



核物理前沿与交叉研讨会

香山/北京

28/08/2022

惠州核中心大科学装置与 若干前沿领域进展-2022

詹文龙，中科院/近物所、东江实验室

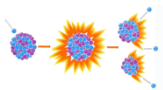


报告提纲

■ 惠州核中心大科学装置进展

➤ 大科学装置简介

➤ HIAF+CIADS 大科学装置进展





核研究中心简介

➤ 国家十二五重大科技基础设施:

- 强流重离子加速器装置(HIAF)
- 加速器驱动嬗变实验装置(CiADS)

➤ 广东省先进能源(东江)实验室

- 2019年底挂牌启动
- 引进11+1个相关团队

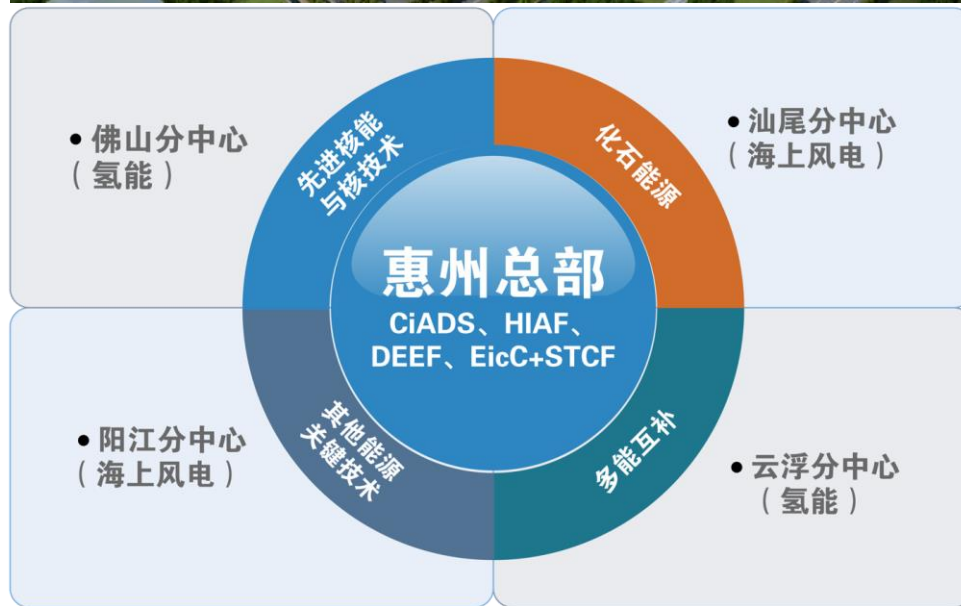
➤ 主要依托单位:

- 中科院近代物理研究所

➤ 主要合作单位(已参与):

- 中科院: >10研究院所
- 大学: >6家
- 企业: 中核、中广核...

其它





强流重离子加速器装置 (HIAF)

0.8 AGeV, 3×10^{10} ppp $^{238}\text{U}^{35+}$
1.75 AGeV, 7.5×10^{10} ppp $^{78}\text{Kr}^{19+}$
3.0 AGeV, 1.0×10^{11} ppp $^{16}\text{O}^{6+}$

HIAF-I: 2018-2025

Budget: 1.62(国家)+1.175(广东) B CNY

External target station

High Energy Density Physics

Nuclear Matter study-CEE

Hypernuclear

High energy irradiation

L: 180m, Bp: 25 Tm

HFRS

SRing: Spectrometer ring

Circumference: 273m

Rigidity: **~15 Tm**

Electron/Stochastic cooling

Precise Measurement by Two TOF detectors, Four operation modes

BRing1: Booster ring 1

Circumference: 600 m

Rigidity: **34 Tm**

Large acceptance (200/100)

Two planes painting injection

Fast ramping rate (5-10Hz)

iLinac: Superconducting linac

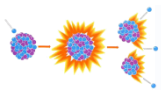
Length: 100 m

Energy: 17/22 MeV/u($\text{U}^{35+}/45+$)

Low energy nuclear
structure terminal

SECRAL and FECR

28-45GHz, 1.0emA(U^{35+})



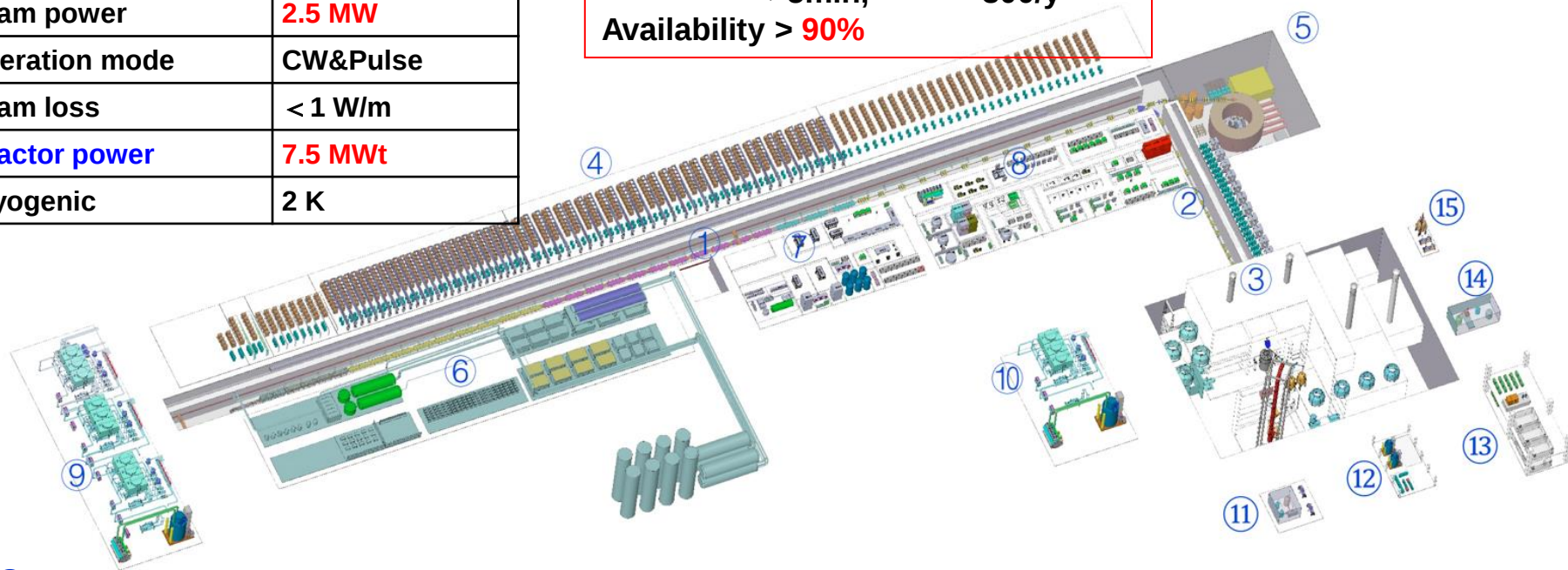


Chinese initial ADS (CiADS 2021-2027)

Design Particle	proton
Energy	500 (250) MeV
Beam current	5 (10) mA
Beam power	2.5 MW
Operation mode	CW&Pulse
Beam loss	< 1 W/m
Reactor power	7.5 MWt
Cryogenic	2 K

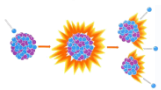
Beam trips goal:

<10s, -
10s ~ 5min, 2500/y
>5min, 300/y
Availability > 90%



- ① SC linac
- ② Coupling transport
- ③ Target and reactor hall
- ④ Accelerator equ. hall
- ⑤ Beam dump and granular target exp.
- ⑥ Cryogenic plant
- ⑦ SRF hall

Funding: 1.8(国拨) + 1.175(广东) + 1.0(中核) CNY



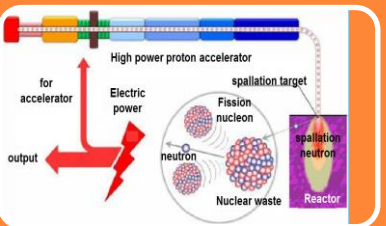


核中心主要研究领域 (基于强流加速器)



核科学

- 核物理: 核结构, 核天体; 核物质, 强子物理
- 基础物理: 超高电场QED, 高能量密度 (HEDP) → 重离子惯性聚变
- 高亮度前沿: μ 、 k 、反质子、中微子 (π 、 μ 、 β 束)、EICC, 超标准模型...



能源及相关材料

- CIADS → ADANES 燃烧器: 燃烧=嬗变+增值(殖)+产能, 燃料循环
- 核燃料研究: 裂变嬗变元件、再生乏燃料、贵重同位素, 聚变燃料自持
- 关键核材料: 高通量裂变、聚变堆芯材料、包壳材料、冷却材料



放射生物医疗

- 离子束治癌: 定型肿瘤(重离子外辐照)治疗, β^+ 束敏感器官外辐照
- 靶向放药: 无定型及轻度扩散肿瘤 (α 、 β 带电粒子内辐照) 治疗
- 辐照变异新药研制, 辐照诱变育种



核技术应用 → μ 成像

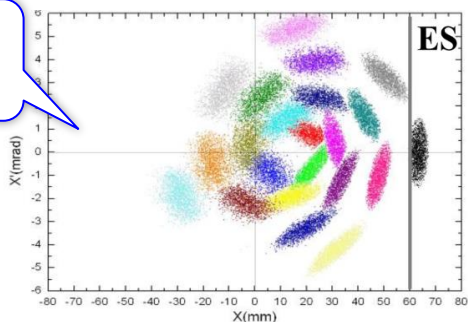
- 加速器: 强流加速器制作 (核能、量产同位素);
- 辐射技术: 器件加固、核孔膜制作, 辐射消毒、保鲜, 等
- 探测技术: 高灵敏探测器制作



