

CNNE



中核集团

核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

# 双 $\beta$ 衰变实验用同位素及其制备

CNNE

谢全新

稳定同位素技术研发中心

2023年5月9日

CNNE

# 目录

## CONTENTS

- 01 核理化院稳定同位素研发情况
- 02 双 $\beta$ 衰变实验用同位素及其制备

The background features a large blue abstract shape on the left side, transitioning into a white background with various light blue patterns. These patterns include the letters 'CNNE' and 'EN' rendered in different styles: some with horizontal lines, some with zig-zag patterns, and some with a grid or dot pattern.

01

## 核理化院稳定同位素研发情况



# 稳定同位素分离方法



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

提取稳定同位素主要依靠物理化学、光学、电磁与等离子体、分子动力学等方法。



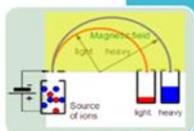
## 物理化学方法

- 蒸馏法
- 化学交换法



## 光学方法

- 原子激光法
- 分子激光法



## 电磁与等离子法

- 电磁法
- 离子回旋共振法



## 分子动力学方法

- 气体扩散法
- 气体离心法

优点	缺点	备注
稳定轻同位素的分离，成本低，量大 如：H、B、C、N、O、He、Ne、Ar	不适宜中、重同位素，国内技术不成熟	轻同位素的分离完全市场化
分离系数高，耗电少，成本低	技术成熟度欠缺，产量受限	还在研发过程中
几乎可分离所有元素的同位素，一次分离可获很高的浓缩丰度	只能小批量生产	重要方法之一
用于铀的浓缩生产，得到长期工业化应用验证，具有较高的经济性	对分离工质有严格要求，需要级联	需要研发专用机型，需要建立成熟的化工转换工艺

\*注：图表来自互联网



# 稳定同位素研发



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司



国内唯一的同位素分离技术研究院

全国重点实验室

国防科工局统筹规划单位

核燃料循环重点规划单位

中国核学会常务理事单位

分析测试协会理事单位

## 人员

正式职工990余人

中科院院士	2人
集团公司首席专家	2人
中核集团科技带头人	3人
享受政府特殊津贴	47人
高级职称研究人员	372人

## 成果

获国家科技进步奖 17项

省部级科研成果 500项

有效专利持有 1000余项

国家及行业标准 73个

# 稳定同位素研发



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

## 国内唯一的同位素分离技术研究院

作为国内最早开展分离稳定同位素的科研单位，先后开展了碳、氘、锌、碲、钨、硅、锗、镍等元素的数十种稳定同位素的分离研究工作。针对大、中、小质量同位素的分离，掌握了核心分离技术，研发了专有型号的专用设备，形成了完整分离技术研发谱系；掌握了的级联设计技术，具备了完整的级联建设水平；掌握了转化工质生产及纯化技术，具备高丰度和高纯度检测能力，可提供质量稳定可靠的同位素产品。

### 1989--2000

- ✓ 相继开展氘、锌、碲等同位素分离研究，论证了专用设备分离稳定同位素的可行性。

### 2001-2004

- ✓ 2001年，建成几十台规模的级联系统。
- ✓ 2002年至2004年，开展了的氘同位素试生产。

### 2004-2010

- ✓ 建成了几百台规模的级联系统，生产出了公斤级99.5%以上的硅-28。

### 2011-2021

- ✓ 氘同位素产品系列化，产品已进入国内外市场；
- ✓ 开展新机型研制、贫化锌-64、锗-76等产品开发以及新级联系统建设。

### 2021-至今

- ✓ 2021年8月30日，成立稳定同位素技术研发中心，踏上研产融合创新发展新征程；
- ✓ 整合氟化工团队，研发实力不断完善。
- ✓ 机型基本定型，型谱化发展；
- ✓ 新增科研生产线；



**完整的技术体系**



**稳定同位素专用机型研发技术**



**级联设计技术及系统建设**



**同位素生产运行技术**



**工质合成、化工转化及纯化技术**



## 稳定同位素研发



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

2022年10月16日，核理化院（公司）津南院区稳定同位素专用机型考核系统启动





## 稳定同位素研发



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司



两套单机  
分离试验系统



多套级联  
分离实验系统



化工实验室



化学分析室



# 稳定同位素研发—部分产品



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

开展了11种元素技术研发

氙、锌、锆、钨、硅、钼  
硼、镍、碳、碲、硒

开发了6种元素

共16种同位素产品

氙: 124,128,129,131,132,134,136  
锌: 64,68  
锆: 70,72,76  
钨: 184,186  
硅: 28  
硼: 11

