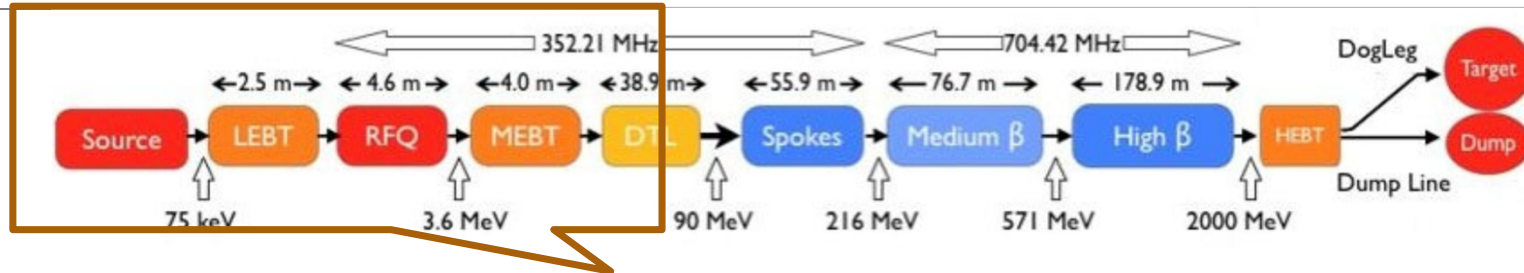
LEDP法拉第筒处的束流分布

H-束流脉冲: 1 Hz, 50 μ s, 不切束

每种功率对应的使用时间2天, 总计12天/年。

Energy	MeV	3	20	40	60	80	80
Intensity	mA	10					50
Average Power	W	1.5	10	20	30	40	200
Beam Size(X_{rms}, Y_{rms})	mm	(9.83,1.74)	(2.2,0.77)	(2.23,0.66)	(2.07,0.63)	(2.34,0.83)	(2.64,1.46)
Beam Profile							

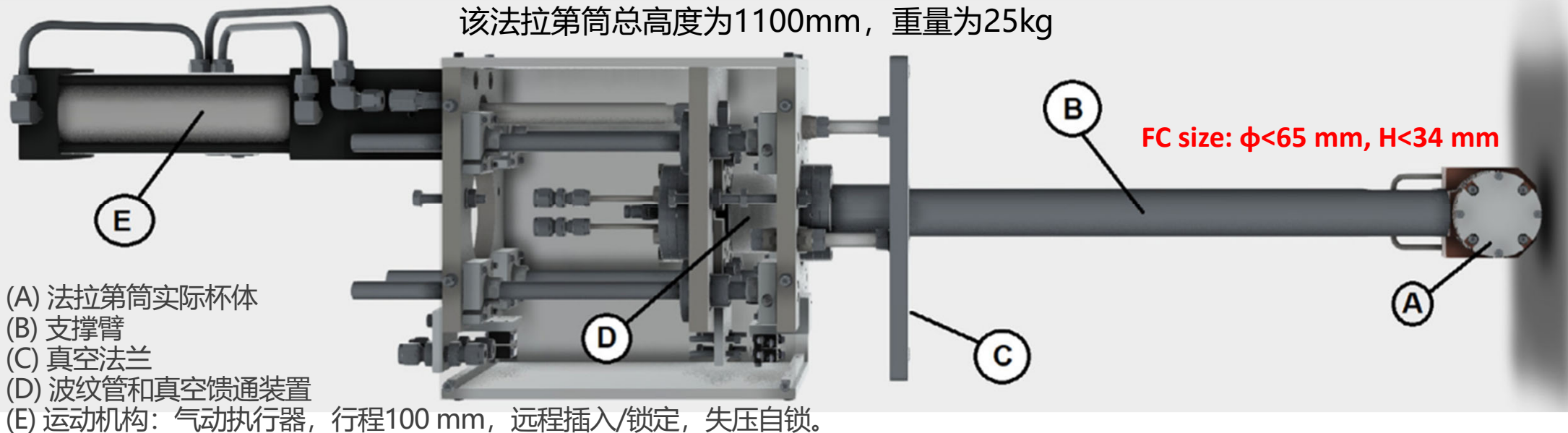
FCs for ESS linac



Beam Parameters	Unit	ESS DTL1	ESS DTL4	CSNS-II
Particle		Proton		H-
Energy	MeV	21	21 - 74	3-80
Intensity	mA	6 - 62.5	62.5	10 - 50
Repetition Frequency	Hz	14	14	1
Macro Pulse Length	μ s	50	5	50
Max. Average Power	W	100	324	200
Beam Size(X_{rms}, Y_{rms})	mm		(1.884,1.6485) (3.5325,3.5325)	(2.64,1.46)

1. A. Garcia Sosa, et al. STATUS OF TESTING AND COMMISSIONING OF THE MEDIUM ENERGY BEAM TRANSPORT LINE OF THE ESS NORMAL CONDUCTING LINAC, 31st Int. Linear Accel. Conf., LINAC2022, Liverpool, UK
2. E.M. Donegani, et al, Design and performance of the compact DTL1 Faraday cup for the high-power ESS NCL, NIMA, 1047 (2023) 167827
3. E.M. Donegani, A. Olsson, L. Page, M. Ruelas, Design and performance of the shielded DTL4 Faraday cup for the commissioning of the high-power ESS proton linac, NIMA, 1057 (2023) 168727