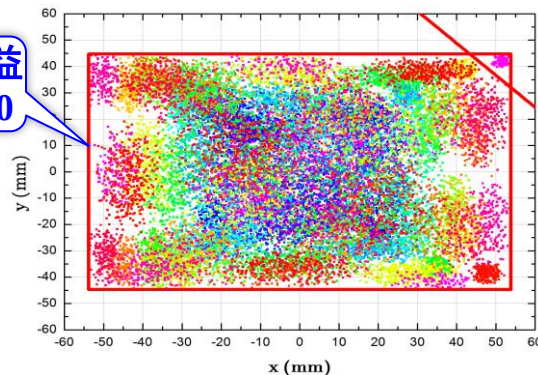
HIAF主要进展：先进性-1

原创基于 Corner Septum 4 维相空间束流涂抹累积方案，充分利用垂直相空间，将重离子累积增益提高10倍，达国际最高脉冲流强

累积增益
约为15



累积增益
约为150



多圈注入方案-2 维相空

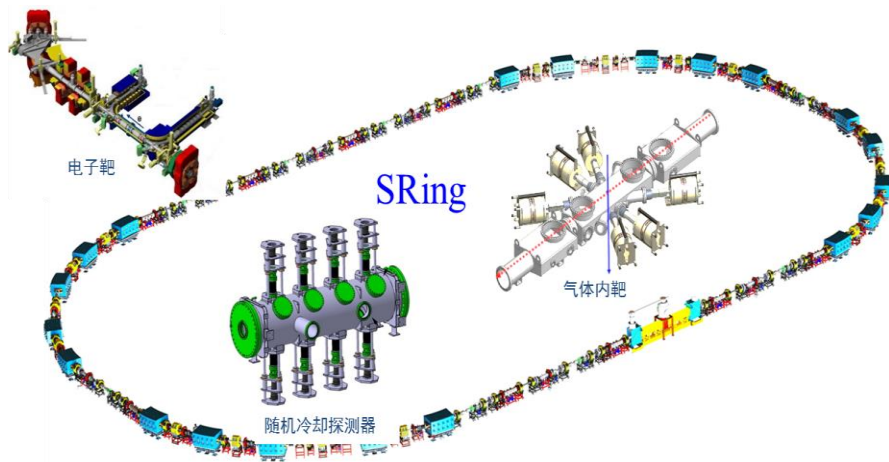
4 维相空间Painting方案

实验室	装置	设计流强	达到流强	离子	重复频率
BNL	AGS Booster		5×10^9	Au^{32+}	
JINR	NICA Booster	4×10^9		Au^{32+}	
GSI	SIS18	1.0×10^{11}	3×10^{10}	U^{28+}	2.7Hz
FAIR	SIS100	4.0×10^{11}		U^{28+}	
IMP	HIAF-Sring	$5/20 \times 10^{11}$		$\text{U/Bi}^{(35-45)+}$	$\geq 5\text{Hz}$, 10-20Hz
IMP	HIAF-BRing -SRing	$1/5 \times 10^{12}$ $2/12 \times 10^{12}$		$\text{U/Bi}^{(35-45)+}$	

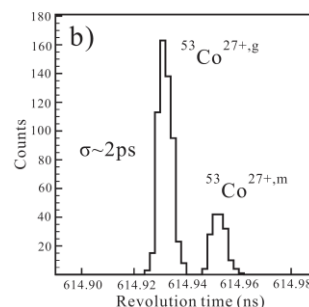


HIAF主要进展：先进性-2

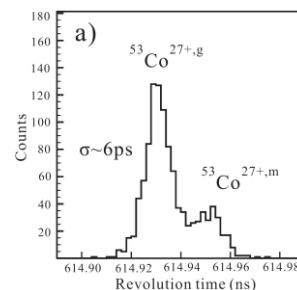
国际精度最高多功能短寿命原子核质量测量谱仪 $\rightarrow 10^{-8}$



在HIRFL-CSRe实现世界首个双TOF等时性核质量谱仪测量精度达 10^{-7} ，为世界同类装置最高



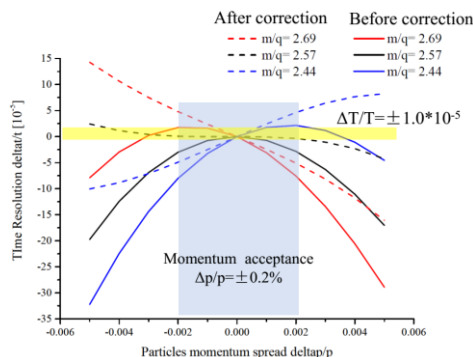
兰州CSRe



德国ESR

➤ HIAF-SRing

- 打靶流强提高4-5个量级，产额大幅提高，提高统计精度
- 增大TOF距离，减小测量误差
- 采用对称光学，降低系统误差



$$\Delta M/M \sim 10^{-8}$$

国际短寿命核质量精度最高

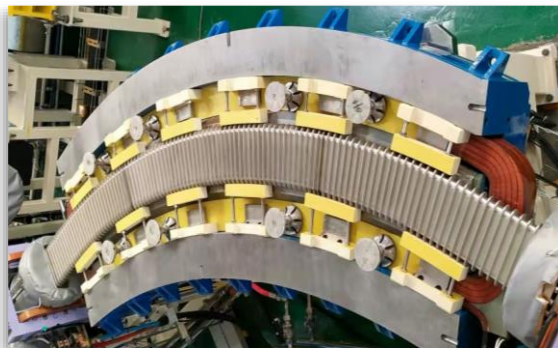


HIAF主要进展：创新技术应用验证

➤ 空间环境地面模拟装置：H(300MeV)-Bi(7MeV/A)同步环

➤ 低能重离子要求：

- 真空 $\sim 10^{-12}$ mbar $\rightarrow$ 薄壁真空室
- 快积累快注入 $\rightarrow$ 磁合金高频腔
- 动力学导向的束流精准控制软件
- 数字孪生设计、安装与调试

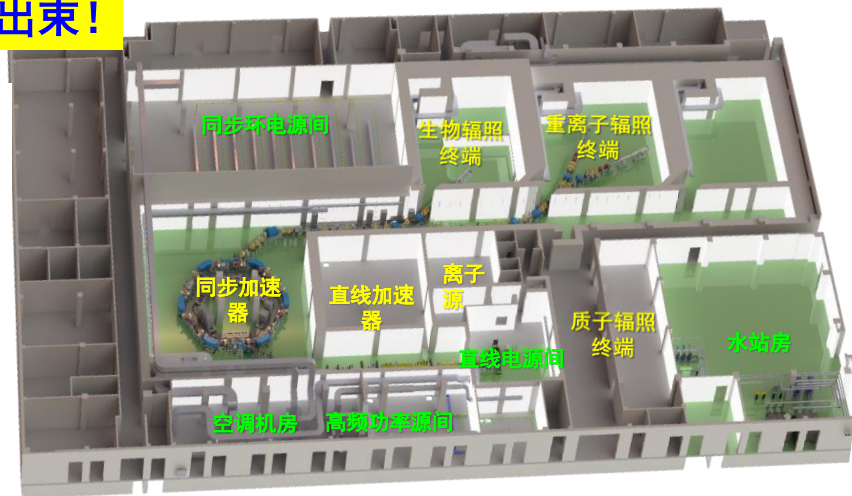
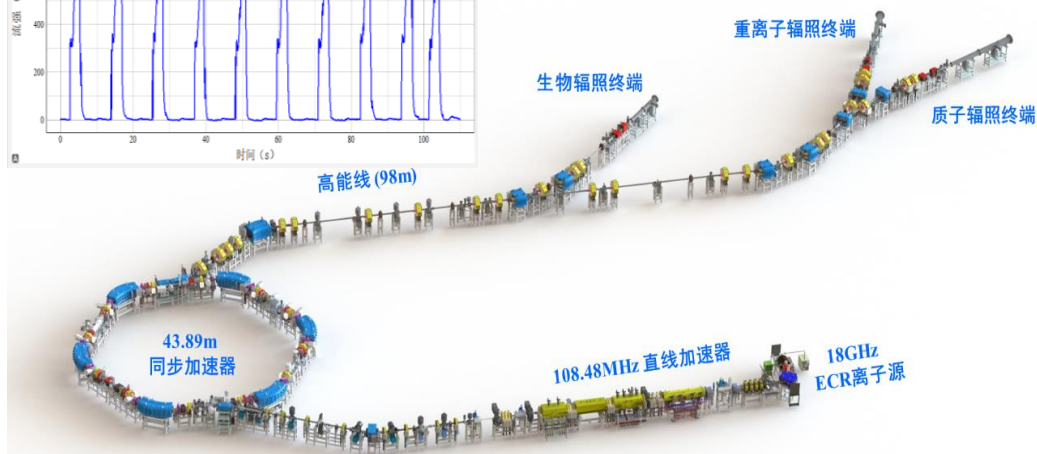
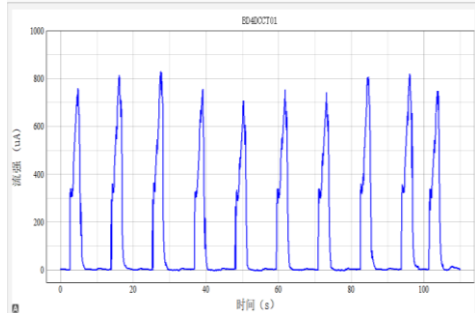


二极铁薄壁弧形真空室



高梯度磁合金环

4个月安装调试，束调一天出束！



BIM建筑设备数字装配 $\rightarrow$ 准数字孪生



CiADS的进展

➤ CiADS于2021.7开工，建设周期6年

➤ 按环保局批复工程建设分3阶段

① 2025.12 超导直线： $>25\text{kW}$

② 2026.10 高功率散裂靶： $>1.0\text{ n/p}$

③ 2027.12束流及靶功率： $>250\text{kW}$ ，

堆芯 $\sim 30\text{kW}$ ，稳定运行 >1 小时

➤ 低温系统进展



运行模式	热负载 (2 K工作模式)		
	2K heat load [W]	4.5-75 K heat load [W]	50-75K heat load [W]
名义值	4400	4300	13500

运行模式	热负载 (2 K待机模式)		
	2K heat load [W]	4.5-75 K heat load [W]	50-75K heat load [W]
名义值	1800	1400	7000

运行模式	热负载 (4.5 K待机模式)		
	2K heat load [W]	4.5-75 K heat load [W]	50-75K heat load [W]
名义值	1800	1400	7000

