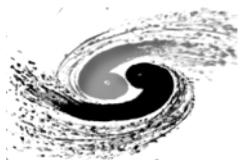




CSNS-II工程加速器进展

中国科学院高能物理研究所
刘华昌 (CSNS加速器团队)

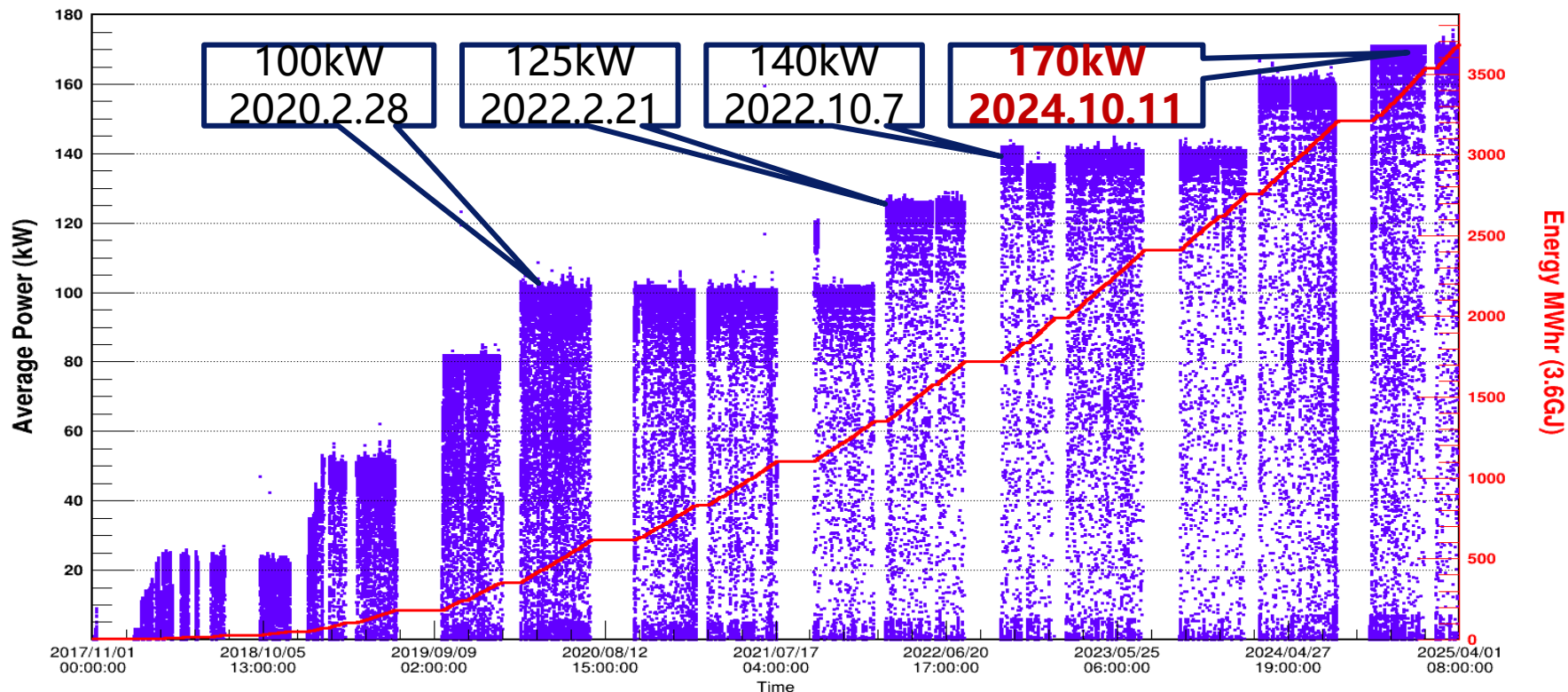
2025年10月14日



加速器束流打靶功率历史曲线



- 2024年10月，束流功率达到170kW，并实现稳定运行；
- 2025年10月，RCS注入区升级改造调束完成，恢复供束；



CSNS-II加速器主要指标



直线加速器能量提升到300MeV

超导直线加速器

束流功率增加到500kW

靶站提升500kW

新建2条实验终端

新建谱仪和实验终端11台

束流指标	一期	二期
质子束功率 (kW)	100	500
脉冲重复频率 (Hz)	25	25
打靶束流能量(GeV)	1.6	1.6
束流平均流强 (μA)	62.5	312
直线束流能量(MeV)	80	300
直线峰值流强(mA)	15	40
直线束流脉宽(μs)	400	600

CSNS campus, 2024, 0.267km²

Linac-II & Cryogenic Bldg.

Floor Area: 5527m²
Bldg. Height: ~17m

Backscattering Spectrometer Experimental Station

Floor Area: 947m²
Bldg. Height: ~18m

LLRW Storage room

Floor Area: 1254m²
Bldg. Height: ~13m

LINAC

LRBT/RTBT

RCS

Target Station

High-energy Proton Experimental Bldg.

Floor Area: 4874m²
Bldg. Height: ~23m

User Laboratories Bldg.

Floor Area: 6475m²
Bldg. Height: ~19m

Machine
Area

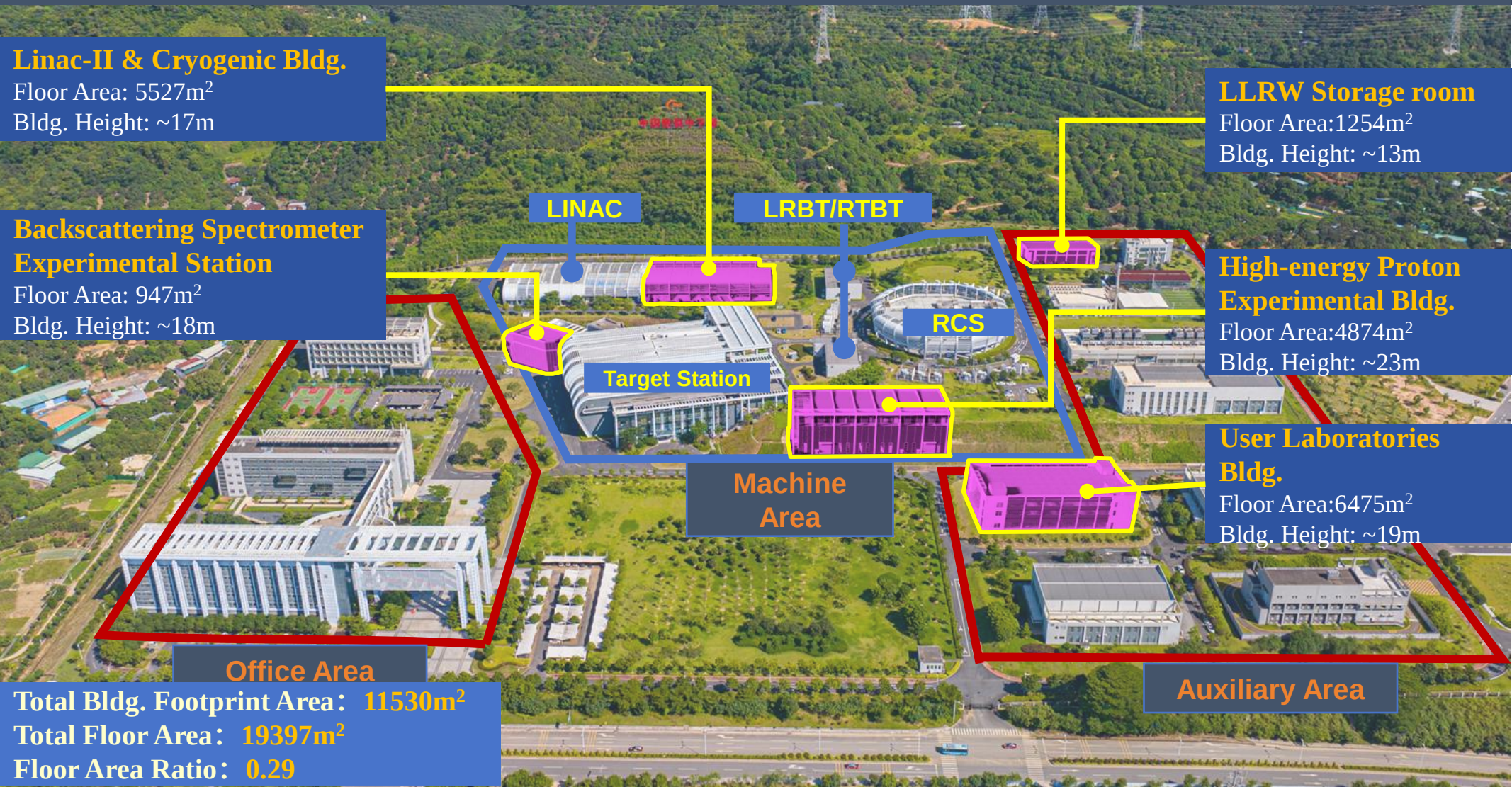
Office Area

Auxiliary Area

Total Bldg. Footprint Area: 11530m²

Total Floor Area: 19397m²

Floor Area Ratio: 0.29



CSNS-II工程队伍及组织结构



专业门类齐全的工程建设队伍
分总体下辖**19**个子系统

人员总数：273人

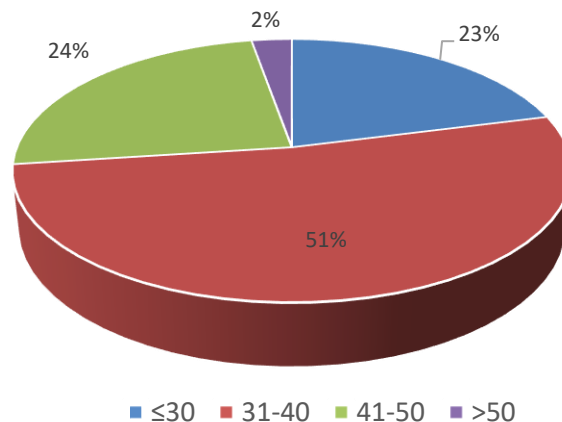
□在编：141

□博后：36

□聘用：35

□学生：61

人员年龄占比



CSNS-II加速器CPM计划

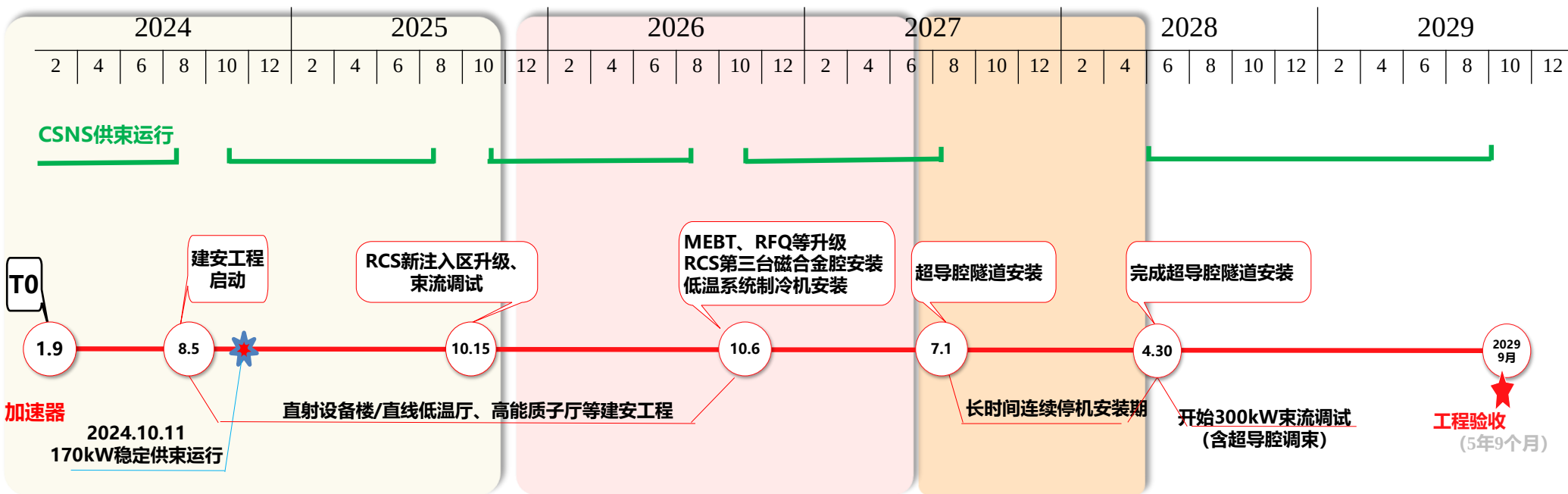


CSNS-II工程建设周期5年9个月；特点/难点：设备研制进程，须兼顾CSNS运行需求

三个里程碑节点任务：**2025年，RCS注入区改造；**

2026年，RFQ、MEBT升级；

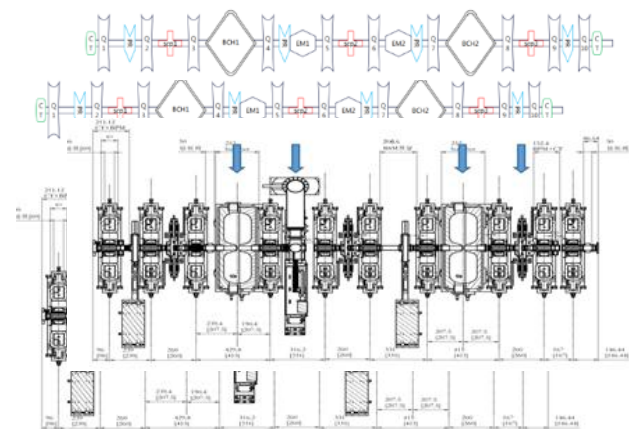
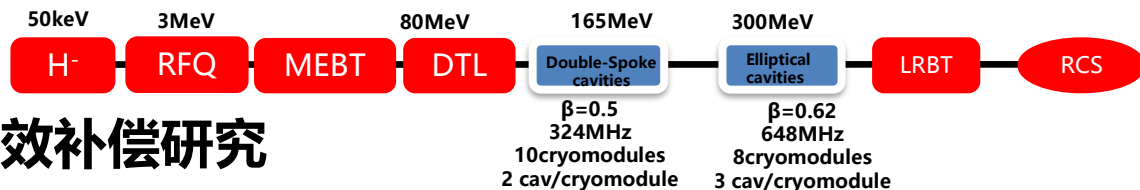
2027.7-2028.4，超导直线加速器安装调试



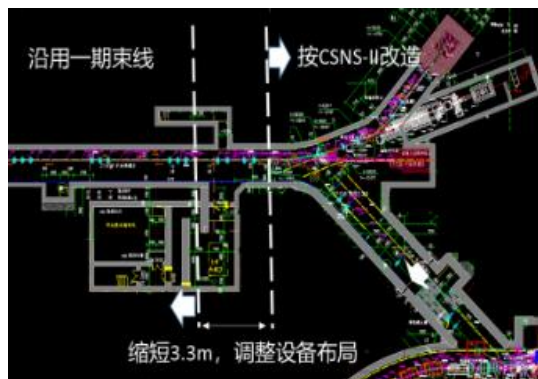
CSNS-II直线加速器



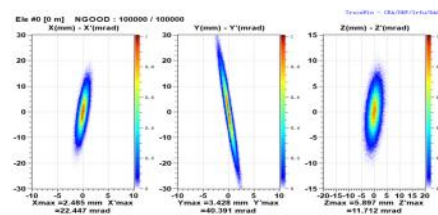
- 完成MEBT 总体方案
- 超导直线加速器动力学优化和失效补偿研究
- 完成LRBT 45°反对称偏转段及LDBT 总体方案
- 直线加速器高流强调试 ($I=30\text{mA}$) 束流通过率99%，束流能量80.3MeV
- 伴生质子束流实验，MEBT段成功观测到信号与模拟值一致



