



# 加速器驱动先进核能及CiADS进展

China initiative Accelerator Driven System (CiADS)

报告人：何 源

代表CiADS项目团队

中国科学院近代物理研究所

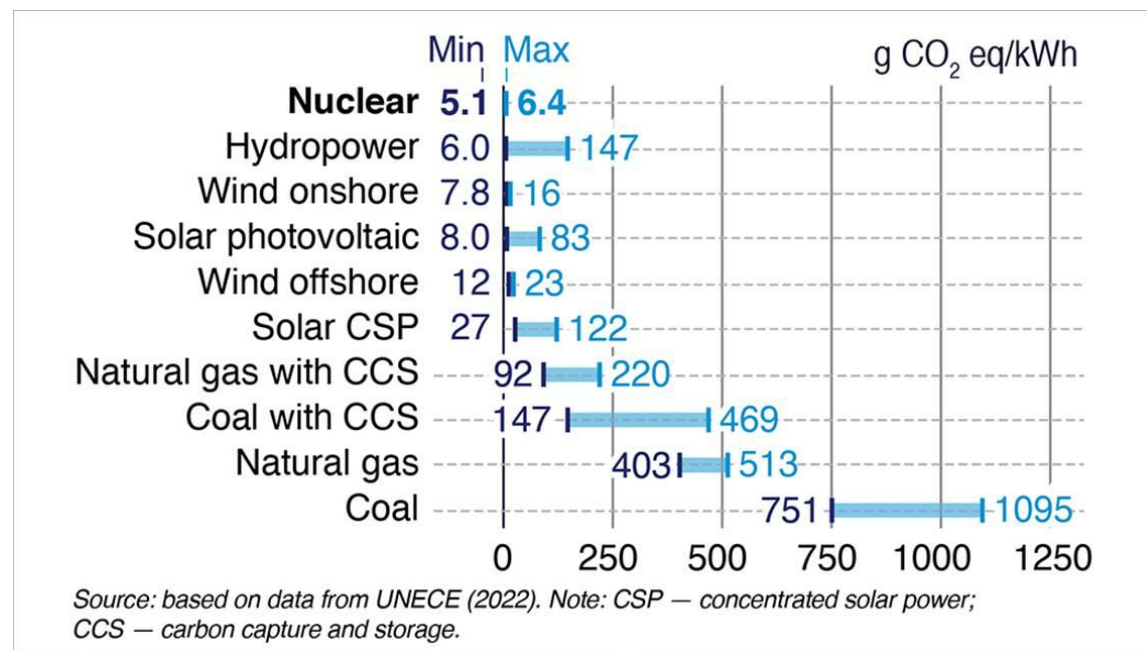


- **核裂变能发展可持续发展的问题**
- 加速器驱动嬗变装置CiADS及其进展
- 依托CiADS的实验终端及其进展

## 核电的现状和发展趋势

□ “积极安全有序发展核能”是我国基本战略；目前在运行56台，在建26台；加上新批复机组20台，在建和在运行机组102台，已位列世界第一。

- 第28届联合国气候变化大会《三倍核能宣言》声明：到2050年全球核电装机量达到目前的三倍。
- 中国核能行业协会等机构预测，我国2060年核电装机量达到400GW，约等于当前全球总装机，是当前规模的8倍。



**核电将迎来大规模增长，解决其可持续发展问题，迫在眉睫**

## ■ 核电大规模发展面临两个核心问题（现有体系）

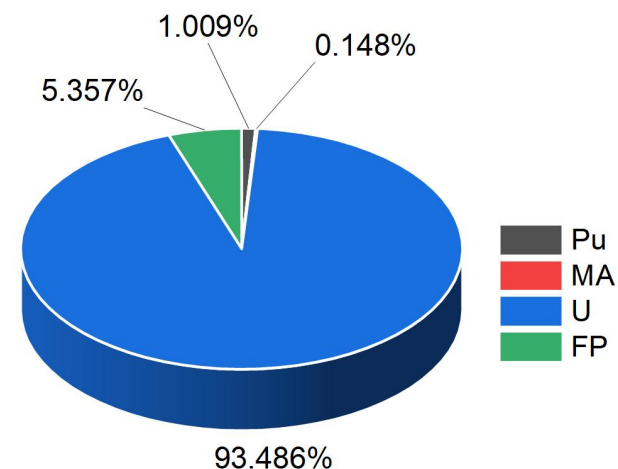
### □ 天然燃料资源少，铀资源利用率低

➤ 天然燃料资源，即易裂变核素，仅有铀-235，占比0.7%，占比99.3%的铀-238不可被直接利用

- 当前探明经济开采铀总量790万吨，如仅利用铀-235，可供给不到百年。
- 我国铀资源储量占全球4%，品味0.01%~0.05%，进口依赖度大于80%。
- 预测我国2040年天然铀需求3.6万吨，超过目前全球总产量50%

➤ 8吨天然铀->1吨核燃料->只有50公斤被燃烧成裂变产物

➤ 剩余的可重复使用的燃料（950公斤）及贫铀（7吨）在能源生产方面具有巨大的未开发潜力



## ■ 现有技术下，核电大规模发展面临两个核心问题

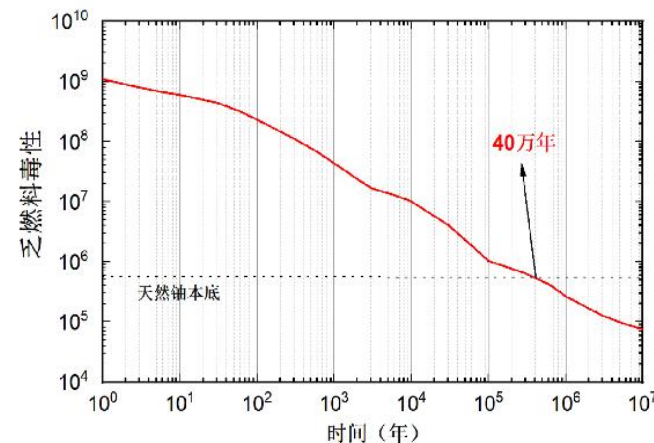
### □ 乏燃料处理处置难

乏燃料量大、成分复杂，其中超铀核素放射性强、危害大

- 当前，全球核电站平均每年卸载约1.13万吨乏燃料，放射性寿命数十万年，地质处置维护时间长。
- 预期，到2050年我国乏燃料卸载规模将达到每年约6500吨。



乏燃料年产量和累积量的预测



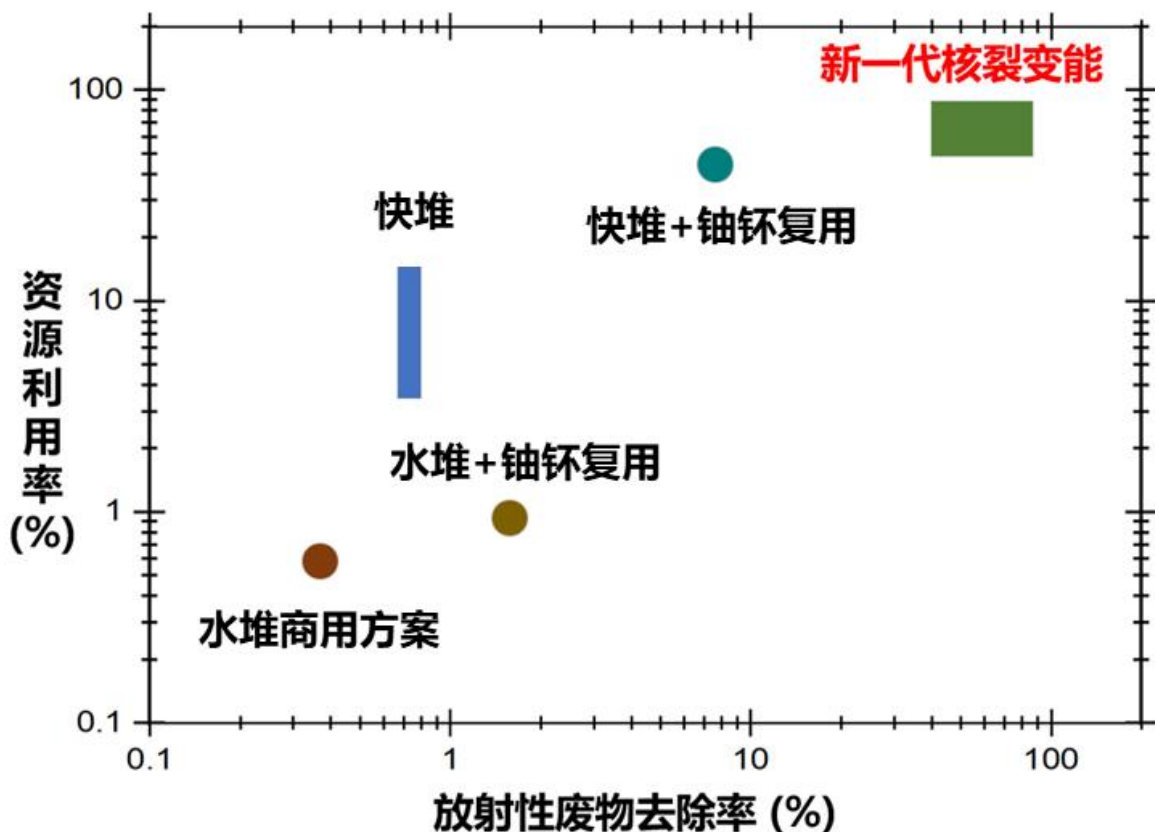
乏燃料的放射性衰减曲线

“到目前为止，所有乏燃料都储存在堆内现场或堆外的工程储存设施中，等待其处置的最终决定。没有一个国家拥有用于乏燃料储存或处置的地质储存库。大多数国家也没有就乏燃料做出最终决定。”

<https://www.iaea.org/newscenter/focus/radwaste-management/managing-spent-nuclear-fuel-global-overview>

## 大规模发展可持续性——资源利用率最大化、废物排出最小化

实现途径：完整意义的闭式循环，即乏燃料持续循环利用

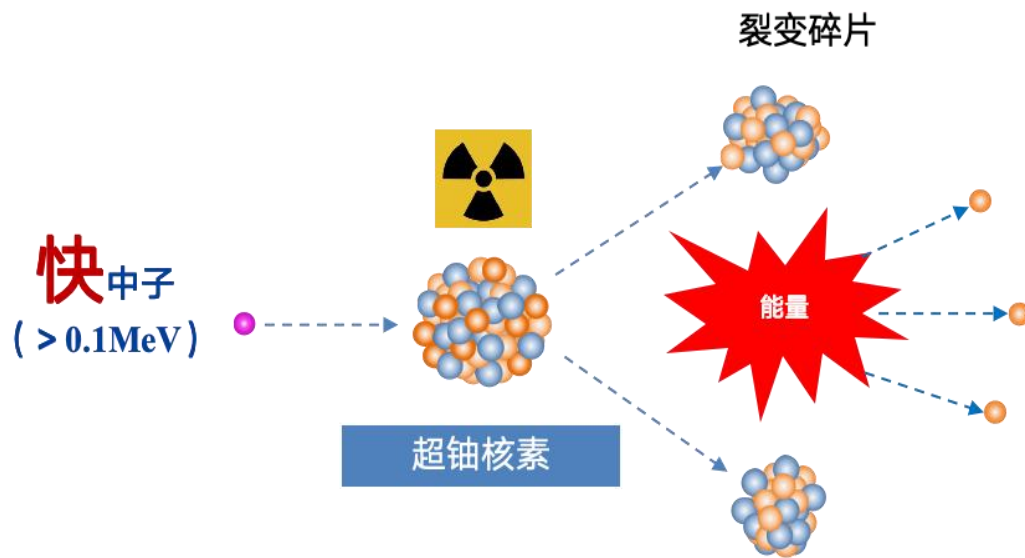
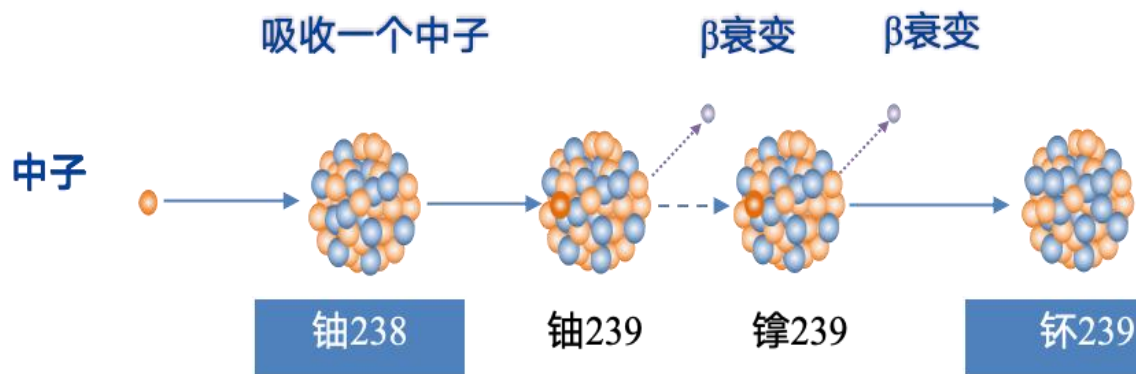


## 燃料可持续循环利用需要解决的两个基本问题

### 增殖

### 嬗变

#### 铀238 → 钚239 (易裂变)

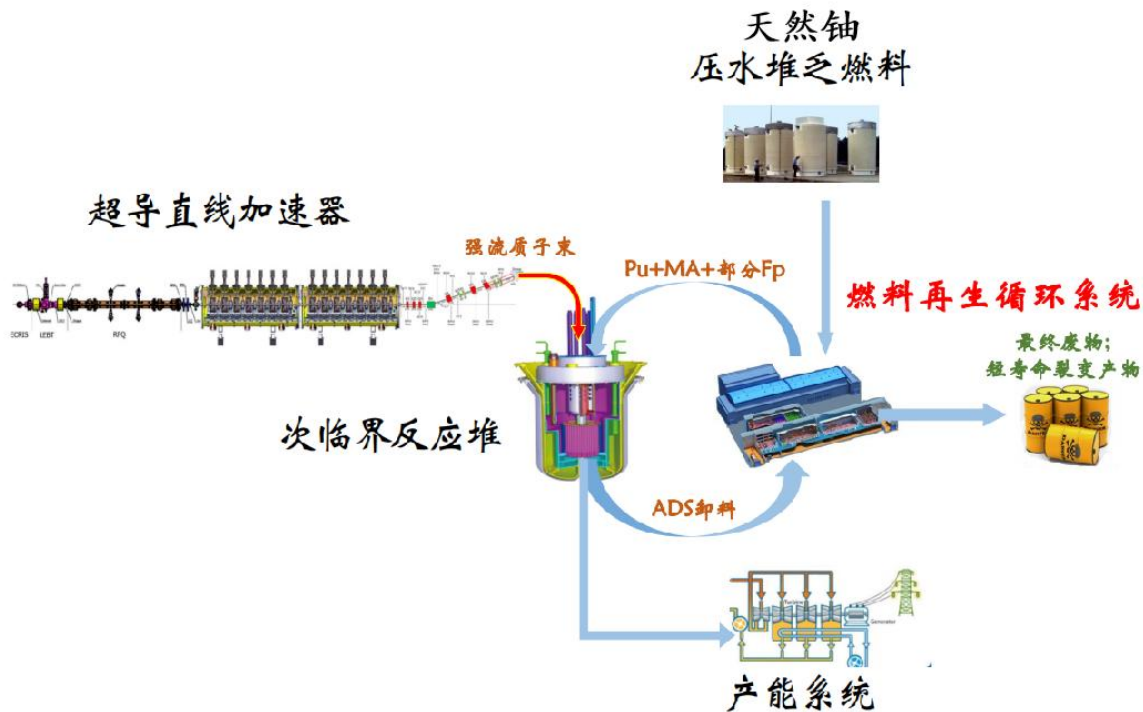


目标：核燃料总量**增加几百倍**，核废料总量**减小几十倍**、寿命**缩短几千倍**

## 原创方案：超越国际上分离嬗变路线——“吃粗粮”

- 加速器驱动核能实现完全闭式循环过程
- 每次循环部分铀-238增殖为钚-239
- 每次去除部分裂变产物，添加乏燃料或贫铀

- 制备“粗”燃料 = 铀+钚+次锕系+少量裂变产物  
乏燃料再生——仅“粗”分离出不可利用的裂变产物  
(废物最少化)
- 燃烧“粗”燃料 = 加速器+次临界快堆 (ADS)  
粗燃料发电——同时增殖“钚”，嬗变“超铀”  
(资源最大化)

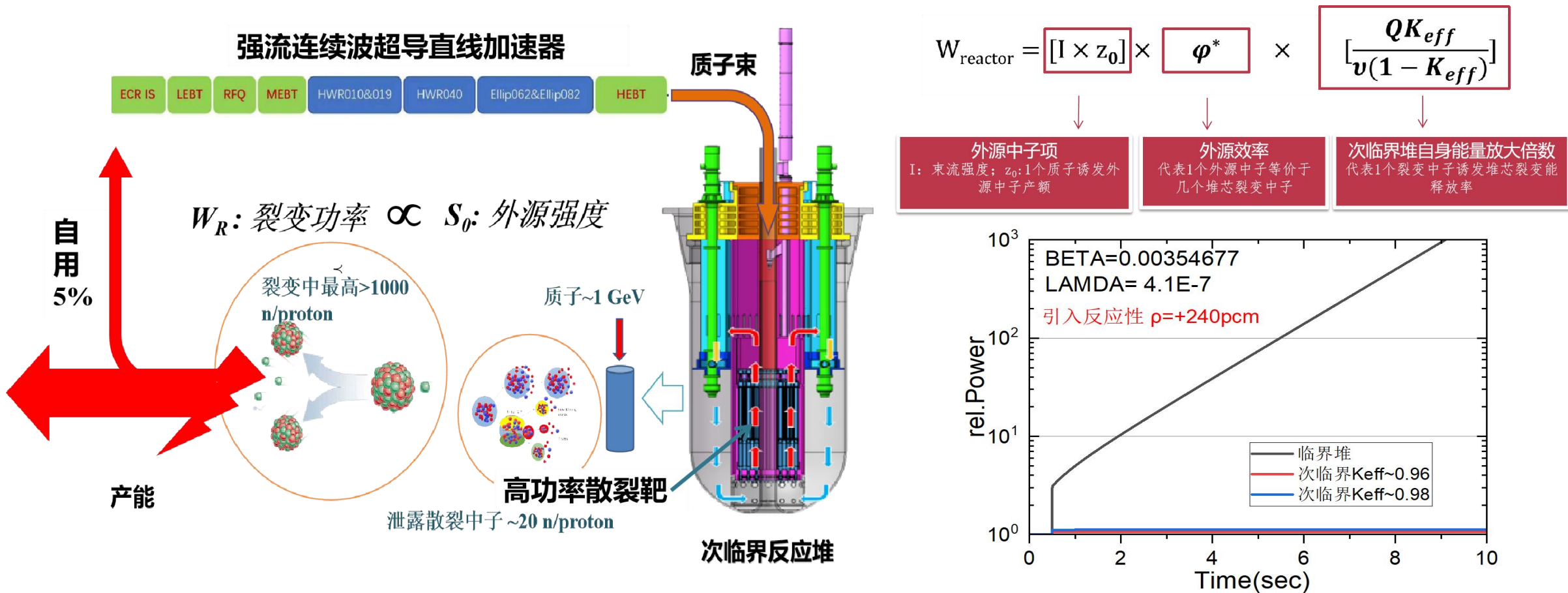


	商业压水堆	ADANES
铀资源利用率	~1%	~95%
放射性排出物寿命	十万年	百年
放射性排出物/1GWe堆年	~25吨 乏料	~1吨 裂变物
燃料补充/1GWe堆年	~25吨 铀	~1吨 乏燃料
临界安全性	临界运行	次临界运行

**“灵活” 衔接现有核电，综合利用乏燃料和贫铀，“吃粗粮且吃干榨净”**



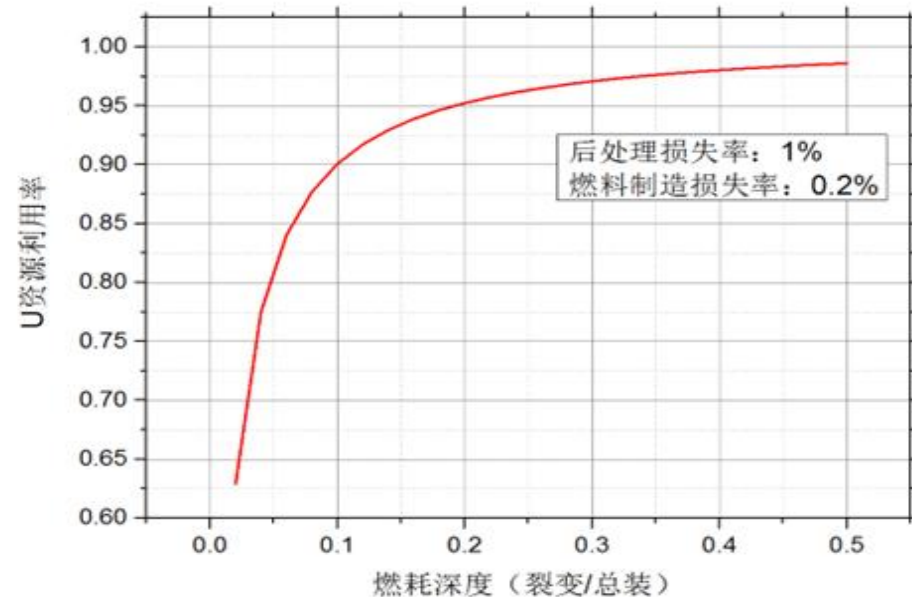
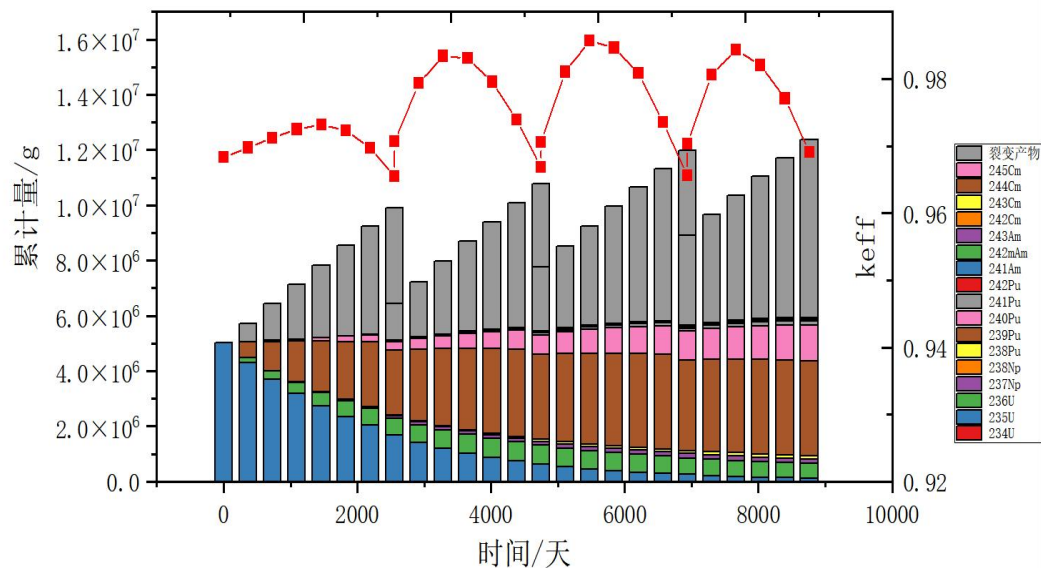
## ADS —— 能量放大器，可烧“粗”燃料 $\square K_{eff}$ 不变，功率靠加速器控制，线性变化



$\square$  ADS: 放大器控制模式，对燃料成分接受裕度很大，平衡循环可添加压水堆乏燃料和贫铀。

(临界控制模式，要求燃料成分中次铀系及裂变产物比例低，需确保对 $K_{eff}$ 的控制能力在安全范围之内)