ESS linac DTL4 FC Design



Main part of ESS linac DTL4 FC

为了更清晰地展示波纹管区域，未显示防触电护盖。在法拉第筒剖视图中，可以看到其各子部件：

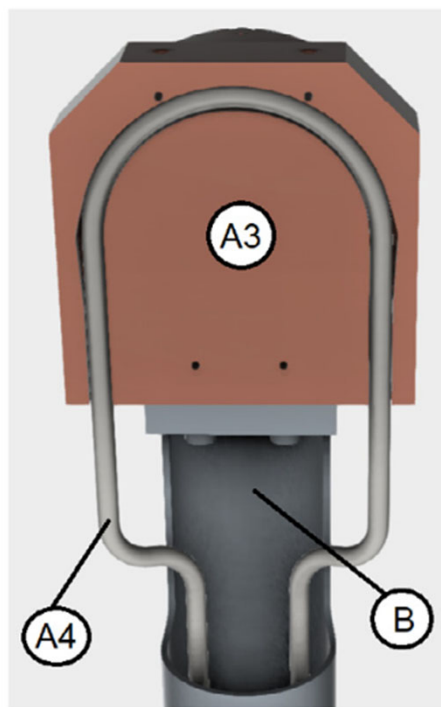
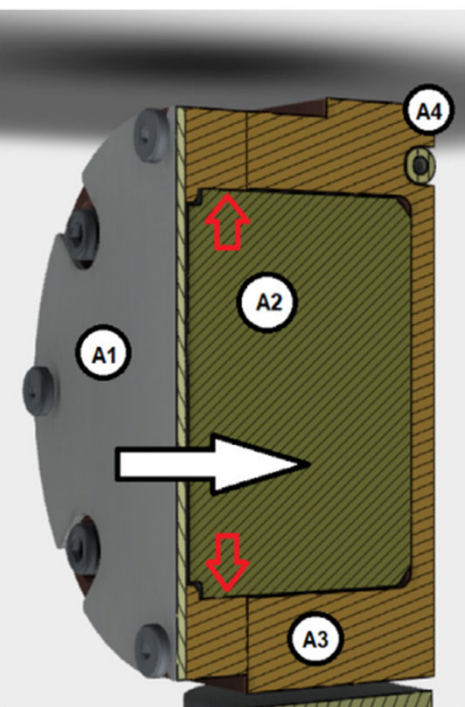
(A1) 入口箔 (TZM箔, 厚度1mm)

(A2) 石墨收集器 (等静压石墨, $\Phi=20\text{ mm}$, $H=28\text{ mm}$)

(A3) 铜制主体 (OFHC)

(A4) 水冷却管 (316不锈钢, PT100温度传感器, 水流速 1l/min)

白色箭头表示质子束的方向；红色箭头表示施加的接触电导。



部件	材料	功能与理由
入口箔 (1 mm)	TZM (Ti-Zr-Mo合金)	耐1400°C；先减速21MeV质子，降低后段功率密度。
主收集器	高纯石墨G-348	低Z→低活化；高热导；易加工。
热沉	无氧高导铜	把热量迅速导走。
冷却管	316L不锈钢, 2mm内径 6bar去离子水, U形回路, 不直接见束流。	

ESS 法拉第筒的热机械模拟

实际法拉第筒关键结构部件的设计：MCNPX+ANSYS

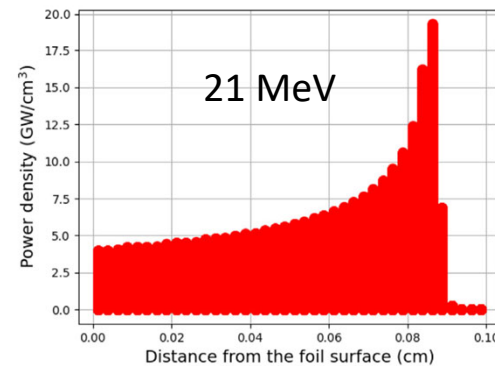
◆ MCNPX计算使用了基于ENDF/B-VII.0的中子库

◆ ANSYS版本为2019 R1

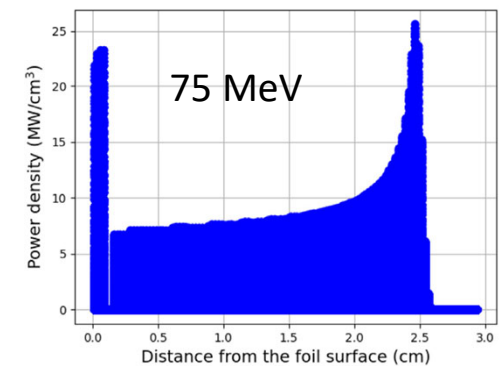
Properties of the fine-grain G-348 isostatic graphite (by MWI Carbon & Graphite solutions [11]).