18kW@4.5K (4kW@2K) 大型
氦低温制冷系统研制合作协议签订仪式

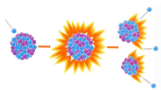
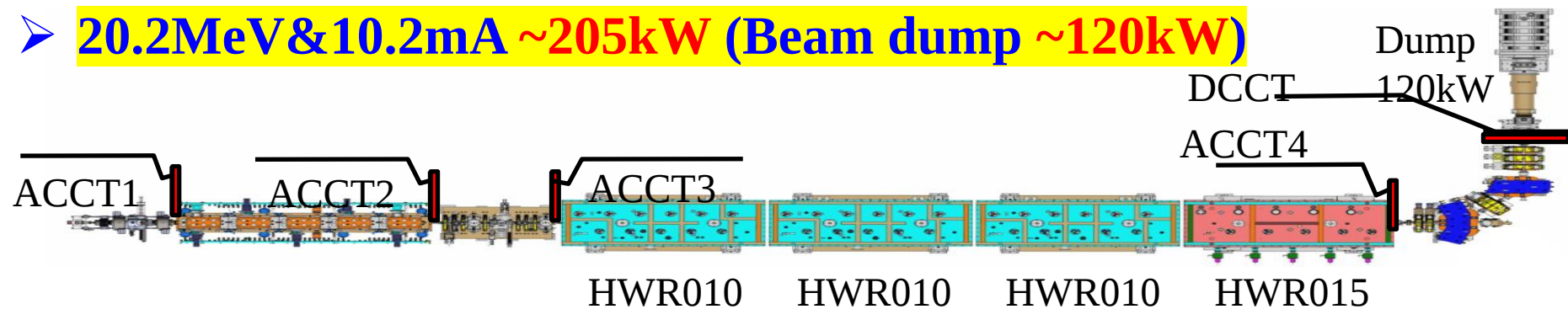




强流超导直线加速器样机



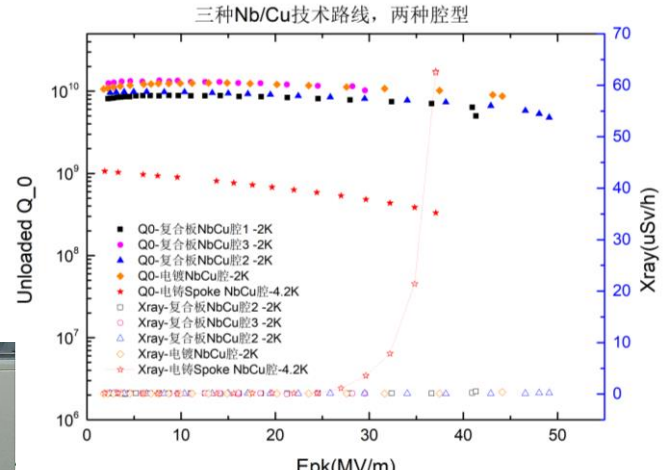
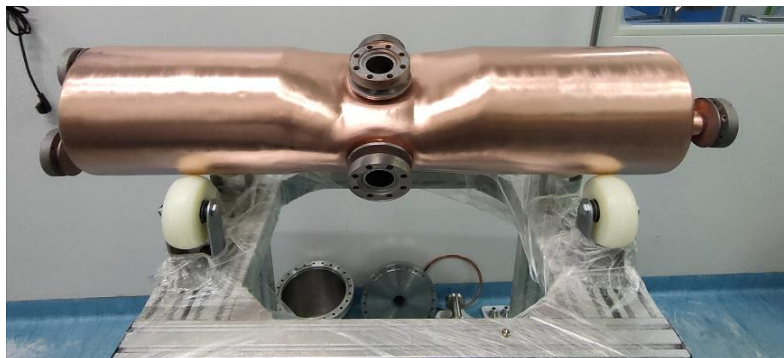
- 17.3MeV&7.3mA ~126kW, Availability ~ 93.6% (108hr) 3/2021
- 17.3MeV&10.1mA ~174kW, Availability ~ 96.2% (12hr) 3/2021
- 20.2MeV&10.2mA ~205kW (Beam dump ~120kW)





面向RAMI的技术研发

Nb/Cu 复合腔 (中低 β)



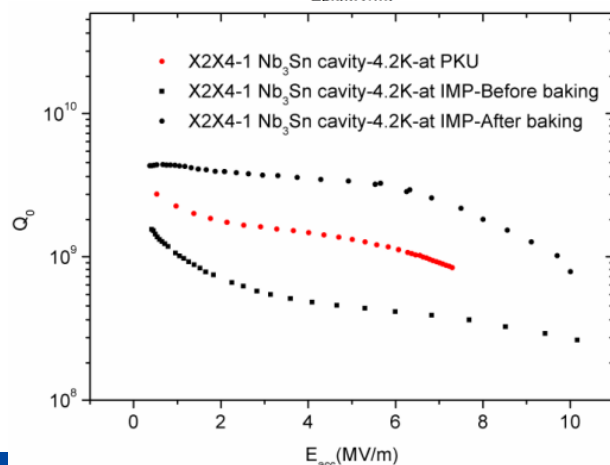
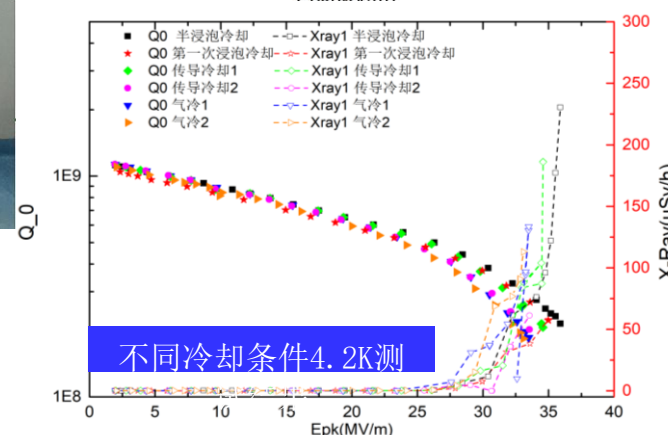
Nb₃Sn/Nb/Cu 复合腔 (高 β)

Nb₃Sn镀层进展:

- $Q=5e^9@10MV/m$

4.2K冷却

- 2W, 达到可应用性能





HIAF + CiADS Civil Construction

- HIAF's civil construction have finished >70%
- HIAF's hardware assemble starting 2023, 1st beam ~ end of 2025

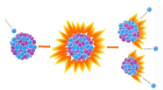




报告提纲

■ 若干科学前沿进展

- 高能量密度物理初步研究
- 基于HIAF及CiADS的 μ 束研究
- 基于HIAF的CP破缺探索





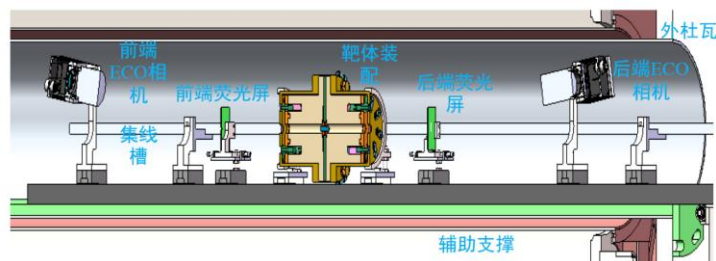
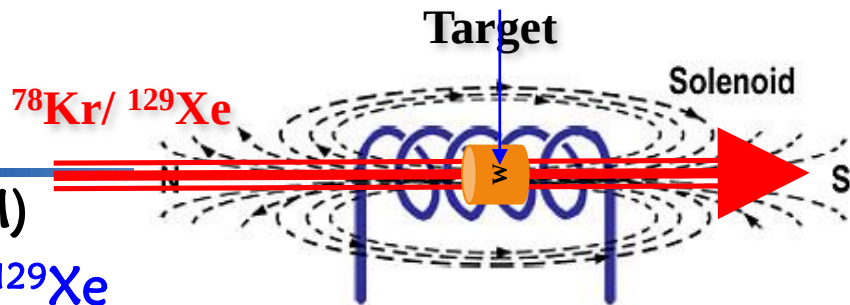
HIB驱动HEDM研究

● 重离子束(HIB)驱动高能量密度物质(HEDM)

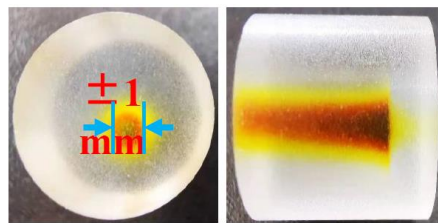
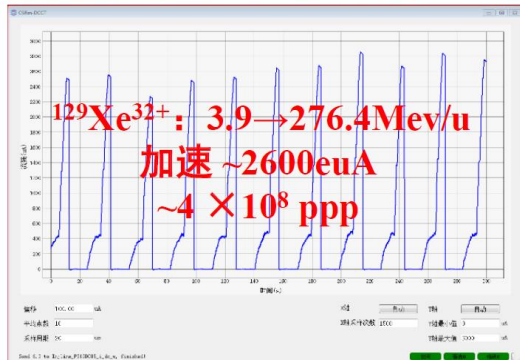
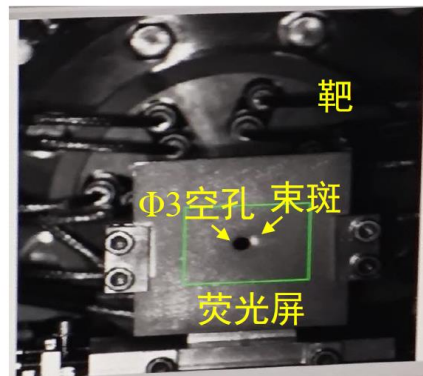
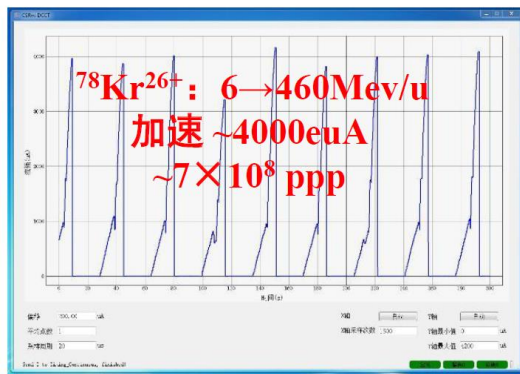
▶ 实验：重离子束：4/2.28J (300ns) $^{78}\text{Kr}/^{129}\text{Xe}$