## ADANES “粗” 燃料循环模拟



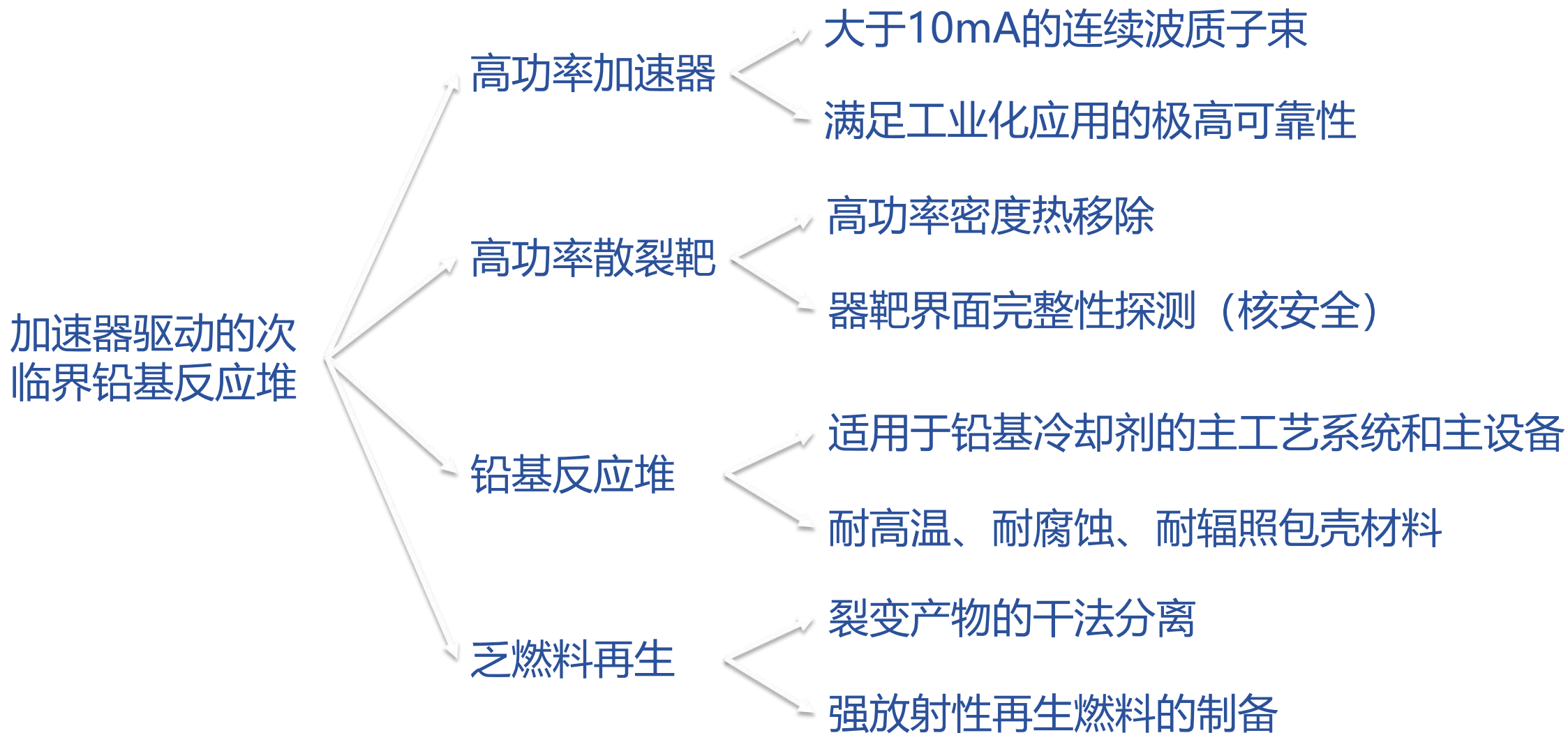
- 挥发/半挥发裂变产物去除70%

- 挥发/半挥发裂变产物去除90%
- 镧系元素去除50%
- 难挥发金属类元素去除80%

- 可实现至少4个燃料循环
- 铀资源利用率达到30%

- 可实现连续的燃料循环
- 燃耗深度20%，铀资源利用率95%

燃烧器运行参数：加速器流强 < 20 mA，反应堆次临界度 < 0.98



中国科学院先导A

完成原理验证及  
样机研制

- 强流超导直线加速器
- 高功率颗粒流散裂靶
- 干式乏燃料再生流程.....

国家重大科技  
基础设施

GJ专项

工业示范及推广

闭式核裂变能系统验证

ADS燃烧器CiADS  
关键技术突破

铀钚燃料再生系统  
百兆瓦级关键技术

ADANES工业示范  
及商业应用  
(核工业集团)

2011

2016

2030

2035

低堆芯功率密度  
高器靶功率 (兆瓦)

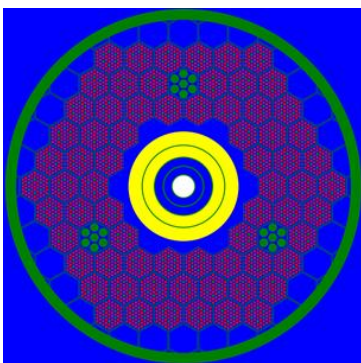


高堆芯功率密度 (还原工业级)  
兆瓦级器靶



高堆芯功率密度  
20兆瓦级器靶

2030

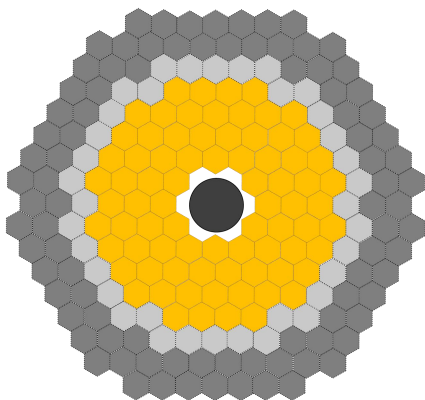
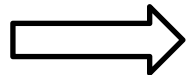


**CiADS-10MWt实验装置**

燃料: UO<sub>2</sub>  
K<sub>eff</sub>~0.75  
束流~2.5MW

- ◆ 验证ADS-器、靶、堆关键技术
- ◆ 器靶堆耦合集成与安全运行技术
- ◆ 再生燃料嬗变增殖实验
- ◆ 再生燃料循环与制造技术

2035

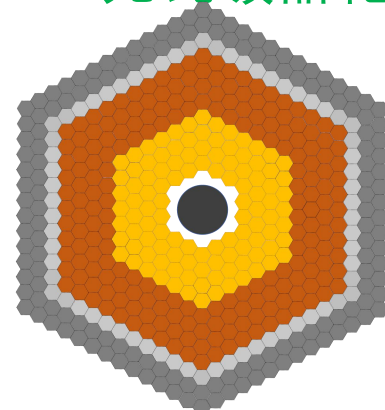
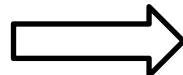


**百兆瓦 (300MWt) 示范装置**

燃料: MOX+再生燃料  
K<sub>eff</sub>~0.975  
束流~3MW

- ◆ 验证再生燃料组件 (多组件-先进燃料)
- ◆ 再生燃料循环技术中等 (百千克) 验证
- ◆ 高功率器靶堆关键技术示范
- ◆ 稳定运行与产能

2040



**吉瓦级 (1.5GWt) 工业装置**

燃料: 先进再生燃料  
K<sub>eff</sub>~0.975  
束流~20MW

- ◆ 验证全堆再生燃料组件 (先进燃料)
- ◆ 再生燃料循环技术工业级 (几吨) 验证
- ◆ 工业级系统稳定安全运行与产能

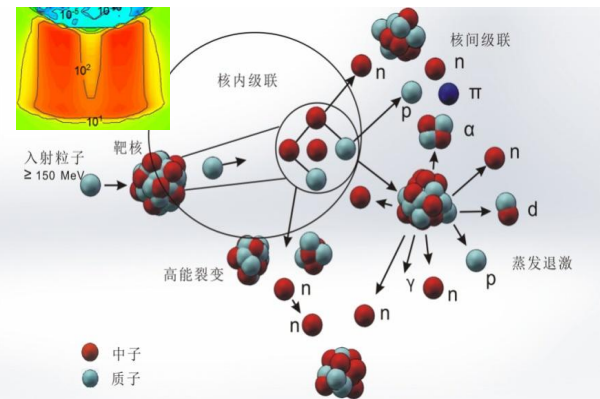
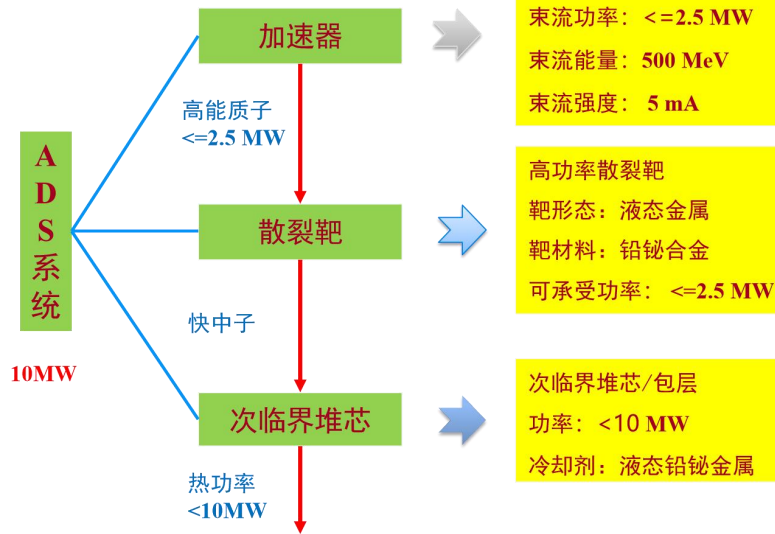


- 核裂变能发展可持续发展的问题
- **加速器驱动嬗变装置CiADS及其进展**
- 依托CiADS的实验终端及其进展

## CiADS主要组成



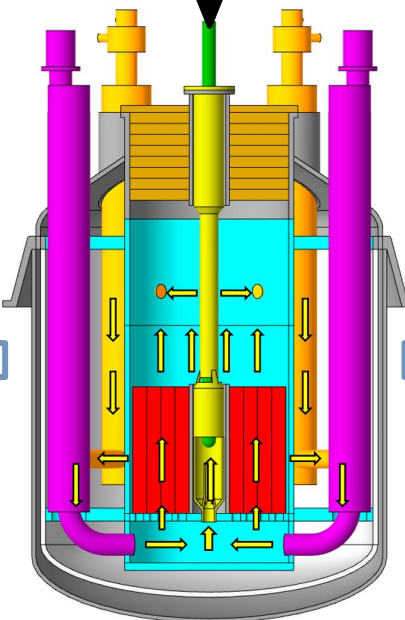
强流直线加速器



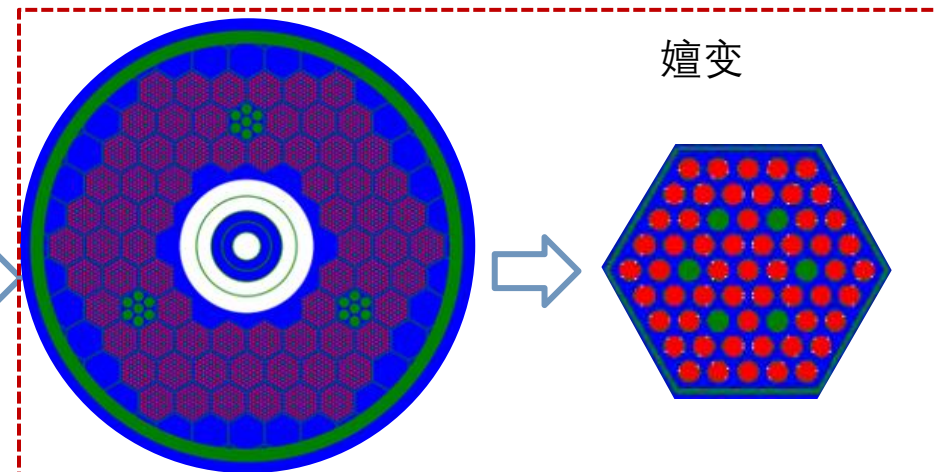
散裂反应



散裂靶



铅基次临界快堆



堆芯

乏燃料

建设单位：近代物理研究所  
 参建单位：原子能院  
 合作单位：高能所，中广核  
 建设地点：广东惠州  
 建设经费：~40亿

CiADS基本参数		
CiADS	总热输出	10 MW
加速器	束流	Proton
	最大功率	2.5MW (500MeV&5mA)
散裂靶	靶材	LBE
	功率	2.5 MW
次临界堆	一回路冷却剂	LBE
	功率	7.5 MW

一期; 加速器和通用设施;  
2022~2024

二期; 反应堆和实验大厅;  
2025-2027

- T1: ADS终端, 10MW堆靶系统,  $K_{eff}$  0.75~0.97;
- T2: 高功率铅铋靶验证终端;
- T3: 材料质子、中子辐照终端;
- T4: ADS中子学研究和数据库终端
- T5: 未来规划待定ISOL、u子终端





- ✓ 建设**全球首个**实现高功率耦合运行的**兆瓦级**加速器驱动嬗变研究装置。全超导加速器驱动系统热功率**10兆瓦**，包含束流功率约**2.5兆瓦**，次临界反应堆芯/包层热功率约**7.5兆瓦**，可以实现**单次大于24小时**满功率耦合运行。

深入探索核废料嬗变过程中的科学技术问题，奠定ADS工业示范装置建设基础

- 突破核废料嬗变系统（ADS）的系列核心关键技术
- 研究器靶堆耦合特性和ADS装置性能，检验系统稳定性和可靠性
- 开展次锕系元素嬗变原理性实验研究
- 开展ADS设计软件开发研究

## 2022年:

8月: 国投界面招标; 10月: 地投界面封顶; 11月国投界面动工。

## 2023年:

3 月: 隧道实现**第一次水泥浇筑**;

4-10月: 隧道**首段封顶** (跳仓式) —4月, 各单体陆续动工;

11 月: 隧道**全部完成浇筑**, 其余子项陆续封顶

12 月: 综合工艺管廊 (B00) 施工面交付, 加速器设备厅 (B03) 封顶

## 2024年

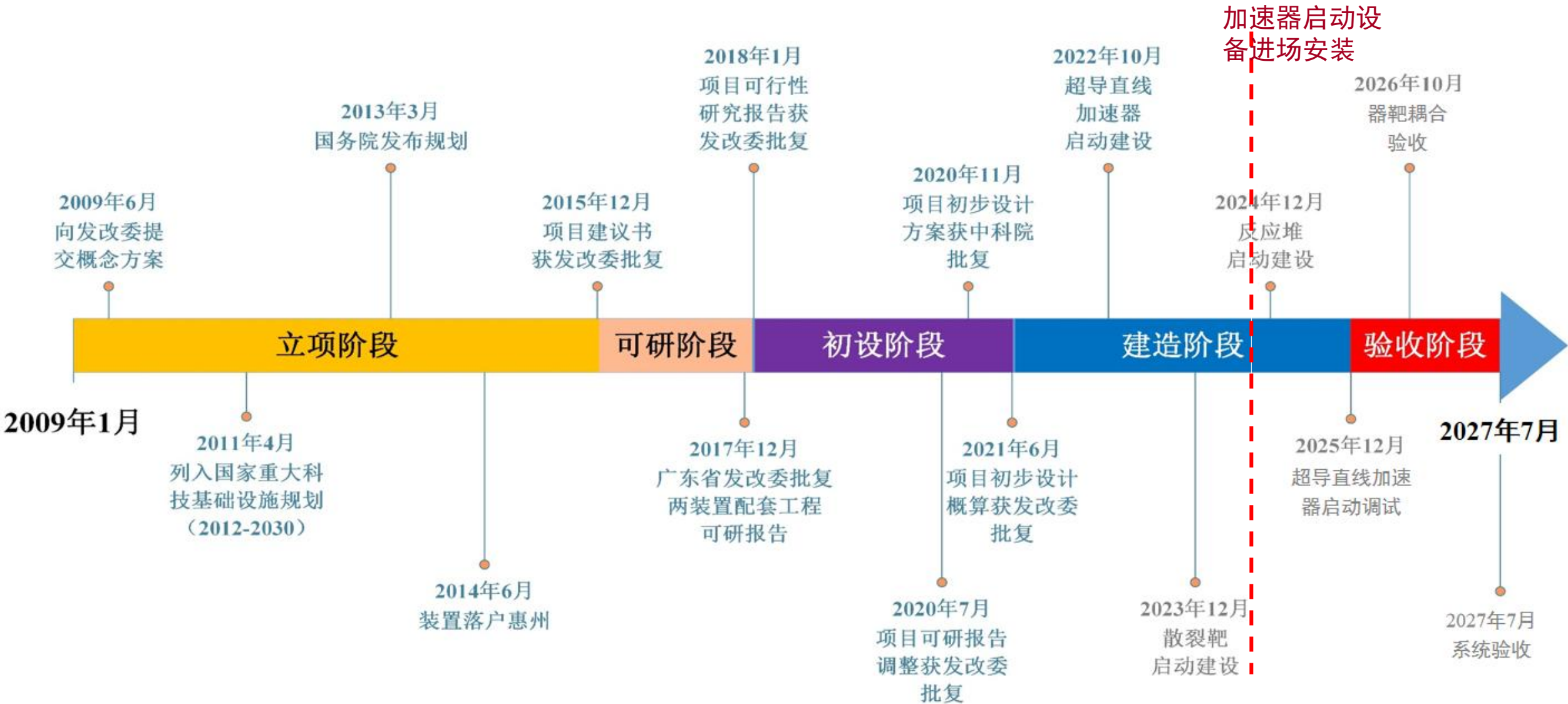
1 月: B06、B08、B09屋顶钢构完工

4-10月: 土建进入机电安装, 内外装修期, 各配套系统陆续进入安装

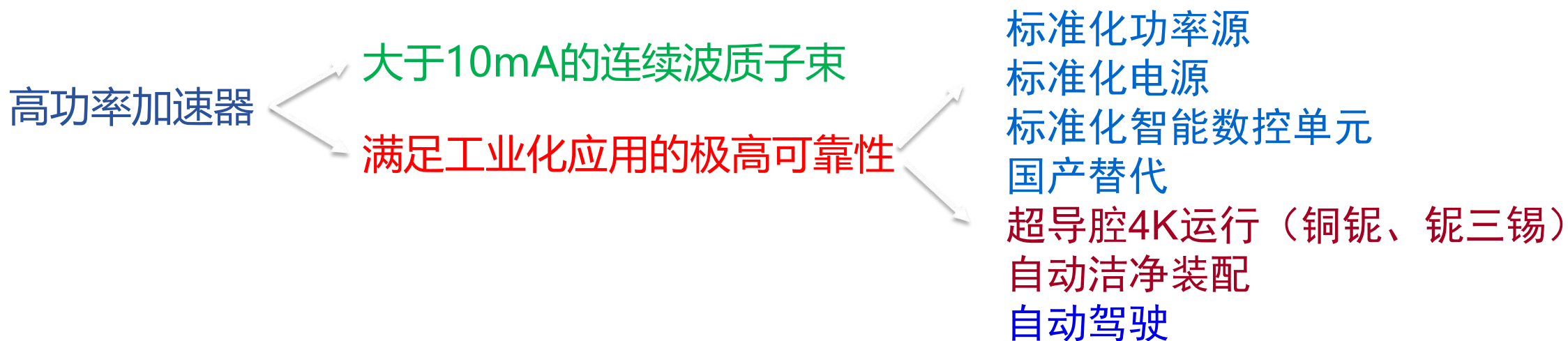
11 月: 准备交付验收

## 2025年

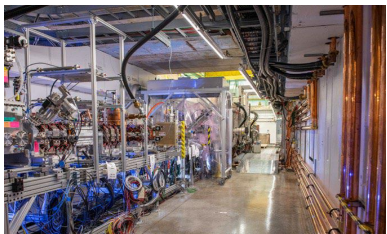
5 月: B05、B02、B04、B07开工



# 超导直线加速器进展



## PII/PXIE



2mA, 25MeV

## EURISOL/SPIRAL2



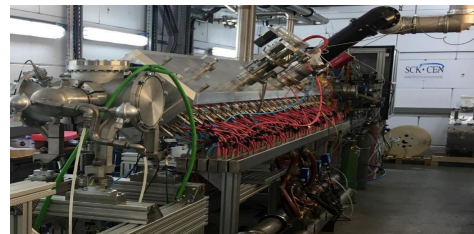
5mA, 40MeV

## SARAF



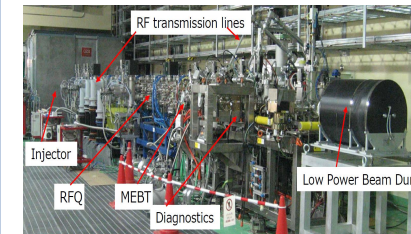
5mA, 40MeV

## MYRRHA/MINERVA



4mA, 100MeV

## IFMIF/LIPAC



125mA, 9MeV

### CERN COURIER

Reporting on international high-energy physics

Physics Technology Community In focus Magazine

Jobs | | |



ACCELERATORS | NEWS

#### High-power linac shows promise for accelerator-driven reactors

China's superconducting proton accelerator is designed to drive a future subcritical reactor for nuclear-energy generation.

STRONG INTERACTIONS | NEWS

#### Odderon discovered

An analysis by TOTEM and DØ researchers shows the existence of a long-predicted three-gluon state.

FLAVOUR PHYSICS | NEWS

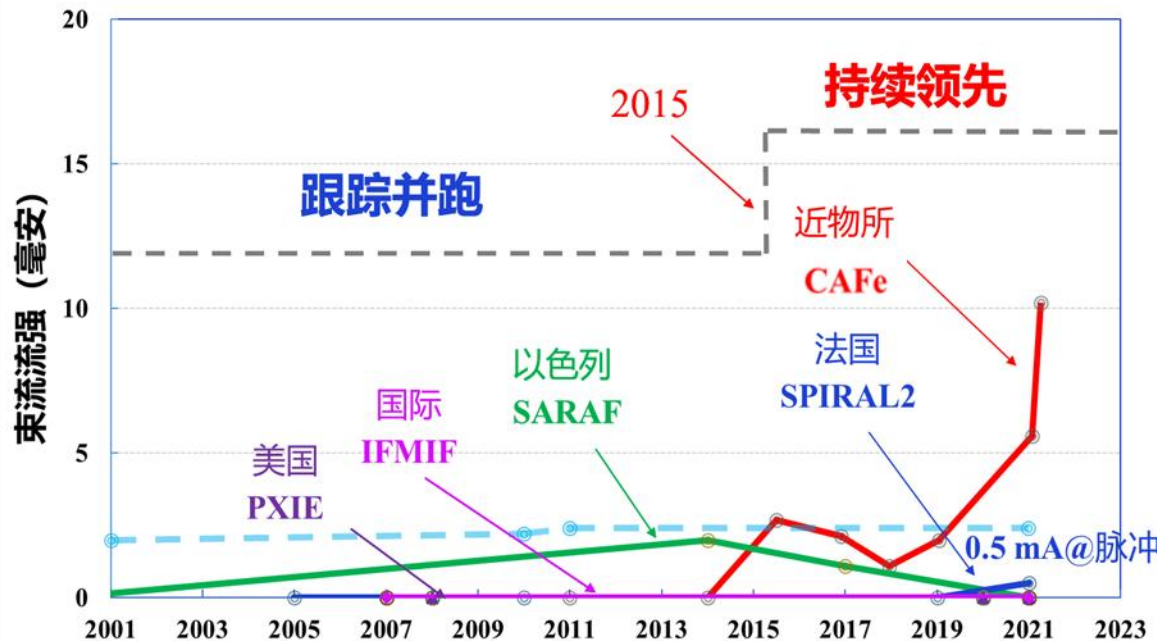
#### LHCb observes four new tetraquarks

The collaboration has used Run 2 data to add new exotic states to the tally of tetraquarks previously discovered in  $B^+ \rightarrow J/\psi \rho^+ K^+$  decays in 2016.