Property	Value
Density	1.92 g/cm ³
Grain size	0.008 mm
Ash content	≤ 150 ppm
Specific resistance	10 mΩm
Flexural strength	60 MPa
Tensile strength	42 MPa
Coeff. thermal expansion (20–1000 °C)	5.5·10 ⁻⁶ /°C
Thermal conductivity (20 °C)	128 W/m/°C
Specific heat capacity (20 °C)	677 J/kg/°C
Young's modulus	12.3 GPa

Material	TZM	Graphite	Copper	Stainless steel
FC Component	Foil	Collector	Heat sink	Water pipes
Density (g/cm ³)	10.22	1.92	8.9	7.75
Poisson's ratio	0.3	0.13	0.34	0.31
Young's modulus (GPa)	325	11.5	125	193
CTE (10 ⁻⁶ /°C)	4.9	5.5	16.7	17
Isotropic TC (W/m/°C)	118	128	398	15.1
Specific heat (J/kg/°C)	255	677	385	480



(a)



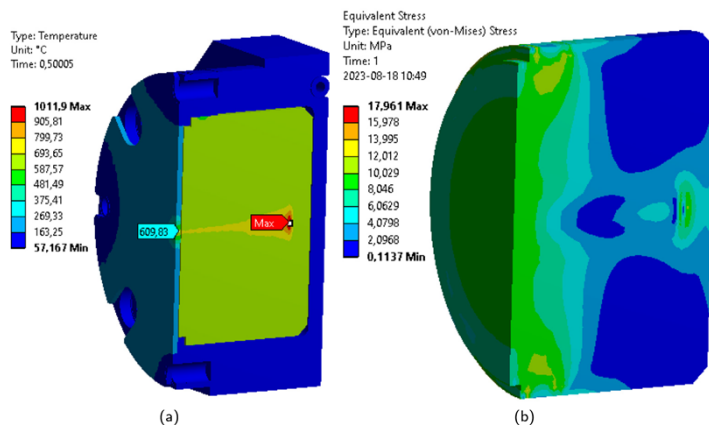
(b)

ANSYS Simulation of ESS DTL4 FC

三种类型的ANSYS模拟，需考虑与温度相关的材料属性

- ◆ 瞬态热模拟，用于计算温度随时间变化的趋势
- ◆ 准静态结构模拟，用于计算结构变形以及（冯·米塞斯等效应力、拉应力和压应力）
- ◆ 稳态模拟，以确定何时达到热平衡

质子束热量沉积在石墨中，其抗拉强度为42兆帕，而其抗压强度未知，因此假定其至少与抗拉强度相同。采用了1.5的安全系数。因此，为石墨热沉积块定义了28兆帕的最大允许等效应力。每次模拟脉冲开始时，假定冷却水温度为25℃。