→ $E_{\text{hedm}} < 100\text{J}/300\text{ns}\cdot\text{cm}^3$ | Al , $B \leq 6\text{T}$

▶ 结果：1, HEDM为特殊逆磁物质；2, 磁导率 μ_{HEDM} 随 E_{hedm} 提高而减小；3, 磁化HEDM吸取外磁场能量；4, 韧致辐射随 E_{hedm} 提高而减小

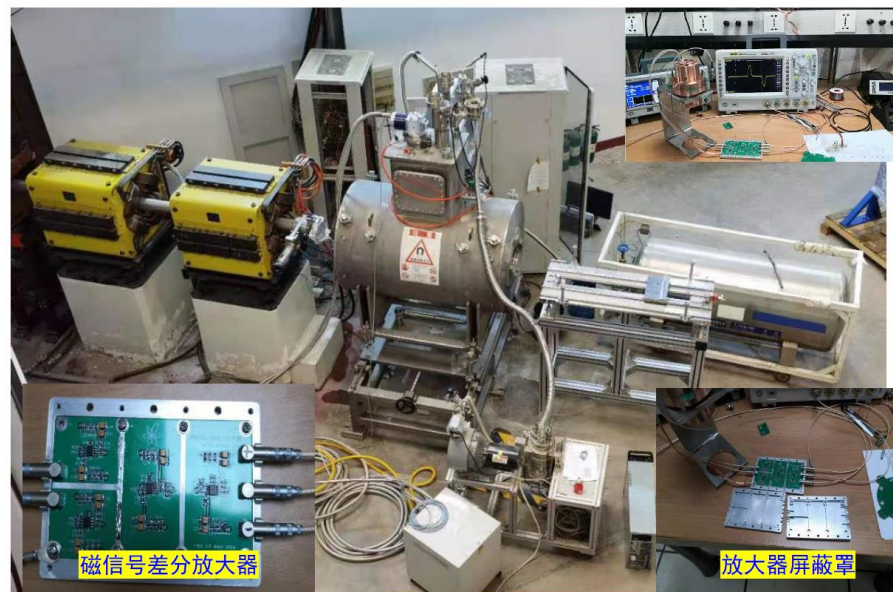


靶区设备布局



束斑尺寸

LiF中布拉格峰



实验终端



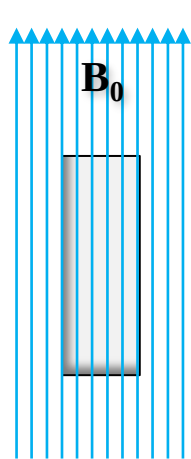
HEDM magnetic Property

● HEDM is Special Diamagnetism Matter

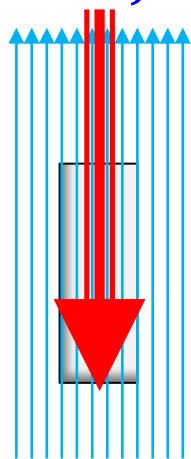
- ▶ dense plasma (HEDM) driven by pulse HIB under magnetic field B_0
- ▶ Magnetized HEDM is Magnetism Matter
- ▶ Charged particle magnetic moment is **opposite** to $\vec{B} \rightarrow$ Diamagnetism

● Magnetized HEDM take in energy from $B_0 \rightarrow B_{tip} > B_{mp} > B_0$

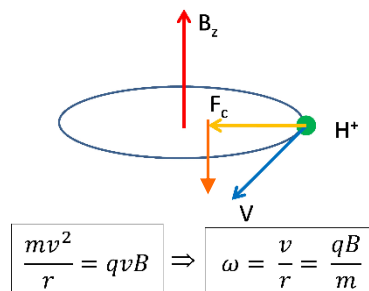
- ▶ **Magnetic permeability μ_c is decreasing with E_{mp} increasing**
- ▶ **Best conductor, similar as SC, but need B to maintain $\rightarrow$ take in flux ϕ**



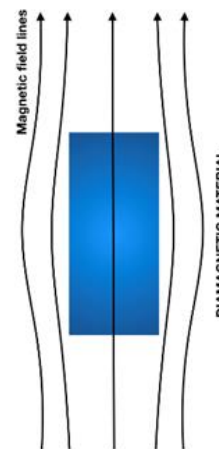
Normal



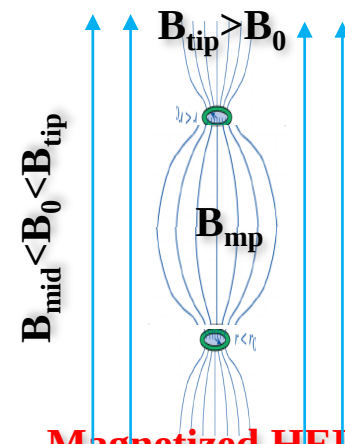
HI driven



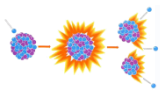
$$\mu = -E_r/B$$



Diamagnetism



Magnetized HEDM
Magnetic Mirror





ESSnuSB项目简介 (I)

Measuring leptonic CP violation at the second neutrino oscillation maximum with ESSnuSB

● ESSnuSM测2nd ν 振荡峰值研究CP破缺

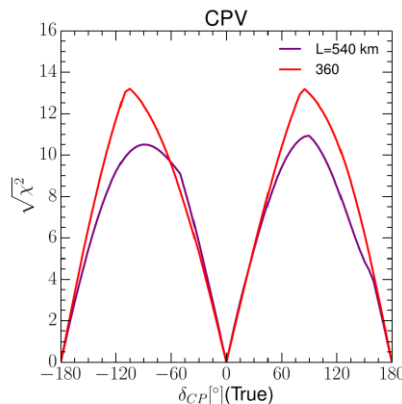
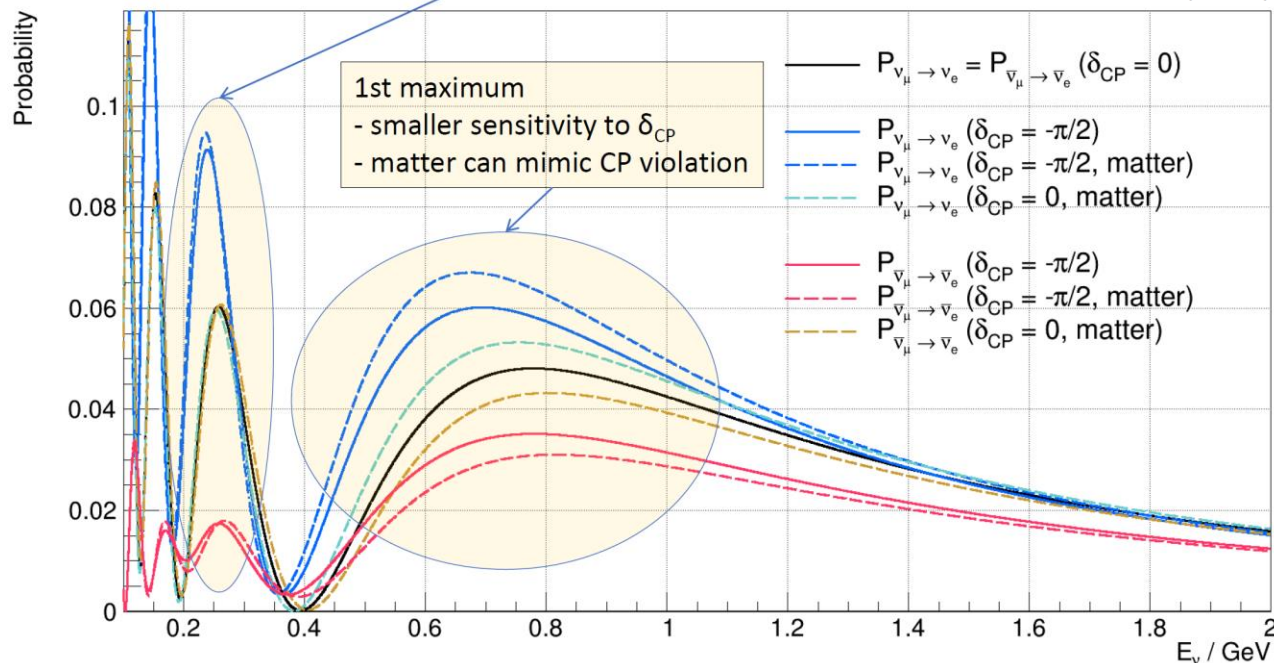
10年

- reach 5σ over 71% of δ_{CP} range
- reach δ_{CP} resolution of less than 8°
- determine neutrino mass hierarchy

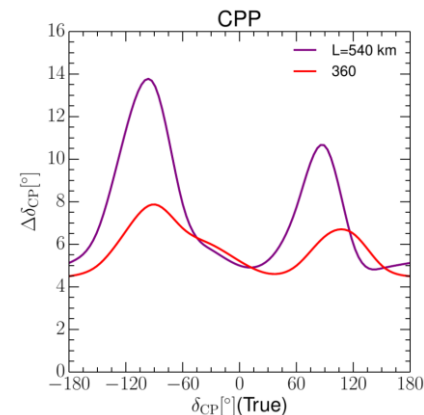
Matter effects

2nd maximum
- larger sensitivity to δ_{CP}
- matter doesn't matter

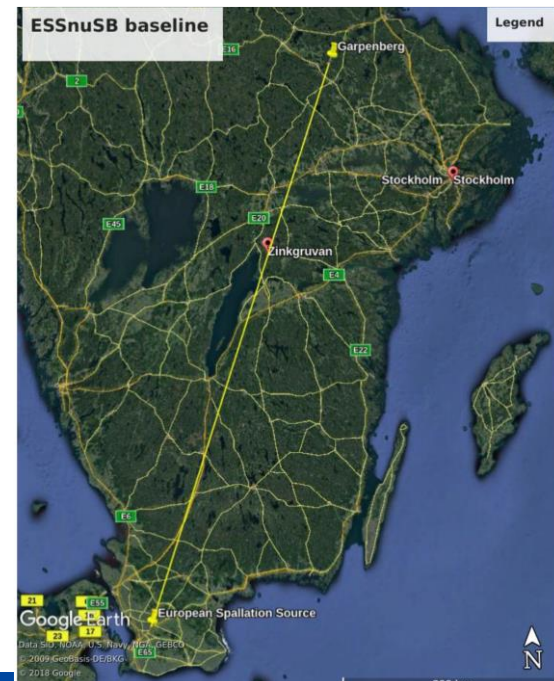
(L = 360 km)