APPLICATIONS | NEWS

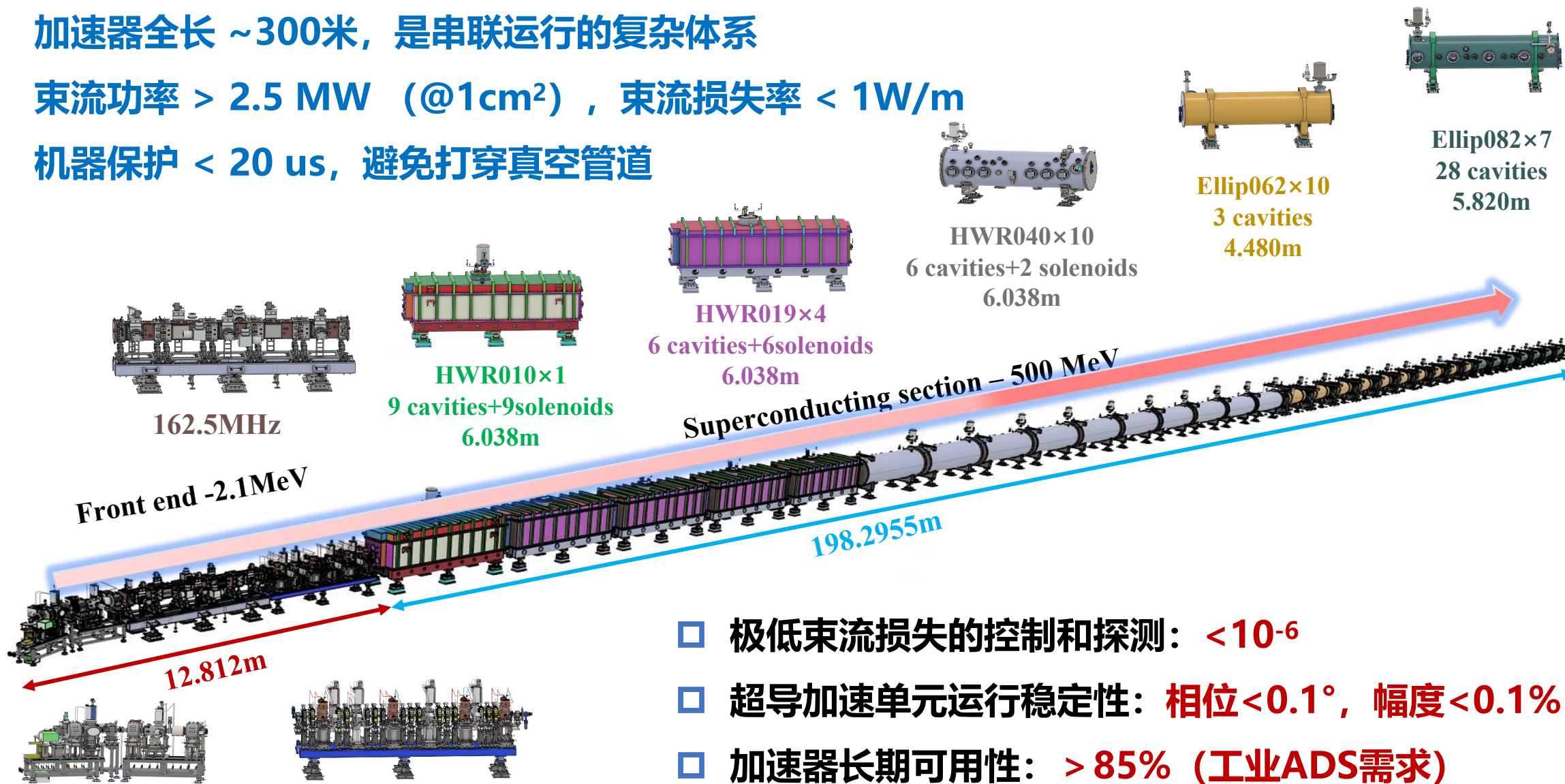
#### Iodine aerosol production could accelerate Arctic melting

Studies at CERN's CLOUD experiment reveal that part-per-trillion-by-volume iodine levels in marine regions lead to rapid formation of iodine acid particles



2021年突破10mA连续束流，目前仍保持领先地位，是ADS领域的里程碑事件

- 加速器全长 ~300米, 是串联运行的复杂体系
- 束流功率 > 2.5 MW (@1cm<sup>2</sup>), 束流损失率 < 1W/m
- 机器保护 < 20 us, 避免打穿真空管道



- 极低束流损失的控制和探测: < 10<sup>-6</sup>
- 超导加速单元运行稳定性: 相位 < 0.1°, 幅度 < 0.1%
- 加速器长期可用性: > 85% (工业ADS需求)



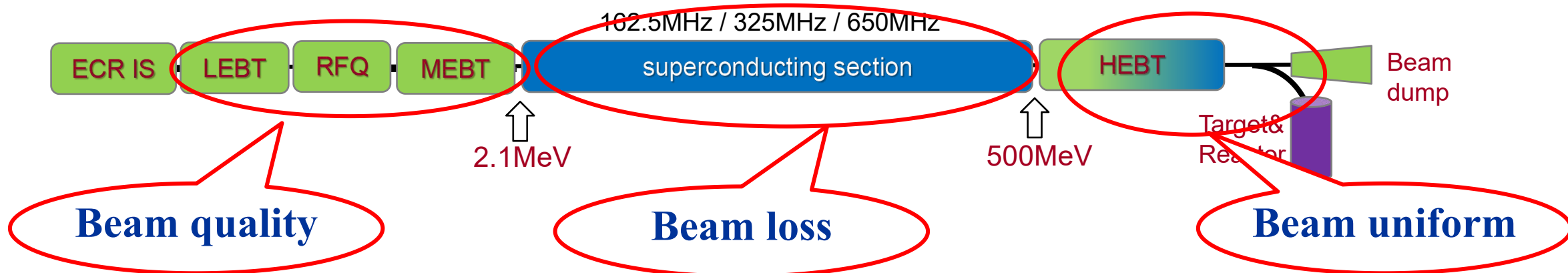
## 超导直线加速器总体设计参数

粒子种类	H <sup>+</sup>	
束流能量	600	MeV
束流强度	5	mA
束流功率	3	MW
射频频率	162.5/325/650	MHz
运行模式	CW&Pulse	
束流损失	< 1	W/m

- 600 MeV, 5 mA连续波质子直线加速器, 束流功率3 MW, 将是国际上束流功率最高的加速器装置, 束流损失控制是核心物理问题

### 各传输段功能及设计特点:

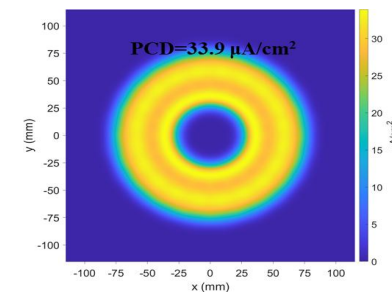
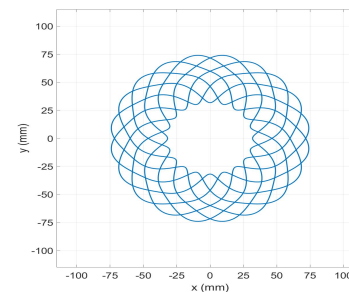
- 常温前端: 优化控制束流品质, 测量束流参数
- 超导加速段: 高稳定性, 可补偿性及高鲁棒性
- 高能传输段及束流收集终端: 束流密度均匀化, 高功率束流监测及保护



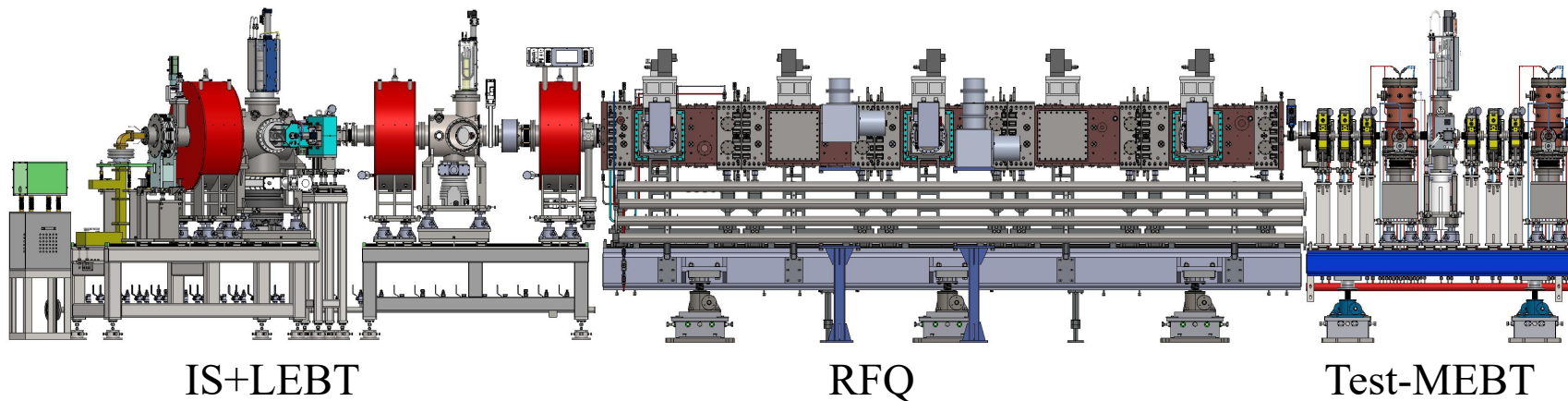
- **LEBT** : Transverse beam quality control- Bend structure + beam scraping
- **RFQ** : Longitudinal beam quality control- Full particle optimization
- **MEBT**: Beam halo control- Full space scraping

- **Low beam loss control**
  - ✓ **Lattice optimization**  
compact quasi-periodic structure and periodic lattice
  - ✓ **Beam matching** for mitigating halo formation and beam emittance growth
  - ✓ **Beam halo collimation** to reduce the probability of beam loss on SC elements

- **Beam uniformity by Multi order Sine wave scanning**
  - Fourier harmonic superposition based on scan magnets
  - Fourier harmonic superposition based on RF cavities

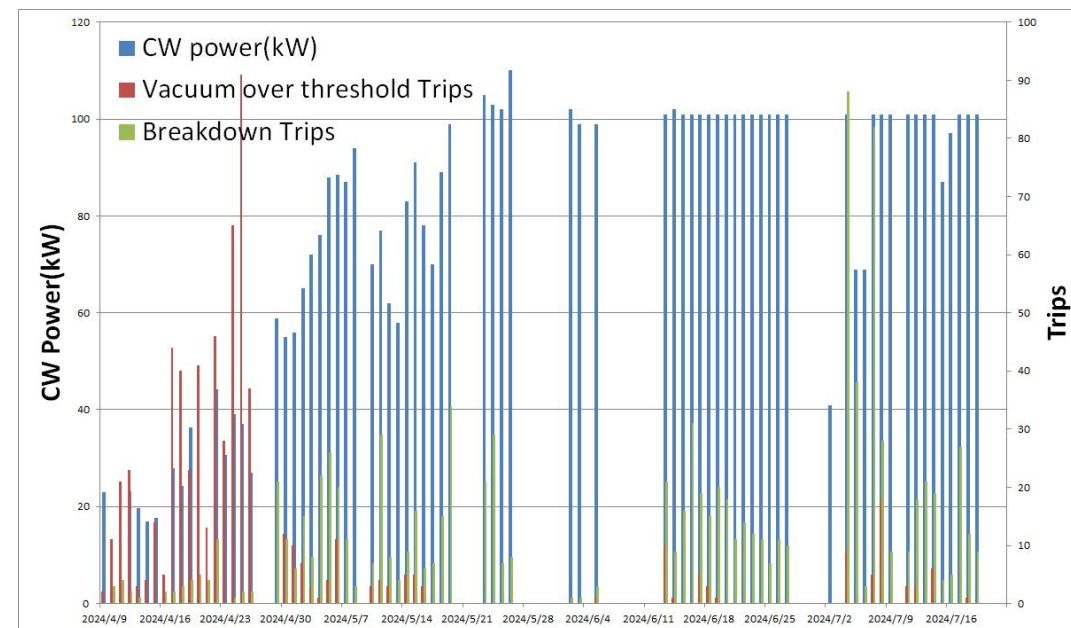


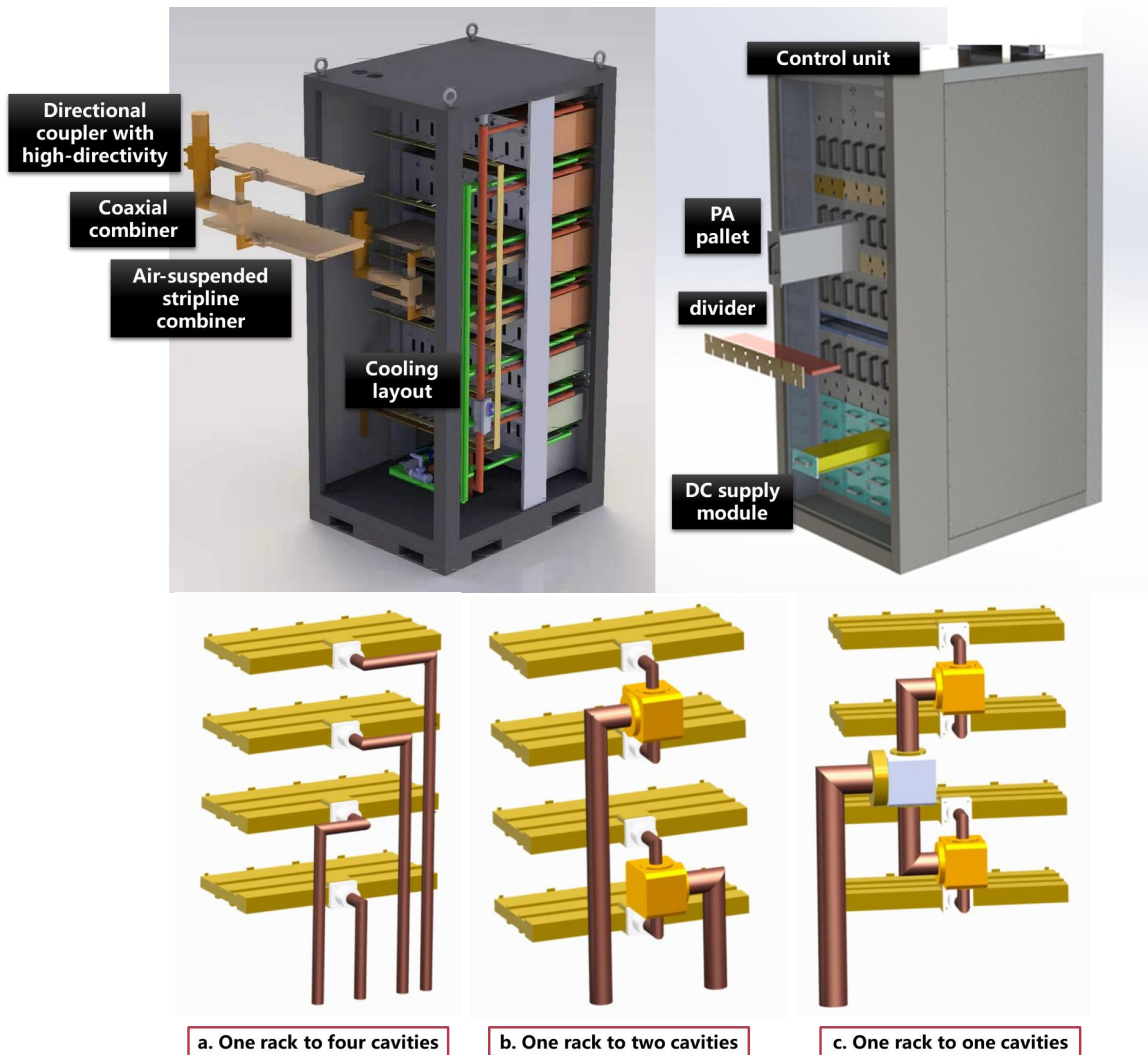




## Beam parameters

Parameters	data	unit
Particle	H <sup>+</sup>	-
Energy	2.1	MeV
Current	5	mA
Frequency	162.5	MHz
Operation mode	Pulse/CW	-





## 设计目标：24\*365 不停机、免维护

- **可靠性：水电分离、固定连接**
- **可用性：模块热插拔、冗余备份**
- **可维护性：功率部件可在线更换**
- **可检测性：智能前端、边缘计算**
- **可扩展性：分级灵活合成、可升级扩展**

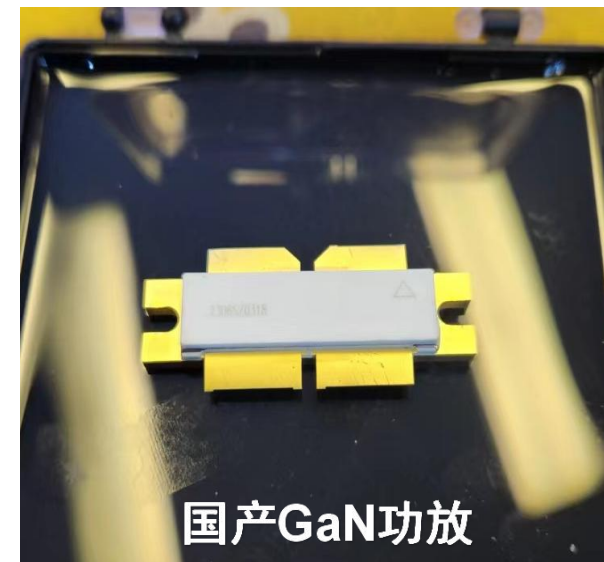
十年磨一剑，从技术上解决了不能标准的问题，已经国家标准立项

## 固态功率源标准化规范：

- 结构标准：合成、电源、电气、水冷、射频等
- 射频模块：81.25MHz、162.5MHz、325MHz、650MHz系列、电气、监测等
- 测控模块：标准数字控制器
- 电气模块：电磁兼容
- 合成模块：射频隔离
- 电源模块：并联、自均流
- 水冷模块：水电分离
- 结构模块：机柜



插件互换成功，实现标准化



国产GaN功放



中国科学院近代物理研究所  
功率源主控器

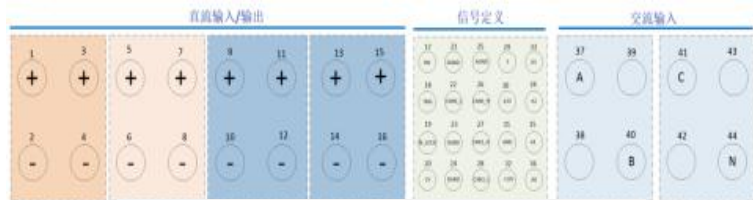
高功率固态功率源及其标准化通过现场测试

2023年9月13日

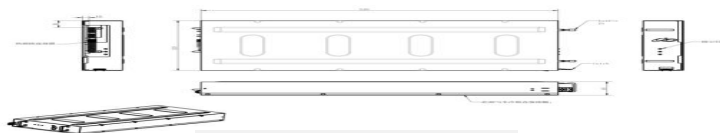


功率源通过专家组测试

- 固态功率器件如**GaN和射频电容等**实现全国产化替代，**P波段功率容量提升50%，效率提升15%**；
- 固态功率源技术取得多项突破，实现了：**热插拔、灵活合成、相变冷却、超高脉冲功率等.....**
- **CiADS功率源已完成80%，正在分批运抵惠州现场；**



标准化电源模块电气接口设计



标准化电源模块



标准化电源机柜



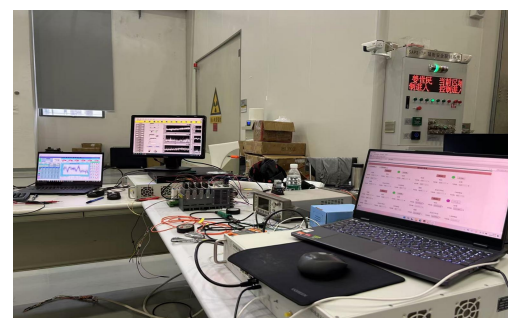
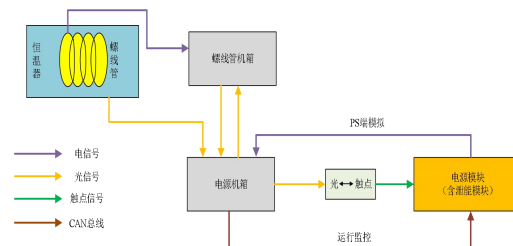
标准化电源机柜批量生产



电源模块并机



电源模块并机



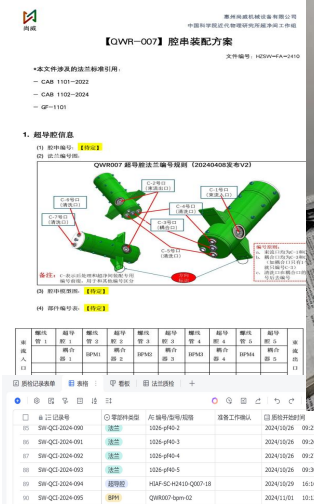
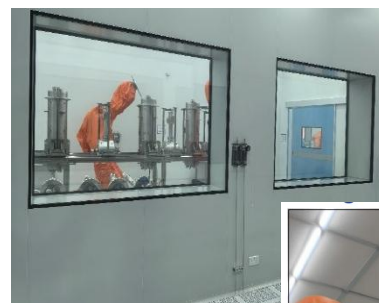
**□ 5kW和1.2kW两种模块设计，满足全线要求**  
**□ 模块并机已正常运行，开始批量安装。**

## 洁净装配的挑战——质量控制

**指标高：**洁净等级ISO1，超过硬盘装配标准。

**难度大：**超大尺寸、大重量超导腔，洁净等级环境，重载装配集成。

**控制难：**流程标准化，无可检测指标，要求100%无污染。



装配地点	2024年11月	2024年12月	2025年01月	2025年02月	2025年03月	2025年04月	2025年05月	2025年06月	2025年07月	2025年08月	2025年09月	2025年10月	2025年11月	2025年12月	2026年01月	2026年02月	2026年03月
装置区B06超净间	HIAF QWR007 6套装配		HIAF HWR015 11套装配		HIAF015+ CiADS010		CiADS HWR010/019/040 15套装配				椭球型超导腔						
兰州新区超净间	IP-SAFE HWR010 2套			IP-SAFE HWR015 3套		IP-SAFE HWR040 4套		自动化装配技术开发									
惠州总部区超净间	垂测腔装配/备用超导腔腔产产能																