MEBT总体方案

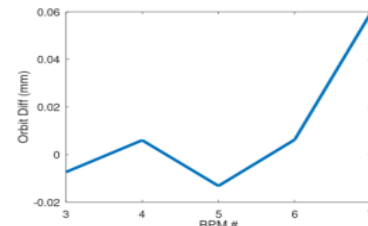
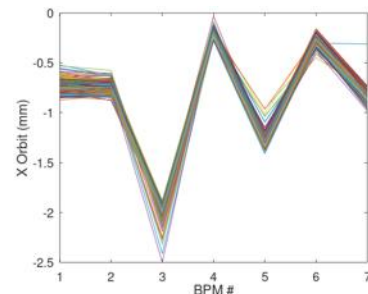


45°反对称偏转段及LDBT



	α	β	$\epsilon_{\text{RMS, Norm}}$ Pi.mm.mrad
X-X'	-0.9596	0.1293	0.2369
Y-Y'	2.7264	0.2403	0.2298
Z-Z' (理论值)	-0.366	0.522	0.365

横向发射度测量和优化



直线轨道测量和优化
模拟与测量RMS差值 $<\pm 0.07\text{mm}$

低能束流传输段(LEBT)

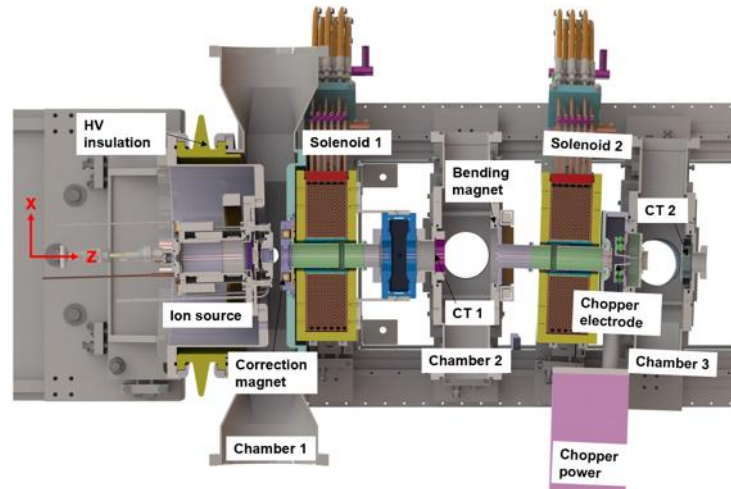
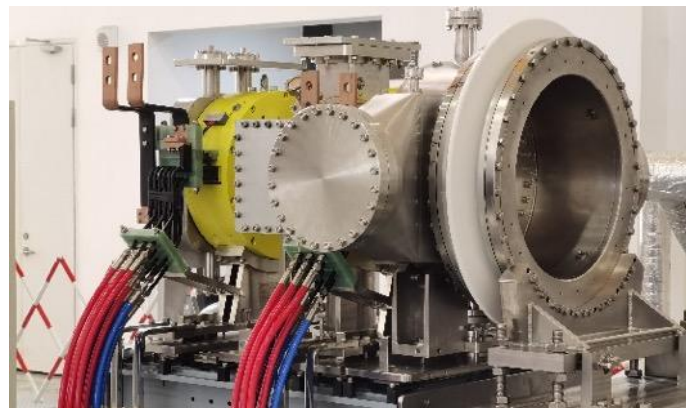
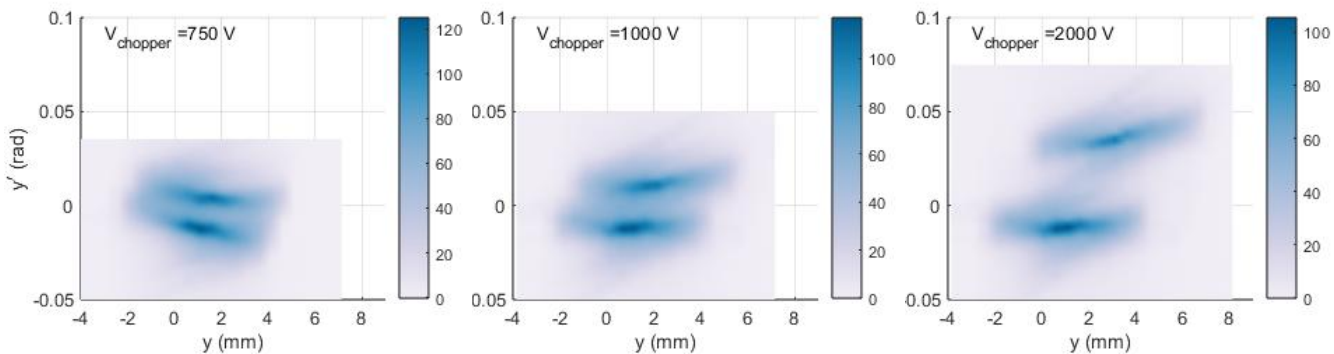


□ 二期技术指标要求

- 整体长度小于1米，负氢离子束通过率大于90%
- LEBT出口伴生质子与负氢束比例小于0.05%
- 切束区(RFQ入口)真空小于 $5\text{E-}4\text{Pa}$

□ 利用1.8度偏转过滤质子

- 伴生质子与负氢离子束比例小于万分之一
- 首次观测到切除和通过束流随切束电压变化



离子源与LEBT安装结构图

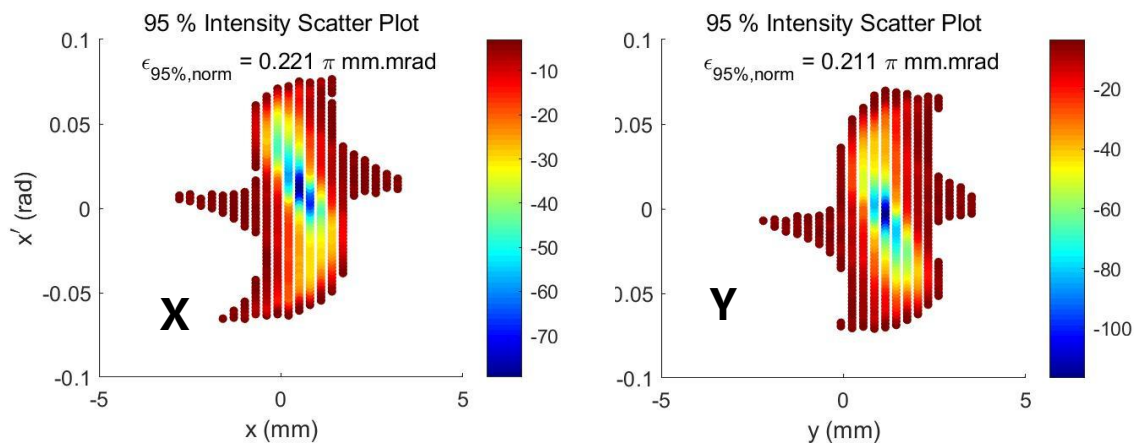
射频负氢离子源

□ 二期技术指标要求

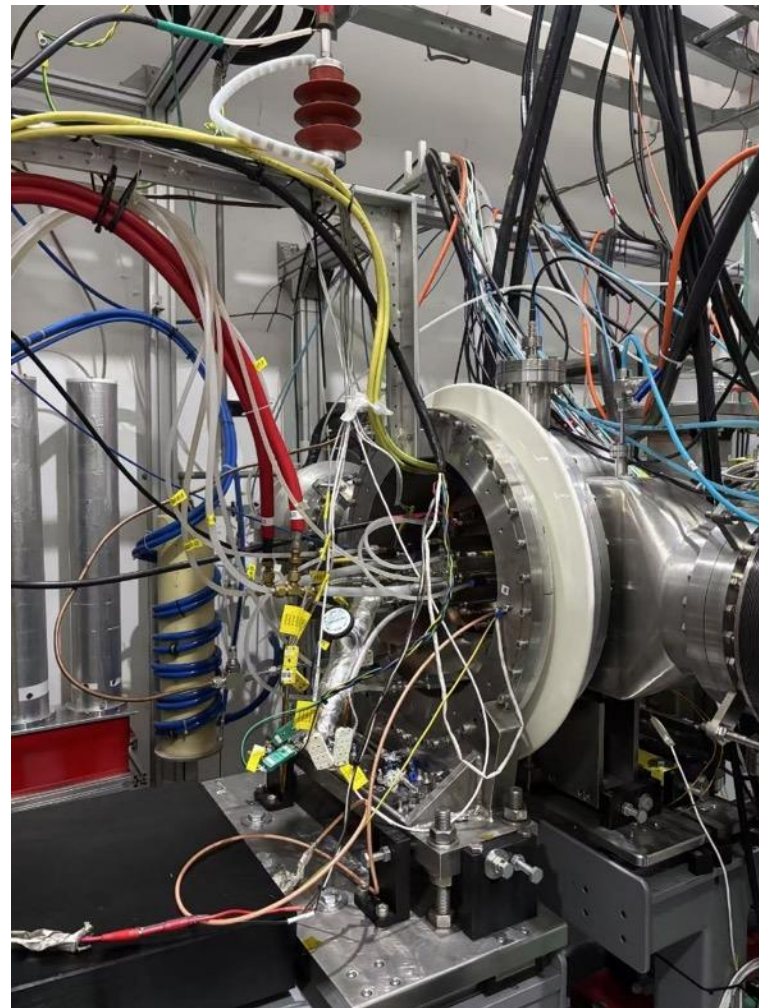
- 束流强度50mA+,
- 95%束流归一化发射度 $<0.26 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$

□ 实验室通过50Hz运行测试

□ 束流强度超过60mA



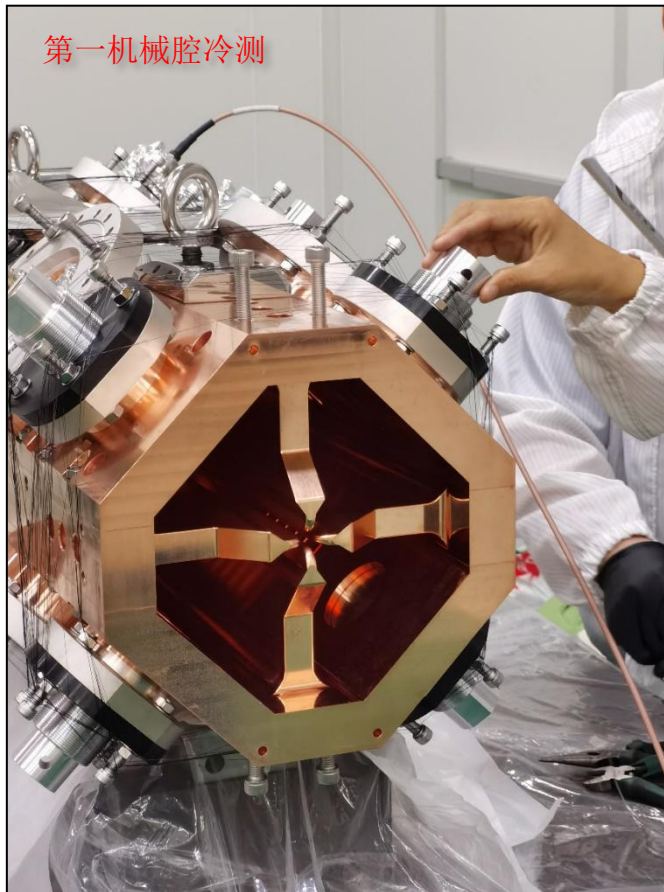
60mA 下测得发射度 $0.22 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$



设计参数

数值

频率 (MHz)	324
极间电压(kV)	77
能量(MeV)	3.025
脉冲流强(mA)	60
注入能量(keV)	55
平均孔径(mm)	3.6
极头半径(mm)	3.204
E_{max} (MV/m)	29.9(1.68kilp)
电极长度(mm)	3989
腔耗(kW)	407
耦合度	1.29@40mA
传输效率	97.2%@60mA



RFQ总体设计原则:

- 提高最大束流强度
- 提高通过率
- 降低极间电压

RFQ加工进展:

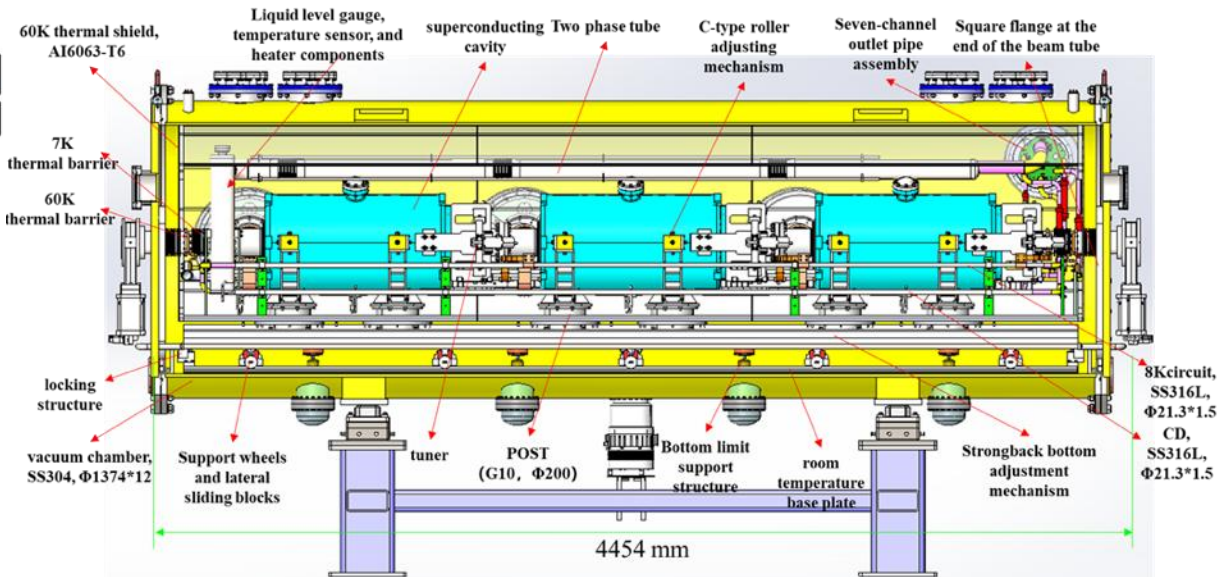
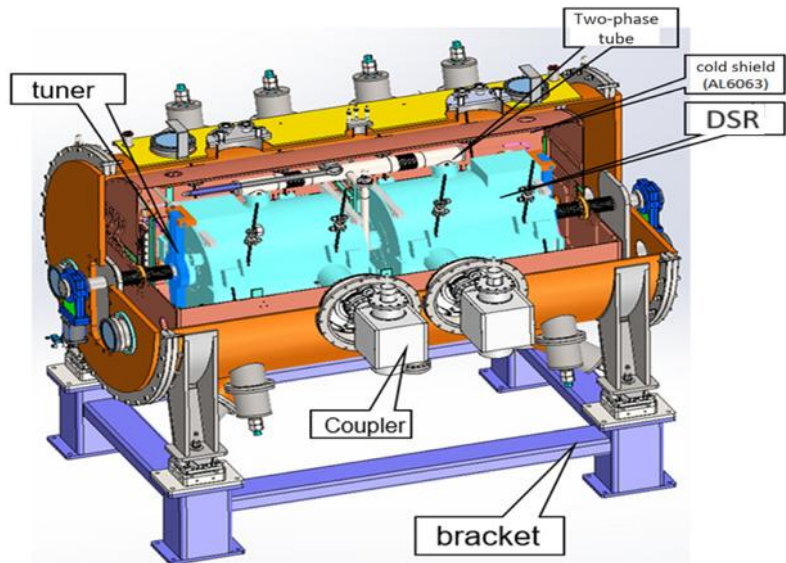
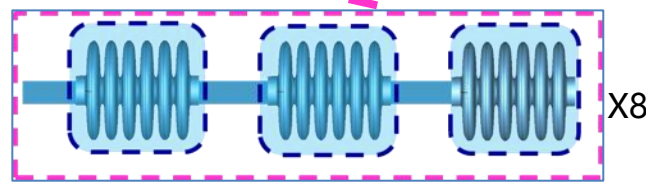
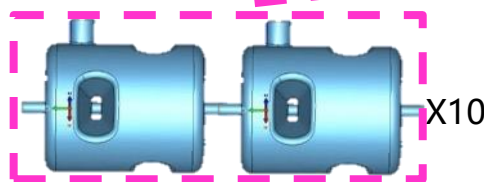
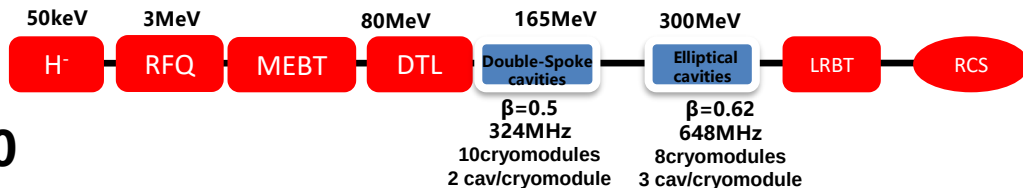
- 第一二腔已经完成冷测。
- 第三腔已经完成加工。
- RFQ耦合器已经完成了第一套加工，真空检测无漏。