Sensitivity for $\delta_{CP} = \pm \pi/2$:
11 σ (540 km)
13 σ (360 km)



High precision of δ_{CP} measurement





HIAF产生强中微子束方法(In Flight-1)

HIAF产生强 $\pi^\pm/\mu^\pm$, 衰变成强 ν 束: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu / \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

HIB在磁化复合靶产生 $\pi^\pm$, 选择收集成 π/μ 束, 随后PWFA高梯度快加速

1. 强流强子碰撞产生 $\pi^\pm$, 衰变成 $\mu^\pm$ 束及强 ν 束

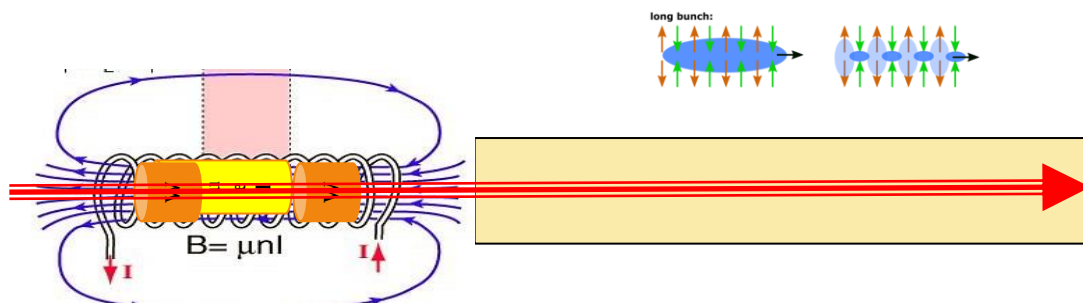
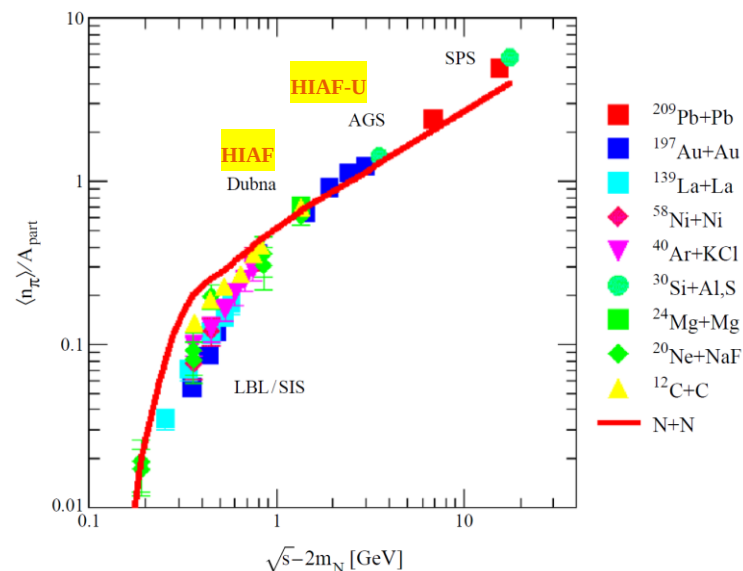
- 在过剩质心能 $\sqrt{s}-2m_N > 1$, N_π/A_{part} 与之成正比
- $\sigma_{np} > \sigma_{pp} \rightarrow$ 重靶(丰中子)利于提高产额
- 随弹核能量提高, $\pi(\mu^-)$ 产额 $> \pi^+(\mu^+)$

2. 产物分布与收集

- 产物能谱为指数分布, 低能产物峰值, 易于电磁收集
- 重离子打轻靶逆运动效应, 产物前冲, 增强收集效率
- 磁化复合靶 $\rightarrow \theta$ 箍缩 $\times 5 \sim 10$

3. PWFA加速条件

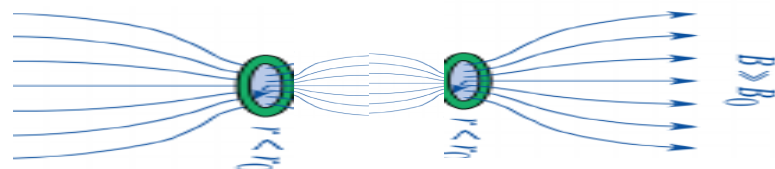
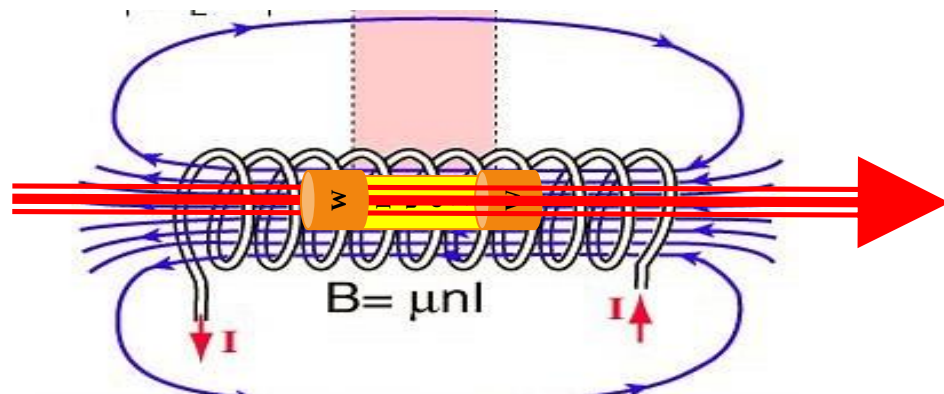
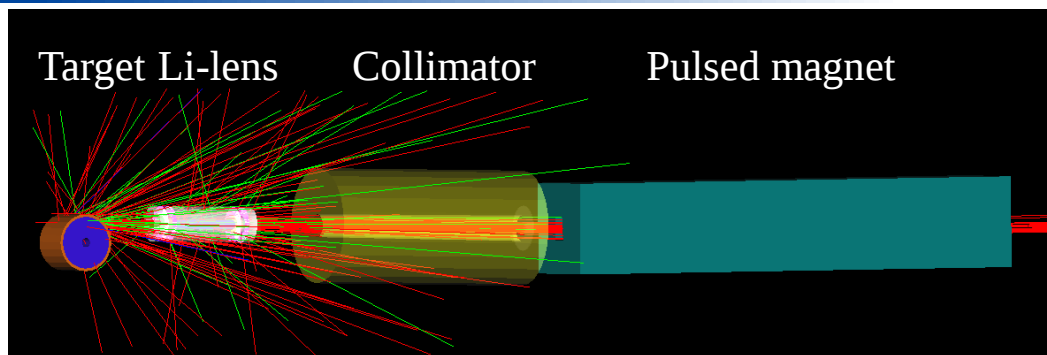
- 被加速带电粒子 $\beta \rightarrow 1$
- 强HIB高等离子体能损密度
- 高加速梯度减小 $\pi \rightarrow \mu$ 引起差异





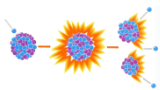
重离子驱动超强磁场产生强 $\pi^\pm/\mu^\pm$ 束

- In Flight束线接收度 $=\Delta x\Delta x'$
 - ▶ 小 Δx 大 $\Delta x'$ →增大动量接收能力
- 打靶产生 $\pi^\pm/\mu^\pm$ ，在靶前后超强磁场 ($\rightarrow 100\text{T}$)
 - ▶ μ 靶前后装W/Pb重靶
 - ▶ HI轰击超导螺线管内两端重靶产生HEDM $\rightarrow$ 超强磁场
 - ▶ 双HIB，前HIB产强磁场，后HIB产生 π/μ



Magnetic Field Distribution $\rightarrow$
Magnetic Mirror

	Horn	HIM
约束模式	Z箍缩 ($\phi 3\text{mm}$)	Θ 箍缩
典型峰值	$\sim 70\text{kA} (< 10\text{T})$	$\rightarrow 100\text{T}$
使用寿命	不长	长





HIAF产生强中微子束II (In Flight)

HIAF R&D 思路:

- In Flight制备 $\beta > 0.95$ μ 束+ PWFA 总体优化

根据弹核种类、能量及上述3方面优化靶种类及靶厚

$P_\pi > 480 \text{ MeV/c}$ ($\beta_\pi > 0.96$) $\rightarrow$ 产额 $> \times 100$

θ 箍缩 $> \times 2 \sim 3$

PWFA可加速高产额的较低动量 $\pi^\pm/\mu^\pm$

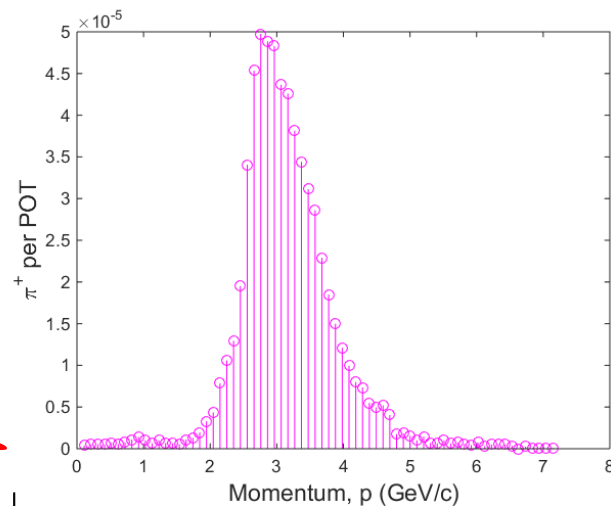
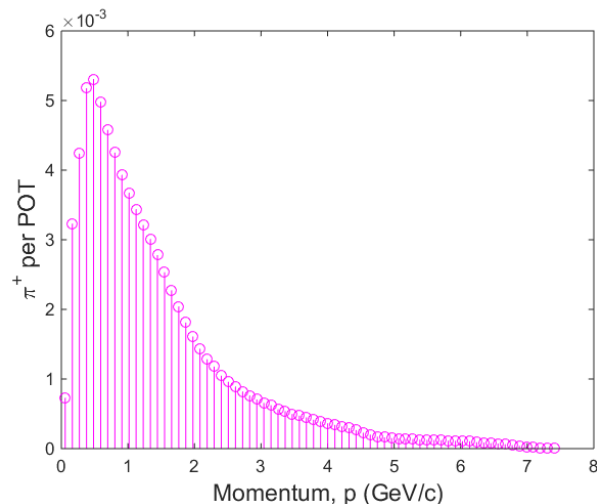
- 靶后PWFA加速调整 $\pi^\pm/\mu^\pm$ 动量适应实验