Assisting solenoids



Assisting cavities



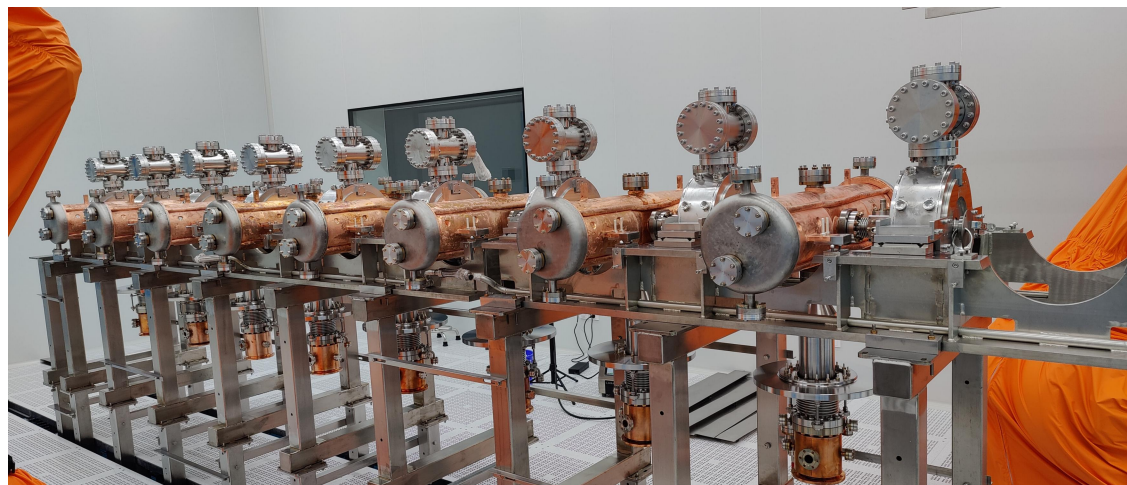
Assisting couplers

## 水平测试条件

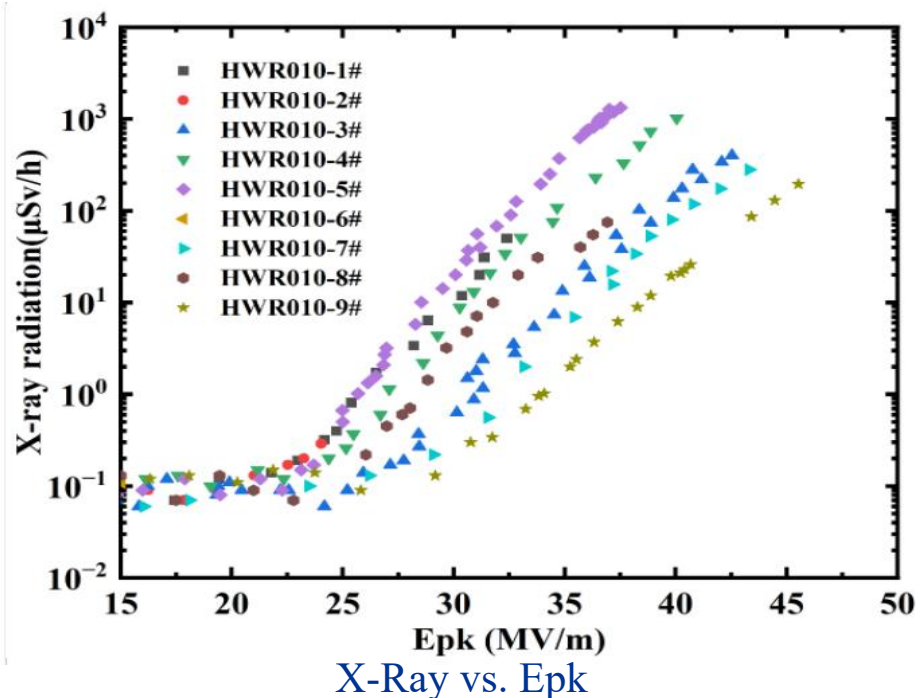
- 9个 HWR010 Cu/Nb 复合超导腔
- 氦压调谐器（国内首次使用）

## 水平测试结果

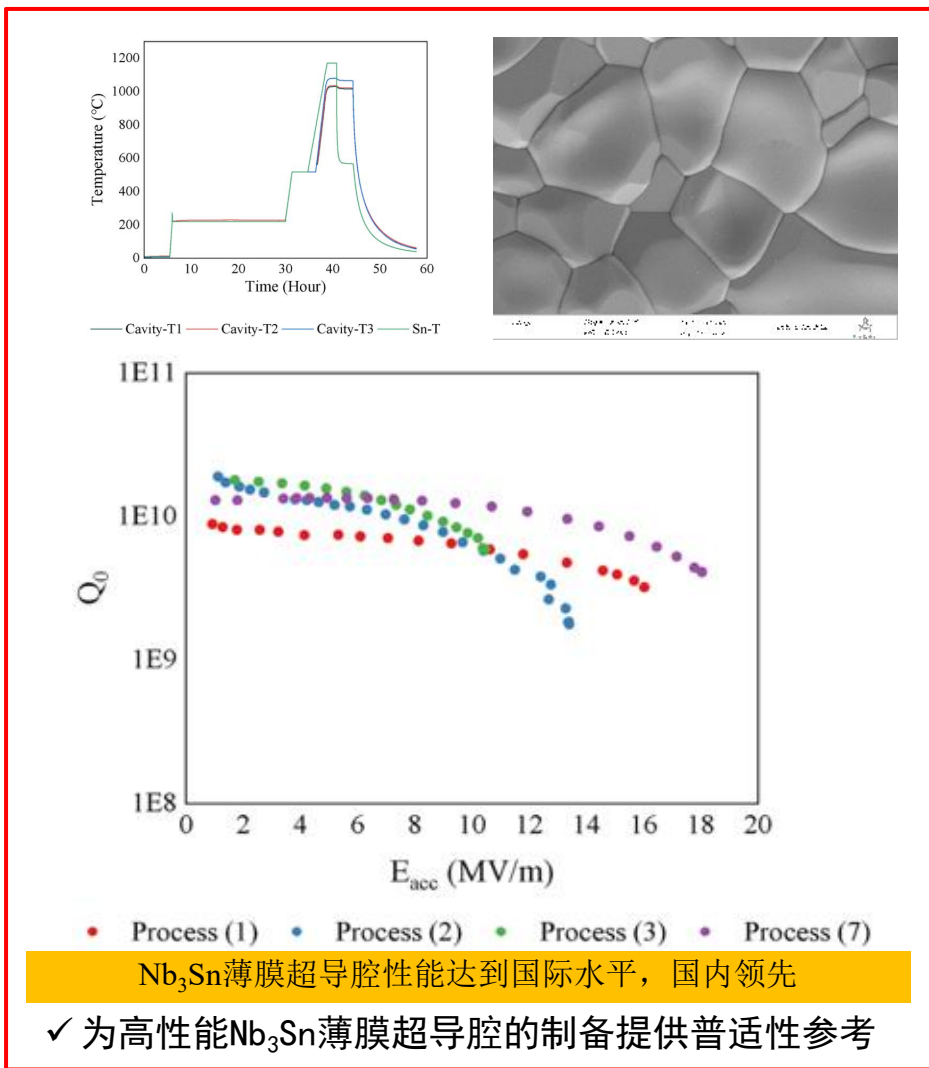
- 平均  $E_{pk} \sim 35.3$  MV/m, 超过设计指标
- 机械参数:  $df/dp (\sim 4 \text{ Hz/mbar})$ ,  $LFD (\sim -0.54 \text{ Hz}/(\text{MV/m})^2)$



The assembled 9 HWR010 Cu/Nb cavities string



Parameter	铌腔加筋	Cu/Nb腔水平测试
$df/dp$ (Hz/mbar)	$\sim -73.09$	$\sim 4$
LFD_coef. (Hz/(MV/m) <sup>2</sup> )	$\sim -35.85$	$\sim -0.54$



## Nb<sub>3</sub>Sn 固体传导冷却电子超导加速器项目测试验收意见

2024年4月15日，先进能源科学与技术广东省实验室在惠州组织了实验室科研平台项目“Nb<sub>3</sub>Sn 固体传导冷却电子超导加速器”测试验收会，专家组由来自中国科学院高能物理研究所、清华大学、北京大学、中国科学技术大学、四川大学、中国科学院大连化学物理研究所的八位专家组成（名单附后）。专家组听取了项目组的研制与测试报告，现场测试了固体传导冷却 Nb<sub>3</sub>Sn 电子超导加速器。经质询、讨论，形成如下验收意见：

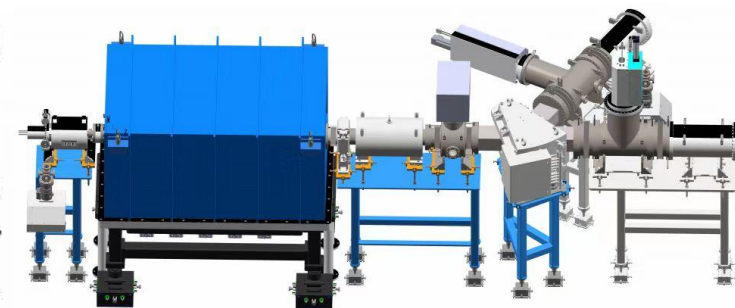
- 1、研制的 Nb<sub>3</sub>Sn 固体传导冷却电子超导加速器实现了电子束能量 4.6MeV、宏脉冲流强 119mA，测试中平均流强为 48nA。项目达到了验收指标。
- 2、项目成功研制了 Nb<sub>3</sub>Sn 电子超导加速器，并在国际上首次实现稳定载束。

专家组一致同意通过项目验收。

专家组组长签字：潘平

2024年4月15日

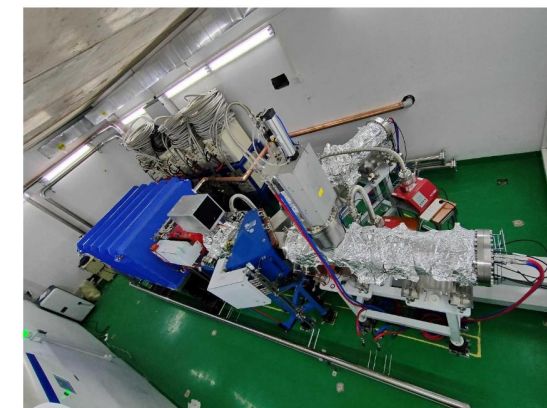
## ADS椭圆腔段未来技术验证



## 国际首次实现铌三锡超导电子加速器稳定载束

2024-04-23 13:48 | 来源：中国网 中国发展门户网 | 分享到

中国网/中国发展门户网讯 近日，中国科学院近代物理研究所与东江实验室在铌三锡材料的射频超导应用方面取得重要进展，研制的铌三锡固体传导冷却超导电子加速器在国际上首次实现稳定载束。

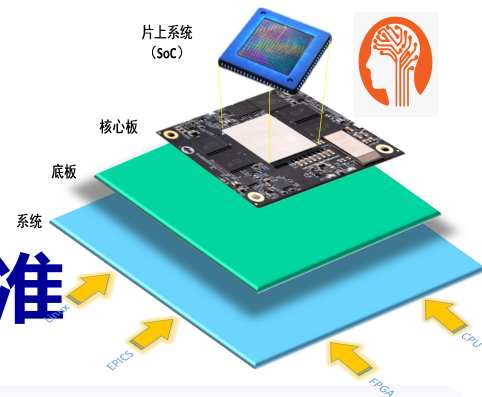


图为固体传导冷却铌三锡电子超导加速器

## • 加速器通用智慧信息终端

( **G**eneral **I**ntelligent **A**ccelerator information **N** Terminal )

### 建立CiADS控制器GIANT的硬件配置与软件设计工程标准



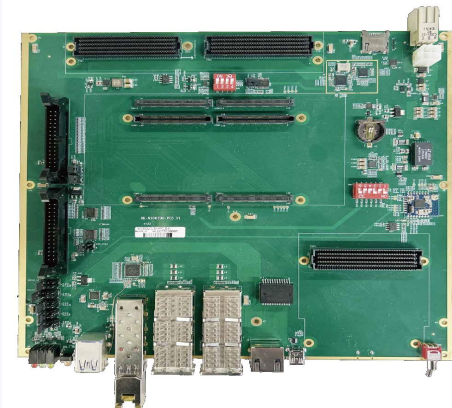
- ✓ 实现各系统硬件与软件设计模块化、标准化，极大地提高了系统适用性、灵活性与可拓展性
- ✓ 适用于CiADS和HIAF直线加速器磁铁、电源、功率源、束测的多个型号系列已完成应用测试，现已在两装置批量制备



UT19EG



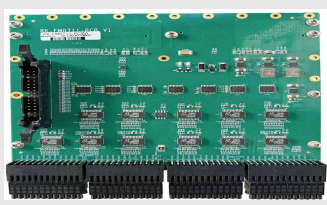
ZQ7100



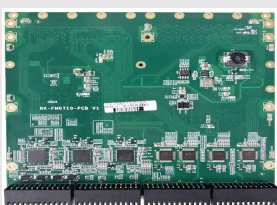
ST1000



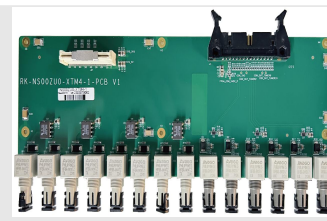
FH1002H



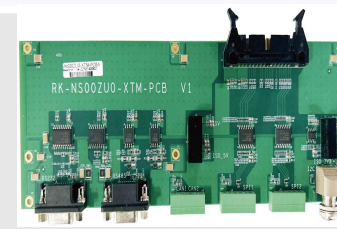
FH4400L



FH3200L

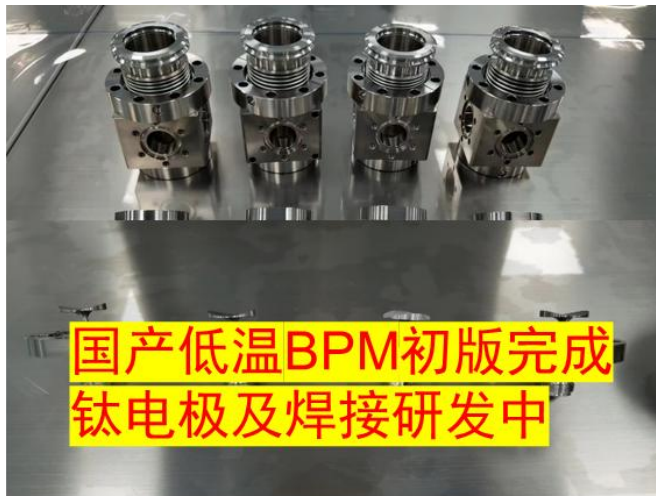


OF1400T/1303T

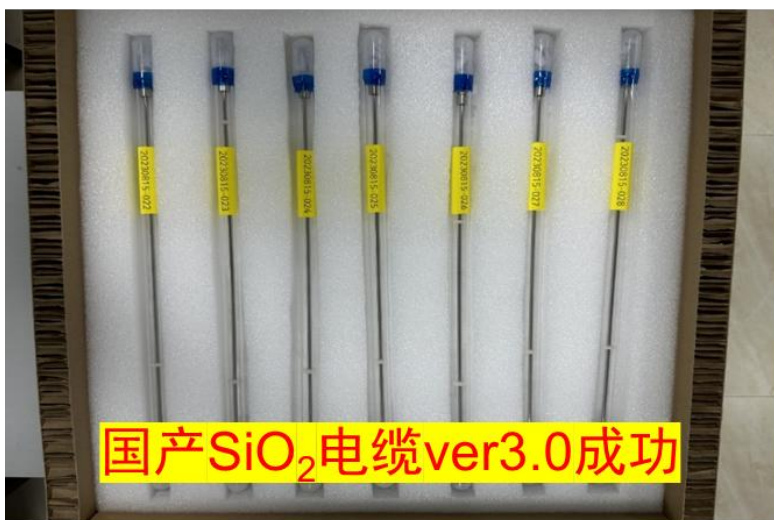


OF8100



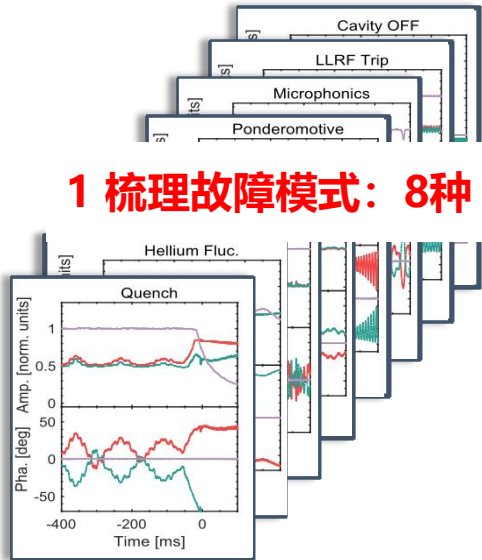


- 关键核心部件DCCT、ACCT、SiO<sub>2</sub>半钢电缆、低温电极实现了国产化替代（部分2024年开始禁运）
- 首套国产万瓦级（18kW@4.5K（含4W@2K））氦制冷机大型液氦制冷机，液化模式已经完成测试，2025年4月已开始安装

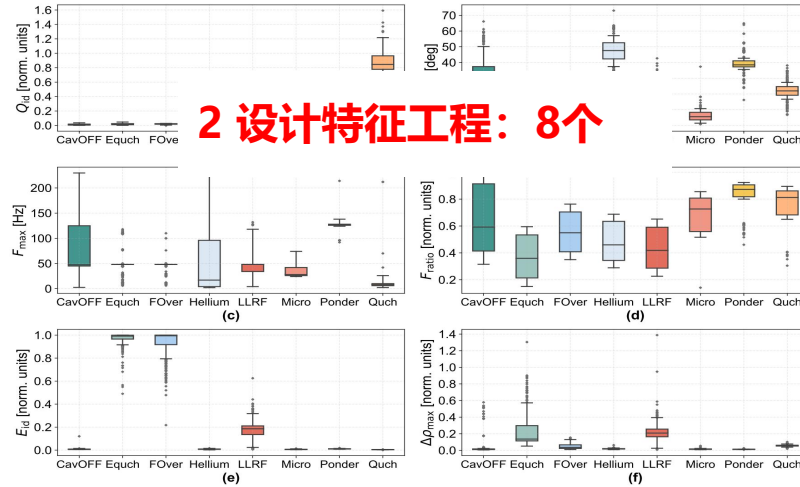




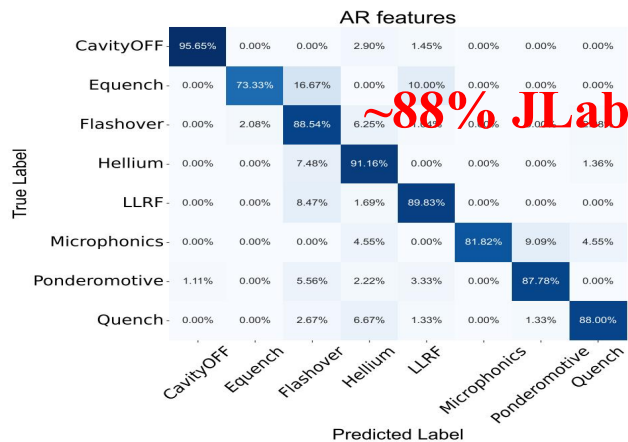
- 实现了超导腔的全自动化故障分类，分类精度约**96%**，优于JLAB (~**88%**)
- NST编辑推荐文章



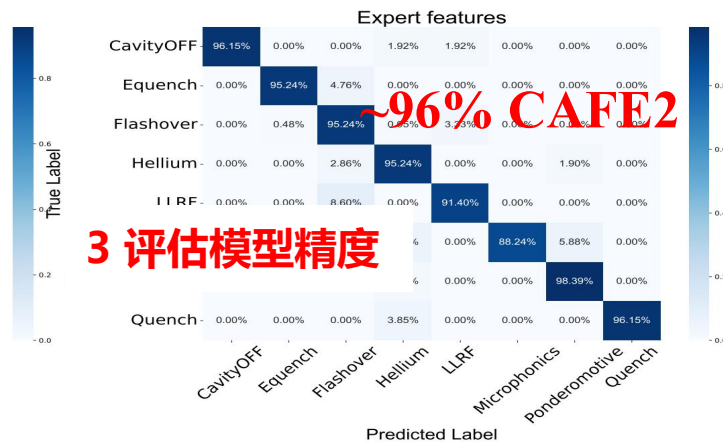
1 梳理故障模式：8种



2 设计特征工程：8个



~88% JLab

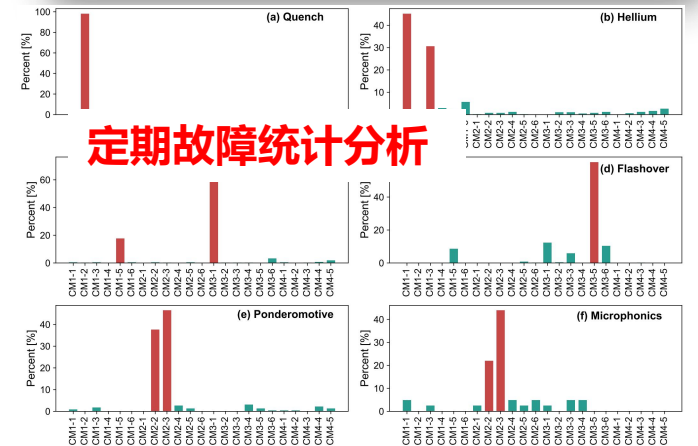


~96% CAFE2

3 评估模型精度

CM	Time	Classification
CM4-2	2024-07-20_18:12:48.779285	Helium
CM4-3	2024-07-20_18:12:48.834327	Microphonics
CM4-4	2024-07-20_18:12:48.757366	Microphonics
CM3-2	2024-07-20_18:15:31.208082	Flashover
CM3-1	2024-07-20_18:15:53.334214	Equench
CM3-3	2024-07-20_18:15:53.334214	Flashover
CM3-4	2024-07-20_18:15:53.334214	LLRF
CM4-3	2024-07-20_18:14:53.234255	LLRF
CM3-2	2024-07-20_18:15:31.208082	Helium
CM4-3	2024-07-20_18:15:53.334214	Microphonics
CM2-4	2024-07-20_18:15:56.129470	Helium
CM4-4	2024-07-20_18:15:55.957324	LLRF
CM3-4	2024-07-20_18:16:15.614068	LLRF

即时故障检测报表



定期故障统计分析

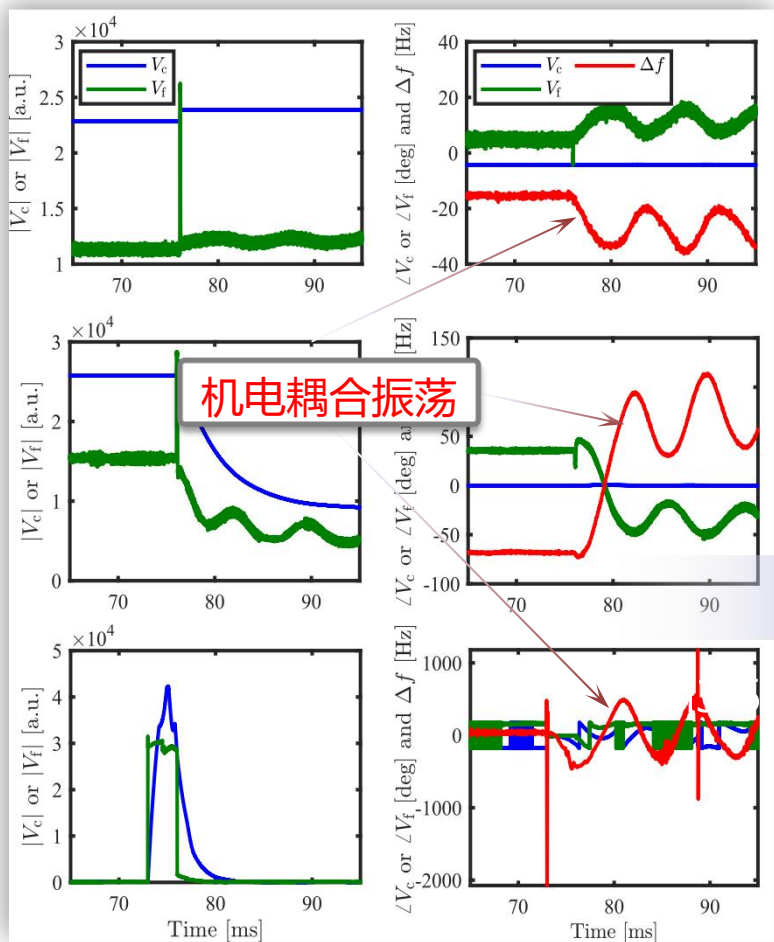
Lijuan Yang, Jiayi Peng, Feng Qiu, et al., Classification of SRF cavity faults of CAFE2 using machine learning, Nucl. Sci. and Tech.