主要  
成果

7种同位素形成销售

氙-124、氙-129、氙-131、氙-132  
锌-64、锌-68、钨-184

2种销往国外

氙-124、锌-68



# 稳定同位素研发—部分产品



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

元素	同位素	天然丰度 (%)	产品丰度 (%)
氙	Xe-124	0.096	>99.9
	Xe-126	0.09	>90
	Xe-128	1.92	>99
	Xe-129	26.44	>99
	Xe-131	21.18	>99
	Xe-132	26.89	>99
	Xe-134	10.44	>99
	Xe-136	8.7	>99.9
钨	W-184	30.64	>60
	W-186	28.43	>95
硅	Si-28	92.21	>99.5
锗	Ge-76	7.61	>86
	Ge-72	27.54	52-59
锌	Zn-68	18.75	>98
	贫化Zn-64	48.89	<1



氙同位素



锗同位素



锌同位素

# 02

## 双 $\beta$ 衰变实验用同位素及其制备



## 无中微子双 $\beta$ 衰变实验研究



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

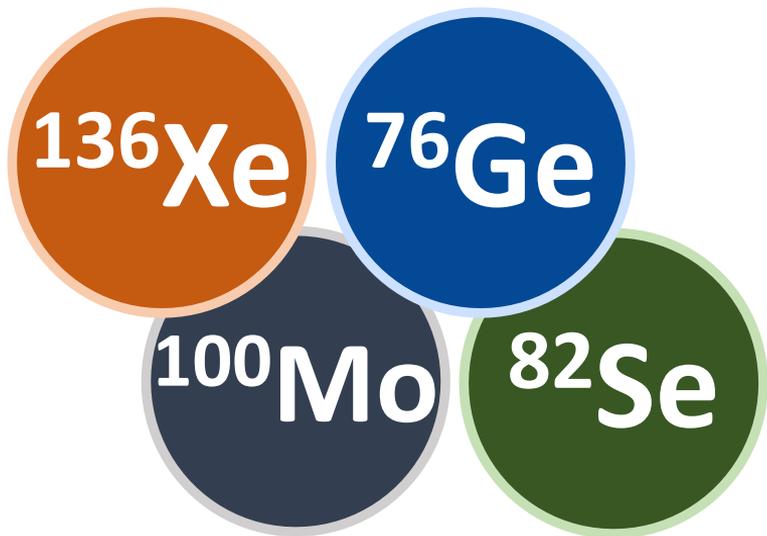
无中微子双 $\beta$ 衰变是当前国际上粒子物理与核物理领域研究的重要科学前沿，是可能突破粒子物理标准模型的研究方向之一。无中微子双 $\beta$ 衰变实验研究可以回答中微子物理的重要问题：

- ◆ 轻子数是否守恒
- ◆ 中微子的基本性质，即中微子是否为马约拉纳粒子
- ◆ 中微子的绝对质量标度
- ◆ 与中微子的马约拉纳属性相关的CP破坏相位。

# 无中微子双β衰变实验研究



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司



氙-136、锗-76、钼-100、硒-82可用于无中微子双β衰变实验，这是学术界公认的探索中微子这一前沿问题的理想途径。

Laboratory	Experiment	Isotope	Abundance, %	Enrichment, %	Mass, kg	When
Gran sasso (Italy)	CUORE	Te-130	34,08	>99	200	2014-19
	GERDA	Ge-76	7,61	87	17	2010-12
					40	2012-14
					1000	2015-25
					33	2012-13
MAJORANA	Ge-76	7,61	87	1000	2015-25	
WIPP (WIPP, New Mexico,	EXO	Xe-136	8,87	69-80	200	2010-12
					1000	2015-25
Modane (France)	SuperNEMO	Se-82	8,73	97	100-200	2013-19
Mo Observatory Of Neutrinos (Japan)	MOON	Mo-100	9,63	95-99	12	2011-14
					220	2014-19
					480	2020-25
Kamioka (Japan)	KamLAND-Zen	Xe-136	8,87	69	400	2011-13
					1000	2014-16
SNOLAB (Canada)	SNO+	Nd-150	5,64	91	40-120	2013-16
					500	2016-20

# 无中微子双 $\beta$ 衰变实验研究



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

北京大学

清华大学

复旦大学

浙江大学

上海交通大学

中国科学技术大学

中科院高能物理研究所

中科院近物理研究所

核工业理化工程研究院

.....