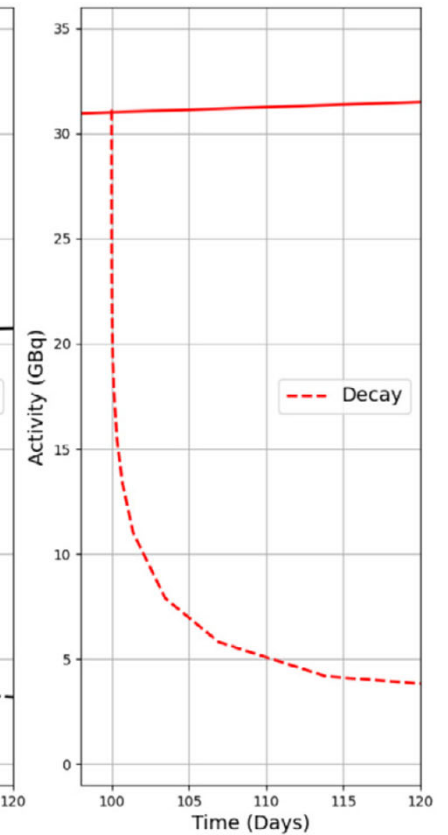
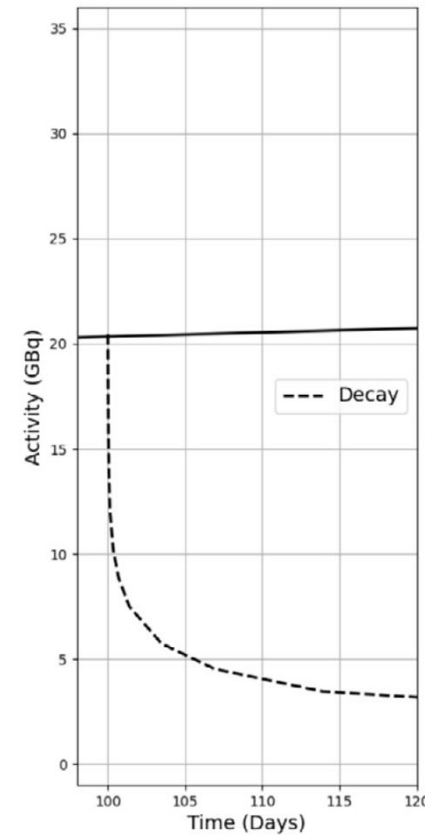
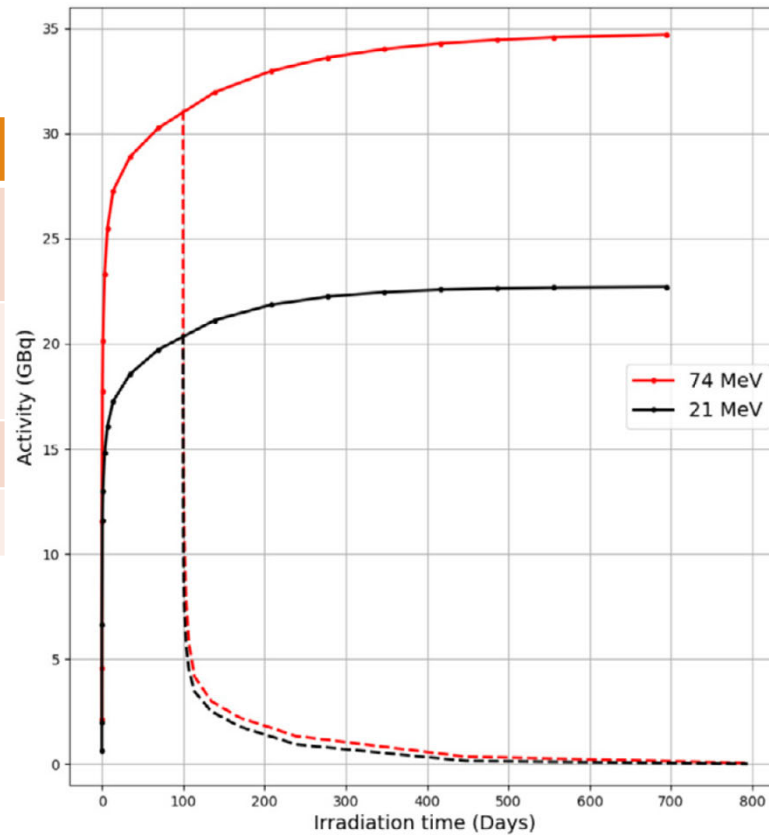
65 mA, 75 MeV, 50 μs 温度和应力分布

Case	Mode	E (MeV)	I (mA)	Δt (μs)	R (Hz)	T_F^{max} (°C)	T_C^{max} (°C)	$PSPS_F^{max}$ (%)	SPS_C^{max} (MPa)	Conclusion
A	OP	21	6	5	1	910	35	0.3	0	OK
B	NS	21	65	5	14	1550	80	1.3	0	NOK
C	NS	21	65	50	1 pulse	3718	–	–	0	NOK
D	OP	39	65	5	14	400	530	0	9	OK