## 基于机电耦合 (Ponderomotive) 故障大数据建模+故障检测算法的的超导腔不稳定模式特征识别

机电耦合大数据集

基于AI的模型辨识算法

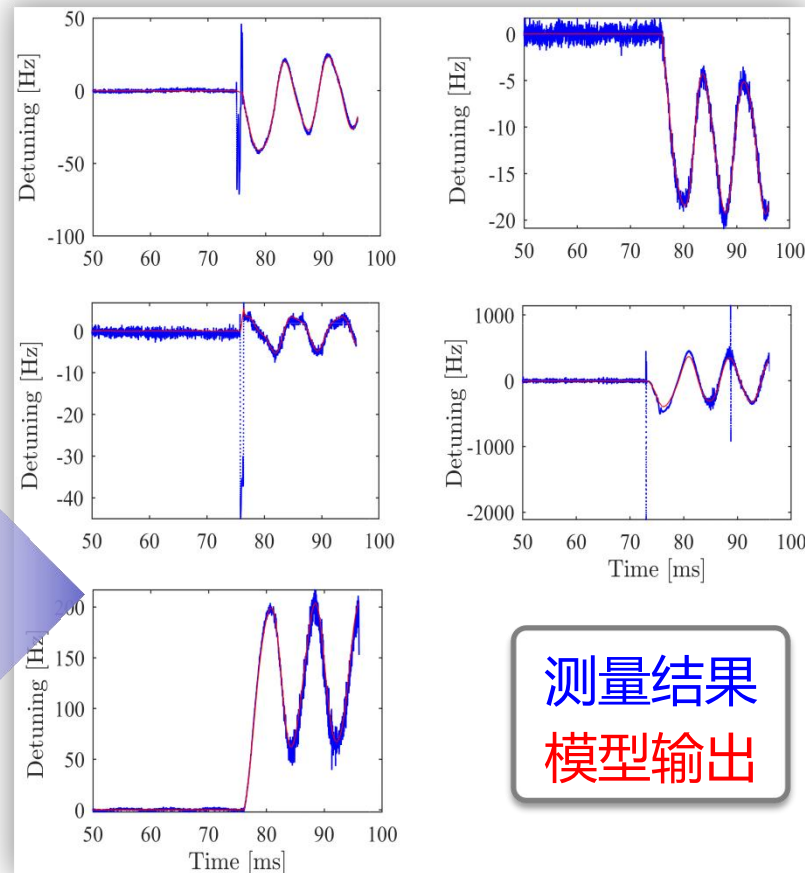
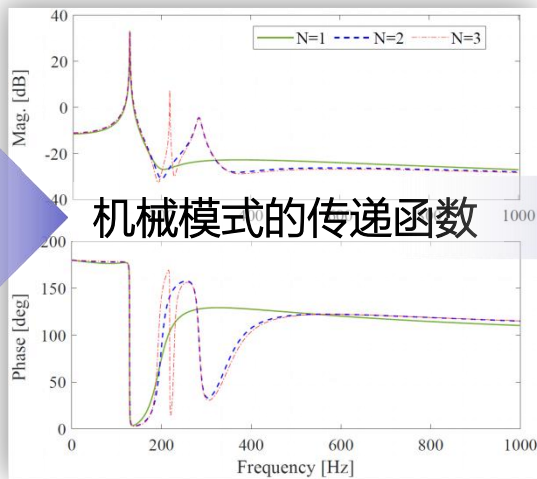
实验验证 (故障预测)



$$\begin{cases} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_{2m}^*(t) \\ x_{2m+1}^*(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} -\omega_{base} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -a^2 & -a/Q & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\omega_{me}^2 & -\omega_{me}/Q_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_{2m}^*(t) \\ x_{2m+1}^*(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{base}\omega_{base} \\ 0 \\ M_1a^2 \\ \vdots \\ M_m\omega_m^2 \end{bmatrix} \cdot u(t),$$

模型辨识算法

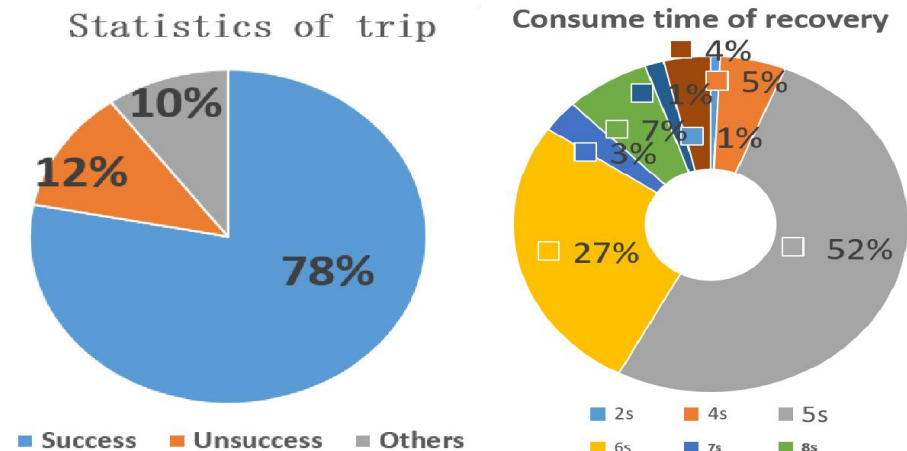
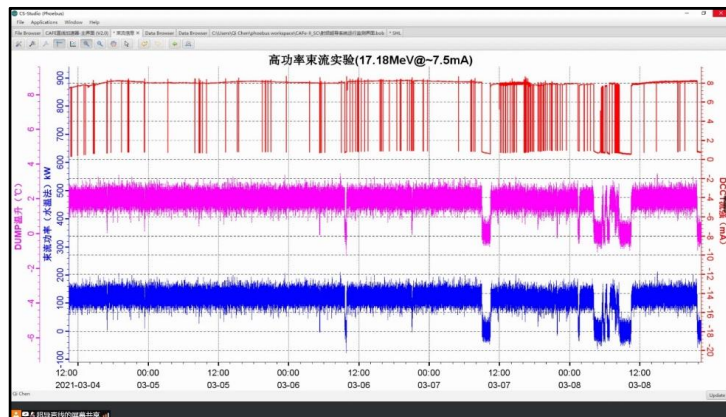
$$[y(t)] = [1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0] [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ \dots \ x_{2m}(t) \ x_{2m+1}(t)]^T;$$



测量结果  
模型输出

## 2021年百千瓦百小时运行测试，可用性93%

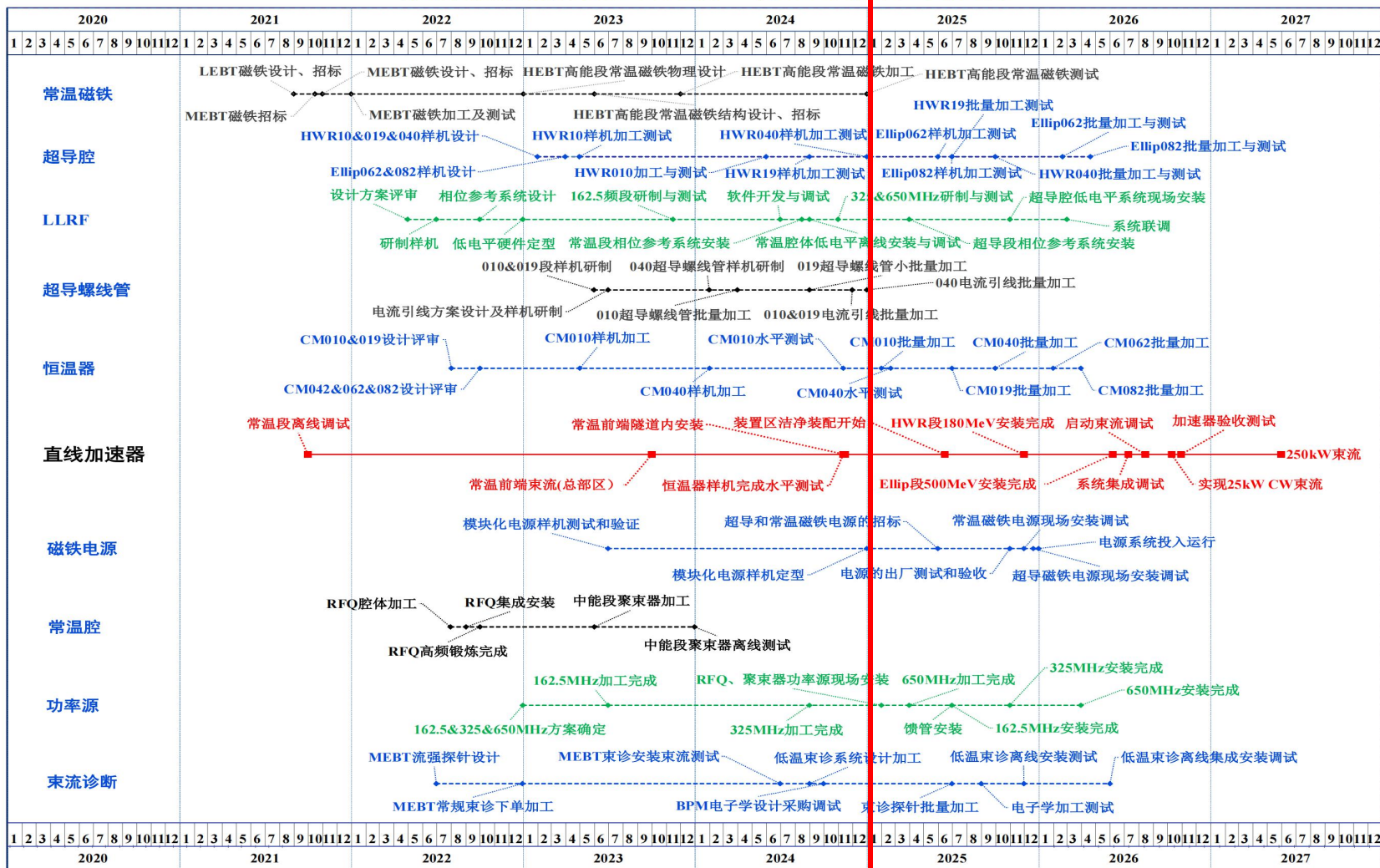
束流能量	17.27±0.03 MeV
束流强度	7.30±0.02 mA
束流功率	126.0 kW
计划运行时间	108 hours
<b>束流可用性</b>	<b>93.6%</b>



2023. 01. 01~2023. 12. 20, 累计开机**6792**小时, 束流时长**5238**小时, 故障时间**555**小时。供有54Cr17+、40Ar12+、48Ca14+、H+等多种重离子束流, 供束效率**89%**。

2023. 12. 01~2024. 11. 17, 累计开机**7012**小时, 束流时长**5143**小时, 故障时间**384**小时。供有54Cr17+、40Ar12+、48Ca14+等多种重离子束流, 供束效率**92%**。

加速器驱动嬗变研究装置 (CiADS) 一级CPM计划 超导直线加速器



- 工艺系统方案 (98%)
- 工程经费 (95%)

- 常温前端 (90%)
- 功率源 (60%)
- 磁铁 (100%)
- 超导腔体 (10%)
- 低温恒温器 (10%)
- 电源系统 (20%)
- 束诊系统 (50%)
- 低电平 (30%)

- ✓ 洁净装配
- ✓ Dirty装配
- ✓ 隧道真空集成
- ✓ 线缆集成冷测

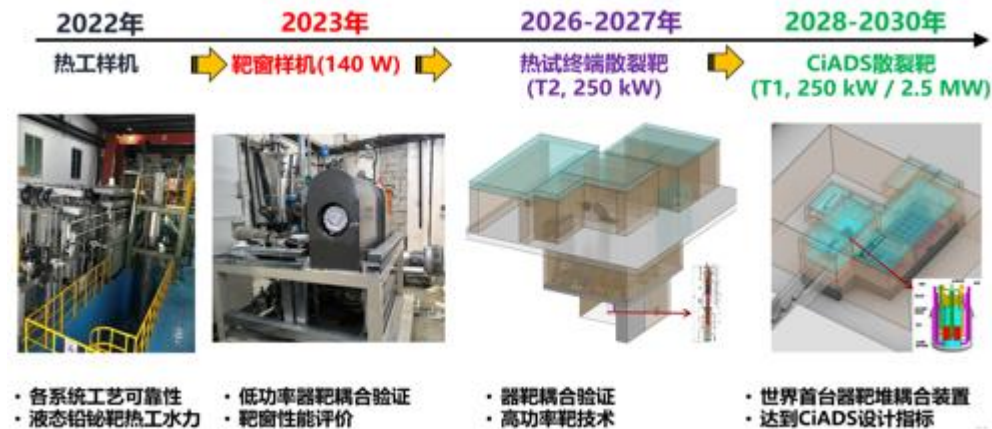
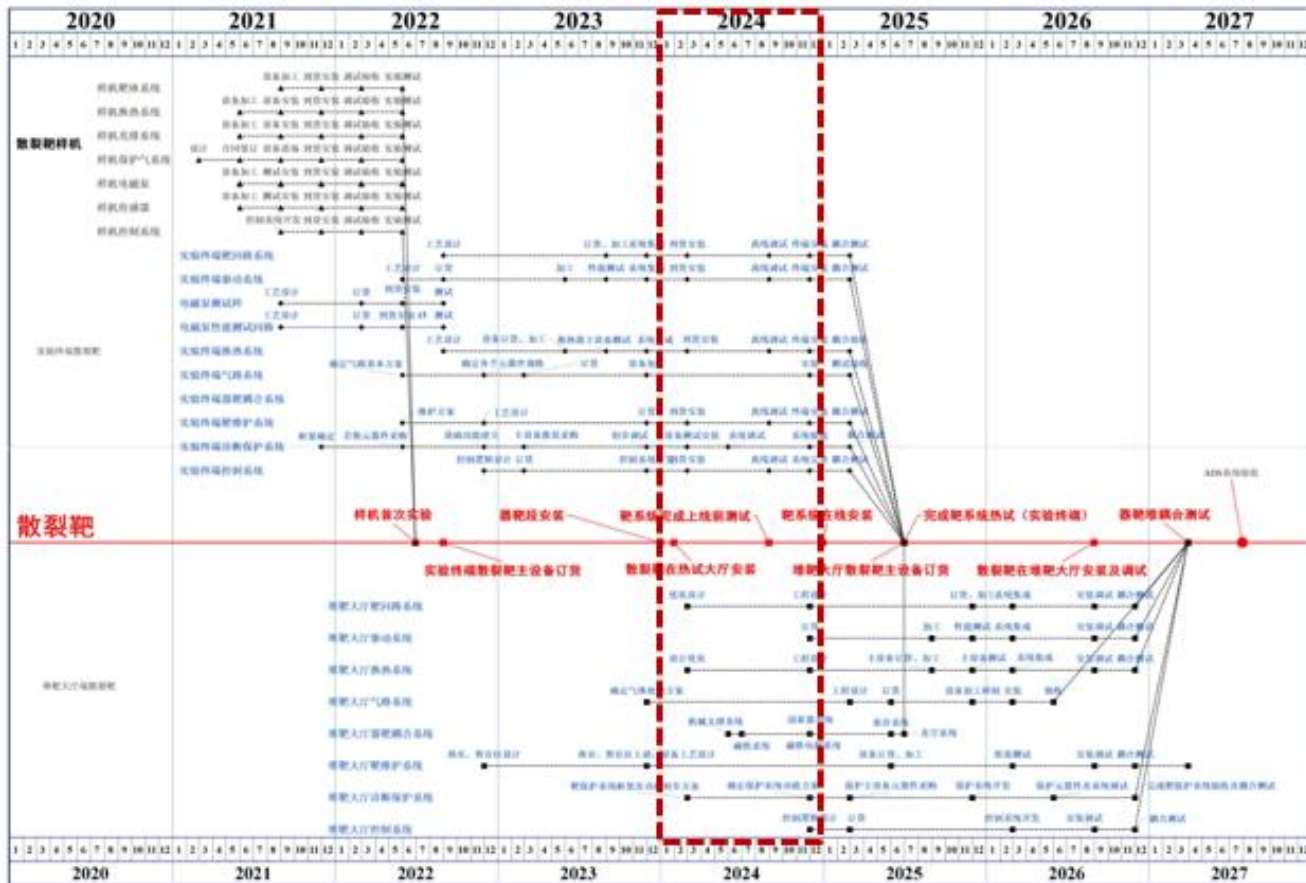
# 高功率散裂靶进展







加速器驱动嬗变研究装置 (CiADS) 项目一级CPM计划 高功率散裂靶 2021年10月



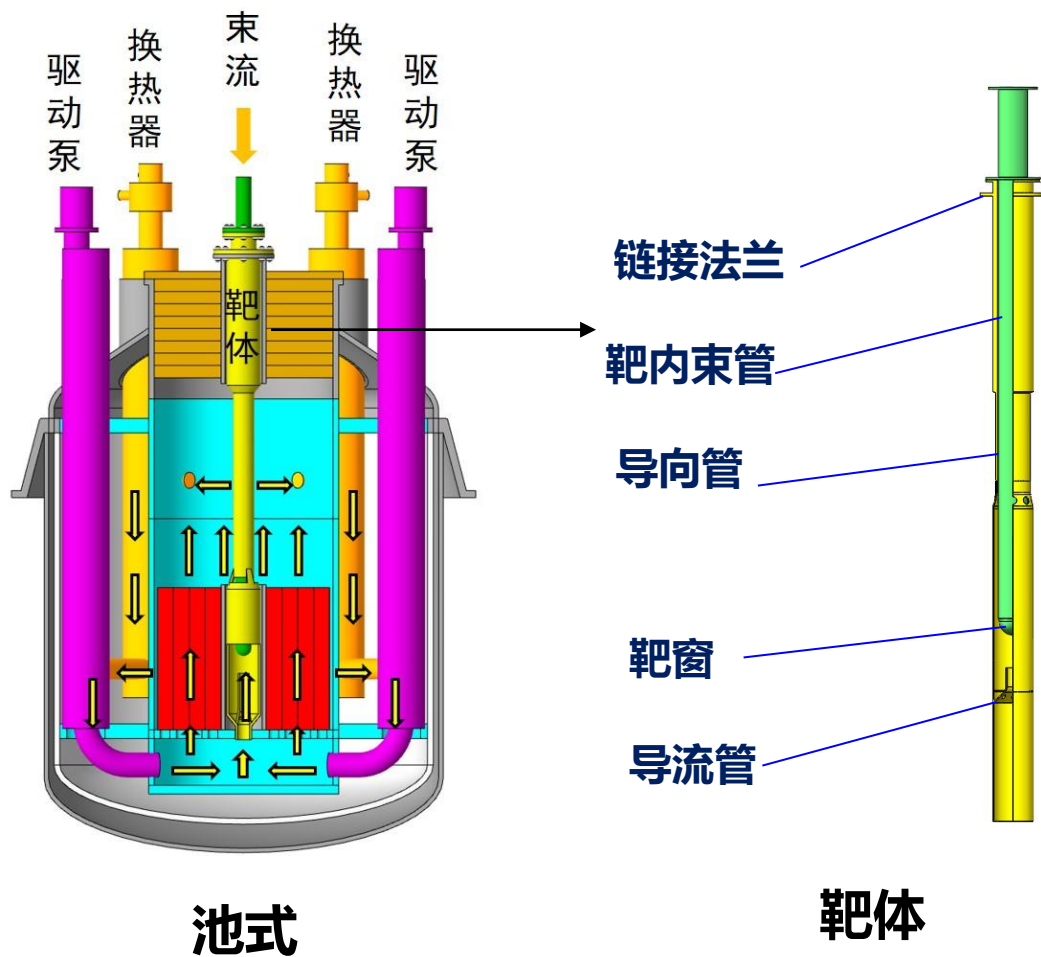
(1)堆靶大厅散裂靶的耦合设计

(2)热试终端散裂靶 (GJ任务)

(3)GJ专项任务实施

按计划完成





## □ 主要特点:

- 靶和堆之间相通，无隔离界面
- 堆靶大部分工艺系统，包括各自一回路、换热系统、保护气系统、驱动系统、维护系统均耦合运行，大幅提升运行效率。

## □ 堆靶耦合运行模式:

- 运行介质：堆一回路冷却剂与靶工质共用；
- 一回路：堆驱动系统通过流量分配同时驱动堆一回路及靶回路介质循环，冷却靶窗并移除靶区束流热沉积；
- 二回路：堆二回路同时满足次临界堆芯和散裂靶换热需求。

## 入堆前工程验证

## 正式入堆

2022年

2023年

2026-2027年

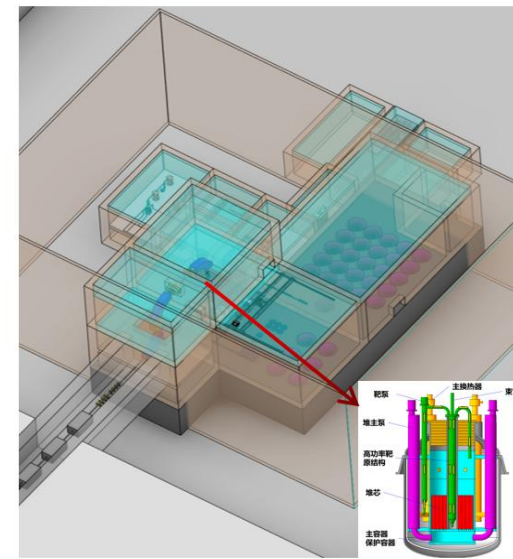
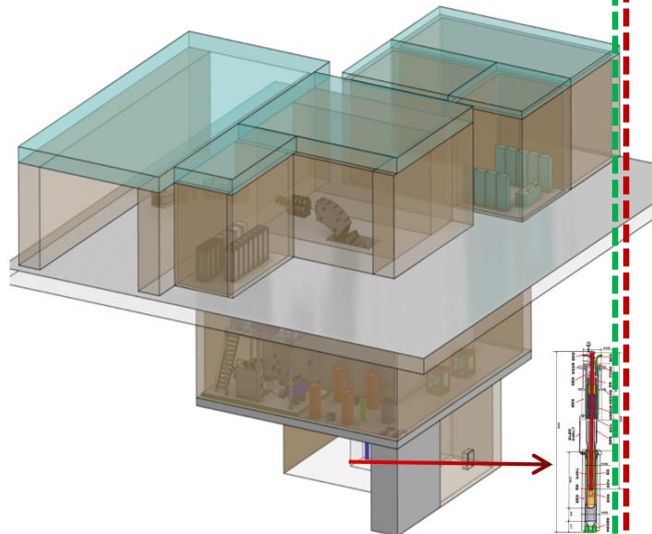
2028-2030年

热工样机

靶窗样机(140 W)

热试终端散裂靶  
(T2, 250 kW)

CiADS散裂靶  
(T1, 250 kW / 2.5 MW)



- 各系统工艺可靠性
- 液态铅铋靶热工水力

- 低功率器靶耦合验证
- 靶窗性能评价

- 器靶耦合验证
- 高功率靶技术

- 世界首台器靶堆耦合装置
- 达到CiADS设计指标



## 验证目标：

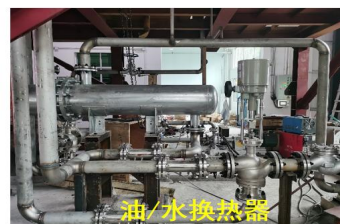
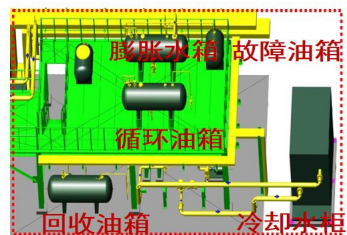
- 散裂靶系统热工设计指标和关键设备的性能验证

## 物理特点：

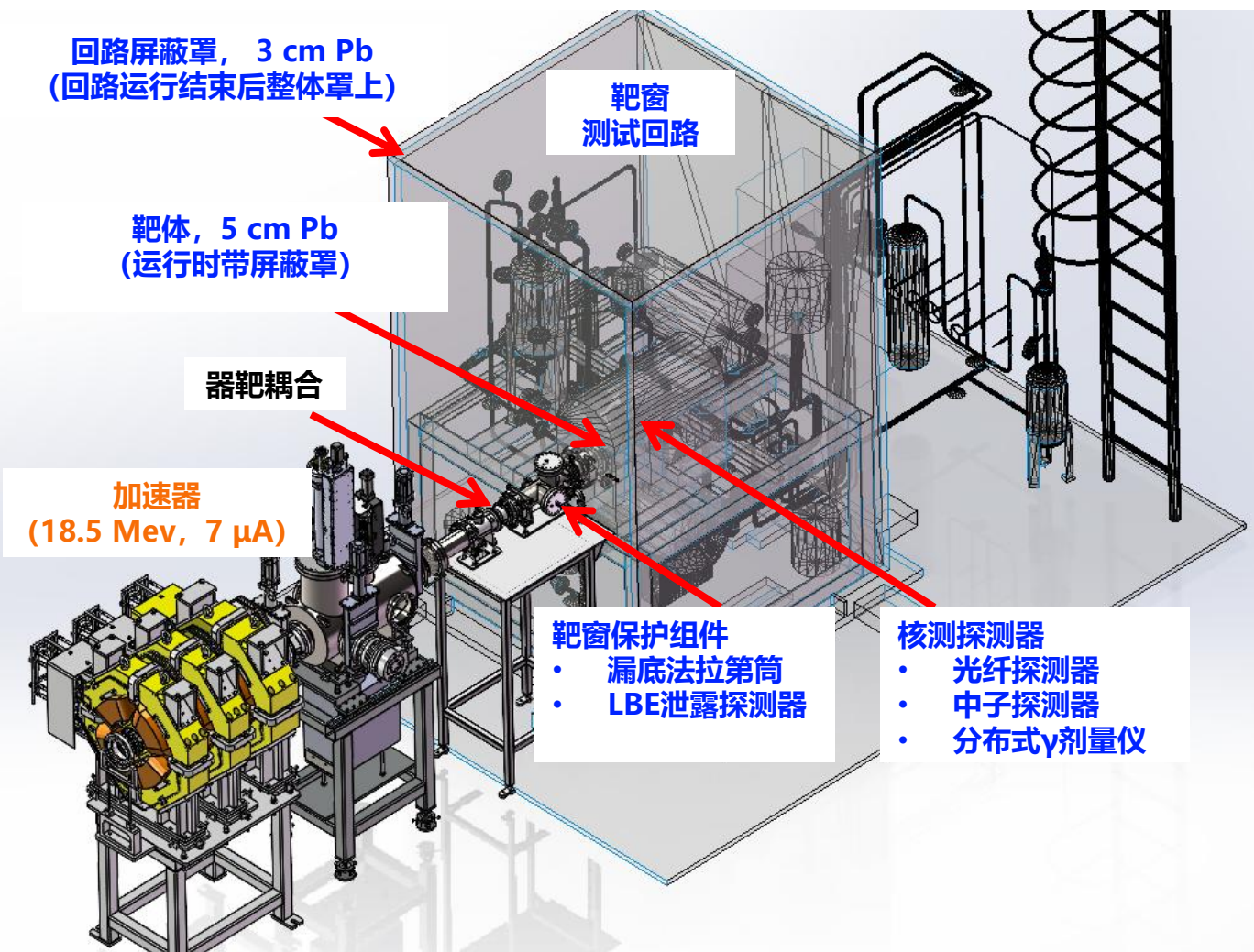
- 我国首台液态铅铋高功率靶热工样机
- 采用环形流道紧凑型结构，解决靶堆耦合设计难题