超导直线加速器



□ 系统建设内容

- 324MHz 双spoke超导腔模组×10
- 648MHz 椭球超导腔模组×8
- 低温管线≈90m



双spoke超导腔



□ 模组样机已于2024年完成水平测试

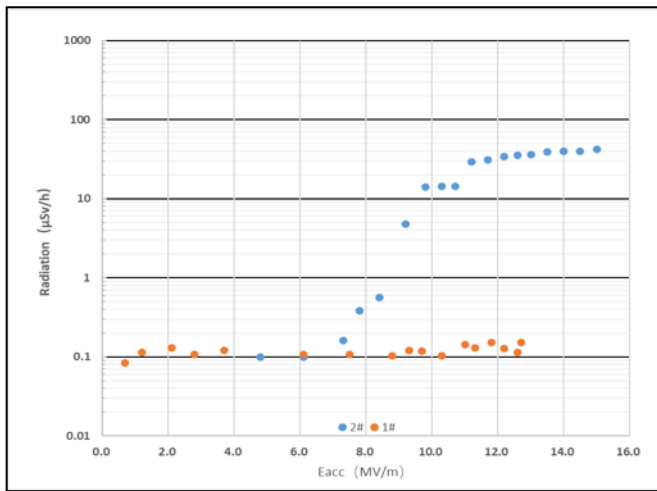
#1最大加速梯度 **12.8MV/m**

#2最大加速梯度 **15.2MV/m** (设计值9MV/m)

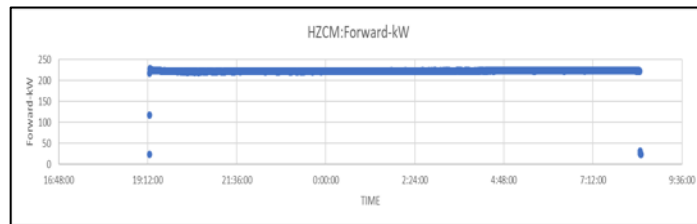
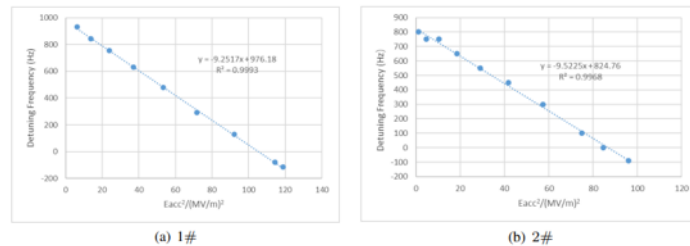
洛伦兹失谐系数 $\sim -9\text{Hz}/(\text{MV/m})^2$ (设计值 $-10.5\text{Hz}/(\text{MV/m})^2$)

自激测试在 $E_{\text{acc}}=15\text{MV/m}$ 稳定13个小时

水平测试结果: Rad vs. E_{acc}



水平测试结果: 洛伦兹系数测量



水平测试结果: 超导腔高场区稳定性测量

parameter	prototype	improved
Frequency(MHz)	324	324
β_{opt}	0.5	0.5
E_p/E_{acc}	4.1	3.44
$B_p/E_{\text{acc}}(\text{mT}/(\text{MV/m}))$	9.2	8.86
R/Q (Ω)	410	401
G (Ω)	120	118
Beam tube diameter (mm)	50	50
$E_{\text{acc}}(\text{MV/m})$	7.3	9
LFD ($\text{Hz}/(\text{MV/m})^2$)	-10.5	-4.56

双spoke腔电磁场分布及设计指标



双spoke模组样机水平测试

Spoke模组长途运输



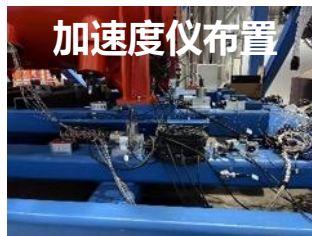
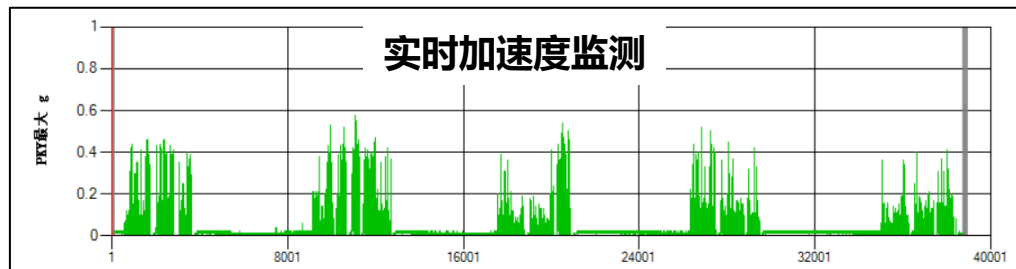
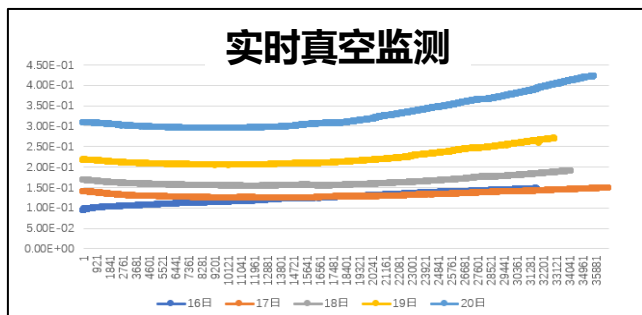
□ 运输实验已完成

气垫车+减震框架+加速度监测+真空监测

北京怀柔平台-散裂中子源, **2400公里**

未出现真空泄漏、加速度值最大约0.6g

腔串位移测量值最大约0.2mm



椭球超导腔



□ 椭球超导腔垂直测试

#1最大加速梯度 **24MV/m**

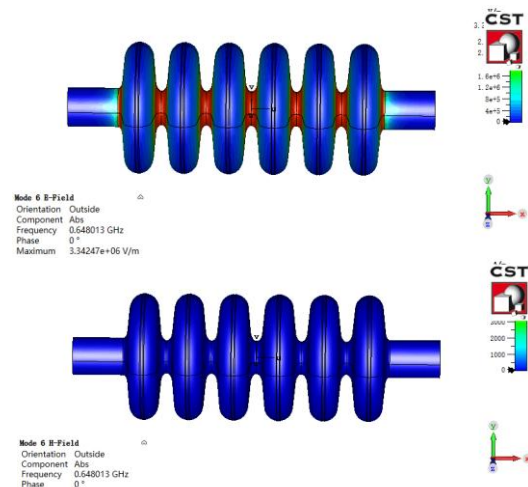
#2最大加速梯度 **26MV/m**

#3最大加速梯度 **18.8MV/m**

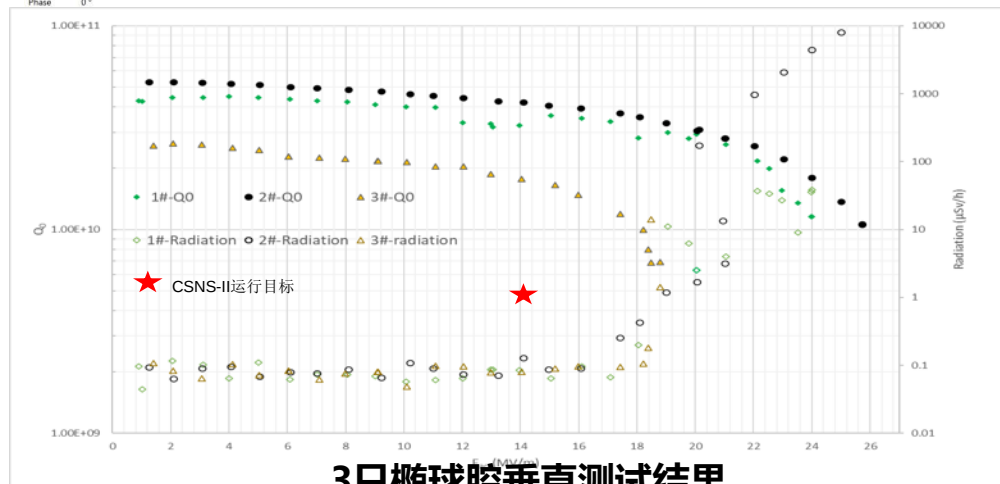
设计值14MV/m



椭球腔BCP酸洗处理特殊工装



parameter	Design value
Frequency(MHz)	648
β_{opt}	0.62
E_p/E_{acc}	2.53
$B_p/E_{acc}(\text{mT}/(\text{MV}/\text{m}))$	5.45
$R/Q (\Omega)$	309
$G (\Omega)$	177
Beam tube diameter (mm)	120
$E_{acc}(\text{MV}/\text{m})$	14
$\text{LFD} (\text{Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2)$	-1.62

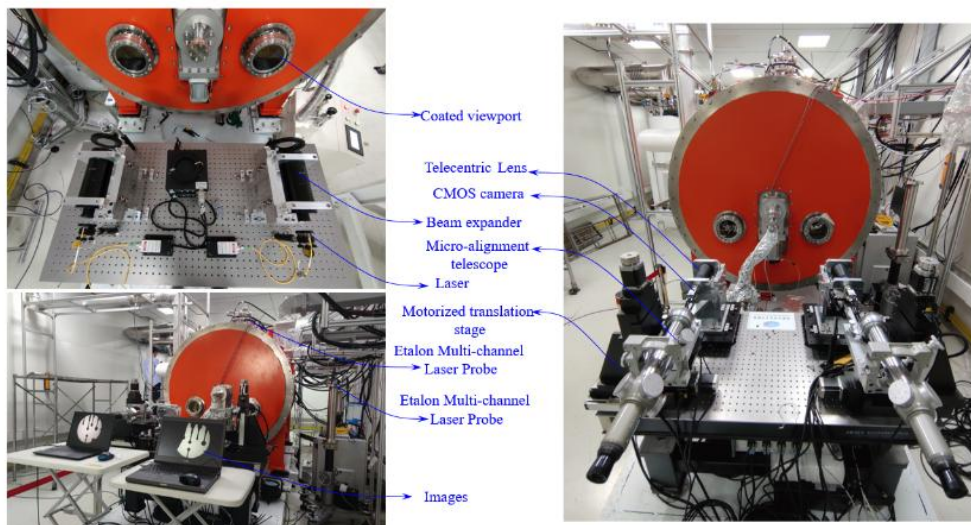


3只椭球腔垂直测试结果

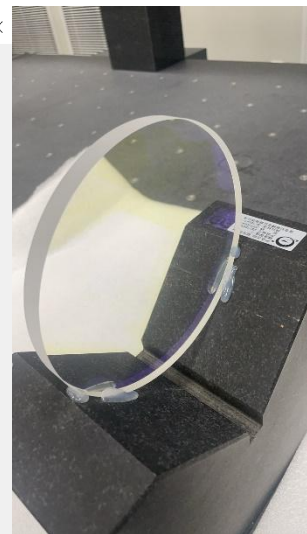
超导腔准直



1、研制了超导腔降温测量系统：相对位移监测系统及绝对位置测量系统；
对双SPOKE样机模组进行了降温测量，结果显示：两个腔中心高程与理论值偏差-0.4mm左右,整体偏下；两个腔中心横向与理论值整体偏差为1.1mm左右，平移后偏差在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内；两次降温后的绝对位置重复性差值基本在0.2mm以内。



激光成像相对监测系统



激光测距绝对测量系统

- [illegible]

标准化GaN固态功率源系统



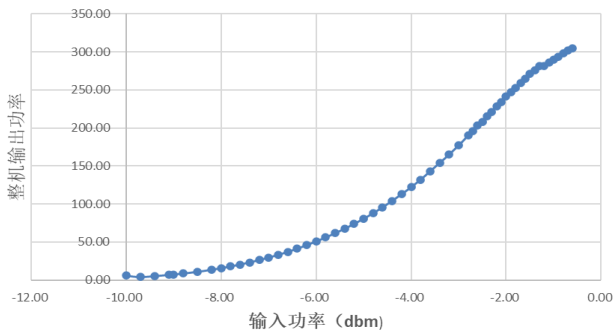
□ 研制进展

- ✓ **样机研制**: 4套160kW、1套300kW 全部完成出厂验收
- ✓ **应用**: 4套160kW用于超导腔水平测试, 1套300kW用于耦合器老练
- ✓ **标准化互换测试**: 已完成结构测试, 电气测试待试验