E	NS	39	65	50	1	930	1150	0.1	35	NOK
F	NS	39	6	100	1 pulse	190	260	0	9	OK
G	NS	39	65	100	1 pulse	1650	1650	3.8	70	NOK
H	OP	75	65	5	14	360	790	0	10	OK
I	OP	75	65	50	1	610	1012	0	10	OK
J	NS	75	6	100	1 pulse	120	160	0	3	OK
K	NS	75	65	100	1 pulse	920	900	0.3	25	OK

Activation of ESS FC and Cooling Water

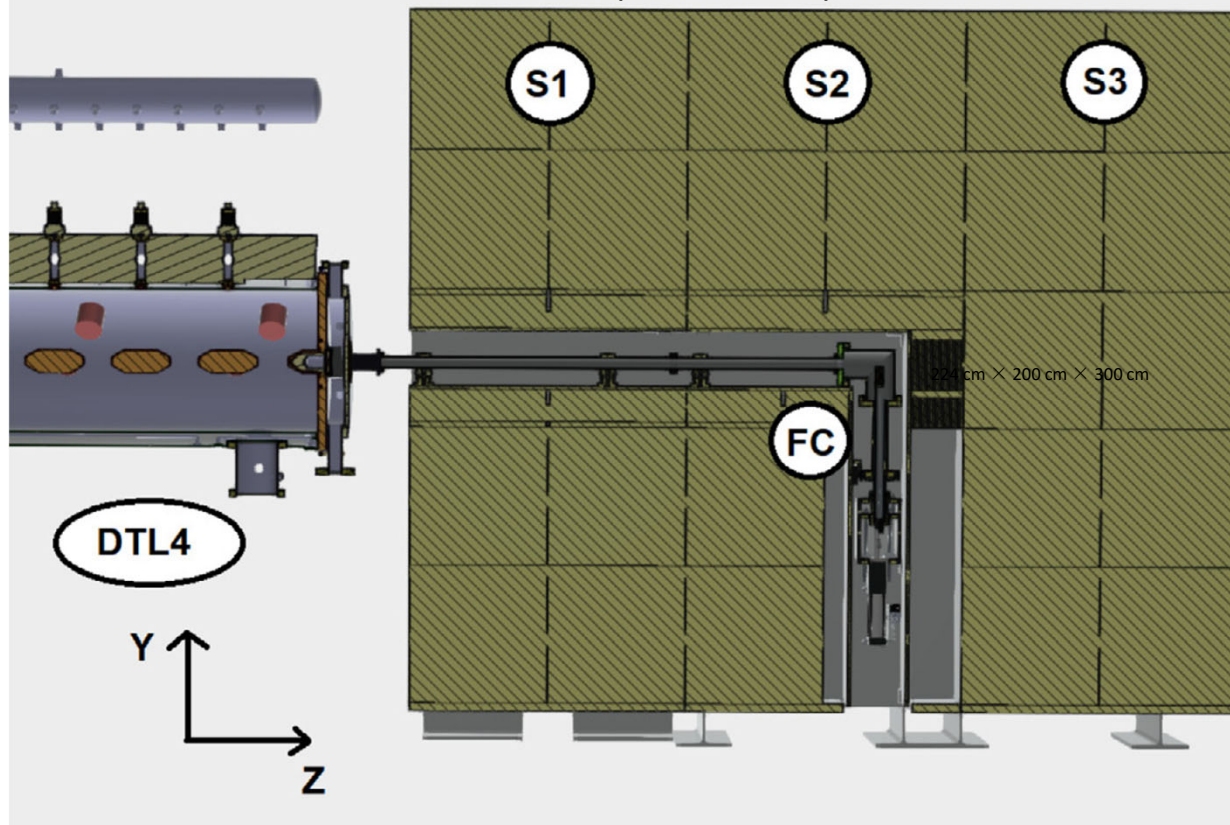
After irradiation 100 days with average proton current of 1 μA .