HIRFL-CSR, HIAF $\rightarrow$ PWFA (R&D)

- 2022~2025: $\sim 1 \text{ GeV} \& 10^{11} \text{ }^{12}\text{C} \rightarrow \text{HI-PWFA}$ 加速
- > 2025 : $3.28 \text{ GeV/A } ^{129}\text{Xe}$ ($\sim 50 \text{ kJ}$) + HI-PWFA 高致

收集并加速 $\pi^\pm/\mu^\pm \rightarrow \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

- > 2027 : $\mu^\pm$ 束注入环(Sring?) $\rightarrow \mu\text{STORM}$ R&D

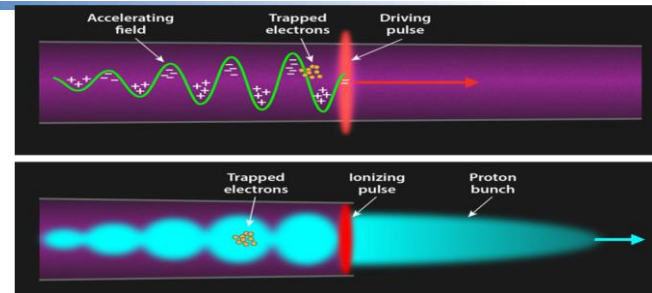




Feature of Ion Driven PWFA

▶ Energy of Driven Beam

- ▶ Laser: $\sim 50\text{J/pulse}$ (high rate)
- ▶ Electron : $\sim 50\text{J/bunch}$
- ▶ Proton: SPS 19 kJ/bunch (SPS), LHC 300kJ/bunch
- ▶ HIB: HIAF-U $> 1\text{MJ/bunch}$, high energy deposit density $\rightarrow$ excite plasma



▶ Ion driver: large energy per bunch allow single stage acceleration in ultra-high($5\sim 10\text{GeV/m}$) gradient

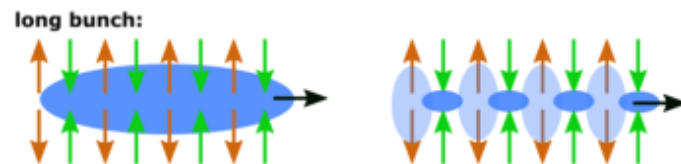
▶ Seeded Self-Modulation of plasma driven by Ion Beam (beam bunch 10cm $\sim$ 10m vs plasma wavelength $\sim 1\text{mm}$)

▶ Storage ring :

- ▶ $\sim \text{MHz}$ rate

- ▶ RF acceleration

quasi CW





Design of HI Driven PWFA Test at CSRe

1988年建成 (“七五”)

SSC(K=450)

100AMeV (H. I.), 110MeV(p)

1962年建成 (“一五”)

SFC(K=69)

10AMeV (H. I.), 17-35MeV(p)

2007年建成 (“九五”)

CSRe

C=128.8m, B ρ =9.4Tm

RIBLL 1

RIBs at tens of AMeV

RIBLL 2

RIBs at hundreds of MeV

HI-PWFA

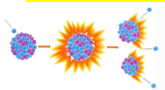
HI-PWFA

2007年建成 (“九五”)

CSRm

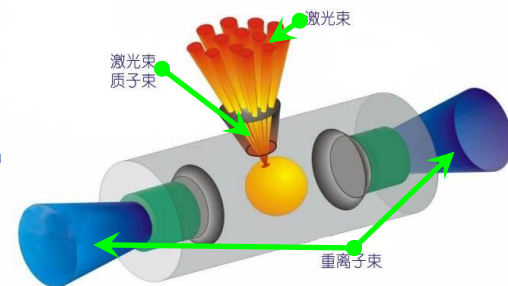
1000AMeV(H.I.), >2.8GeV(p)

- HI: $\sim 1000\text{MeV/A}$ & $10^{11} \text{ }^{12}\text{C/ppp}$
- Accelerate : electron, π^- ?





Optimizing of HIAF (~2027)



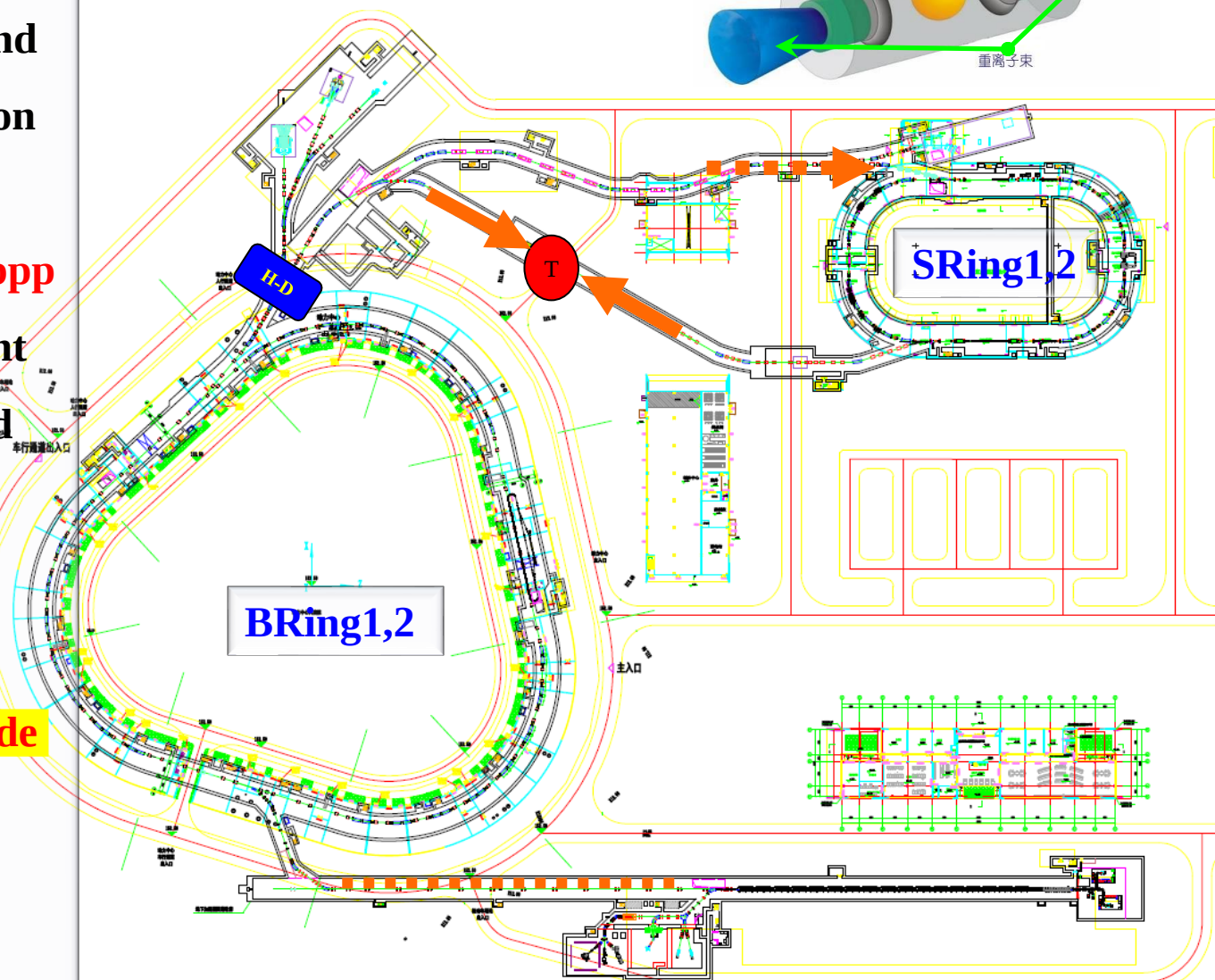
- Beams from BRing and SRing head on collision for **HEDM** :

$$E_{\text{HIB}} = 1\text{kJ/ppp} \rightarrow 2 \times 50\text{kJ/ppp}$$

- Beam + Target in front of **H** magnetic ion and Produce **2nd Beams** :

1. RIB on HFERS
2. Neutron in 0°
3. **Meson at both side in downstream**

- Single beam $\rightarrow$ Multi-Beam $\rightarrow$ Multi-Exp.

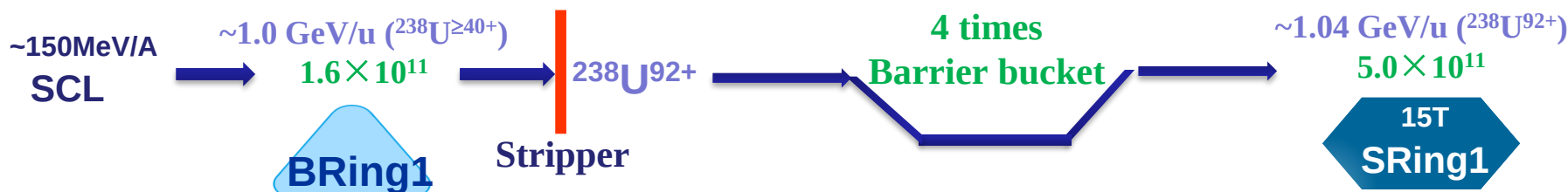




Optimizing for CW to Pulse Transform Efficient

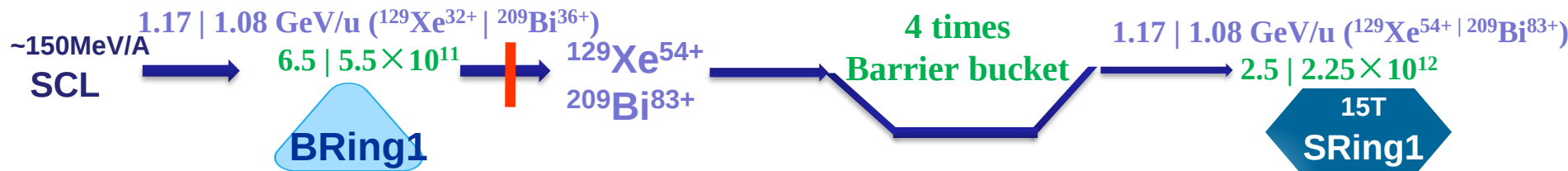
Intense CW Beam $\longrightarrow$ **Transformer (HF_RCS + Storage)** $\longrightarrow$ **Power Pulse Beam**