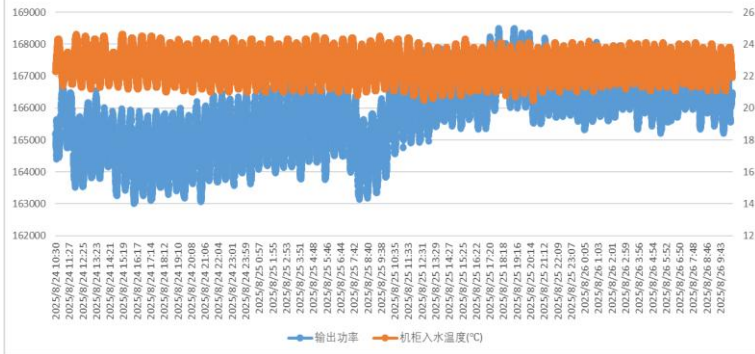
□ 研制情况

- ✓ 样机测试结果达到指标要求,
- ✓ 任意相位全反无故障, 48小时满功率稳定运行
- ✓ 2个插件无输出, 整机仍能输出300kW功率
- ✓ 不同厂家机柜实现并柜, 输出功率达到设计值

两个功放插件无输出



48小时带载稳定性测试



不同厂家并柜工作

648MHz/1.2MW速调管



- 1号管**已完成整管的排气。**
- 2号管芯正在排气台上处于升温阶段，3、4、5管子已在排队。
- 聚焦线圈已完成1套总装，其余阴极、陶瓷窗片等各零部件也已到位。
- 今年底可完成**5支速调管的排气。**
- 厂家新增2个排气台，后续年度批产量**>10支。**



第一支648MHz速调管配套的线圈及支架已完成制造

第一支648MHz速调管管芯已完成排气

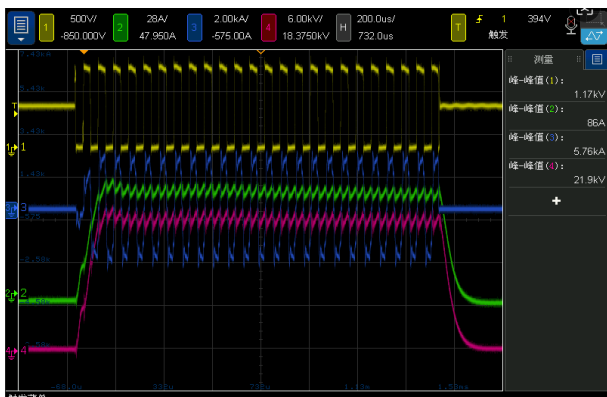
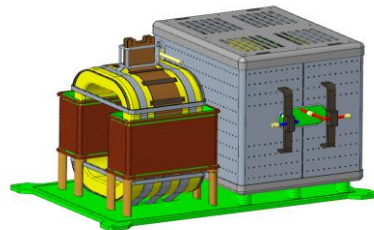
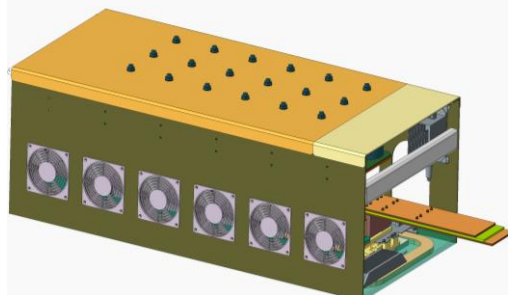
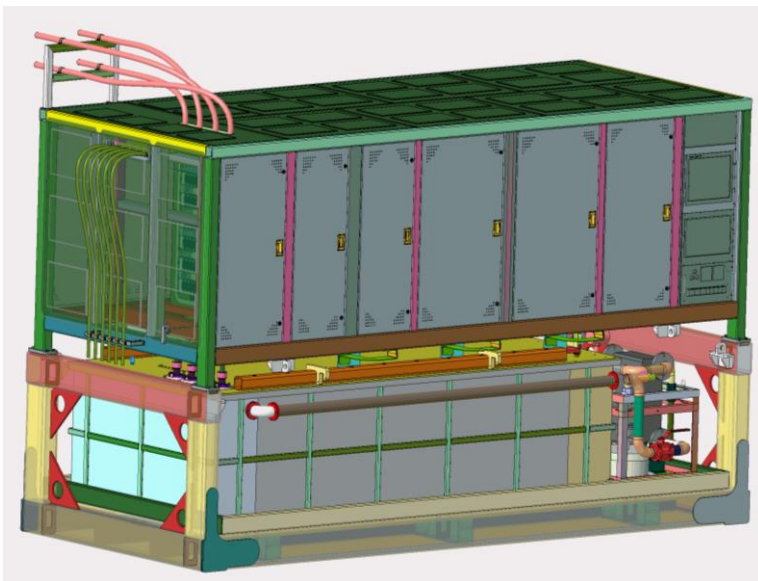
长脉冲固态调试器



□ 重频提升至50Hz，功率提升

已完成方案评审和单高压模块72小时稳定测试，正在进行H桥、高频脉冲变压器组件的安装调试、11月份进行第一套高功率整机的调试。

序号	项目	技术指标
1	脉冲负电压	120kV
2	脉冲电流	80A
3	脉冲重复频率	50Hz
4	脉冲平顶宽度	1.5ms
5	高压脉冲内顶降	$\leq 1\%$
6	上升沿时间	$\leq 200\mu\text{s}$
7	下升沿时间	$\leq 200\mu\text{s}$
8	高压纹波	$\leq 0.5\%$
9	高压过冲	$\leq 1\%$
10	脉冲间高压稳定度	$\leq 1\%$
11	负载打火响应时间	$\leq 6\mu\text{s}$
12	输入电流 THD(网侧)	$\leq 5\%$
13	效率	$\geq 85\%$



散束腔



□ RCS环注入能量抖动要求小于**0.3%**

□ 2台648MHz PIMS散束腔，分别进行能量抖动和能散校正

完成样机的设计加工和高功率测试

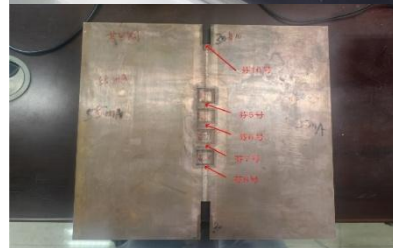
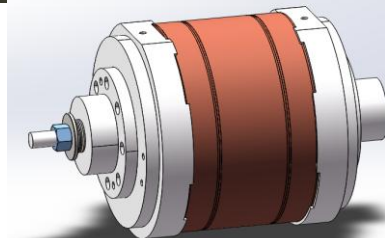
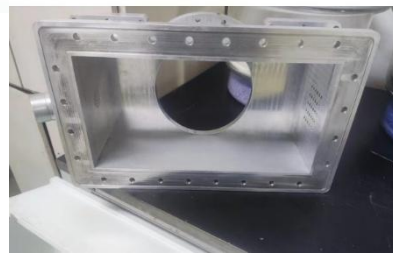
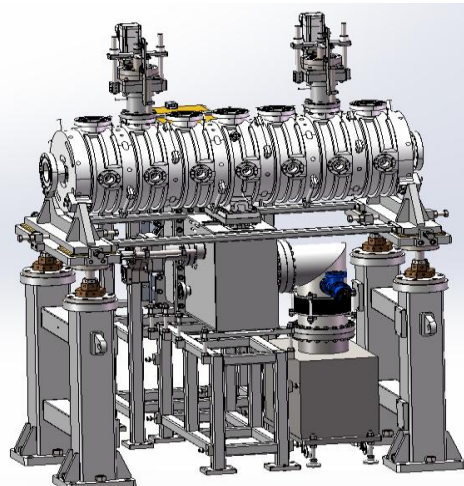
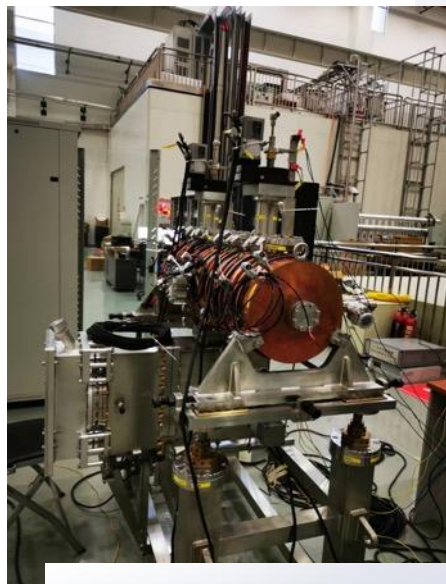
- ◆ 完成样腔设计及工艺探索
- ◆ 完成首台耦合度可调波导耦合器
- ◆ 完成散束腔低功率、高功率测试1.2MW

启动正式腔设计和加工制造

- ◆ 完成正式腔体和耦合器的物理设计、机械设计
- ◆ 进行关键工艺电子束焊接实验

目标熔深 $>7.5\text{mm}$ ，测得焊接收缩量

- ◆ 可动耦合器主体加工基本完成，待焊接和测试
- ◆ 预研腔用于第二个散束腔，满足物理设计要求



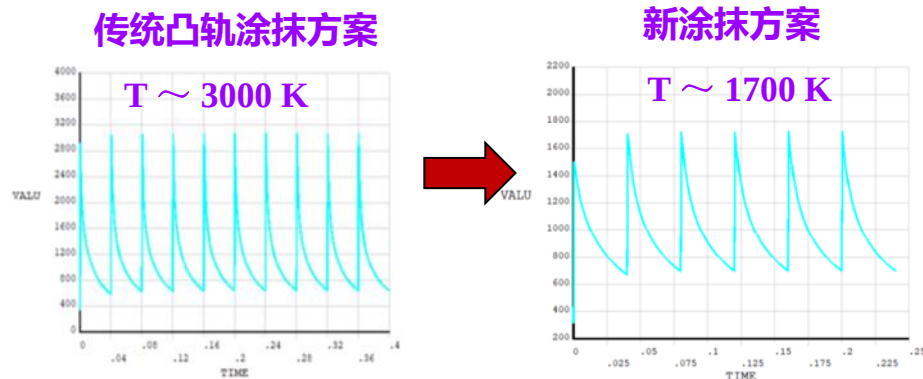
CSNS-II RCS注入区升级



□ 设计了**全新涂抹注入方案**，国际上首次将固定凸轨和水平涂抹凸轨合二为一，解决了“剥离膜峰值温度过高”的难题，并应用于CSNS-II 全新注入系统

优点

- 解决了剥离膜峰值温度过高的难题
- 实现相关和反相关涂抹自由切换
- 大幅降低边缘聚焦效应的影响
- 解决角度扫描对注入口和输运线所需大孔径难题
- 节省一套凸轨磁铁和电源，注入区布局更换优化
- 大幅降低残余H⁻束流造成辐射剂量



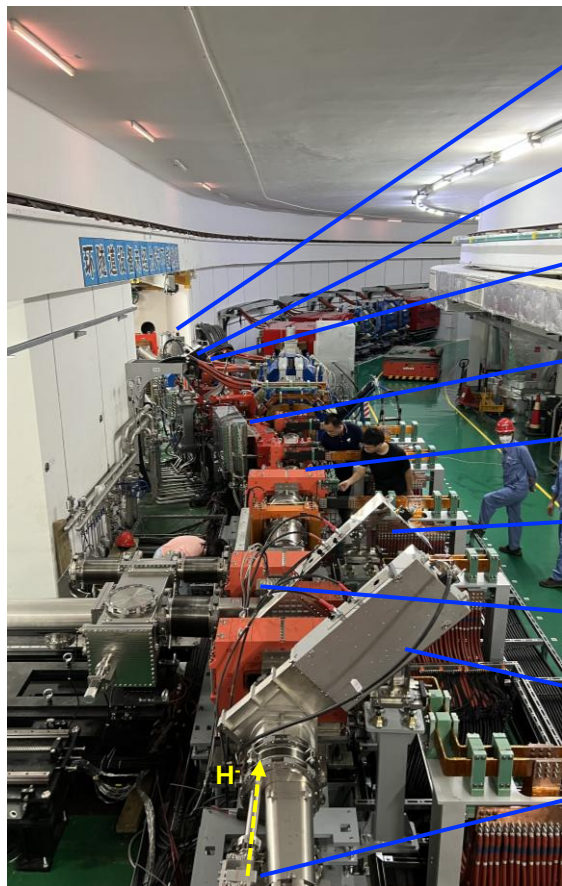
与J-PARC 相比优势

- ✓ 节省了一套凸轨磁铁和电源
- ✓ 极大放宽了对注入束流参数和注入口真空盒孔径的要求
- ✓ 节省了一套次剥离膜系统

与SNS相比优势

- ✓ 实现相关和反相关涂抹自由切换
- ✓ 节省了一套凸轨磁铁和电源
- ✓ 大幅降低残余H⁻束流产生辐射剂量

注入区：束测系统升级



INDVS
INDCT
INDMWS01
H0CT (p+)
R1BPM01
INMWS02
INECOL
INMWS01
LRBPM18

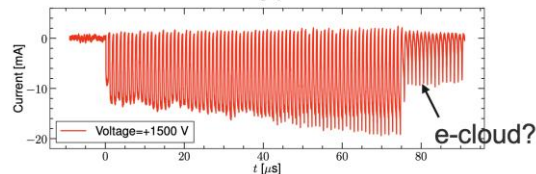
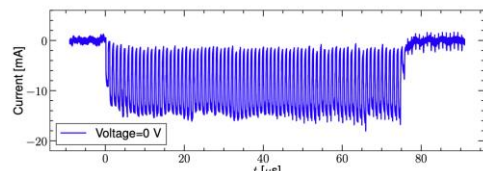
□ 完成9台探测器及电子学升级

- LRBPM18: 条带型BPM
- INMWS01-02、INMWS03: 多丝剖面探测器
- INECOL: 剥离电子收集器
- R1BPM01: 异形斜切式BPM
- H0CT、INDCT: 流强探测器 (p+)
- INDVS: 荧光屏剖面探测器

□ 全部探测器在RCS注入调试初期正常工作



剥离电子强度首次观测

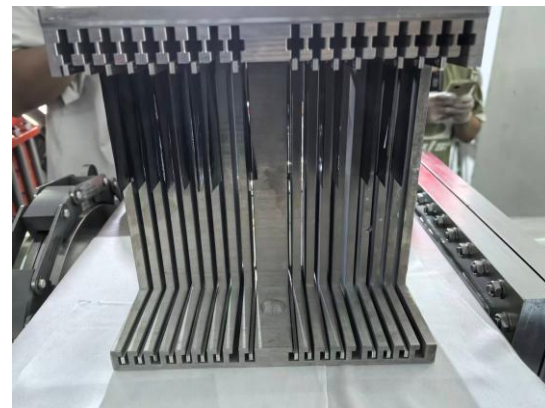
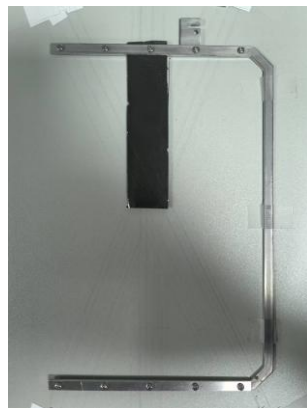
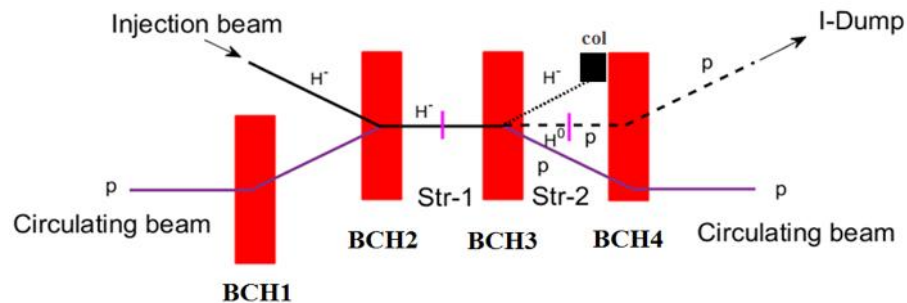