存在部位	放射核素成分
TZM箱	H-3 Be-7, Ca-45, Tc-99
铜质部件	H-3, Fe-59, Co-58, Co-60, Ni-63
石墨收集极	H-3, Be-7
冷却水	H-3



Radiation shielding, residual dose rates and air activation

S1: 主要屏蔽快中子 (74 MeV 模式)

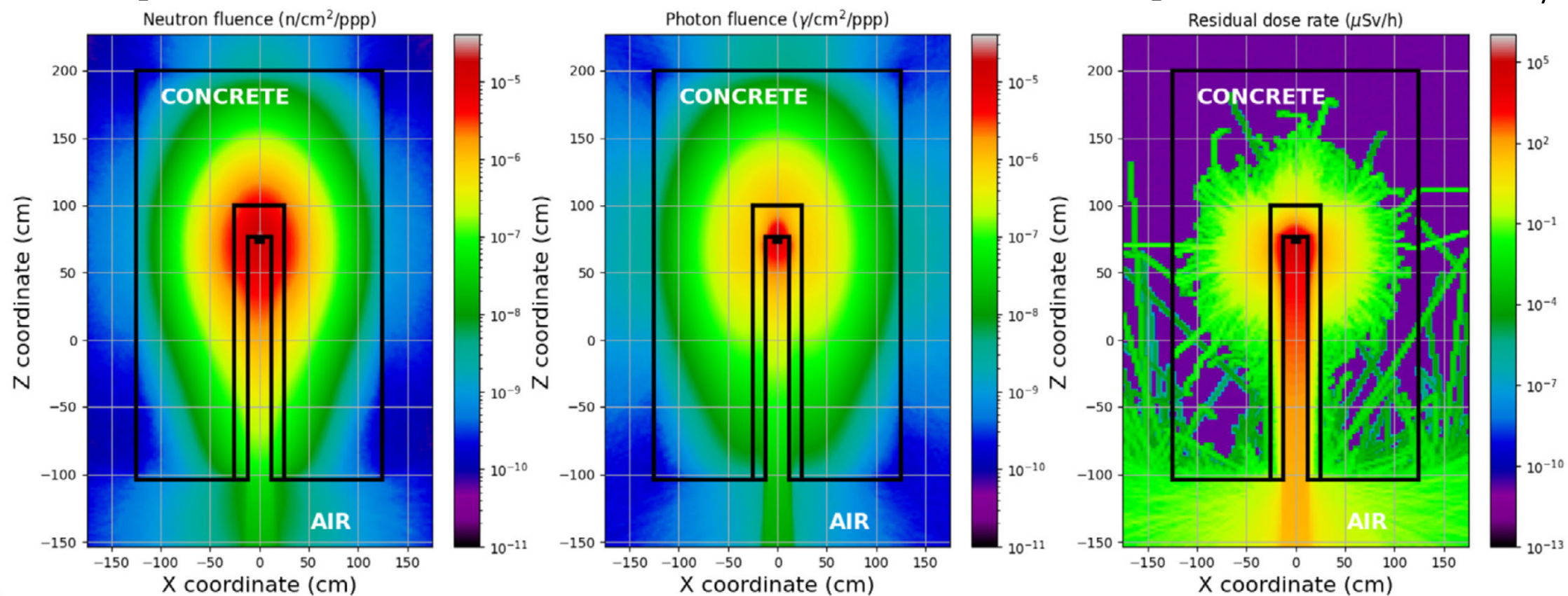


屏蔽体尺寸: 224 cm x 200 cm x 300 cm

屏蔽层的最内层部件由碳钢制成（碳钢比混凝土密度大），用于在尽可能靠近产生快中子的DTL4 法拉第筒处对快中子进行屏蔽。外部屏蔽部件由具有模块化结构的堆叠混凝土块制成，以便在没有起重机的隧道中进行安装和运输。由于DTL4 法拉第筒屏蔽层的S2扇区与S3扇区旁边的临时屏蔽墙之间的空间非常有限，法拉第筒的精确对准变得复杂。因此，在安装到欧洲散裂中子源（ESS）隧道之前，该装置在实验室中使用便携式测量臂进行了基准定位，最终可以 $\pm 4\text{mm}$ 的精度推断法拉第筒在束流轴上的定心情况。

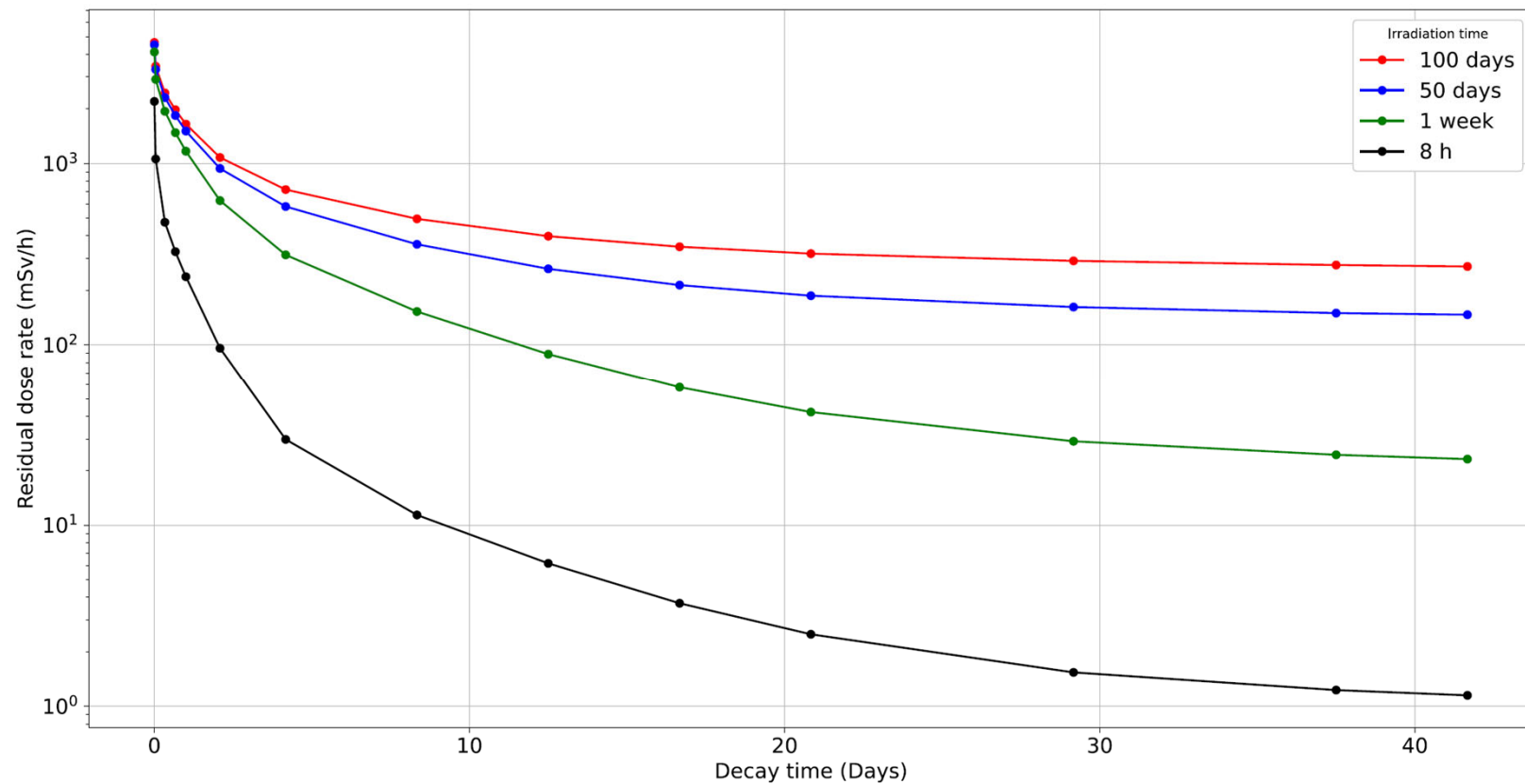
屏蔽体内中子、 γ 通量及残余剂量率计算 (ESS DTL4 FC in 74MeV mode)