## 当前进展：

- 2022年8月于惠州潼湖园区安装完成并投入运行
- 累计运行时间超800小时，运行正常
- 目前正在由惠州潼湖园区搬迁至惠东装置区



## 低能加速器与液态铅铋散裂靶耦合运行的技术验证装置



### ● 散裂靶靶窗性能的验证

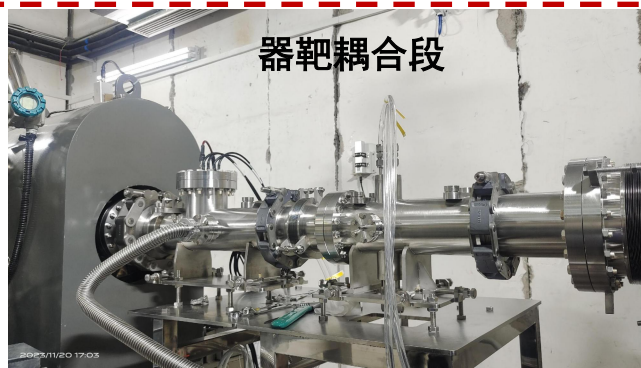
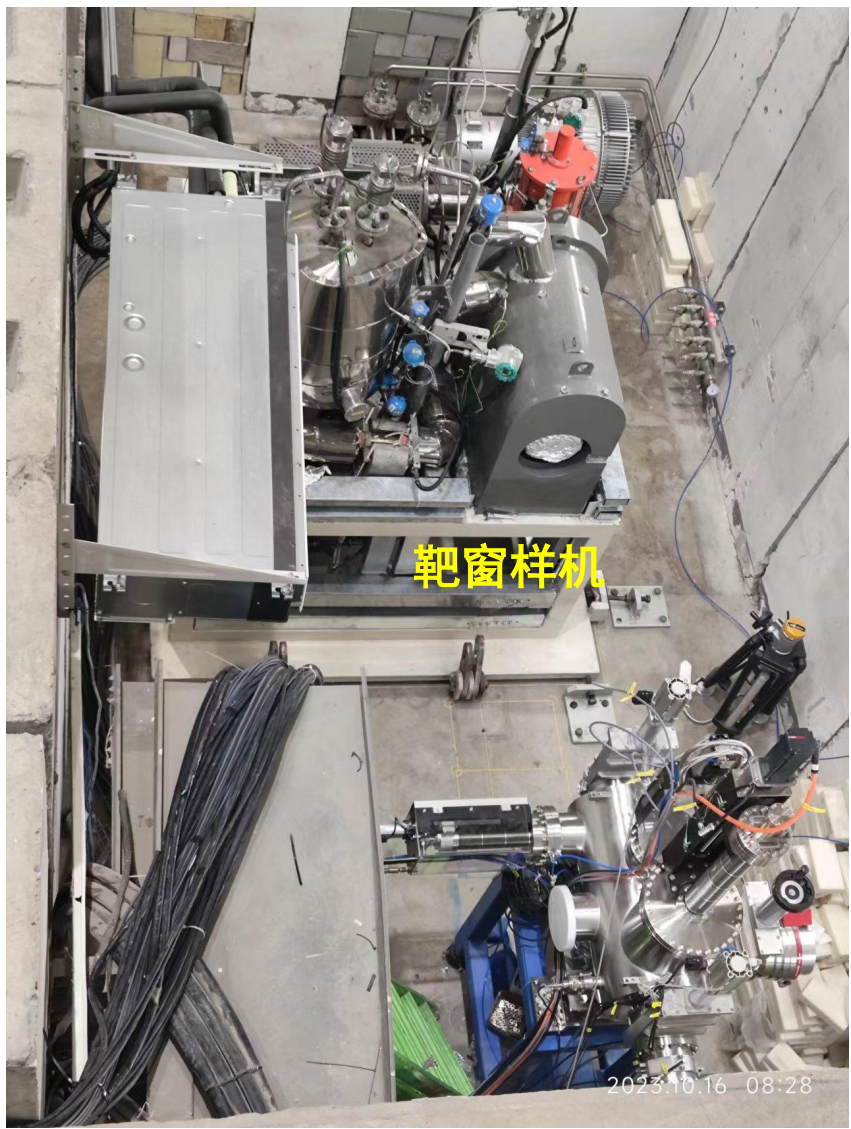
- 靶窗是散裂靶靶体**最薄**的部分
- 靶窗材料的服役条件**最为恶劣** (高温、大应力、强辐照、LBE腐蚀/侵蚀)
  - 验证在**相似温升和应力条件**下, **靶窗材料性能及靶窗寿命**是否满足相关要求
  - 在风险可控的前提下, 可进行**超额定工况**的靶窗性能验证实验

### ● 在线条件下散裂靶运维相关设备和技术的验证

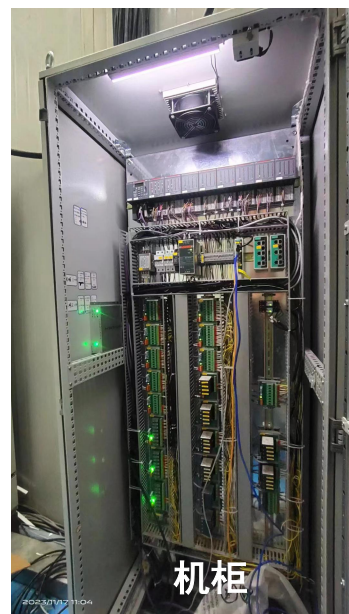
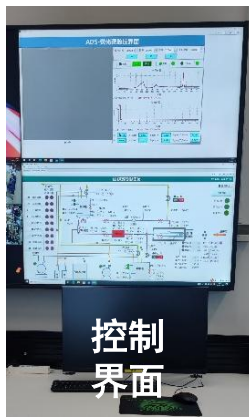
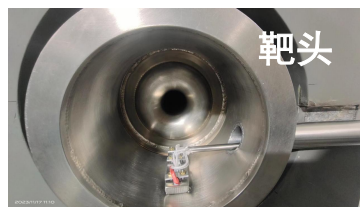
- LBE泄漏探测器
- 传感器、电子元器件的抗辐照性能
- 靶的诊断与保护逻辑
- 核测方法的验证 (n- $\gamma$ )

### ● 器靶耦合技术验证

- 机械准直
- 散裂靶与加速器控制系统的协同工作
- 在束条件下靶的实操经验积累

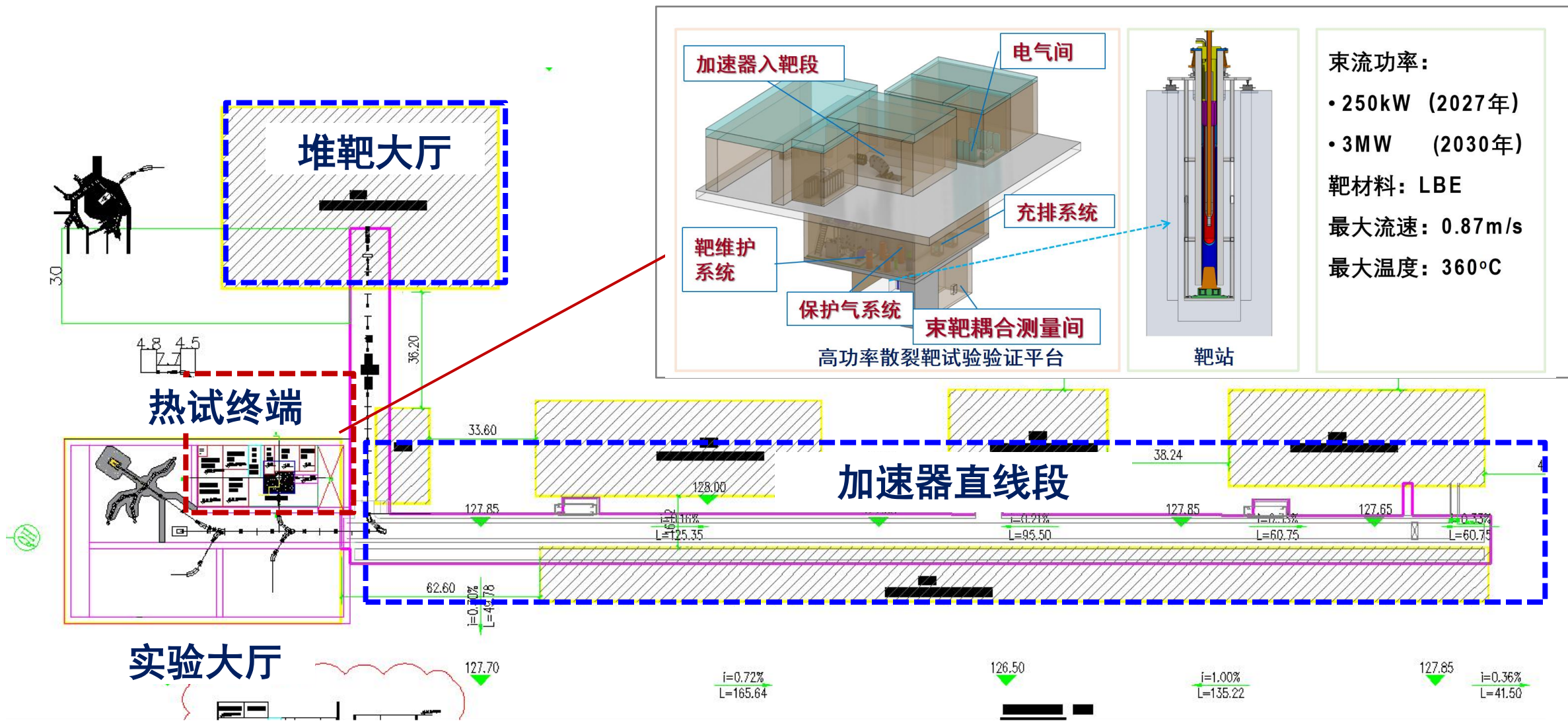


束线及现场配套准备



## 工作进展：

- 2023年10月完成安装
- 2023年12月完成离线测试
- 2024年1月完成第一轮测试，**运行时间超200小时，靶窗热工性能得到验证**
- 计划2025年开展第二轮实验，主要验证诊断保护、核测等系统