注入区：负氢剥离与剥离膜



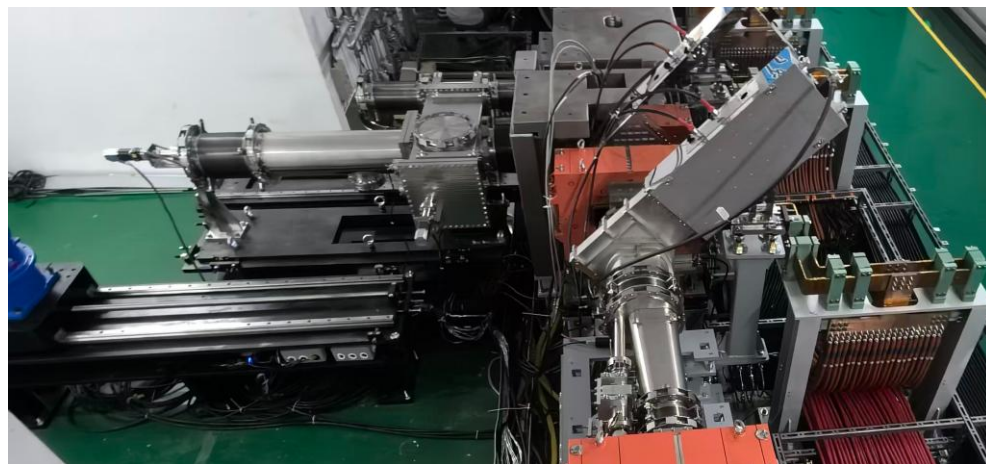
□ 自研剥离膜进行带束测试

□ 增加自动换膜系统



剥离膜安装方式及膜库

Parameters	Str-1		Str-2	
Energy (MeV)	300	350	300	350
Material	HBC	HBC	HBC	HBC
Structure	Double-layer	Double-layer	Double-layer	Double-layer
Transverse size (mm*mm)	20*60	20*60	20*60	20*60
Thickness (ug/cm ²)	260	300	450	500
Thickness deviation	≤±5%	≤±5%	≤±5%	≤±5%



主次剥离膜安装到位

注入区：脉冲磁铁和电源



□ 脉冲磁铁：

- 水平脉冲涂抹磁铁BCH1样机完成研制
- 批量磁铁6月中下旬陆续到货、完成测试



BCH1样机与脉冲磁测系统

□ 脉冲电源：共7台，3台完成出厂验收

- 脉冲电流峰值高：23000A
- 输出电压峰值高：3500V
- 电流变化率快：286MA/s
- 跟踪精度要求高：< 2%

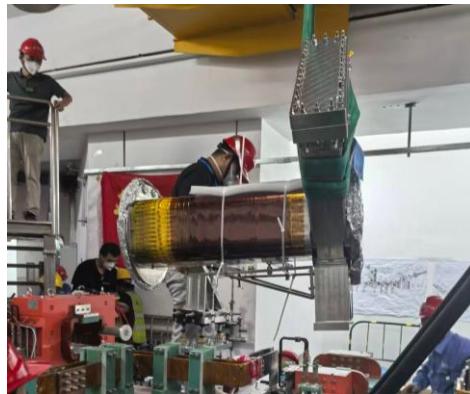


注入区：机械

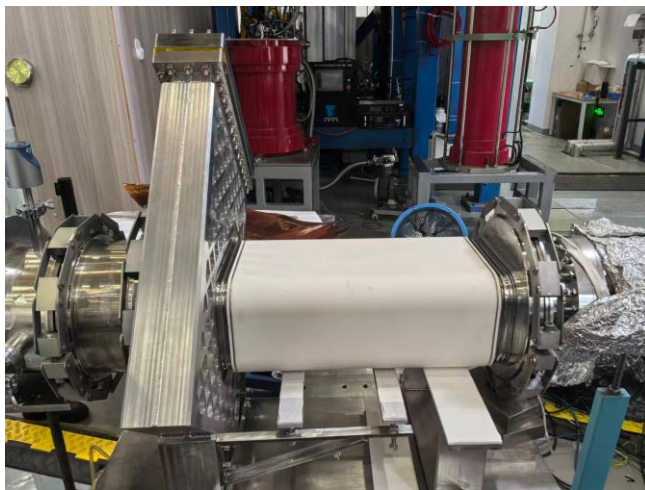


□ 大尺寸异型陶瓷真空盒

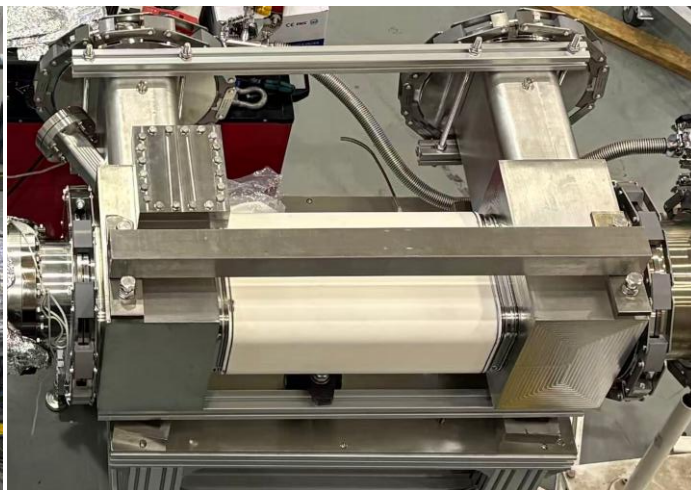
- 四个BCH真空盒已研制成功
- 完成氮化钛镀膜及屏蔽条安装



BCH1真空盒



BCH2真空盒



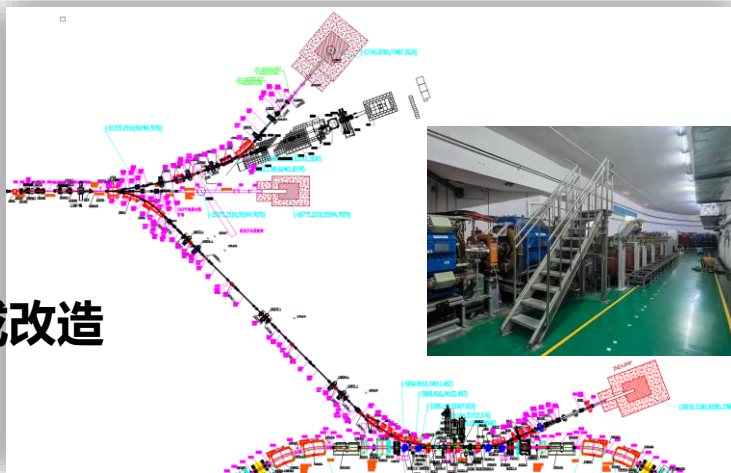
BCH3真空盒



BCH4真空盒

LRBT&注入区暑期升级改造 (6月20日~8月25日)

- 完成所有硬件设计和研制
- 完成LRBT&注入区屏蔽墙改造
- 完成注入区地面孔洞增扩孔
- 合理规划、精准施工、按时完成改造



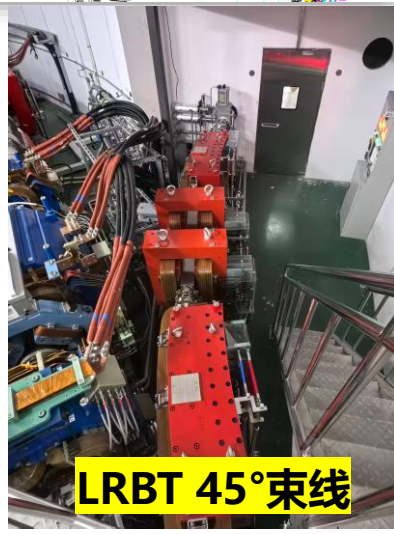
注入区及INDUMP束线



LRBT平移段



LDBT束线



LRBT 45°束线



LRBT 45°束线

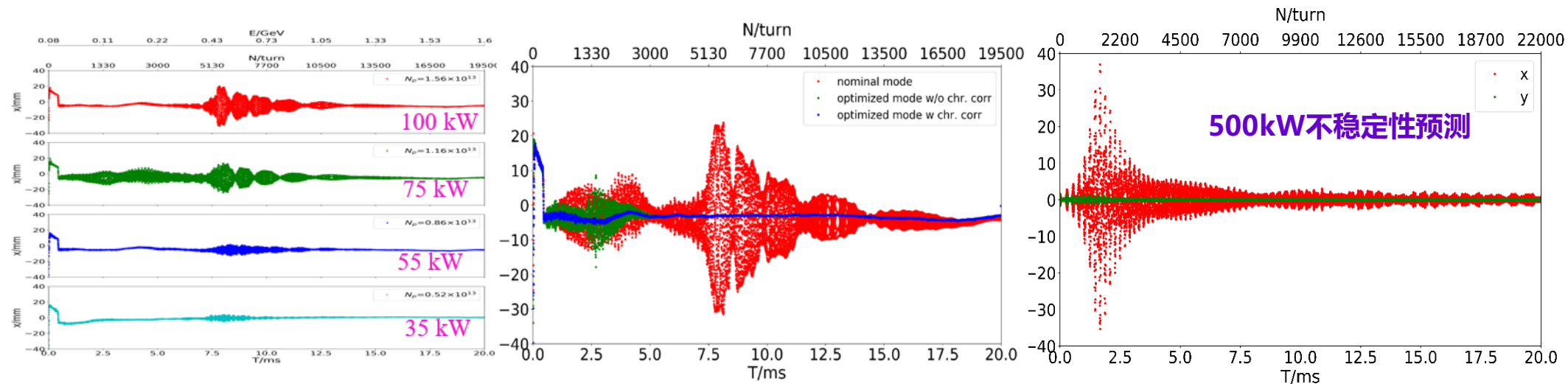
CSNS-II RCS 束流不稳定性



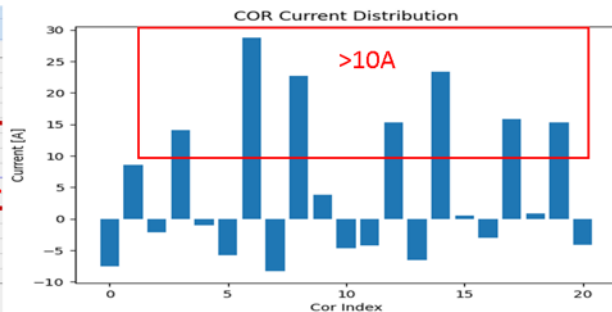
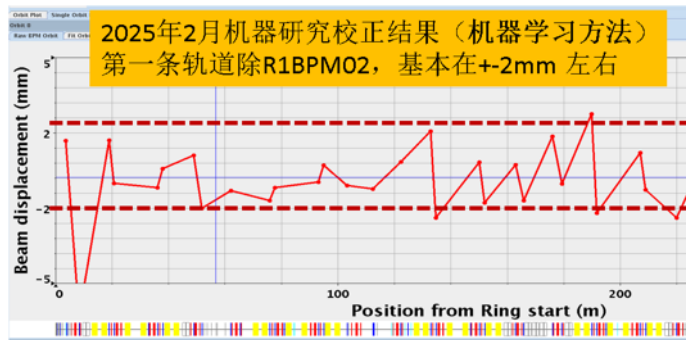
- 半整数工作点
- 六极铁优化色品、八极铁以增加朗道阻尼
- 减少陶瓷真空盒阻抗
- 开发逐束团反馈系统

逐束团反馈系统

阻尼时间	0.5 ms
带宽	> 1.25Hz
数量	2 (水平+垂直)



CSNS-II RCS 轨道校正



R1DH09, R2DH09, R2DH04, R3DH04, R3DH09, R4DH09, R4DH04

当前RCS具备将轨道校正到 $\pm 2\text{mm}$ 的能力 但校正子用量偏大

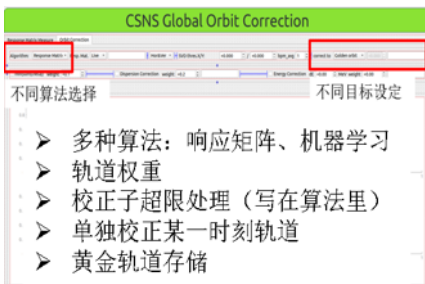
升级校正程序
更多的校正手段

Offset测量
减小校正子用量

能量匹配
减小校正子用量

准直精度
减小原始轨道

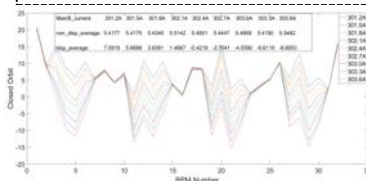
B铁sorting
减小原始轨道



理论上能测量 18个BPM
用QT可以测量 8个
共用电源可以测量 10个

剩下14个，目前尚没有
较为可靠的测量方法
可以尝试基于amn推算

可以减小弧区轨道
期望可以减小弧区校
正子用量



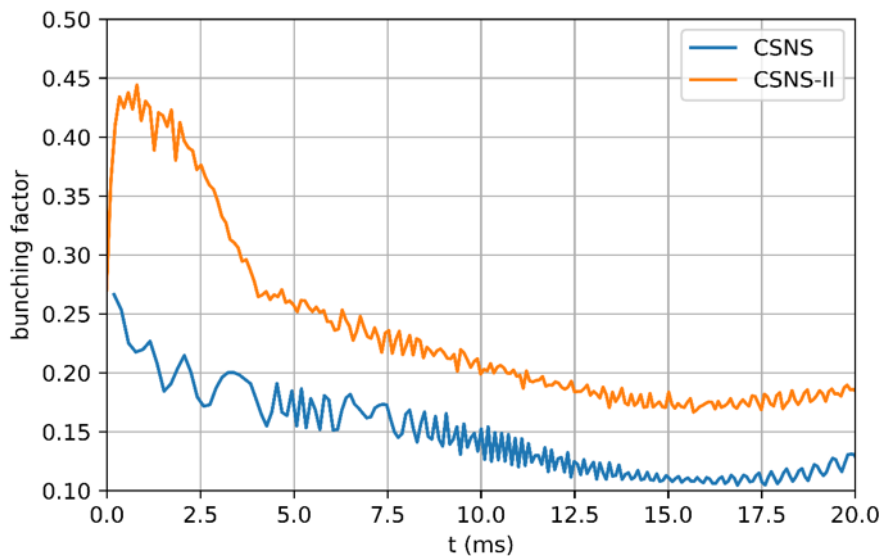
准直误差控制在1mm
内 轨道收益约 3mm

当前方案B铁sorting
轨道收益约 3mm

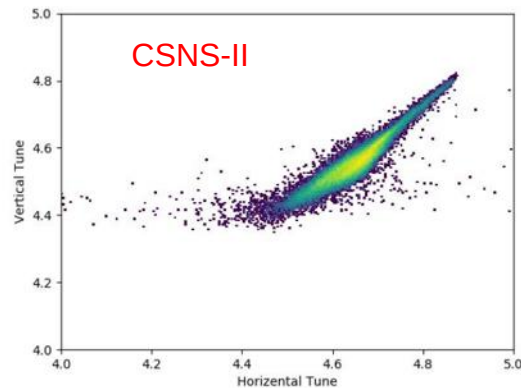
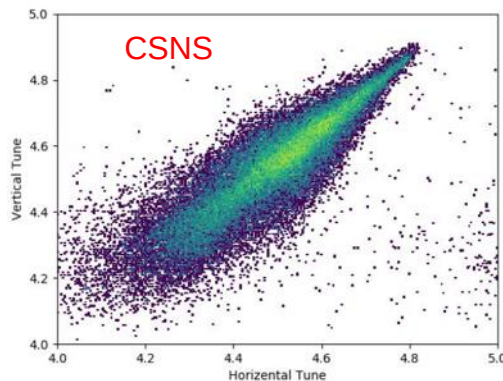
CSNS-II RCS 500kW纵向动力学研究