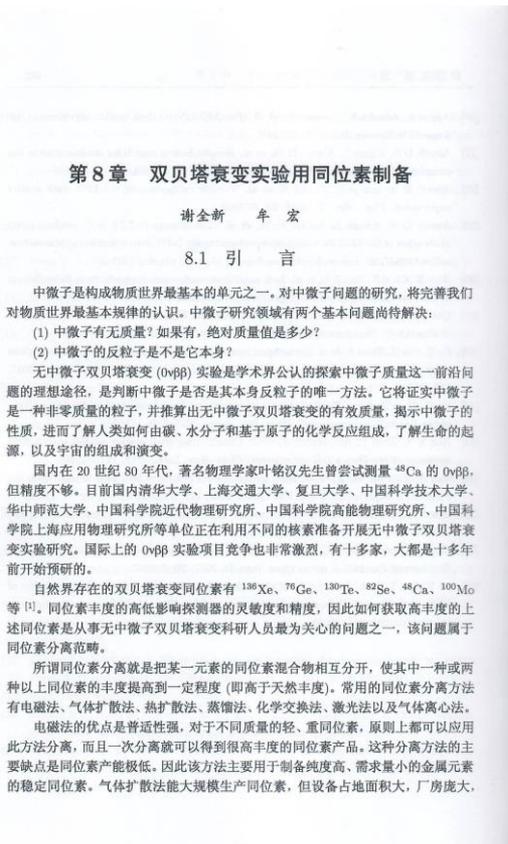
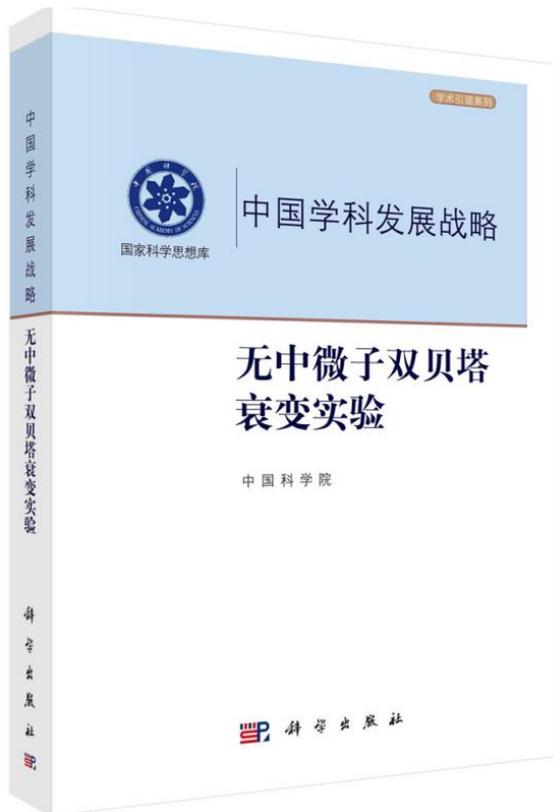




# 无中微子双 $\beta$ 衰变实验研究



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司





# 无中微子双β衰变实验用同位素



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

## 四种元素的同位素组分及天然丰度



$^{70}\text{Ge}$	20.84%
$^{72}\text{Ge}$	27.54%
$^{73}\text{Ge}$	7.73%
$^{74}\text{Ge}$	36.28%
$^{76}\text{Ge}$	<b>7.61%</b>



$^{74}\text{Se}$	0.89%
$^{76}\text{Se}$	9.37%
$^{77}\text{Se}$	7.63%
$^{78}\text{Se}$	23.77%
$^{80}\text{Se}$	49.61%
$^{82}\text{Se}$	<b>8.73%</b>



$^{92}\text{Mo}$	14.84%
$^{94}\text{Mo}$	9.25%
$^{95}\text{Mo}$	15.92%
$^{96}\text{Mo}$	16.68%
$^{97}\text{Mo}$	9.55%
$^{98}\text{Mo}$	24.13%
$^{100}\text{Mo}$	<b>9.63%</b>



$^{124}\text{Xe}$	0.09%
$^{126}\text{Xe}$	0.09%
$^{128}\text{Xe}$	1.92%
$^{129}\text{Xe}$	26.44%
$^{130}\text{Xe}$	4.08%
$^{131}\text{Xe}$	21.18%
$^{132}\text{Xe}$	26.89%
$^{134}\text{Xe}$	10.44%
$^{136}\text{Xe}$	<b>8.87%</b>



# 无中微子双 $\beta$ 衰变实验用同位素



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

## 四种元素分离技术难点

分子量相对较小，  
分离效率不高

Xe	(131.29)
GeF <sub>4</sub>	(148.61)
SeF <sub>6</sub>	(192.96)
MoF <sub>6</sub>	(209.94)
UF <sub>6</sub>	(352.03)