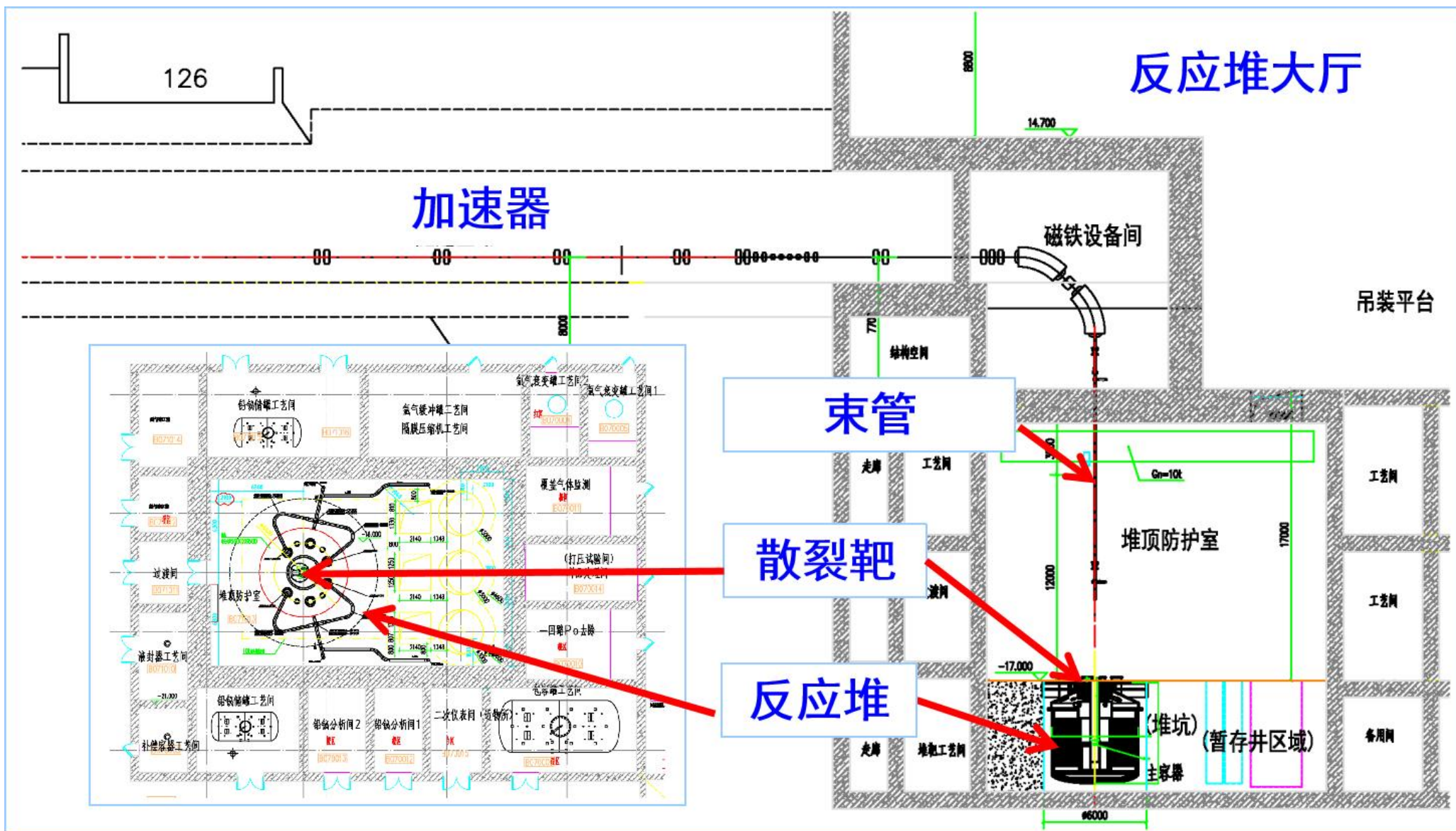


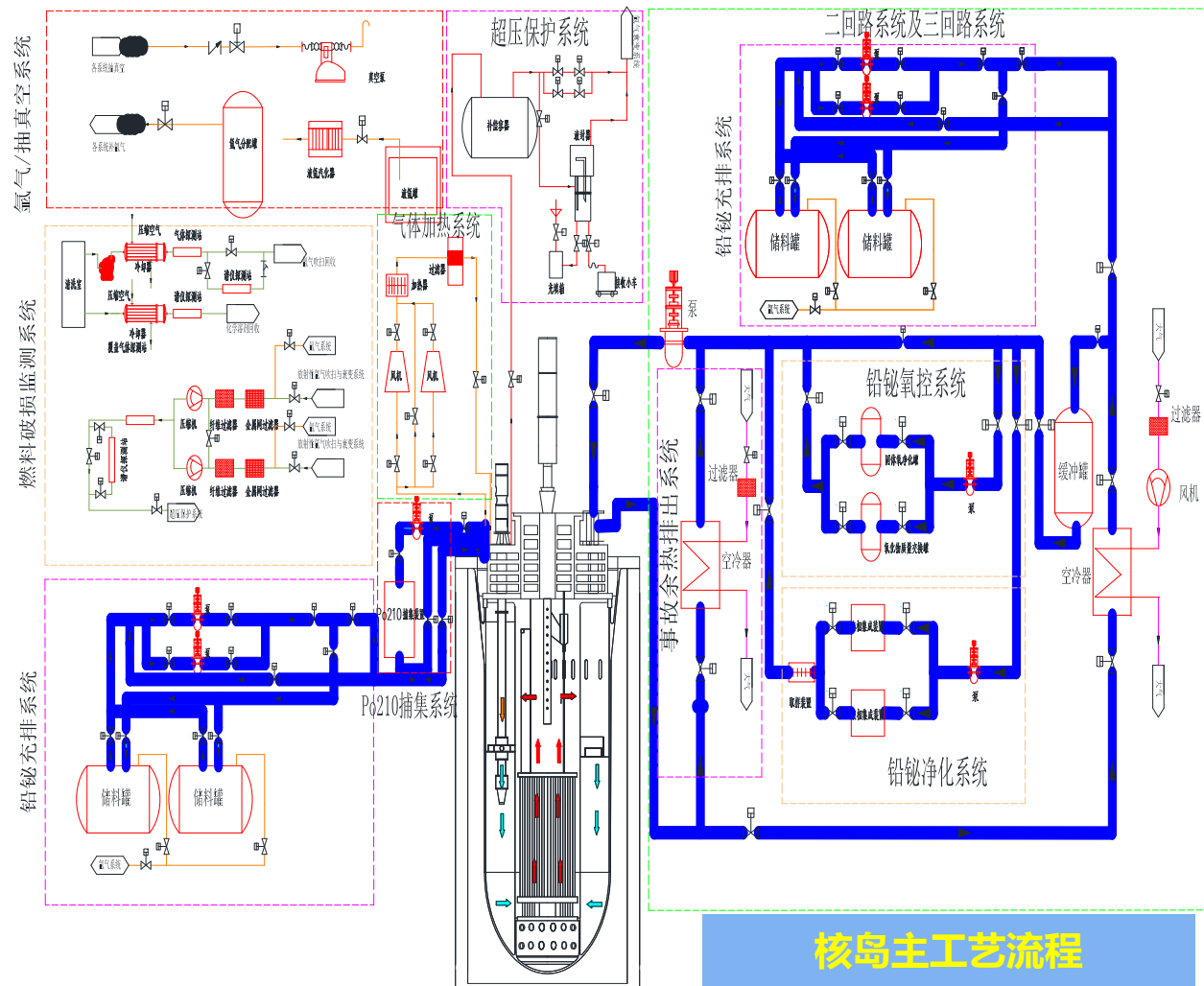
**验证目标：全面验证高功率束靶耦合下的散裂靶系统运行能力**

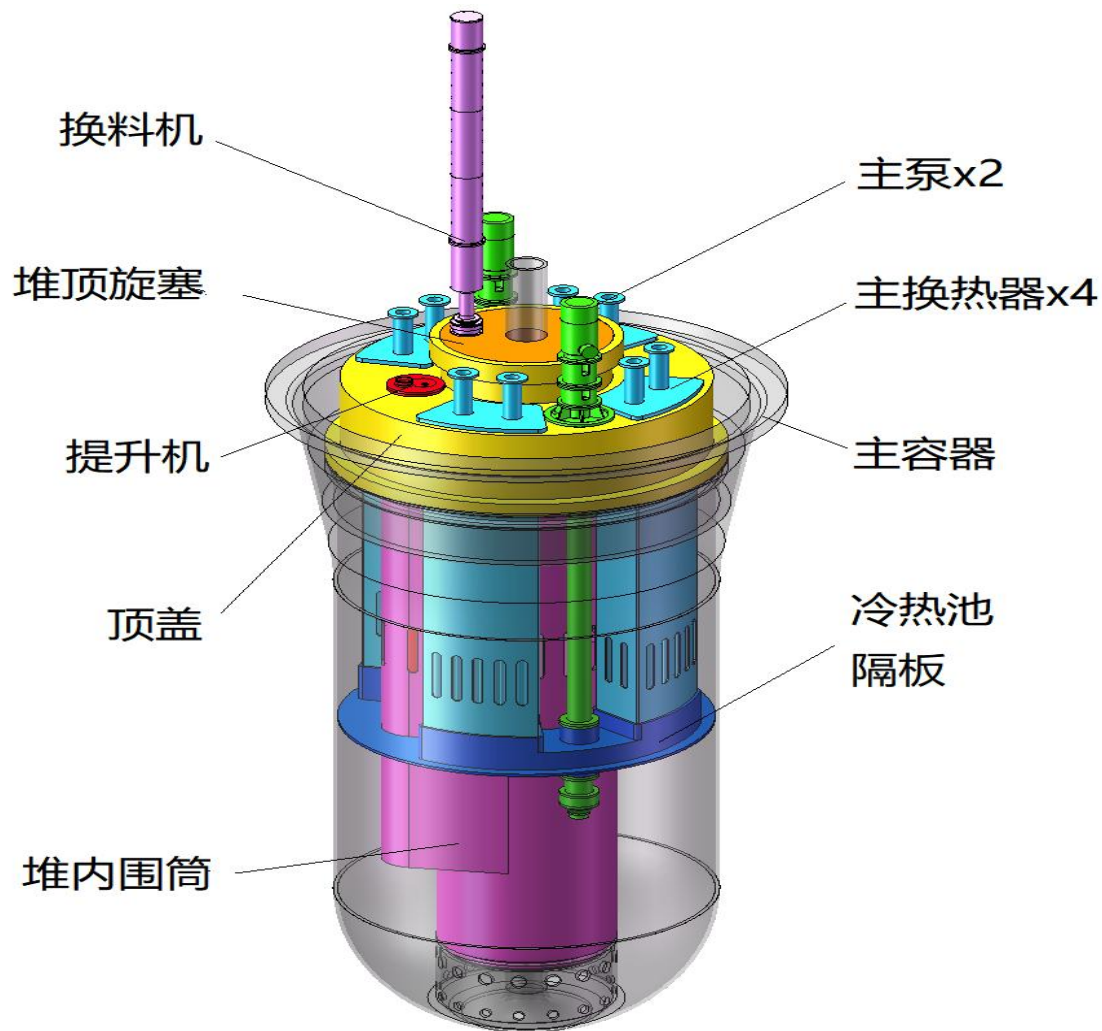
# 铅铋次临界反应堆进展



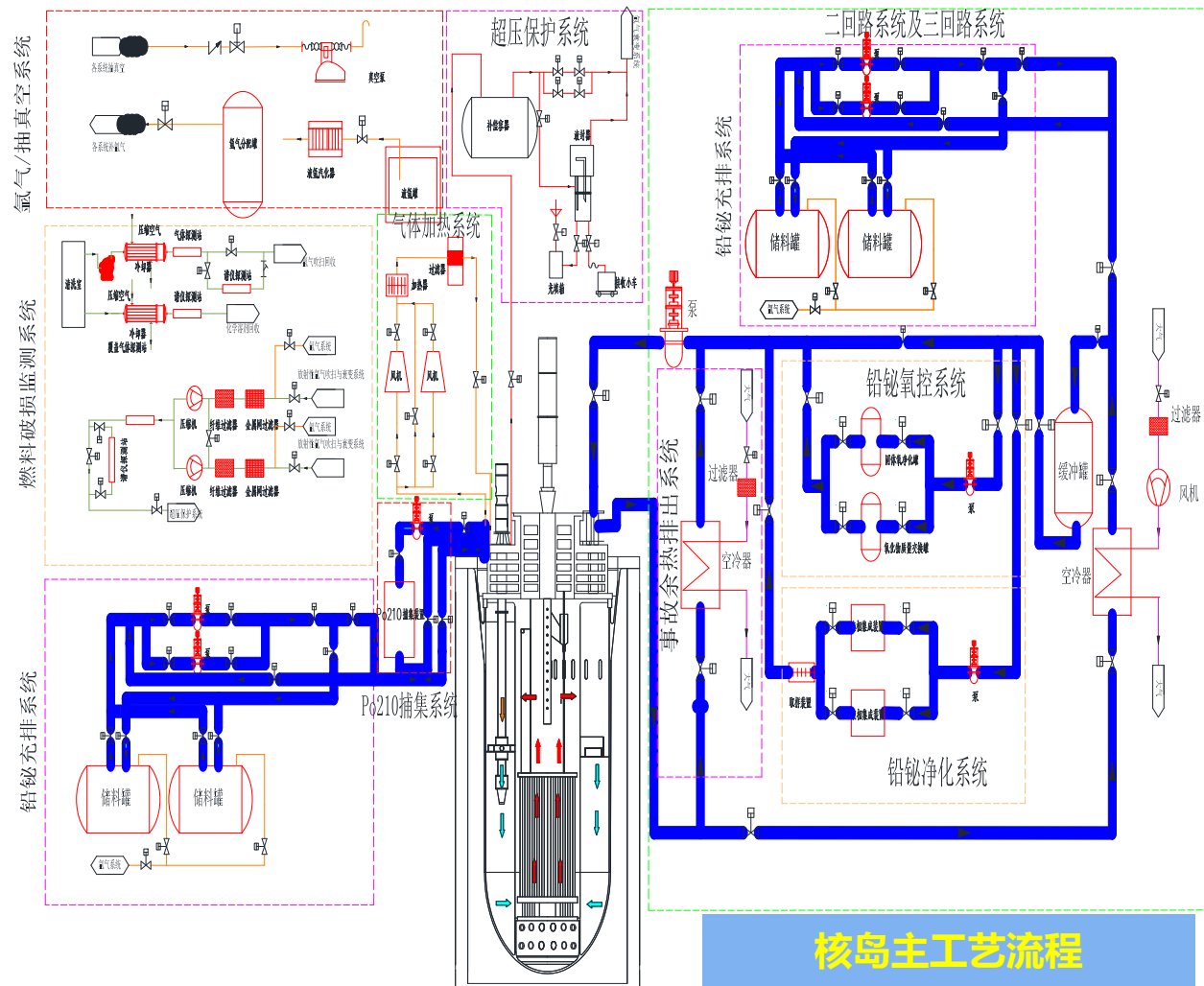






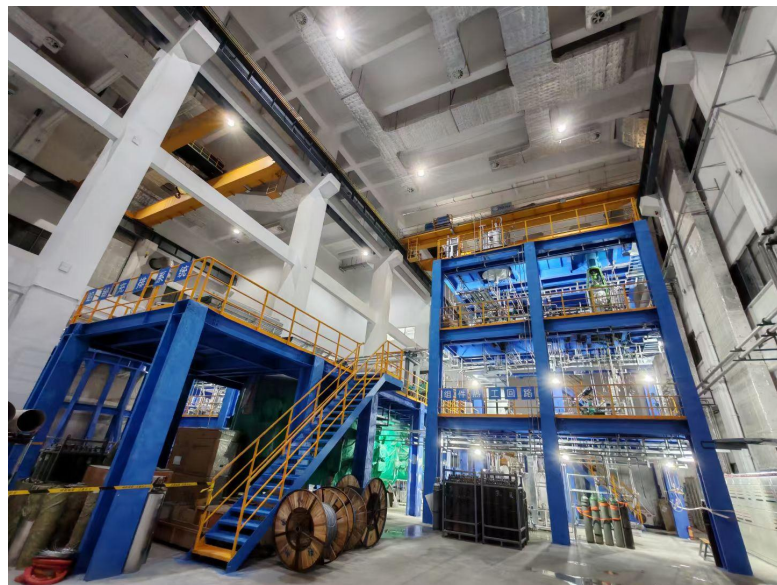
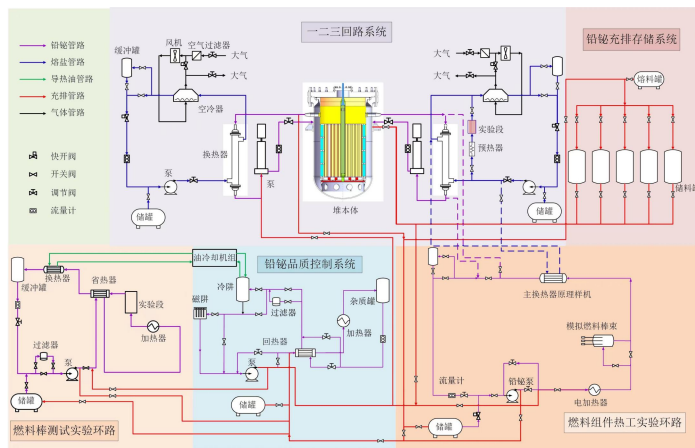


次临界堆	总体设计参数
类型	铅铋快中子堆
功率	10MW (含靶功率0.25MW)
燃料	UO <sub>2</sub> (19.75%)
一回路布置方式	池式布置
一回路驱动方式	强迫循环
一回路冷却剂	铅铋
一回路运行压力	常压
一回路运行温度	280-380°C
一回路换热器	主换热器×4
一回路主泵	机械泵×2
二回路冷却剂	铅铋
二回路运行压力	常压
二回路运行温度	220-230°C



- 反应堆主设备与主系统功能验证
- 热工水力与安全特性实验
- 铅铋工艺系统实验
- 运行控制验证、运行技术研究
- 人员培训、软件验证

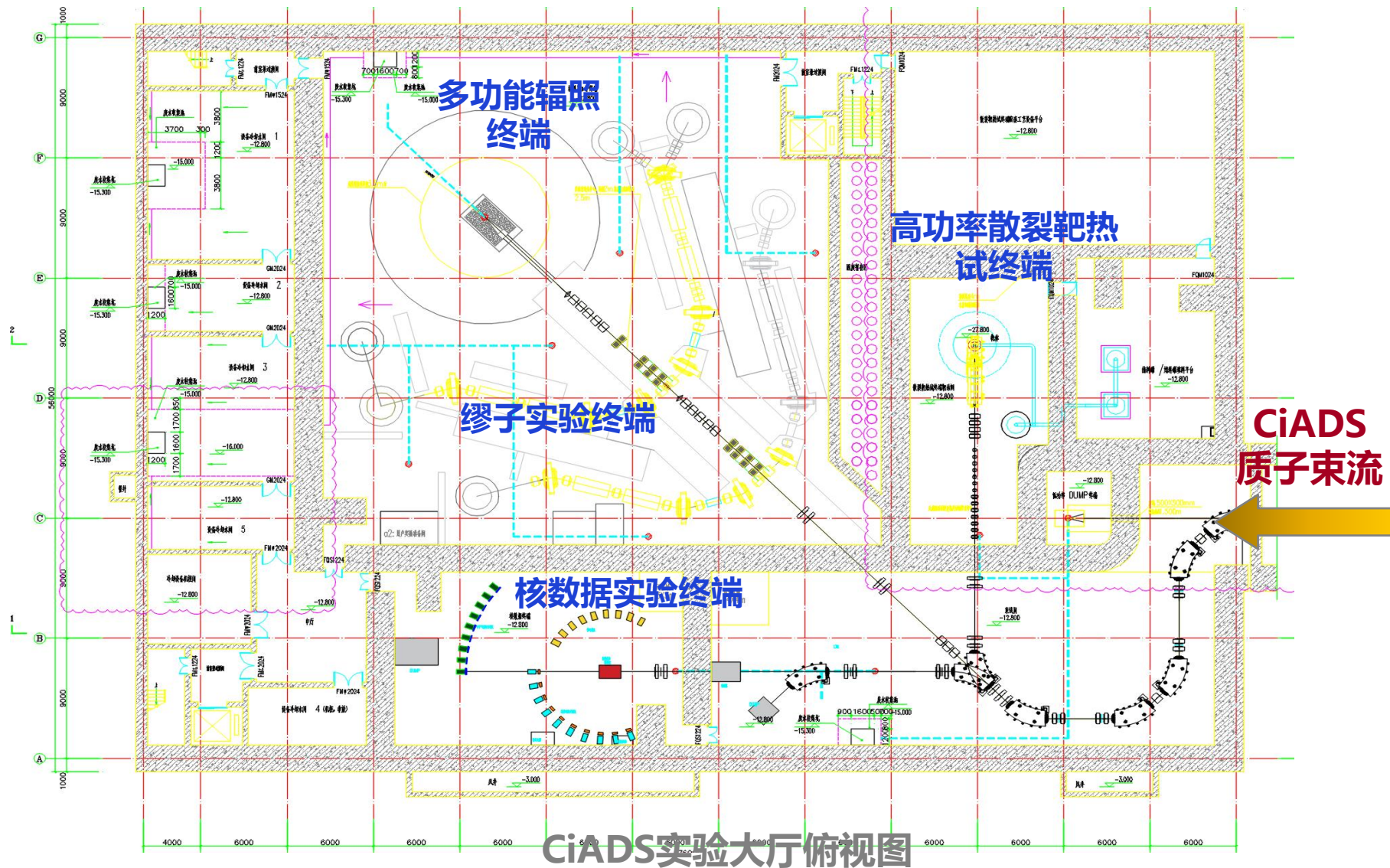
工艺流程设计



铅铋反应堆主设备样机到场，非核集成验证平台完成一期安装，启动调试

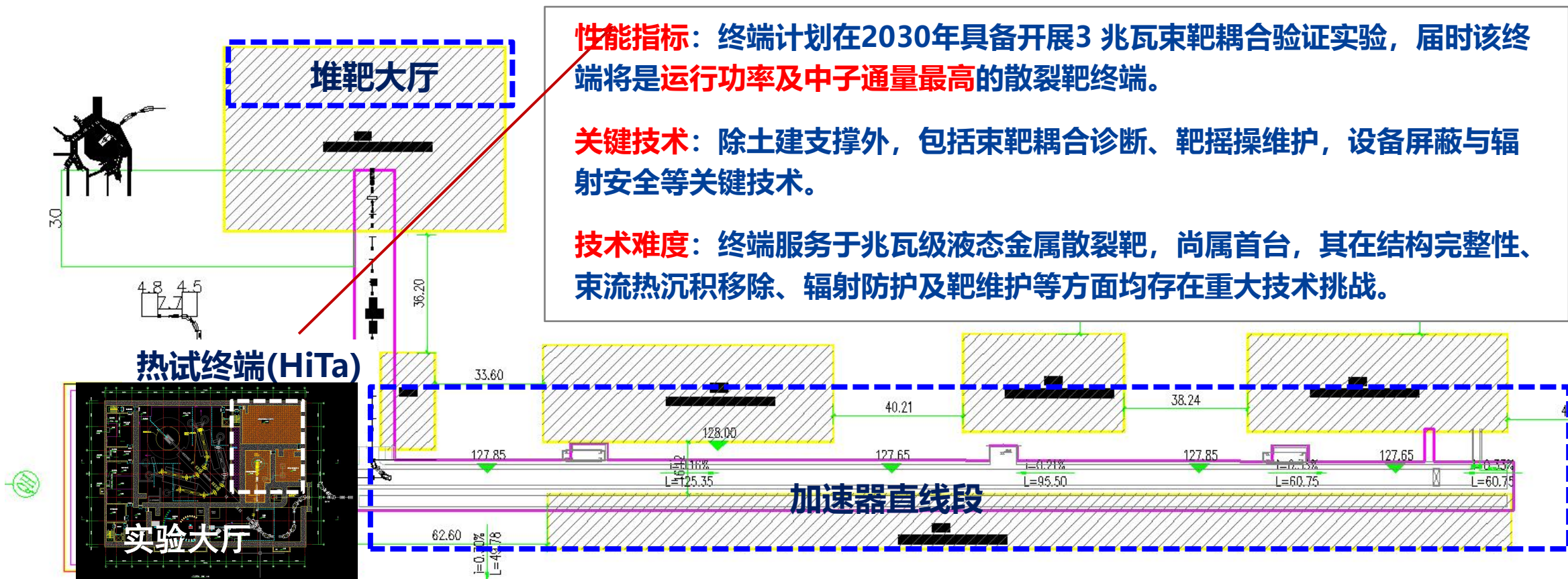


- 核裂变能发展可持续发展的问题
- 加速器驱动嬗变装置CiADS及其进展
- **依托CiADS的实验终端及其进展**



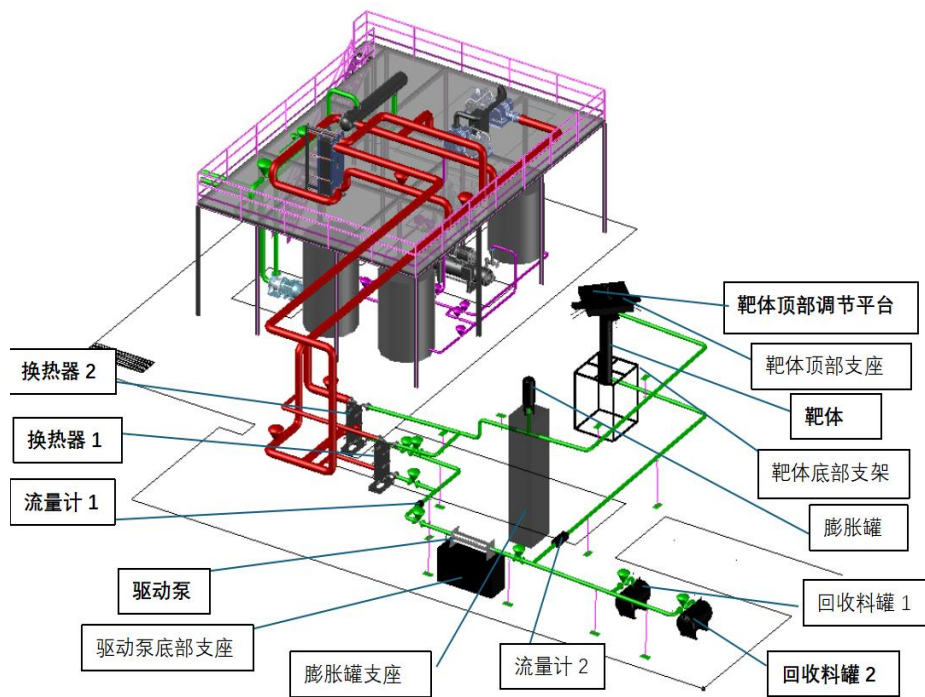
## ◆ 建设目标

建设高功率束靶耦合的热试终端，开展高功率束靶耦合热试实验研究，为CiADS 250kW散裂靶验收、ADANES攻坚专项3MW束靶耦合验证提供关键支撑。





- ❑ **设计依据：**基于与铅基反应堆深度耦合的液态铅铋散裂靶
- ❑ **科学目标：**开展ADS燃烧器束靶耦合堆外验证。包括核材料、热工流体、中子学、核测技术、结构完整性等验证。
- ❑ **重要节点：**
  - 2027年可支撑250kW器靶耦合运行及相应验证工作
  - 2030年可支撑3MW束靶耦合运行及相应验证工作



**靶系统示意图**

技术参数	技术指标
靶材料	LBE
束流种类	质子
束流能量	600 MeV
最高束流强度	0-5 mA
入靶束斑直径	≤ 22 cm
LBE工作温度	200-400 °C
LBE额定流量	0-170 kg/s
靶体结构材料	316L
靶窗束管材料	T91
出射中子产额	> 9 n/p
换热功率	250 kW/3.0 MW

- ❑ **进度计划：**
  - 热试终端土建提资正在收尾
  - 平台配套设施已完成物理方案评审，2025年底完成工程设计
  - 高功率散裂靶完成物理方案设计，主工艺系统将在2025年度开始委托加工
  - 2026年调试
  - 28-29年达到满功率

## ◆ 建设目标

依托CiADS建成核数据实验研究平台，突破核数据实验关键技术，开展 **600MeV** 以下能量区间高精度关键核数据研究，为新一代核裂变能关键技术研究提供重要的数据支撑。

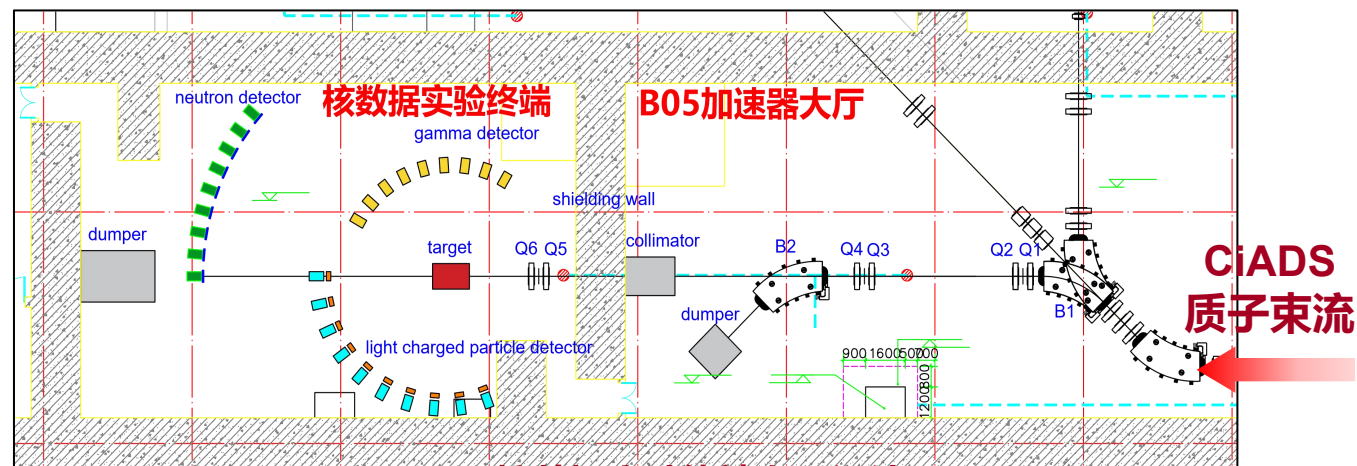
## 关键技术

- 质子散裂反应高精度核数据实验测量技术
- 高能准单能中子源技术
- 高能中子核数据实验测量技术
- 核数据宏观检验技术

➤ 终端主要包括：质子束流引出与调制装置和核数据实验平台，实验平台设计涵盖散裂反应实验测量装置，高能准单能中子源与中子核数据实验测量装置，核数据宏观检验实验测量装置。

## 主要功能

- ① 具备质子散裂反应、高能中子核数据、核数据宏观检验及堆外嬗变实验测量能力。
- ② 可提供高能强流质子束及高能准单能中子源，束流能量达600MeV，是ADANES高能核数据专用实验测量平台。



核数据实验终端布局设计

## ◆ 进度计划

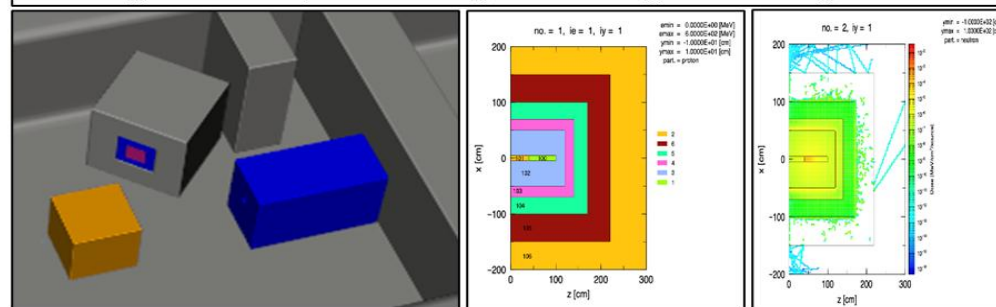
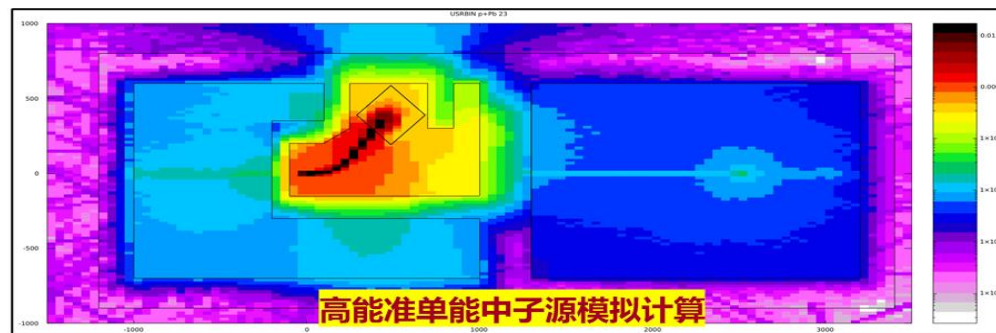
- 完成核数据实验平台总体方案设计与建设提资。初步完成实验终端辐射剂量分布计算与束流dump设计。
- 完成轻带电粒子飞行时间谱仪样机研制与初步测试；完成高能中子飞行时间谱仪样机搭建与配套核电子学与数据获取系统调试，开展n-TOF实验测量方法研究。
- 2026年底开始调试，27年开始实验



轻带电粒子谱仪样机研制



高能中子飞行时间谱仪样机搭建



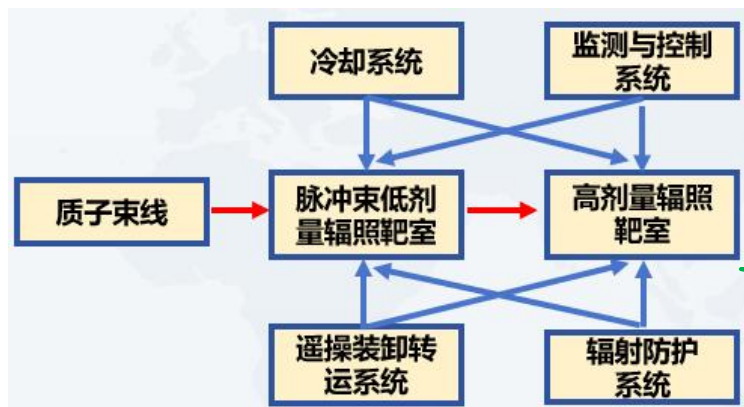
核数据实验平台束流dump设计与模拟计算

## ◆ 建设目标

依托CiADS建成国内首套高功率脉冲质子及高通量质子/中子辐照平台，为开展先进核能装置材料研发与器件性能评估多场耦合辐照实验提供平台和技术支撑。

## 关键技术

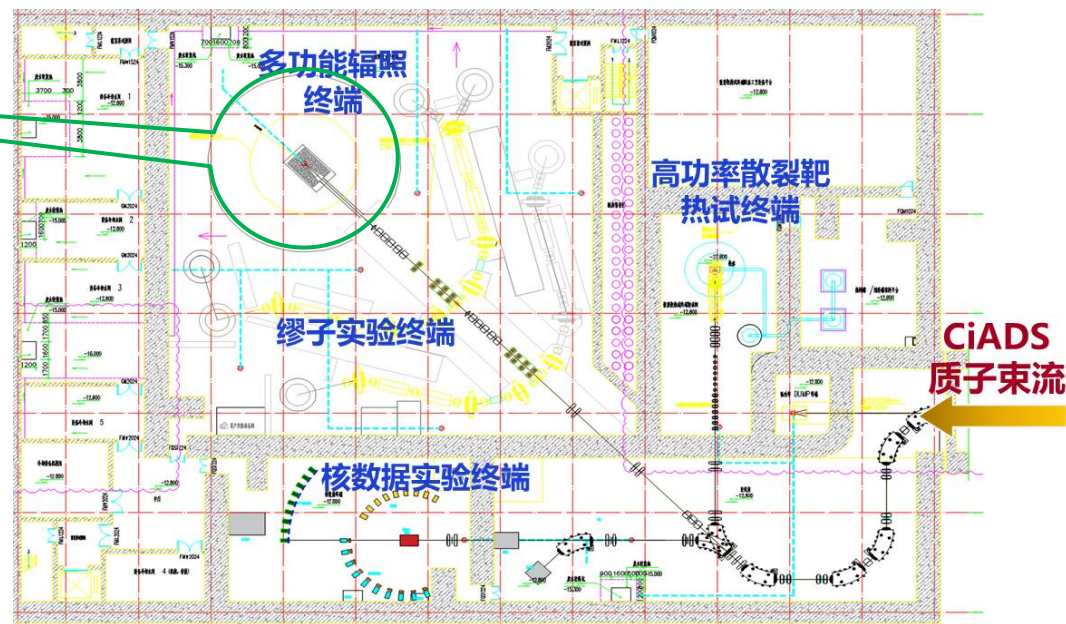
- 高功率辐照靶件冷却技术
- 辐照在线监测与控制技术
- 辐照靶件遥操装卸技术