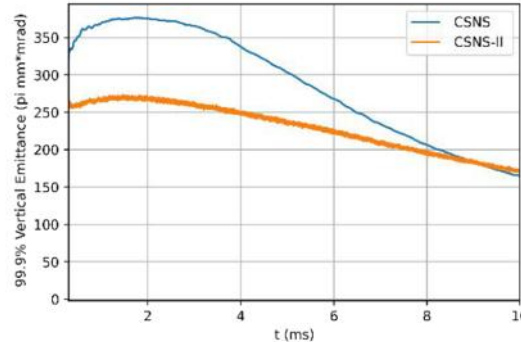
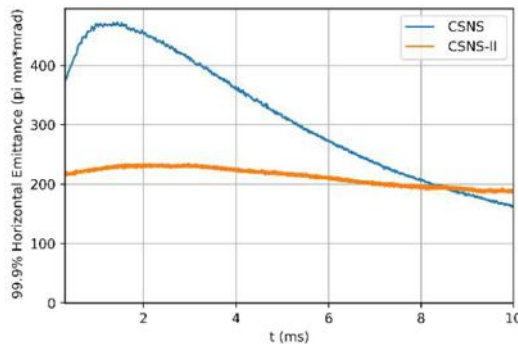
CSNS 和 CSNS-II 纵向动力学模拟研究比较



束团因子比较

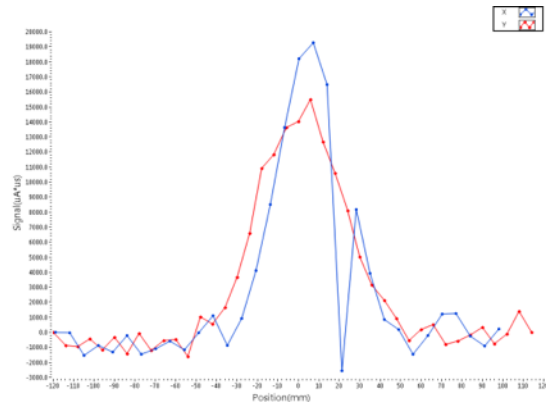
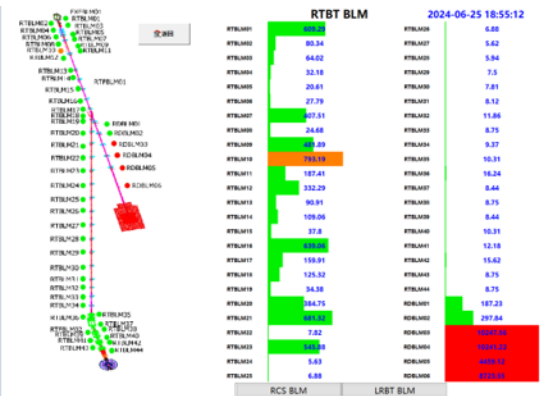
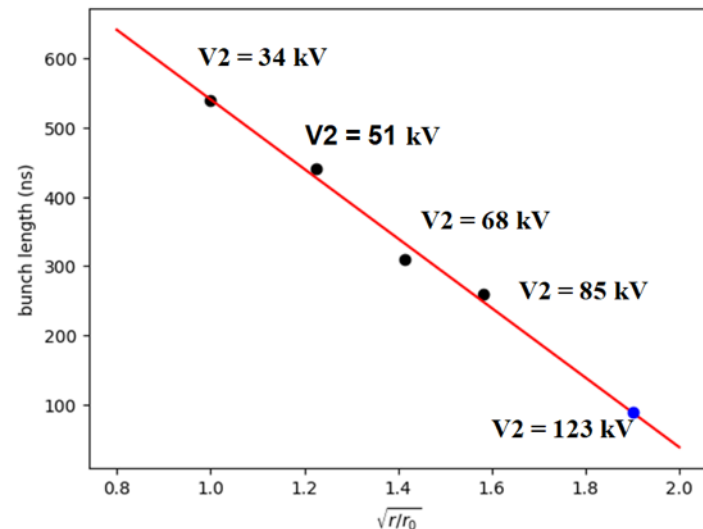
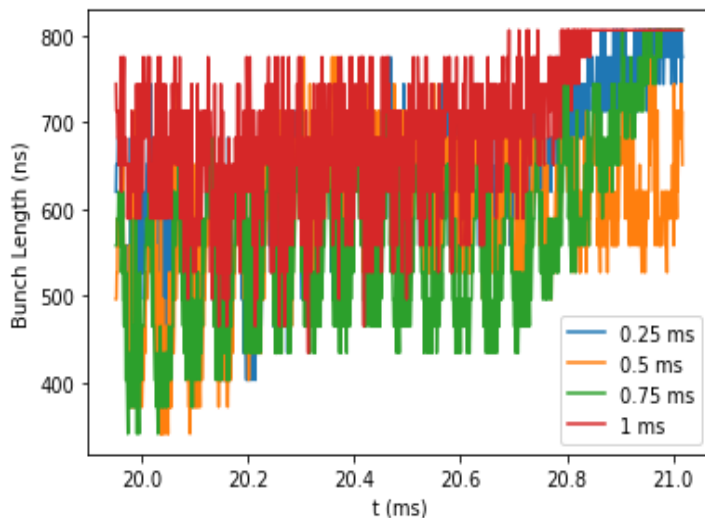
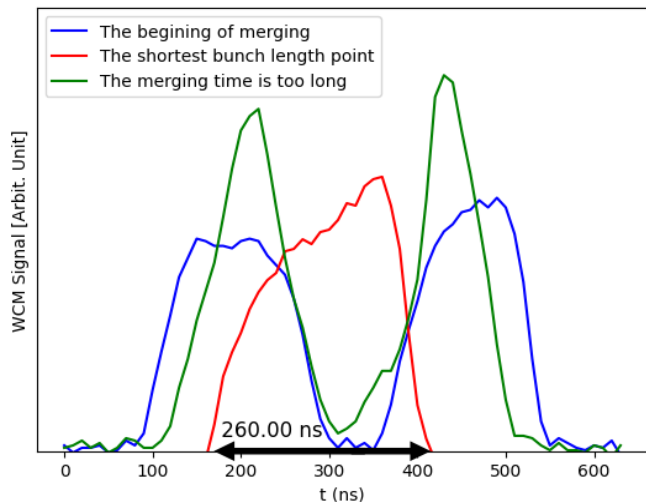


空间电荷频移比较



横向发射度比较

CSNS-II RCS 强流束团融合实验



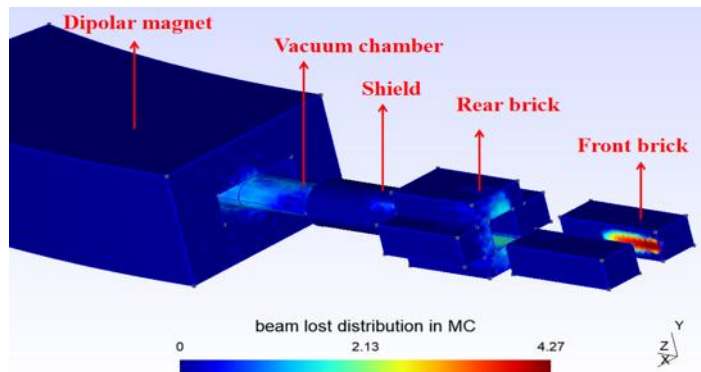
➤ **实验结果：**束长可压缩到260ns以内,对应束流平均打靶功率可以达到120kW；根据该结果推算将融合后束长压缩到**100ns**需要**123 kV**腔压。

➤ **完成第一个快循环同步加速器的强流束团融合实验。**

CSNS-II RCS 其他进展

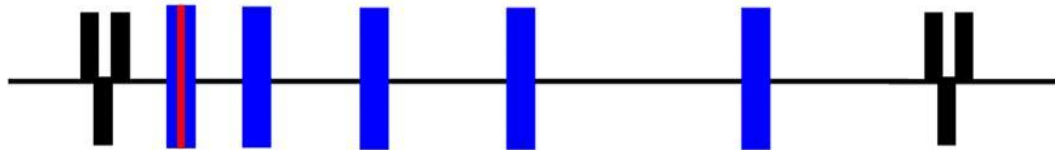


- 完成**动量准直器**物理设计和调试
- 完成**新横向准直器**物理方案评审
- 完成RCS对直线加速器束流和相关硬件要求
- 完成**新Lambertson**物理设计
- 完成CSNS-II RCS **主铁磁测**方案
- 完成**束流光学测量**物理方案
- 正在开展调束软件和仿真软件工作



动量准直器

新横向准直方案



Simulation Platform

PyORBIT

+

Geant4 Interface

Time-varying elements

Injection painting process

Higher-order harmonics in RF cavities

Eddy current effects in resonant power supplies

Beam commissioning tools

SCORE

Wire Analysis

PASTA

OpenXAL



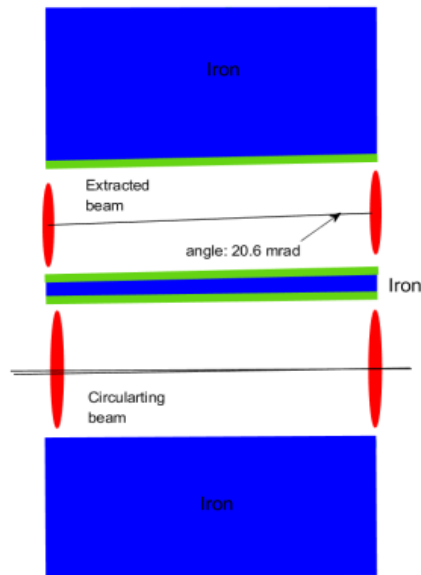
Orbit Correction

TBT Analysis

RF Tuner

Injection Curve Set

.....

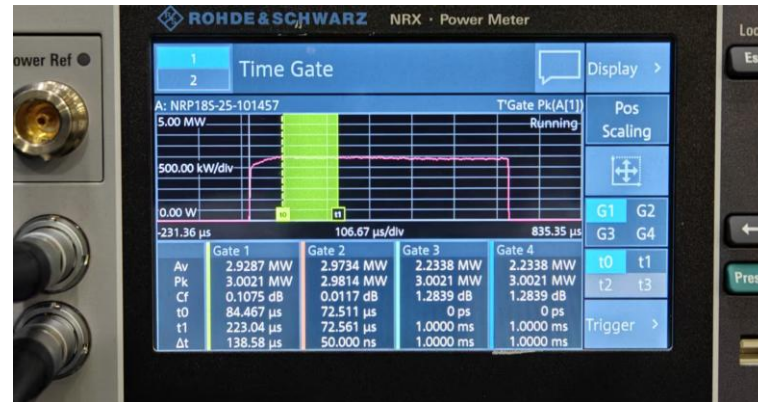
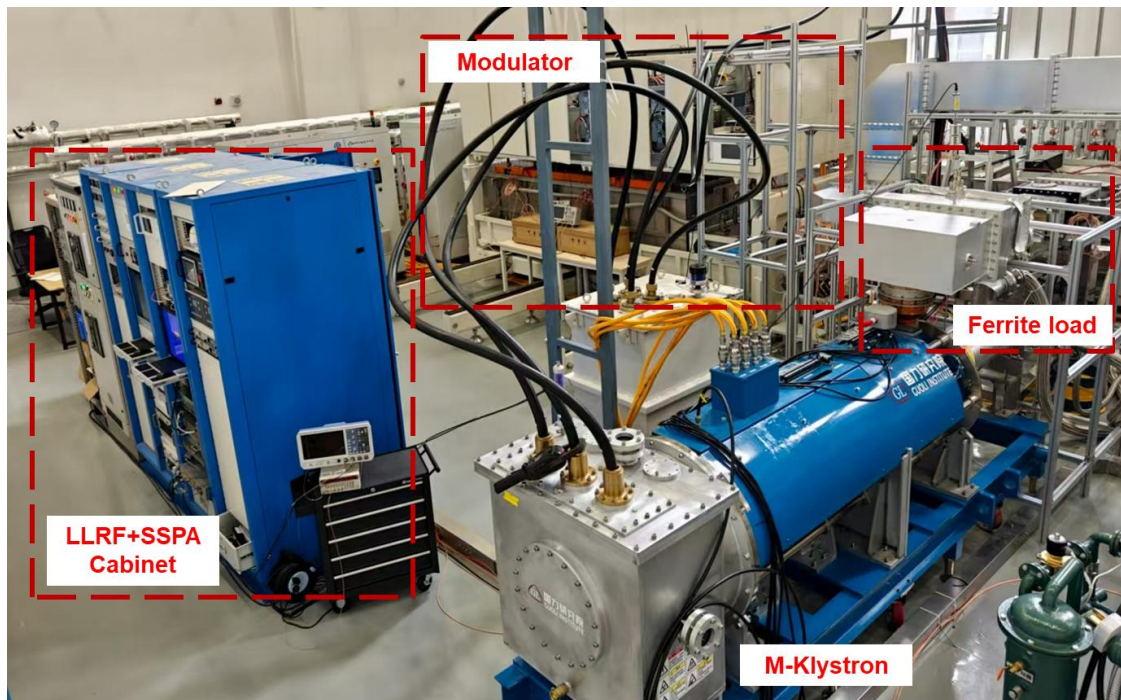


新Lambertson磁铁

关键技术研究/国产化突破



- 国际首台P波段大功率超构材料速调管
- 在2.5MW/25Hz/650us工况下，通过了48小时满指标稳定性测试，最大输出功率3MW。



□ Helicoflex@DELTA 金属密封圈国产化研制

- 研制6批样品，包含高温合金材料研究，有限元力学分析，压缩-回弹测试，常温-250℃循环加热真空密封试验，扭矩25 ~ 40N·m下UHV密封成功率为100%。
- 2023年07月至今，在RCS 4个区使用共计15件，**已正常持续运行20个月**
- 实现**金属密封圈国产化**，解决卡脖子问题，价格大幅下降，使常规环境下应用成为可能