Residual dose rate after 50 h of irradiation and 2 h of decay



Residual Dose Rates Calculation for ESS DTL4 FC

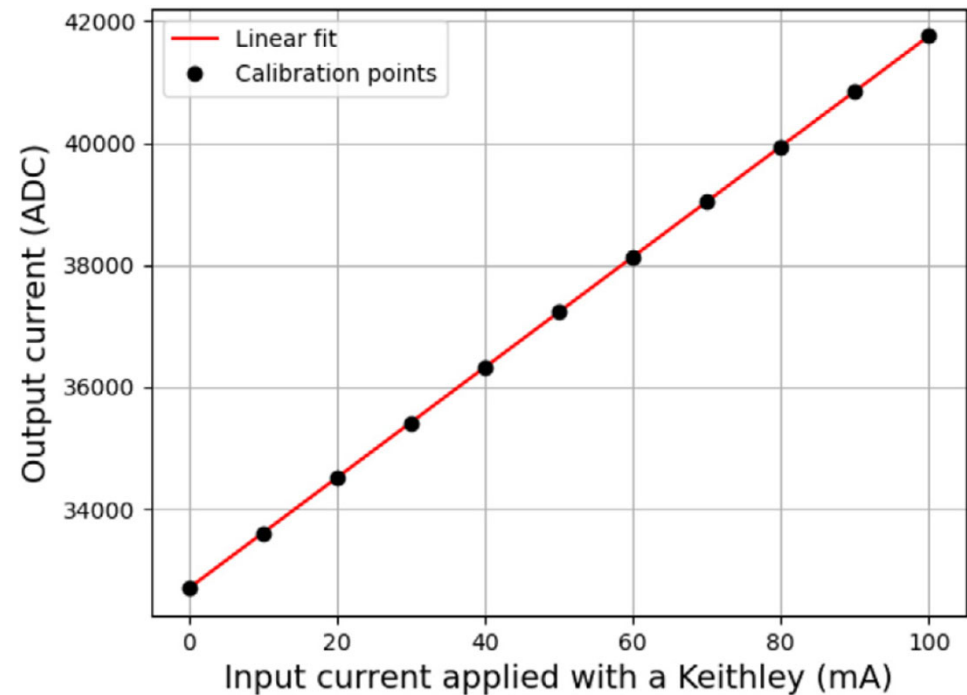
74MeV Proton ($1\mu\text{A}$) with 4 Possible Cumulative Irradiation Times



Controls, operation and measurements

法拉第筒校准

- ◆ 电流源（吉时利6221型）
- ◆ 标定范围：[0.1, 100] mA
- ◆ 标定步长：10 mA



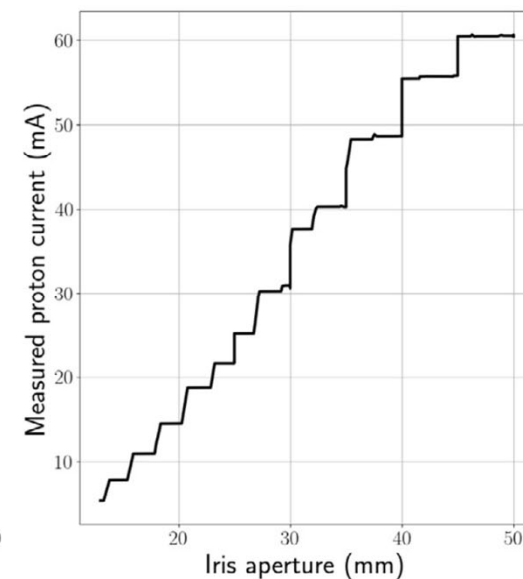
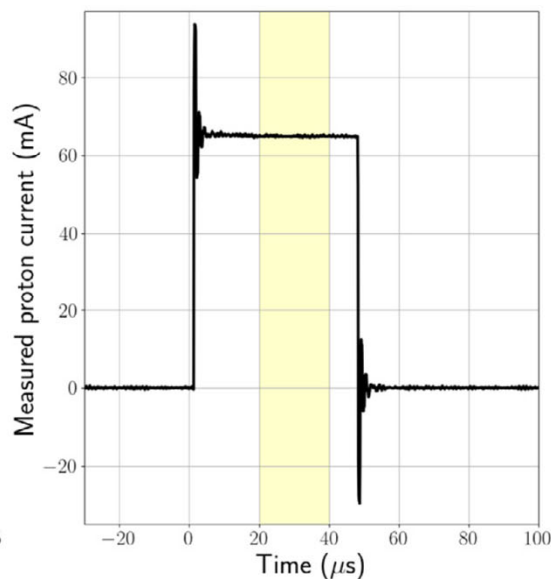
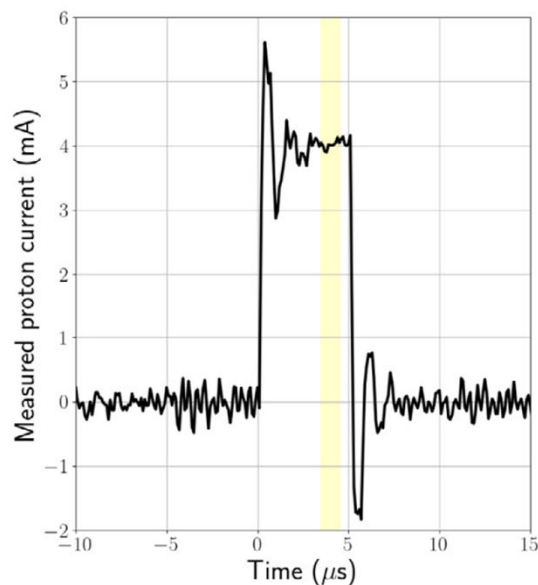
注入和测量的校准脉冲通过Jupyterlab以.hdf5格式保存

ESS DTL4 法拉第筒在调束中的测量情况

Operational parameters on the DTL4 FC during Commissioning (C) and Tuning (T) with 74 MeV protons.