组分多，属于多组分  
分离，分离难度大

Ge	(5种组分)
Se	(6种组分)
Mo	(7种组分)
Xe	(9种组分)

组分间质量差小，  
最大为2，分离  
系数低



## Xe-136同位素



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

### Xe-136

2000年：开展氙同位素分离技术研究；

2015年：实现氙同位素产品系列化；

2022年：在天津市津南院区新建了专用的氙同位素分离系统，目前正在生产市场所需的氙-124、氙-128、氙-129、氙-131等同位素；该系统可随时转产氙-136同位素，具备年产90公斤丰度90%的氙-136能力。

✓ 中核集团成员单位（中核沧州）拥有更大扩产空间，如有需求，可扩产至1吨。



## Ge-76同位素



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

### Ge-76

- 2021年6月：在机型研制的基础上开展分离试验研究，同步开展四氟化锗到二氧化锗的转化技术研究；
- 2021年10月：突破分离技术和化工转化技术，完成样品制备及转化任务，获得5公斤丰度大于86%的锗-76同位素样品，产品纯度大于99.98%；
- 2022年2月：在中核沧州建成年产100公斤锗-76同位素生产系统，在核理化院建成了100公斤的化工转化系统，两个系统成功投运，并建立了相应的分析平台。
- 2022年4月：累计完成了120公斤锗-76同位素分离和转化任务。



# 稳定同位素应用—重大基础科研



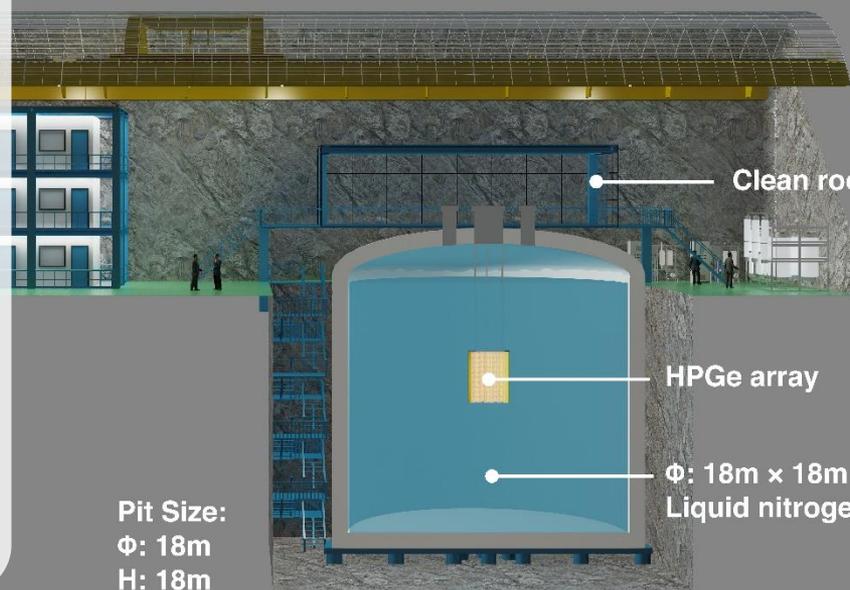
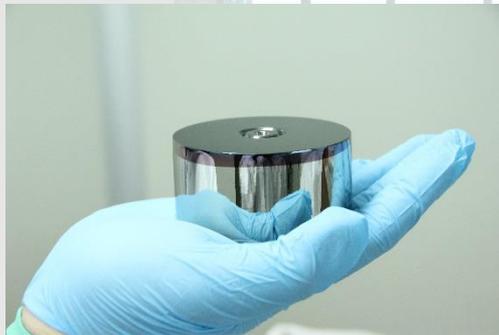
核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

## CDEX-1T Conceptual Layout



中国锦屏地下实验室  
China Jinping Underground Laboratory  
清华大学·雅砻江流域水电开发有限公司

$^{76}\text{Ge}$



Pit Size:  
Φ: 18m  
H: 18m



# 稳定同位素研发



# 核工业理化工程研究院 核工业理化工程研究院有限公司

## 锆系列同位素产业化获评中核集团2022年度十大新闻

## 锆-76研发过程获得科技日报2023年1月12日头条报导

中国核工业集团有限公司  
China National Nuclear Corporation

# 2022年度十大新闻 NEWS

08

打破国外垄断  
中核集团成为全球规模最大、  
技术指标最高的锆同位素材料生产供应商

# 科技日报

## 在新时代新征程上一刻不停推进全面从严治党

### ——习近平总书记在中纪委二次全会上的重要讲话在广大干部群众中引发强烈反响

新华社北京2月12日电 习近平总书记在中纪委二次全会上的重要讲话，充分肯定党的十八大以来全面从严治党取得的重大成就，为新时代新征程上一刻不停推进全面从严治党、深入推进新时代党的建设新的伟大工程指明了前进方向，在各地干部群众中引发强烈反响。