终端主要系统构成

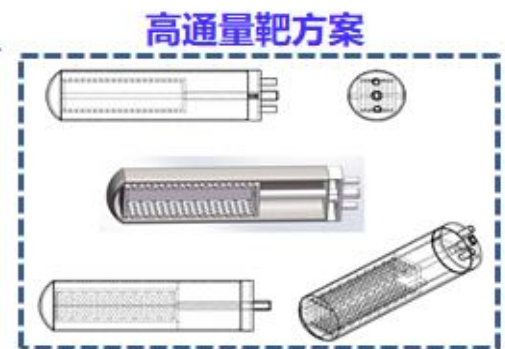
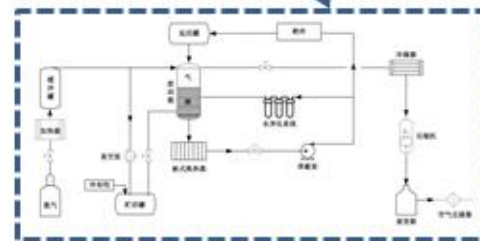
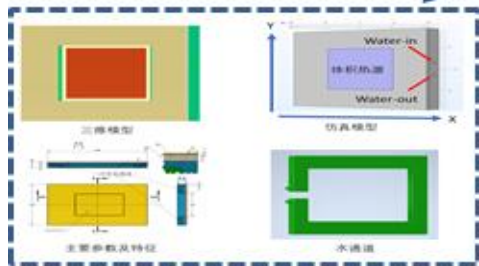
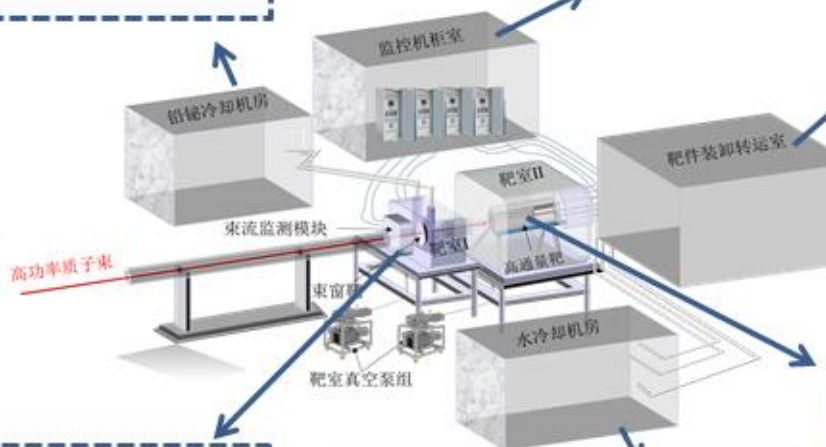
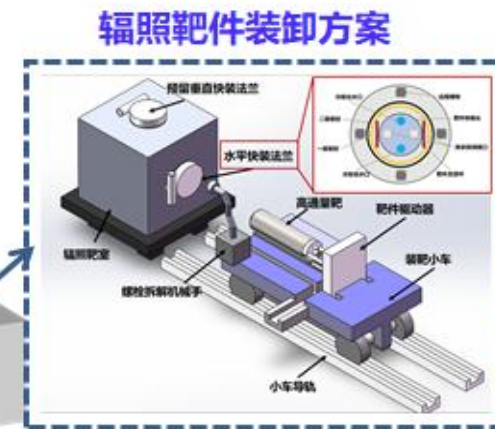
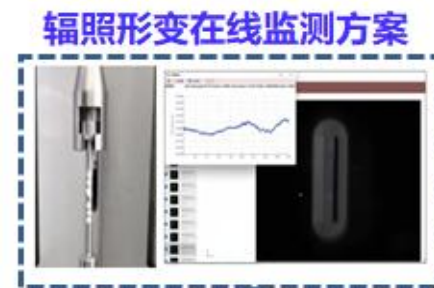
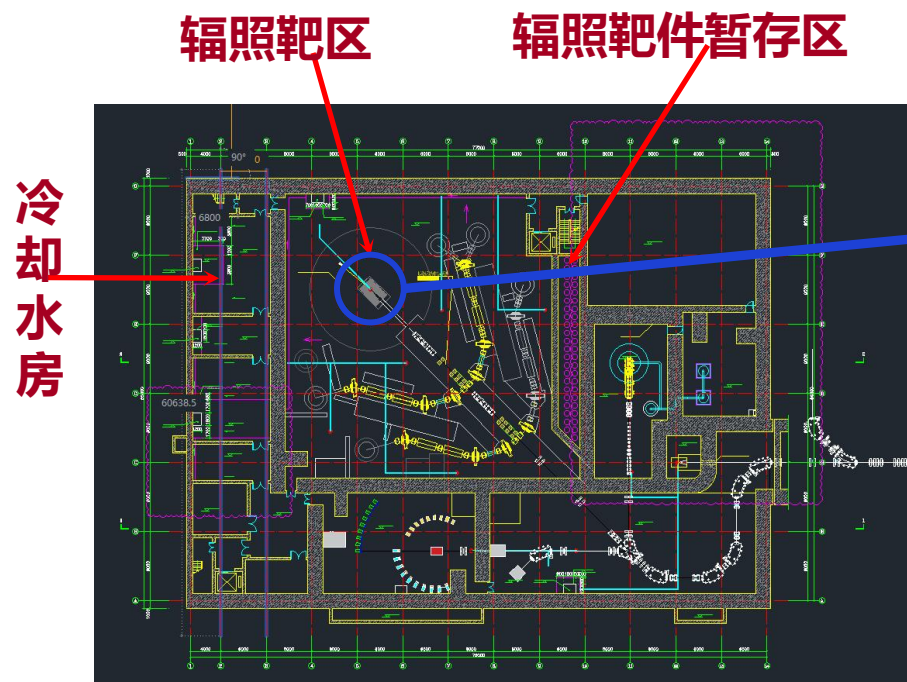
## 主要指标和功能

- ① 质子束流最高能量 600 MeV; 平均功率 300 kW; 束斑面积  $\geq 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$
- ② 辐照温度 200-600 °C; 剂量率  $\geq 3 \times 10^{12} \text{ p/cm}^2/\text{s}$
- ③ 可实现多功能辐照（脉冲束流辐照、高温/辐照/腐蚀等多因素耦合环境辐照等）



## ◆ 进度计划

完成初步设计方案，正在开展方案论证和优化设计。2027年开始调试。



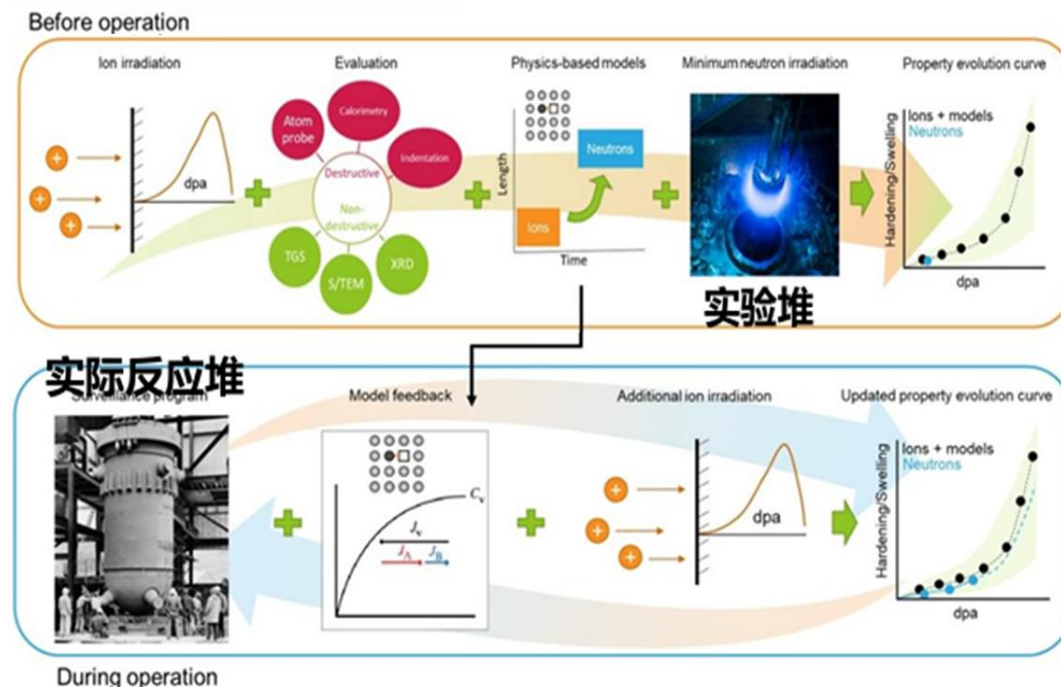
## ◆ 优势与前景

性能先进的多功能辐照实验平台。

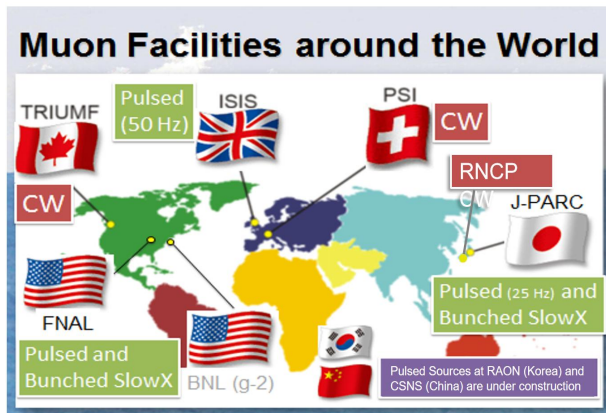
- 指标先进性：高能强流质子束，辐照剂量率大，适合核能材料高剂量辐照。
- 功能先进性：（1）可模拟高温/辐照/腐蚀等核能材料面临的复杂工况。在线获取材料辐照温度、形变等信息；（2）可调高功率脉冲束流辐照。
- 应用前景：可作为国内现有材料辐照平台的重要补充、支撑核能材料的高效评价和精准筛选。

## ◆ 现有辐照平台不足

中子资源短缺，参数不可控；重离子射程短；国内现有高能质子辐照流强小，无法满足核能材料高剂量辐照需求。



## 国内外缪子装置:

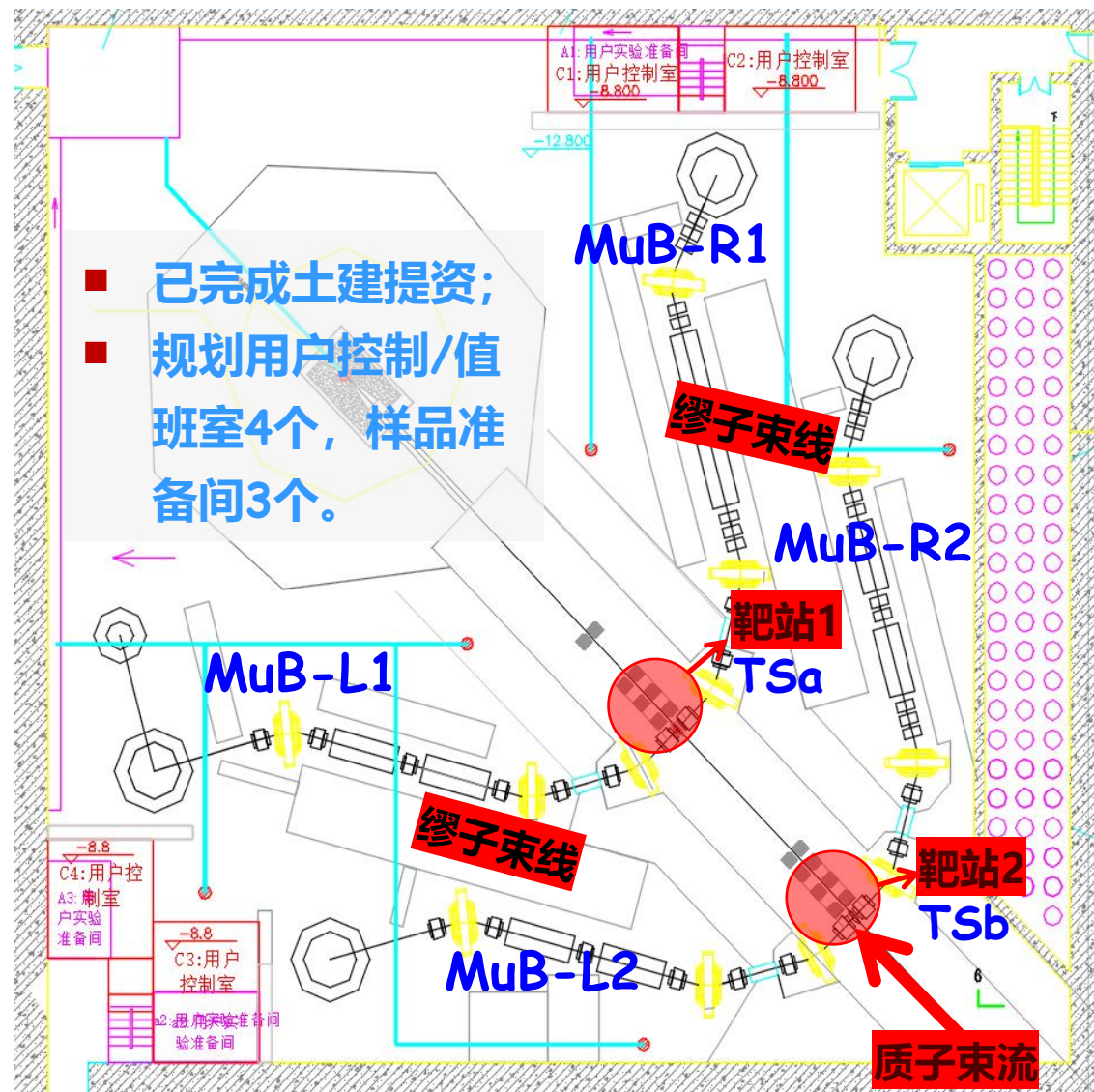


- 国际：5台缪子源+4条专用缪子束线；RAON在建
- 国内：CSNS在建，CiADS/SHINE/HiAF规划

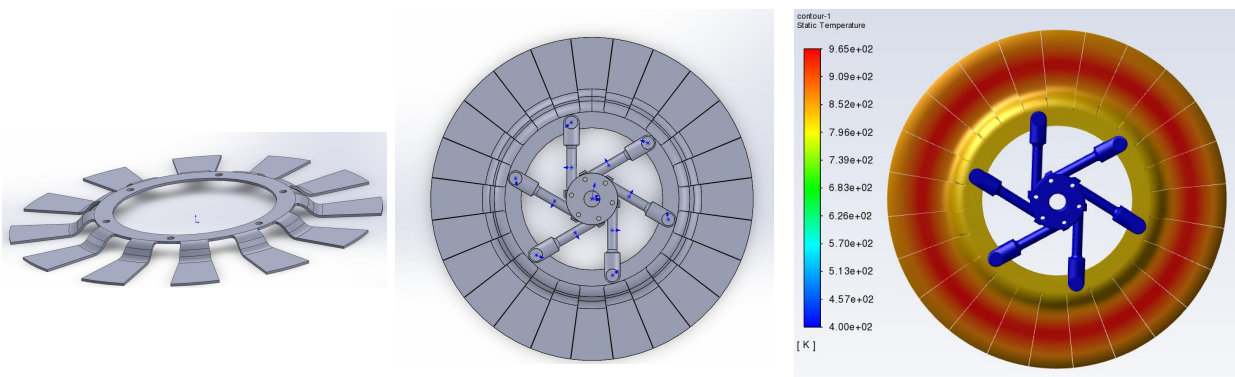
□ **CiADS缪子源定位：**基于超导直线加速器束流，建成国内首台连续型缪子源；对标PSI缪子源，实现关键指标超越。

□ **CiADS缪子源的分期建设计划：**

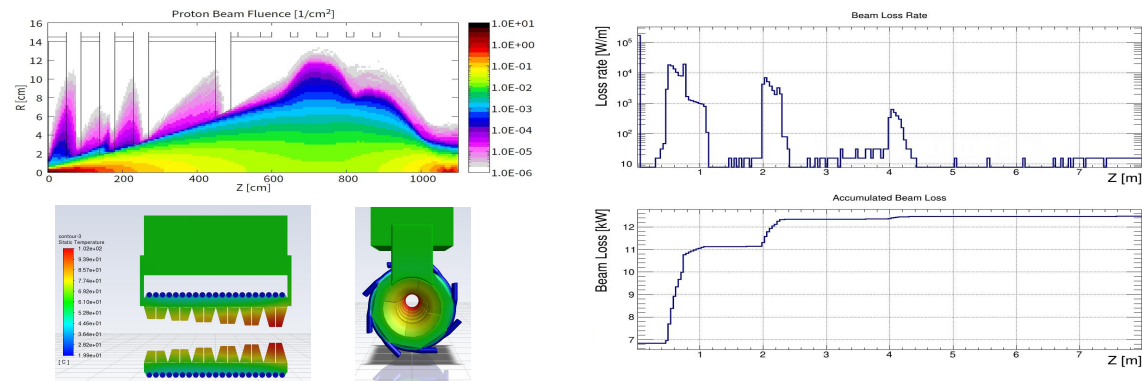
建设周期	靶站	缪子束流	主要应用
I期 2025~2028	靶站a (TSa)	L1: 表面缪子	$\mu$ SR
		R1: 表面/衰变/慢缪	$\mu$ SR/MIXE/part. phys.
II期 2029~2032	靶站b (TSb)	L2: 表面缪子	$\mu$ SR
		R2: 表面/衰变/慢缪	$\mu$ SR/MIXE/part. phys.



## 缪子靶设计：300kW束流，多晶石墨转靶，双齿轮复合结构



## 靶后刮束（束损控制）：紧凑布置、大孔径传输、小比例刮束、聚焦段束损 < 10 W/

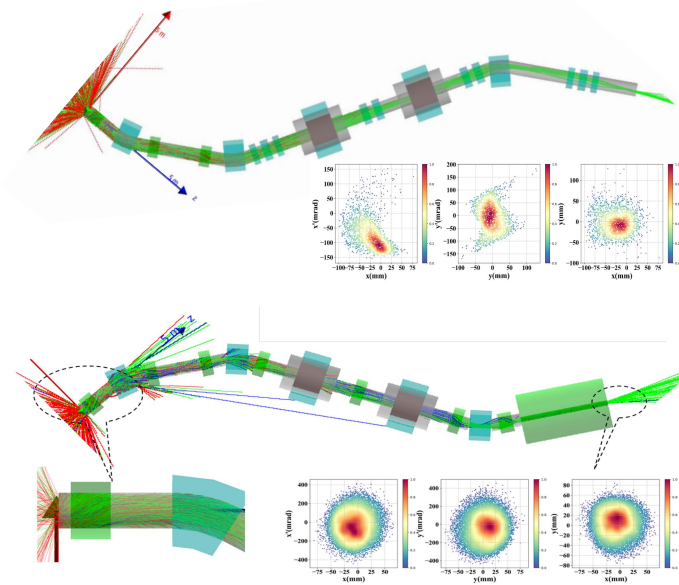


## 缪子束线设计：大孔径螺线管俘获设计；高效本底分离设计；基于进化算法的自动优化框架；

打靶功率	靶方案	束线方案	表面缪子强度 $\mu^+ / s$		极化率	本底率
			全尺寸	$\Phi 30mm$		
300kW	石墨转靶	全螺线管	>5E8	~1E8	~94%	<0.1%
		混合聚焦	>5E7	~1E7	>99%	
3MW	液态锂靶	全螺线管	>1E10	~2E9	~94%	
		混合聚焦	>1E9	~2E8	>99%	

混合聚焦

全螺线管聚焦



➤ 概念设计完成！300kW可超过PSI当前指标；3MW可在未来一段时间保持领先。



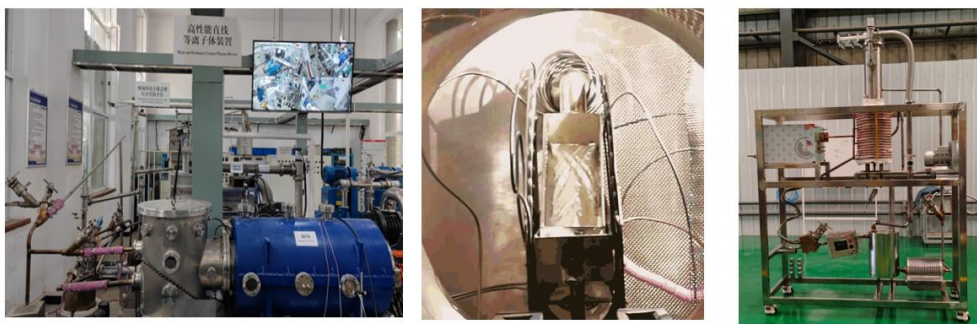
## □ 主要技术挑战

- **产生靶**: 3MW束流功率下, 国际上暂无对应的缪子靶解决方案 (冷却问题、高热强辐照下的寿命问题等)
- **抗辐照螺线管**: PSI/J-PARC较为成熟, 国内尚在研发
- **终端探测器/谱仪**: 缪子强度饱和问题等

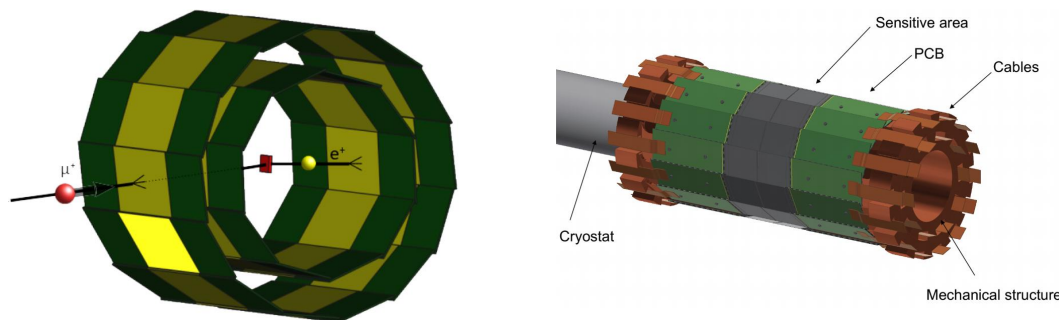
## □ 解决方案

- **液态锂射流靶**: 满足3MW束流功率要求, 缪子产率翻倍 (国际上首次提出)
- **MgO绝缘螺线管**: 导线研制及绕制测试 (协同开发)、大孔径磁屏蔽设计
- **硅像素探测器**: 顶点重建/高位置分辨; 小样品测量; 饱和事例率量级提升; 极端样品条件 (高压/射频磁场; 非关联本底排除能力等)。(联合研究)

液态锂射流靶研究: 四川大学苟富均团队合作



基于硅像素的表面缪子谱仪 (PSI方案)



➤ **期待业内合作及用户专家建议, 共同推动CiADS缪子源建设, 服务高精度物理研究及多学科应用。**

2025 ~ 2026

2026 ~ 2027

2027~2029

2029~2030

- 加速器 25kW
- 散裂靶 >25kW
- 热试终端

- 600MeV加速器试运行
- 250kW靶试运行
- 模拟乏燃料分离与燃料制备工艺
- 首个再生燃料芯块完成制备

- 加速器 250kW
- 散裂靶 250kW
- $k_{eff} \sim 0.4$
- 反应堆 30kW

- ADANES燃烧器启动调试
- 燃料先导组件入堆
- 乏燃料高温干法再生工业试验
- 首根再生燃料棒完成制备

- 加速器 0.25~2.5MW
- 散裂靶 0.25~2.5MW
- $k_{eff} \sim 0.75$
- 反应堆 功率提升

- 获得反应堆批量装料许可
- 燃烧器实现满功率运行
- 金属裂变产物分离工艺热实验
- 首盒含有再生燃料的组件完成制备

- 加速器 ~2.5MW
- 散裂靶 ~2.5MW
- $k_{eff} \sim 0.75$
- 反应堆 ~7.5MW

- 获得再生燃料入堆许可
- 再生燃料首次入堆
- 开展满功率增殖嬗变试验
- 完成百兆瓦关键技术集成验证

- 加速器驱动的先进核裂变能，解决核燃料利用率低和核废料处置难问题，是未来核能发展场景中不可或缺的组成部分。
- 加速器驱动系统示范项目CiADS已于2021年开工，计划于2027年开始测试运行，将是国际上首个兆瓦量级ADS系统。依托CiADS将同步建设材料辐照、核数据、靶热试终端，缪子终端正在设计。
- 建成国际上第一个达到10mA连续波运行的超导直线加速器，示范了ADS所需要的束流强度和运行可靠性技术，显著领先于国际同类装置。
- 国际上第一个ADS型的高功率散裂靶热工样机和靶窗通过测试，多项试验结果表明，热工水力性能满足CiADS装置验收要求。
- 铅铋反应堆非核验证装置已经完成安装，正在进行系统调试。



# 感谢各位专家!