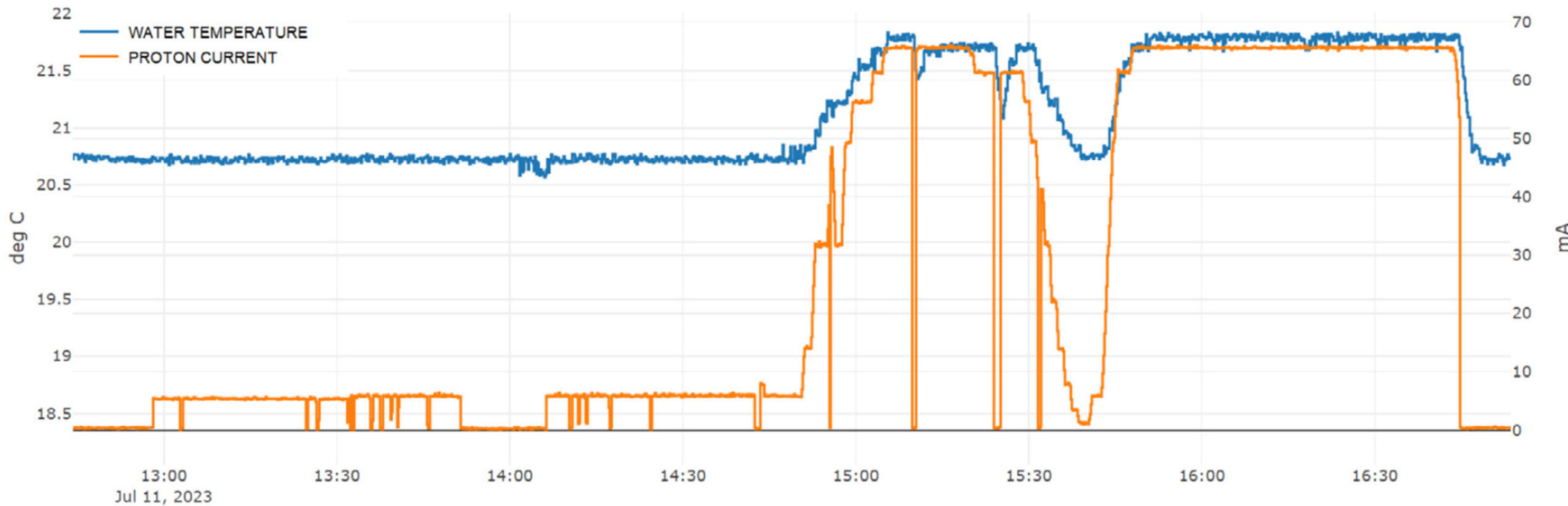
Mode	Current (mA)	Pulse (μ s)	Rate (Hz)
PROBE	6	5	1
FAST-C	6	5	14
RF-TEST	6	50	1
SLOW-C	62.5	5	1
FAST-T	62.5	5	14
SLOW-T	62.5	50	1

(左图) 所谓“探测”束模式下最短脉冲的示例
(中图) 所谓“慢调谐”束模式下最长脉冲的示例
(右图) 中的图显示了测量到的质子电流随逐步增大的光阑孔径的变化情况。



法拉第筒冷却水温与测得流强的对比

Measured proton current (in mA) by the DTL4 FC as a function of the time, and corresponding recorded temperature of the cooling water (in °C).



LEDP法拉第筒初步设计考虑

部件	材料	尺寸（直径 × 厚度）	功能
入口衰减器	TZM (90%Mo+8%Ti+2%Zr)	Φ40mm×1mm	分散束流能量，降低收集极热负荷
次级电子抑制环	316L 不锈钢	Φ45mm×5mm (环宽 3mm)	施加 - 1500V 偏压，抑制电子逃逸
主收集极	等静压石墨 (G-348)	Φ40mm×30mm	完全吸收 80MeV H ⁻ (射程≈25mm)
水冷热沉	无氧铜 (OFHC)	Φ60mm×20mm	传导热量至冷却系统
冷却通道	316L 不锈钢管	内径 2mm, U 型布局	水流速度 1.5m/s, 压力 6bar

讨论

人员安排

任务分工	人员
探测器负责人	黄蔚玲
机械设计	吕永佳
FLUKA/ANSYS	张刚/吕永佳
电子学	束测
控制	控制
真空	真空

时间进度安排：2027年4月安装调试

经费预算：待定

谢谢！