□ 高功率闸流管国产化

- 高功率闸流管是RCS引出脉冲电源的核心器件，此前依赖国外E2V公司产品，面临断供等风险
- 联合昆山国力大功率器件工业技术研究院进行国产闸流管的开发
 - ✓ 目前已经部署了**4只国产闸流管在线运行**
 - ✓ 经过不断地优化迭代，提高闸流管运行寿命，目前运行时间最高超过**13700小时**



参数	指标
电压	> 50 kV
峰值电流	> 14 kA
di/dt	> 100 kA/us
抖动	< 2ns
重复频率	25 Hz

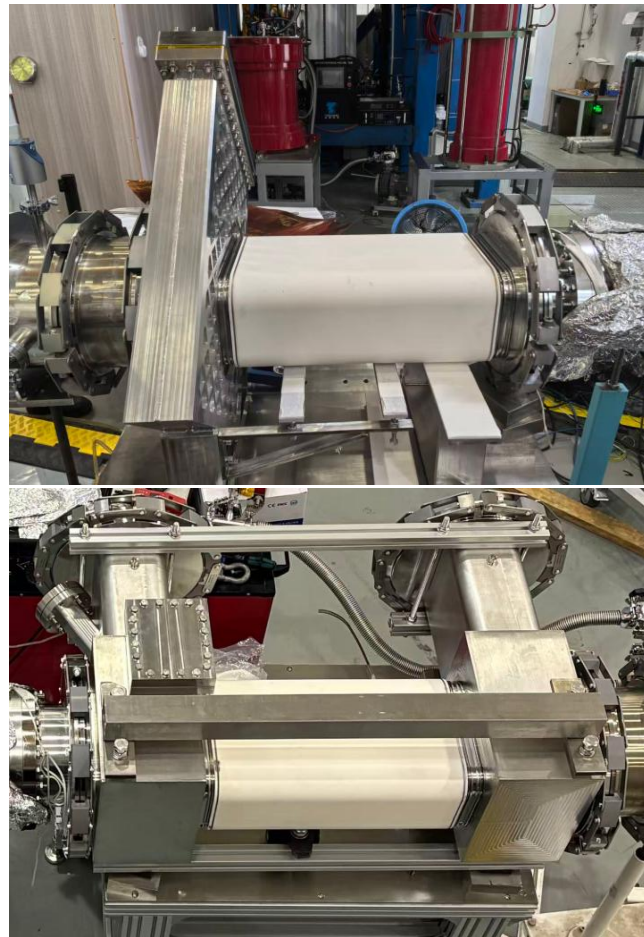
□ 大截面矩形陶瓷真空盒

① 关键指标:

- ◆ 材料选用99.7%以上的高纯 Al_2O_3 陶瓷材料
- ◆ 金属部分焊后磁导率 $\mu \leq 1.05$
- ◆ 真空漏率 $\leq 1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
- ◆ 焊缝抗拉强度 $\geq 90 \text{MPa}$ (实测 $\geq 150 \text{MPa}$)

② 技术难点:

- ◆ 大截面异型陶瓷管的加工制造
(截面尺寸 $265 \text{mm} \times 187 \text{mm}$ 长 450mm)
- ◆ 高纯陶瓷管金属化及焊接
- ◆ 国内厂家无类似截面尺寸陶瓷真空盒加工经验
- ◆ 已研制成功



大直径CNT纤维研发和首次批量应用

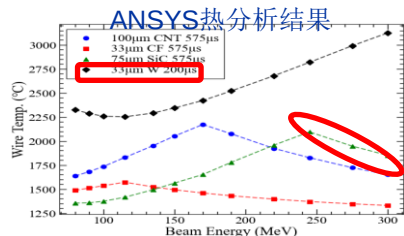


- 传统丝材料不能满足CSNS-II高功率H-束流剖面探测需求 (80-300 MeV/50 mA/575 μ s) => **大直径CNT纤维**
- 合作研发纯化大直径CNT纤维 (**前沿材料**) , 指标达到国际先进水平并完成国际首次批量应用 (注入区多丝靶)

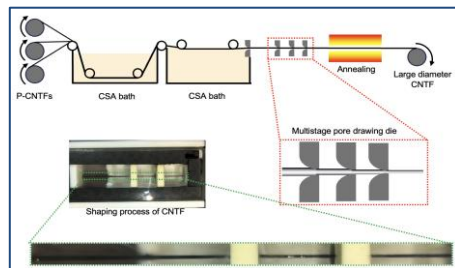
高能所、苏州纳米所、北京大学

候选丝材料物理参数

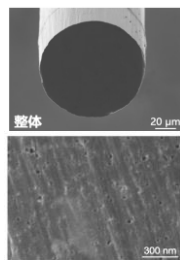
Material	CNT	CF	W	SiC
Diameter(μ m)	100	33	33	75
Density(g/cm ³)	1.08	1.8	19.35	2.89
Thermal conductivity (W/mK)	350	24	173	340
Tensile Strength(GPa)	1.79	3	1	5.9
Work Temperature (°C)	<2000	<2000	<2000	<1250



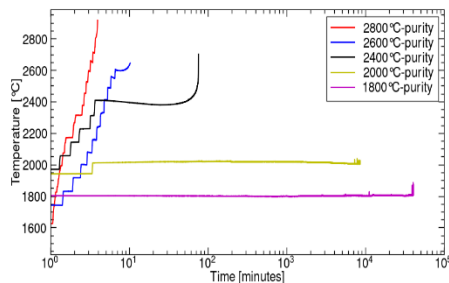
大直径CNT丝制备技术路线



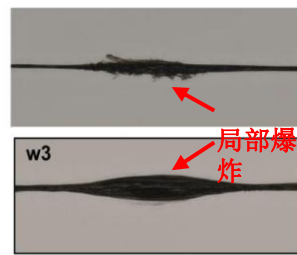
尺寸不均性~3%



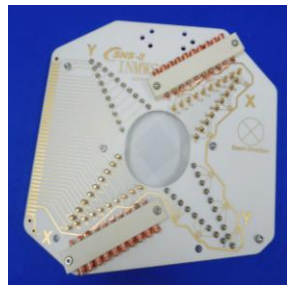
>2000 K连续加热耐受时间~700 h



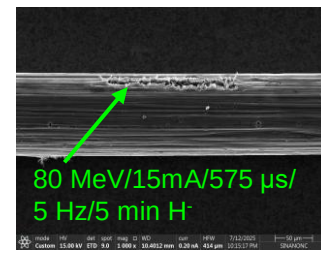
CERN CNT丝实验 (2022)



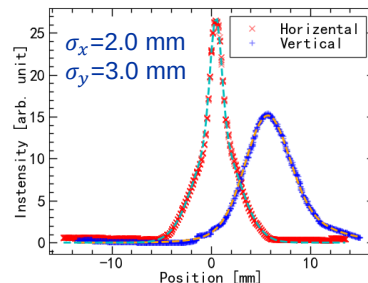
多丝结构 (共3台, 132路)



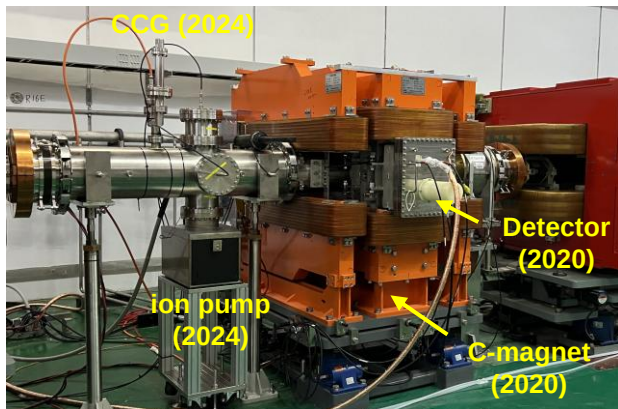
全脉宽H-轰击实验@CSNS



INMWS01 (15/09/2025)

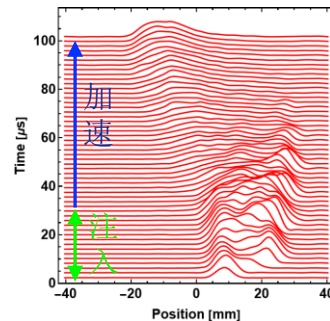
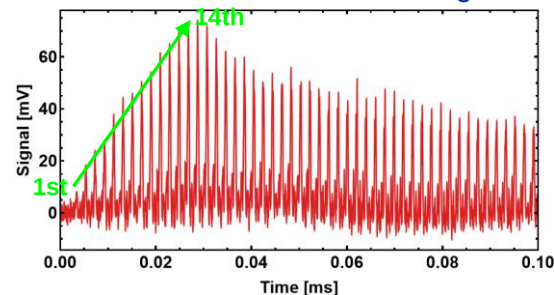


- 提供逐束团束流横向位置和分布信息，用于束流位置振荡、相空间失匹配和发射度监测。技术挑战：如何抑制束流镜像电流引入的电磁干扰
- 历时5年，于2024年实现**逐束团分布测量（国内首次）** => 时间分辨率 $<1\ \mu\text{s}$ 、系统带宽 $>5\ \text{MHz}$



ion-mode

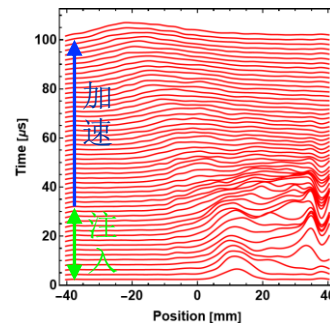
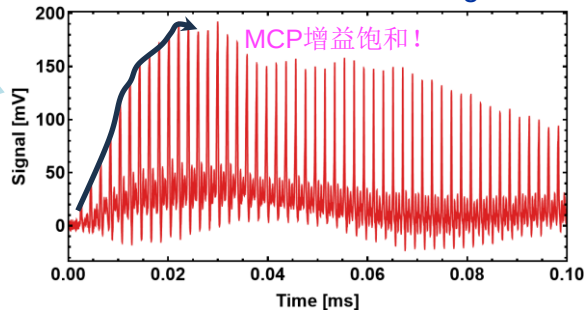
H⁺ beam: 3.1 mA/29 μs , RCS single-bunch



Painting和加速阶段逐束团水平方向分布演化

e-mode

H⁺ beam: 3.1 mA/29 μs , RCS single-bunch



主束流空间电荷效应致束流分布畸变!

超导段激光丝负氢束流剖面测量技术验证

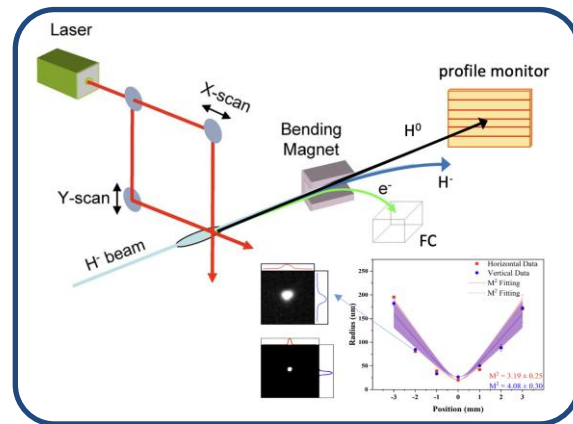


□ 基于激光剥离的非拦截式负氢束流剖面探测可以避免材料溅射、损伤造成的超导腔污染

□ 技术难点

□ 自由空间长距离高功率激光 (J/pulse) 传输与稳定性

□ 剥离电子探测技术及长期可靠性 (免维护)



Y方向剖面测量

● 2024.11.1

9

e-探测模块升级

● 2024.2

<1 mm束斑测量成功

● 2025.3.26

传输光路和e-探测升级

● 2025.8-9

● 2024.9~10

搭建样机
调试光路

● 2024.12.16

优化探测器参数

● 2025.2.8

激光能量相关性实验

● 2025.4.22

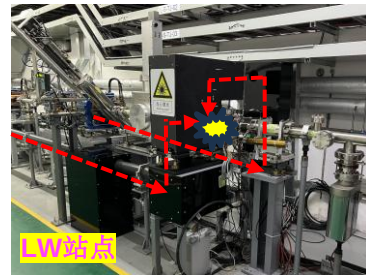
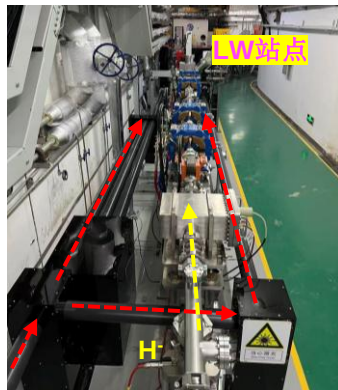
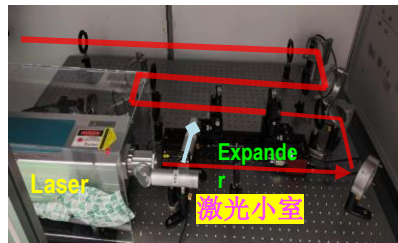
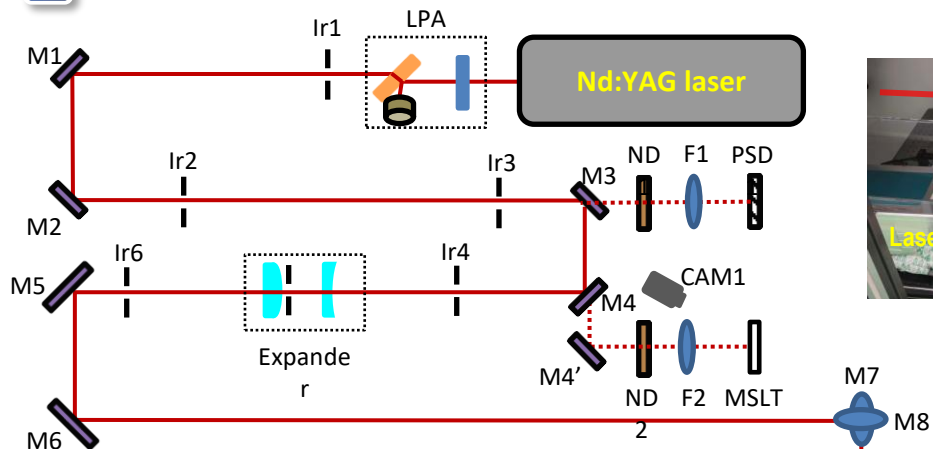
纳秒级时间分辨力实验
H-宏脉冲内分布演化