Compression: BRing $\rightarrow$ SRing Accum._{long} 5×10^{11} 1.04 GeV/u $^{238}\text{U}^{92+}$ $\rightarrow 19.8 \text{ kJ/ppp}$



or: BRing $\rightarrow$ SRing Accum._{long} 2.5×10^{12} 1.168 GeV/u $^{129}\text{Xe}^{54+}$ $\rightarrow \sim 60 \text{ kJ/ppp}$

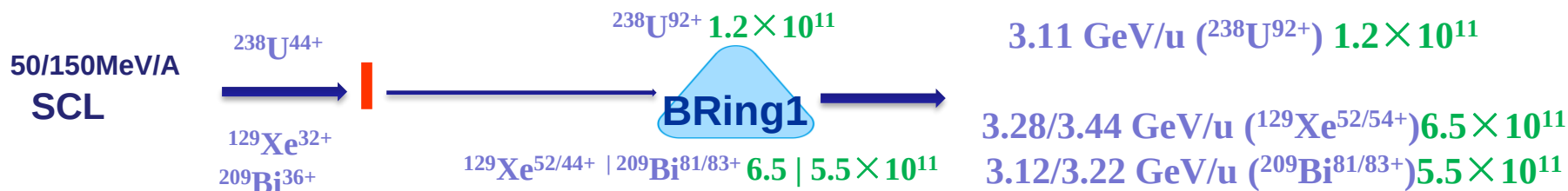
or: BRing $\rightarrow$ SRing Accum._{long} 2.25×10^{12} 1.08 GeV/u $^{209}\text{Bi}^{54+}$ $\rightarrow \sim 80 \text{ kJ/ppp}$



Heating: SCL $\rightarrow$ BRing1(34Tm) $\rightarrow 1.2 \times 10^{11}$ 3.11 GeV/u $^{238}\text{U}^{92+}$, $\sim 14 \text{ kJ/ppp}$

or: SCL $\rightarrow$ BRing1(34Tm) $\rightarrow 6.5 \times 10^{11}$ 3.44 GeV/u $^{129}\text{Xe}^{54+}$, 46 kJ/ppp

or: SCL $\rightarrow$ BRing1(34Tm) $\rightarrow 5.5 \times 10^{11}$ 3.22 GeV/u $^{209}\text{Bi}^{83+}$, 59 kJ/ppp

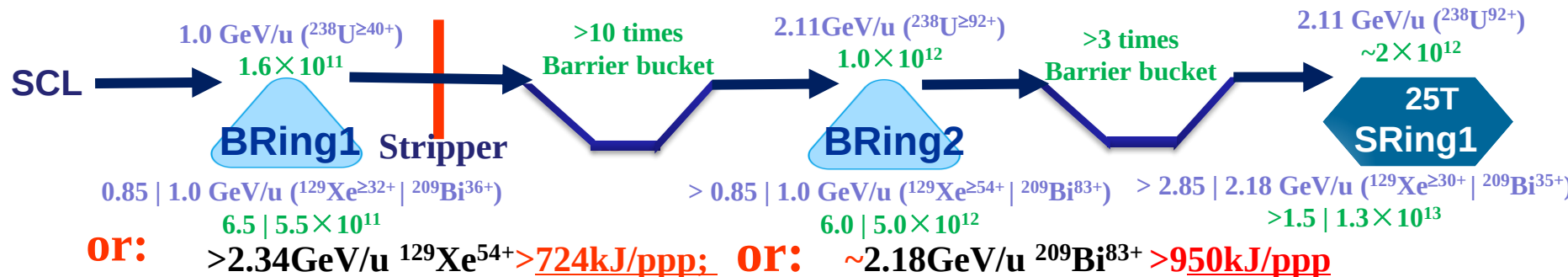




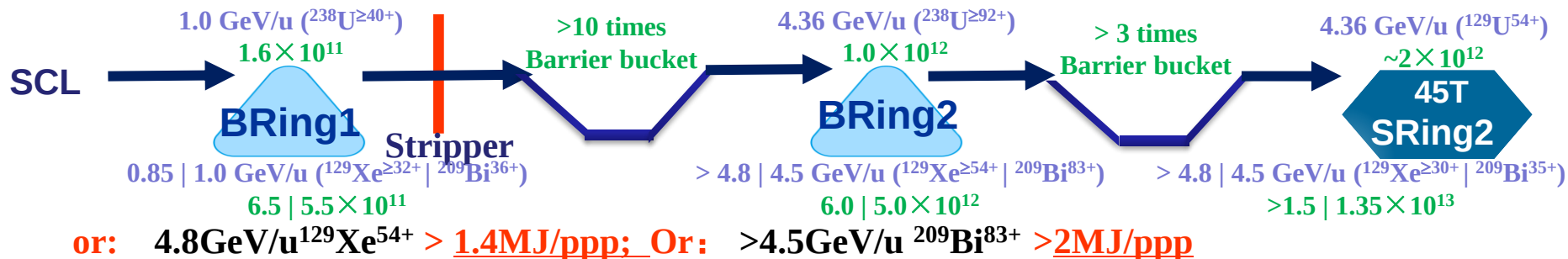
Upgrade1-2 for CW to Pulse Transform Efficient

Intense CW Beam → **Transformer (HF_RCS + Storage)** → **Power Pulse Beam**

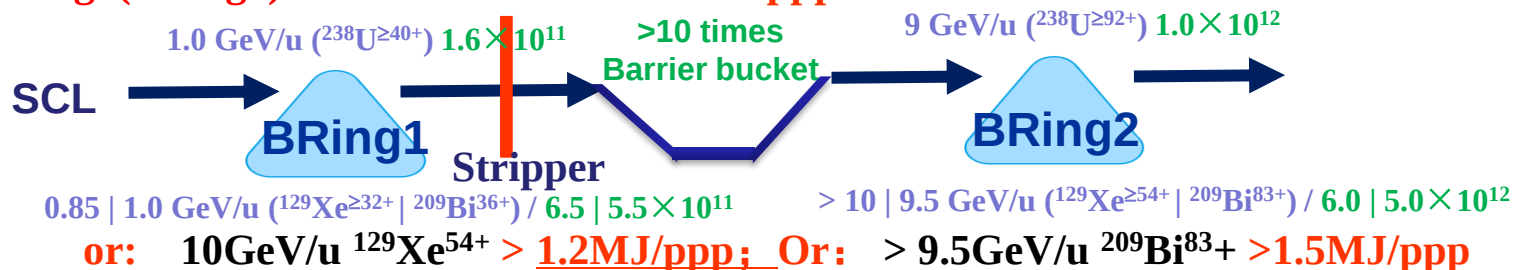
Compression(SRing1): $2.11\text{GeV/u } ^{238}\text{U}^{92+} \sim 160\text{kJ/ppp}$



Heating1(SRing2): $4.36\text{GeV/u } ^{238}\text{U}^{92+} \sim 332\text{kJ/ppp}$



Heating2(BRing2): $9\text{GeV/u } ^{238}\text{U}^{92+} \sim 342\text{kJ/ppp}$





HIAF-U与ESSnuSB中微子束比较

	ESSnuSB	HIAF_O	HIAF_U
Beam	Proton	Proton ~ ^{209}Bi	^{209}Bi
Energy (MeV/A)	~2.5	9/>3.22	9.5
Nucleon on Target (N.O.T) /ppp	~ 1.0×10^{15}	$209 \times 5.5 \times 10^{11}$	$209 \times 5.0 \times 10^{12}$
Frequency (Hz)	14/28	~20	10
N.O.T/(85%y)	~ 2.7×10^{23}	~ 7×10^{22}	> 2.7×10^{23}
靶约束	Horn(Z箍缩) <10T	HIM(⊖箍缩) >30T	HIM(⊖箍缩) ~100T
后加速	No	Yes	Yes
运行时间	2036	>2027	2032
远端探测器距离(km)	360/540	~260(JUNO)	~260(JUNO)





2060能源需求与现有能源分析

●2060年碳中和目标：非化石能源消费>80%

2020年

能源消费：~50亿吨标煤
用电7.51万亿度，占比~27%
→平均电功率>8.5亿千瓦



2060年(总耗能没显著增加)

能源消费：≥65亿吨标煤
用电<25万亿度，占比70~80%
→平均电功率23~28亿千瓦

年增长率2.5~3.0%/年(2020年~2.7%)

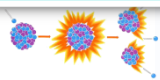
等效于：70%~80%非化石能源消费

清洁低碳一次能源发电可基本实现>80非化石能源消耗

**2060年用电占比70%~80%预估：

●数字、智能化耗能~30%；电动交通运输>15%

●民用：2020年1.09亿度，年增6.9%(美国人均电x6)；2060年增5%→7.7万亿度





电网单日用电与供电时间结构分析

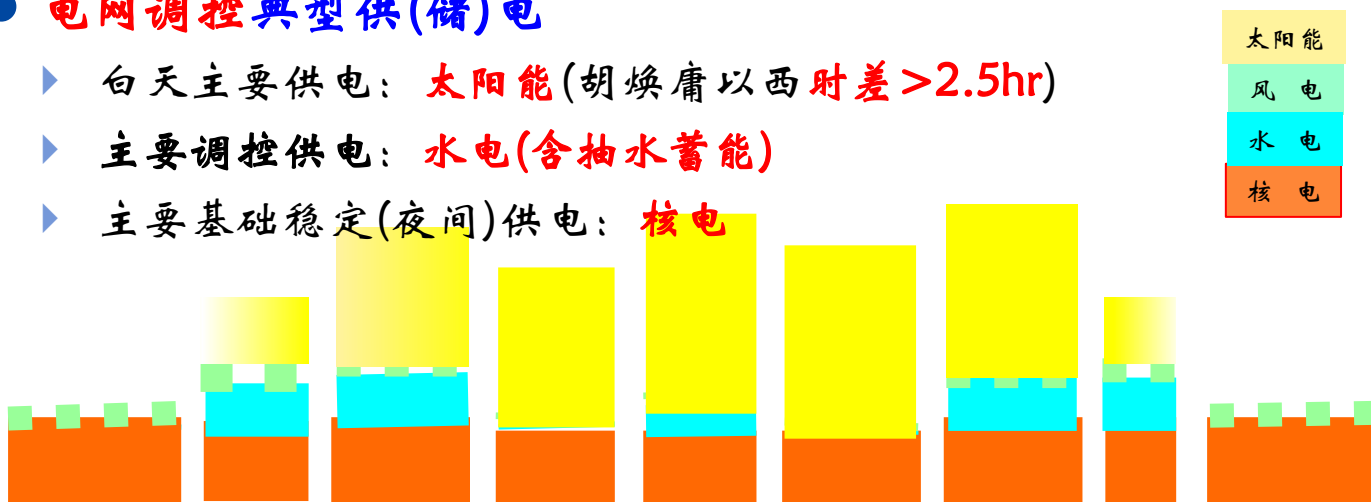
● 主要(东部)用电

- ▶ 夜间低谷
- ▶ 上班、晚间高峰
- ▶ 其余平段



● 电网调控典型供(储)电

- ▶ 白天主要供电: **太阳能**(胡焕庸以西时差 $>2.5\text{hr}$)
- ▶ 主要调控供电: **水电**(含抽水蓄能)
- ▶ 主要基础稳定(夜间)供电: **核电**