大家表示，要深入学习贯彻习近平总书记重要讲话精神，全面落实全面从严治党要求，以实际行动迎接党的二十大胜利召开。

新华社北京2月12日电 习近平总书记在中纪委二次全会上的重要讲话，充分肯定党的十八大以来全面从严治党取得的重大成就，为新时代新征程上一刻不停推进全面从严治党、深入推进新时代党的建设新的伟大工程指明了前进方向，在各地干部群众中引发强烈反响。

大家表示，要深入学习贯彻习近平总书记重要讲话精神，全面落实全面从严治党要求，以实际行动迎接党的二十大胜利召开。

# 为了全行业唯一的锆-76用户

## 创新故事

▲ 突破一层窗户纸 开辟一扇新大门

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 创新故事

▲ 突破一层窗户纸 开辟一扇新大门

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 突破一层窗户纸 开辟一扇新大门

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 创新故事

▲ 突破一层窗户纸 开辟一扇新大门

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 突破一层窗户纸 开辟一扇新大门

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 突破一层窗户纸 开辟一扇新大门

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

### 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运

▲ 医生「看护这座跨海大桥」

▲ 今年春运



## Mo-100同位素



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

### Mo-100

2020年：完成了六氟化钼静态腐蚀性研究

2021年：完成了单机分离技术研究，初步确定单机分离性能；

2022年：完成了单机优化技术研究，进一步提升分离性能；

2023年：4月启动了级联分离系统，开展钼-100同位素分离；同步开展六氟化钼到三氧化钼的转化技术研究及分析检测技术研究。

预计9月份获得2公斤丰度大于95%钼-100同位素。

✓ 后续根据需要设计并建设能实现批量化生产的分离系统和化工转化系统。



# Se-82同位素



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

## Se-82

第19卷 第1期  
2006年2月

同位素  
Journal of Isotopes

Vol. 19 No. 1  
Feb. 2006

### <sup>74</sup>Se 同位素分离研究

李大勇,牟宏,李文泊,孙建英  
(核工业理化工程研究院,天津 300180)

摘要:针对分离装置对工作介质的特殊要求,选择 SeF<sub>6</sub> 作为分离工作介质,并进行了单机分离试验,获得适用于级联设计的单机参数和单位质量数差的全分离系数  $\gamma_0$ 。进一步研究中,借鉴其它稳定同位素分离经验,建立了直角级联模型,并进行了级联分离计算。通过理论计算,分析了<sup>74</sup>Se 同位素级联分离特性。上述研究表明,采用专用方法分离<sup>74</sup>Se 同位素是可行的。

关键词:<sup>74</sup>Se 同位素;分离;浓缩;级联

中图分类号:TL252;TQ125.2 文献标识码:A 文章编号:1000-7512(2006)01-0004-03

### The Study of <sup>74</sup>Se Isotopes Separation

LI Da-yong, MOU Hong, LI Wen-po, SHUN Jian-ying

(Research Institute of Physical & Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

Abstract: According to the special demand of a separation facility, SeF<sub>6</sub> is selected as working medium. By dint of separation test in a separation facility, some separation characteristic parameters which are necessary for a cascade design are acquired. In the further study, a square cascade model is established, and the cascade separation characteristic of <sup>74</sup>Se is analyzed by the cascade theory. The studies indicate that it is feasible for separating <sup>74</sup>Se by the special separation facility.

Key words: <sup>74</sup>Se; isotope; Concentration; Cascade

2005年: 开展了硒同位素分离单机技术研究;  
2009年: 以六氟化硒为工质, 开展了级联分离  
试验, 获得几十克丰度达到94%的  
硒-82同位素样品。

✓ 目前已经掌握硒-82制备技术, 六氟化硒对系统和机器的腐蚀性比六氟化钼要弱, 相对容易。而且六氟化硒可直接用于双β衰变试验, 无需进行化工转化。



结束语



核工业理化工程研究院  
核工业理化工程研究院有限公司

# 开放合作 互利共赢

产业理念：开阔新视野、开发新产品、开拓新市场



CNNE

 核工业理化工程研究院  
中核集团 核工业理化工程研究院有限公司

汇报完毕，欢迎交流合作！

CNNE

谢全新 159 0039 3395

CNNE