● 2025.9.12

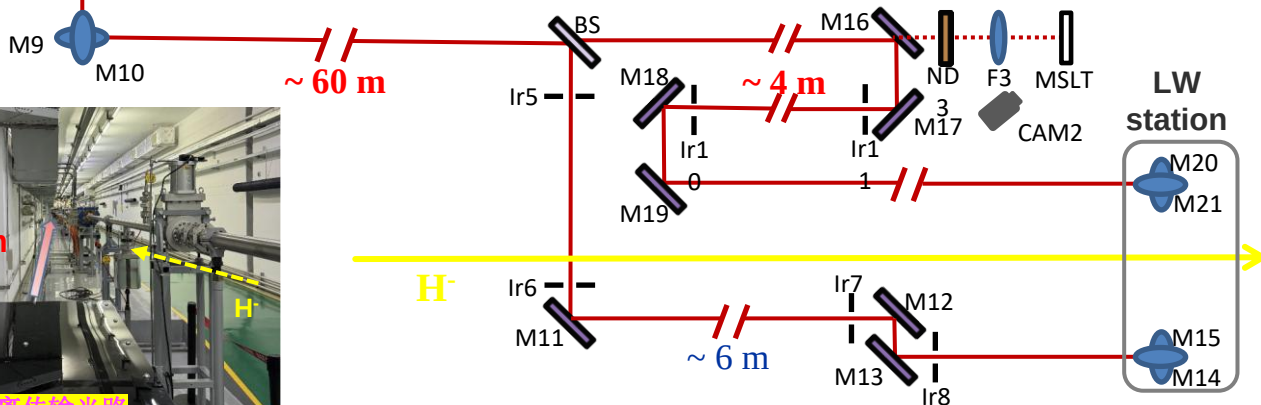
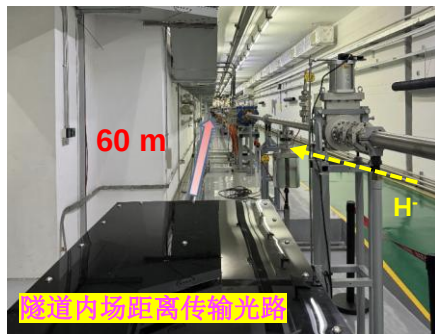
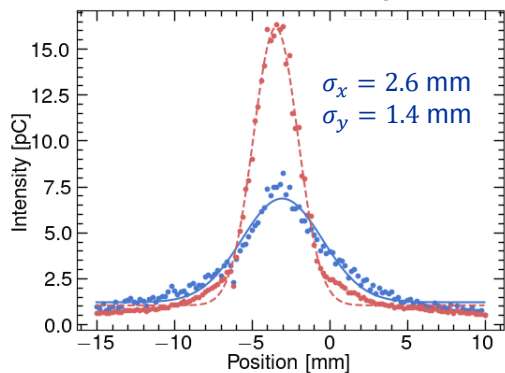
X&Y方向同时测
量实验

工程
设计

国内首台激光丝负氢束流剖面探测器



XY方向分布同时测量结果 (12/09/2025)

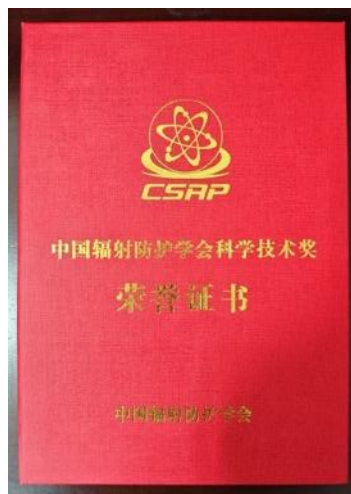
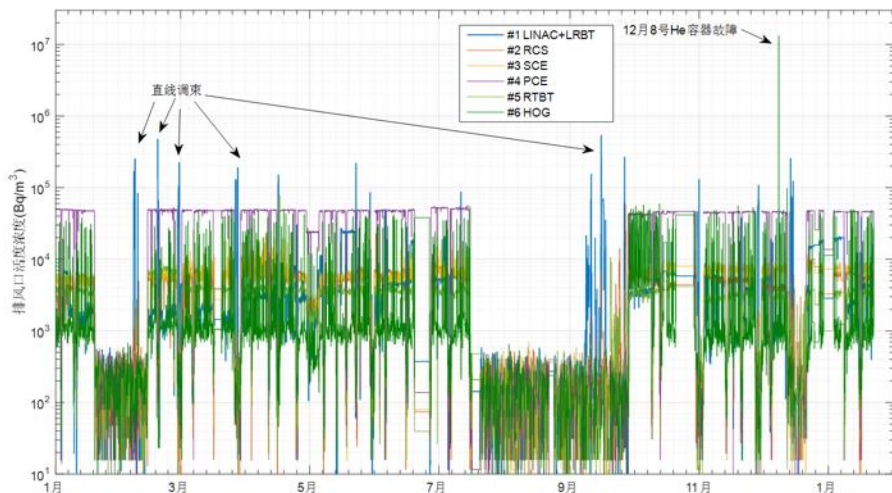


关键技术研究/国产化突破



□ 加速器活化空气监测方法及系统

- 首次提出并建立了**加速器活化空气监测**系统，并应用于CSNS装置
- 通过了中国辐射防护学会科技成果鉴定，获中国辐射防护学会科技进步二等奖
- 技术成果被J-PARC、ISIS等国际同行广泛引用
- **推动设立国家标准**



Full Paper

Radiation Safety Management Vol. 23 (7-15)

Measurement of Gaseous Radioactivity Concentration of Short-Lived Nuclides Produced by Air Activation in the Spallation Neutron Source Facility of J-PARC

Koichi SAKASHITA*, Yuto ARAKAWA, Koichi MASUYAMA, Koichi SATO, Kazunari SEKI, Yoshimi KASUGAI, Tetsuro ISHII

Safety Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata, Tokai-mura, Ibaraki 319-1195, Japan

Received Nov. 1, 2024; accepted Feb. 14, 2025

Radioactivity concentrations of short-lived nuclides of ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O and ^{41}Ar with half-lives of about 2 to 110 min, produced by air activation under the spallation neutron environment at the Materials and Life Science Experimental Facility in J-PARC, were measured using a scintillation gas monitor. Since these radionuclides decay with β^- without emitting γ -rays except for ^{41}Ar , the contribution of each radionuclide was separated by fitting a multi-component function depending on the half-lives of the products to the time variation of measured counting rates. Concentration conversion factors to convert count rates to radioactivity concentrations were determined by taking account of the result of Monte Carlo calculations. Using this method, the radioactivity concentrations of these nuclides were obtained with an accuracy of about 10–25%.

Key Words: spallation neutron source, radioactivity concentration, short-lived nuclide, scintillation gas monitor, concentration conversion factor

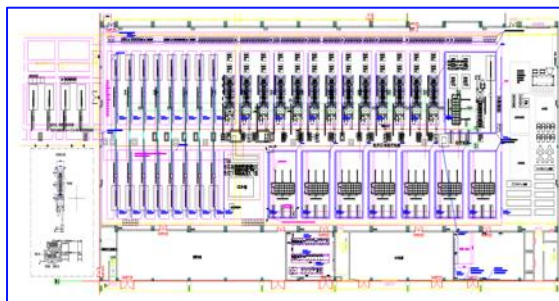
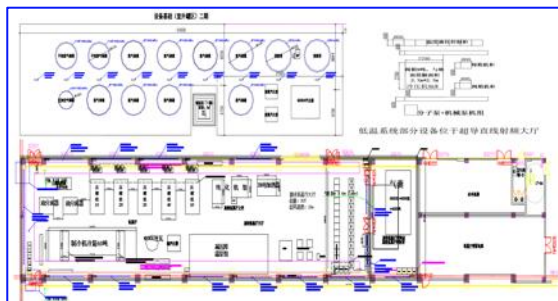
[doi:10.12950/rsm.241101]

基建进展



建安工程进展顺利

- 新建：超导直线设备楼&直线低温厅
- 新建：高能质子实验厅
- 改造：直线设备楼、RCS设备楼
- 建设工期：2024.8—2026.10



超导直线设备&楼直线低温厅&高能质子厅

CSNS更新改造（两重项目）



□提升CSNS装置运行效率和运行水平，扩展实验能力

□关键器件国产化替代，摆脱对外依赖，掌握核心技术，助力产业技术升级和持续发展

	项目实施前	项目实施后
直线加速器重复频率	25Hz	50Hz
束流功率	160kW	200kW
324MHz 速调管	进口	国产替代升级，脉冲峰值功率3MW
500kW 四极管	进口	国产替代，平均功率500kW
脉冲高压开关	进口	国产替代升级，输出峰值45kV/16kA，64kA/us
主磁铁电源	高次谐波不控制	高次谐波幅值 < 150mA，降低不可控束流损失
加速器中央控制系统	156 核心 CPU 0.02PFLOPS@FP16	640 核心 CPU 4PFLOPS@FP16 NPU算力，超10万PV
GPPD 主探测器	6m ²	10m ² ，提高应力测量能力
靶站关键设备服役评价	靶体评价	靶体-慢化器-反射体与质子束窗评价 动力机械手国产升级遥控维护能力，末端负载300kg

CSNS更新改造项目



与CSNS-II统筹协调管理，加速器关键设备和核心器件国产化率基本达到100%



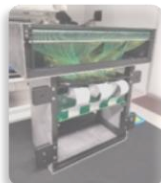
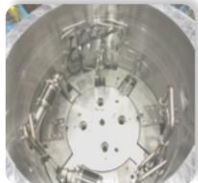
速调管功率源升级

美国CPI和日本佳能功率源，故障率/价格高

- ◆ 国产化：超构材料速调管
- ◆ 国产化：长脉冲固态调制器



工程材料及部件中的残余应力



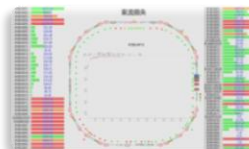
- ◆ 靶-慢化器-反射体寿命
- ◆ 动力机械手&遥控维护

- ◆ 探测器面积增加
- ◆ 光读出器件升级

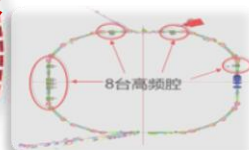
靶站服役评价能力建设

GPPD谱仪升级

主铁及脉冲电源升级
四极管功率源升级
中央控制系统升级



- ◆ 高次谐波闭环控制
- ◆ 智能化状态监控
- ◆ 国产固态开关sGTO和高压充电机



法国TH558四极管，故障率/价格高

- ◆ 阳极/帘栅/灯丝电源扩容升级
- ◆ 提高抗失配能力降低故障率
- ◆ 石墨栅沉积设备工艺/飞秒激光加工



在线监控超10万个变量

- ◆ 提升计算资源和存储资源
- ◆ 健康监测和预警系统

同位素GJ专项



利用**CSNS 直线加速器的高功率质子束流**辐照**叠层金属钍靶**，通过沉淀组分离、多级离子交换/固相萃取色谱联合分离纯化方法，实现多种医用 α 同位素（ ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 和 $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$ ）的规模化量产。



备注：负氢在注入RCS环时，通过剥离膜去除外围两个电子成为质子

直线束流参数	CSNS-I	CSNS-II
粒子类型（剥离）	质子	质子
束流能量（MeV）	80	300
平均功率（kW）	~10-20	~100-200

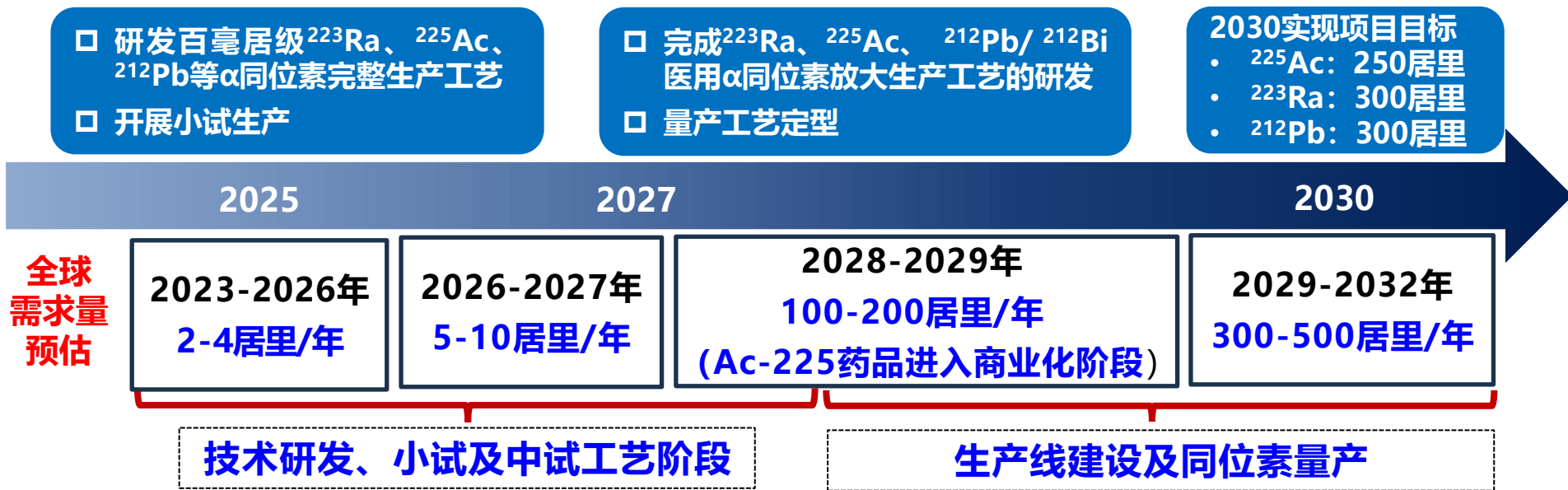
同位素GJ专项



攻克高功率靶站及叠层靶制备、医用 α 同位素及新型医用诊疗一体化核素对的分离纯化和质控分析等生产技术难点

实现 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 和 $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$ 医用 α 同位素的量产供应

项目阶段目标



里程碑进展



- 国内首次实现单批次毫居里级、核纯度 $\geq 99\%$ 的钷-225、镭-223和铅-212，且实现了百毫居里级的年生产能力，突破了关键医用 α 同位素长期受制于人的技术瓶颈，有望打破国外的垄断。
- 团队依托大科学装置中国散裂中子源的高能质子束流辐照叠层钚靶，结合自主开发的分离新工艺，实现同时分离纯化三种医用阿尔法同位素。

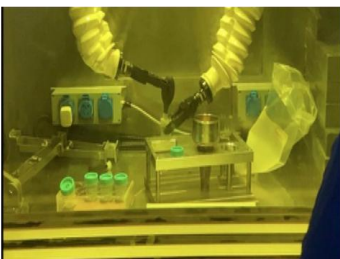
- 相关成果于7月4日进行了专家鉴定。中国科学院国家纳米科学中心等核药研发相关单位，以及核药领军企业中国同辐股份有限公司、东诚药业集团股份有限公司等应用本次实验取得的同位素开展了后续药物研发工作，中国同辐原子高科及东诚药业集团蓝纳成公司的实验表明，团队制备的钷-225和铅-212的纯度质量达到或优于国外进口产品。



钚靶辐照、冷却及机械臂远程取靶



钚靶转运



靶片拆解



溶靶



靶转运路线



分离纯化



- 通过创新物理调束方法和关键技术突破，束流功率提升至**170kW**，超过设计指标70%并实现稳定运行，年运行时间超过**5000小时**和效率超过**95%**，达到国际同类装置领先水平
- CSNS-II按计划稳步推进，暑期3个月顺利实现里程碑节点任务——注入区升级改造，包括设备拆除、土建结构改造及新设备安装；首次提出全新涂抹注入方案，调束结果基本验证RCS功率提升关键物理与技术问题可行性
- CSNS-II后续完成射频四极加速器和中能输运线改造（2026年）、完成超导直线加速器安装和调试（2028年），兼顾“两重”更新改造项目和同位素GJ专项任务实施

感谢对CSNS的关注和支持!