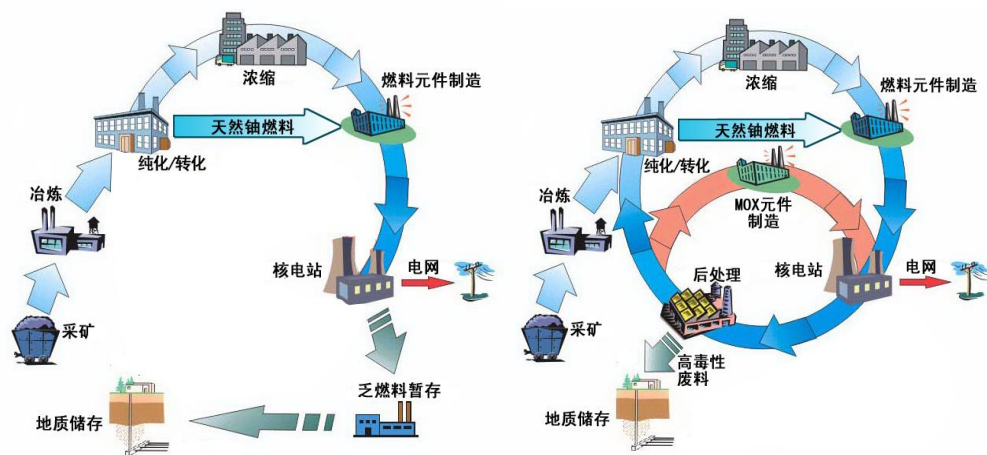




主要裂变核电(高能量密度)

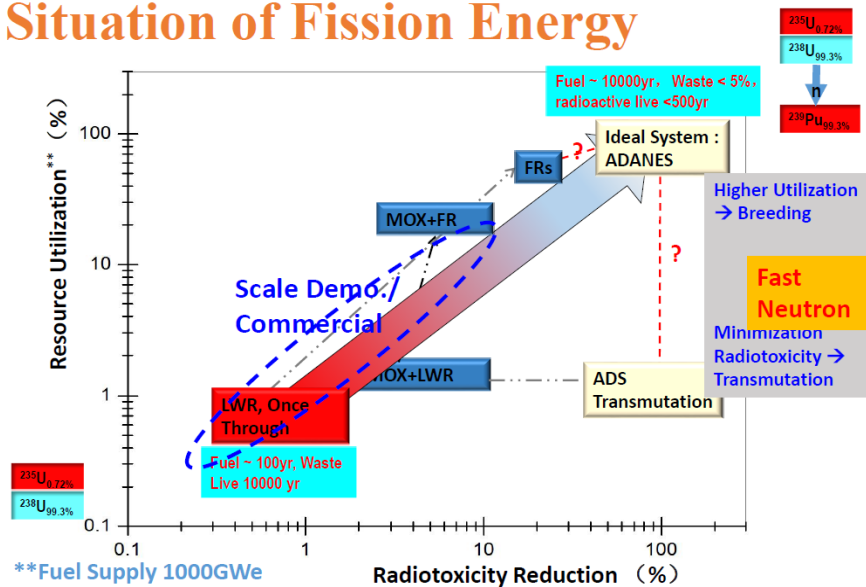
- 核电较成熟、低碳、电网UPS、具有规模经济竞争力
- 评价标准：安全可靠、可持续发展、经济可行、防扩散
- “碳中和” → “能源革命” 面临主要挑战：

1. 运行事故率场地可控、衰变余热、放射性包容 → 固有安全性
2. 燃料一次通过 → 全闭式循环(毒性<4%&寿命<500y, 燃料利用率>95%)
3. 沿海场址 → 西北沙漠、戈壁(无水冷却)
4. ~15%调控能力



一次通过 → 全闭式燃料循环

Situation of Fission Energy





ADANES: 裂变发电+嬗变减废+增殖燃料

轻水堆乏燃料(燃耗33GWd/T、冷十年): 铀系96.4%+ 裂变碎片 (FP) 3.6%, 其中稀土(RE) ~30%。引自NEA No. 6090

水冷堆乏燃料

粉化乏燃料

排~35% FP

高温挥发

提 ^{137}Cs 等

提排~55%FP(66% RE)

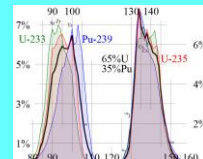
物理提铀

提TRU→核电池

排>66% FP

离子液体

提RE、MA



干式堆存

核电

加速器

固有安全性燃烧器
次临界、低压、耐高温容错包壳、非能动、宽快中子能谱

燃料利用率~30%

燃料利用率~80%

>95%

碳化>96%再生乏燃料, 耐高温碳化硅容错包壳



乏燃料排除>66%裂变产物, 制成再生嬗变、增殖燃料供成千上万年燃烧; 排出废料<裂变碎片(4%), 放射寿命<500y



平均20亿kW清洁低碳电(符合“双碳工作意见”)

- 在胡焕庸线西北开发一批人造绿洲
- 建造~8亿kw非水冷全燃料循环核电, (确保民生用电, 确保深夜低谷供电)
- >7万km²的15亿kw太阳能风能发电上网
- ~小时储能实现滤波、延时储能电池
- 结合西部“南水北调”增加水电调控能力



●可持续 ●安全可靠 ●经济高效 ●非水冷 ●洲内循环 ●防扩散

A
D
A
N
E
S

- ADANES燃烧器烧含50%裂变产物的再生乏燃料(粗燃料)
- 将铀资源利用率提高到>95%、核废料量减少到<4%、放射寿命<500年
- 核燃料全闭式循环, 使核裂变能成为可持续近万年的安全、清洁、低碳战略能源
- 模块化制作, 极具经济竞争力; 无水冷却, 适应戈壁、沙漠运行, 闭式燃料循环
- 同时, 提取珍贵同位素应用于移动能源、健康、安全等领域

国家重大科技基础设施

——CiADS

ADANES燃烧器: 即加速器驱动的燃烧器系 (Accelerator-Driven Burner)。利用ADS强大外源中子的特点, 集嬗变、增殖、产能为一体, 非水冷、烧再生乏燃料(含50%FP)、易调控~20%输出功率

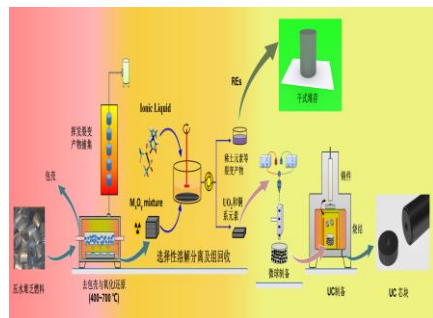
ADRUF:

加速器驱动乏燃料再生

(Accelerator Driven Recycle of Used Fuel) 以排除>50% 裂变产物(FP)为目的, 无水乏料再生→燃料全闭式循环



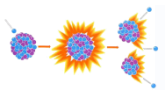
惠州, 在建





报告提纲

■ 小结





小结

■ HIAF: (按研制进度)

- ✓ 强高电荷离子源+4D注入+高重频→显著提高束团强度
- ✓ ~2027 (优化): $>5.5 \times 10^{11}$ HI/s, $\sim 2 \times 10^{15}$ N.O.T /s → ν
- ✓ ~2032 (升级): $>5.0 \times 10^{12}$ HI/s, $\sim 10^{16}$ N.O.T/s → ν (>ESSnuSB)

■ CiADS: (按研制进度)

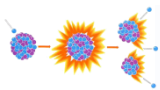
- ✓ ~2028: 2.5MW 质子束
- ✓ ~2032: >15MW 质子束



最强缪子源

■ HIAF(+CiADS)产生强 ν 束挑战 ($\pi \rightarrow \mu$)

- 高亮度→高收集率(HIM+PWFA)→高强度脉冲中微子束
- PWFA主要条件: 高能量及高功率密度等离子体→
 - 增大束团总能量(50kJ/>1MJ/ppp)
 - 减小束团空间→压缩束团截面及束团长度(<300ns)





ADANES发展路线图

TRL: 研发 (TRL: 1~4) 规模验证 (TRL: 4~7) 工业示范 (TRL: 6~8) 工业推广 (TRL: 7~9)

ADANES乏燃料再生的原理和模拟研究:
中科院-0.2亿, 科技部-0.2亿, 基金委-0.2亿

ADANES乏燃料再生关键技术攻关和规模有效化验证
裂变资源利用率3阶段目标: 30%、80%、95%

ADANES集成化与工业应用示范
重大专项

产业化

CiADS: ADANES燃烧器经济性优化的关键技术攻关和有效示范

CiADS (ADANES燃烧器技术)项目
经费: 28.16亿元, 其他>5亿

ADANES燃烧器原理研究及关键技术攻关: 中科院-16亿, 其他-0.8亿

ADANES

可持续

安全可靠

经济高效

非水冷

厂区循环

防核扩散

2010

2016

~ 2021

~ 2030

~ 2035

~ 2040

