

СОВЕТ РАН ПО ФИЗИКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Гостиница SHERATON, конференц-зал «Пожарский»
г. Нижний Новгород, пл. Театральная, д.1

14-17 мая 2024

Создание радиохимической лаборатории в ЛЯР ОИЯИ

Николай Аксенов

nikolay.aksenov@jinr.ru

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова



Создание радиохимической лаборатории (РХЛ) в ЛЯР:

Статус:

Подготовка концептуального проекта новой РХЛ с горячими камерами («горячая лаб».) для проведения операций с радиоактивными веществами по 1-му классу РБ

Цель проекта:

Создание в ЛЯР ОИЯИ специализированного радиохимического исследовательского комплекса

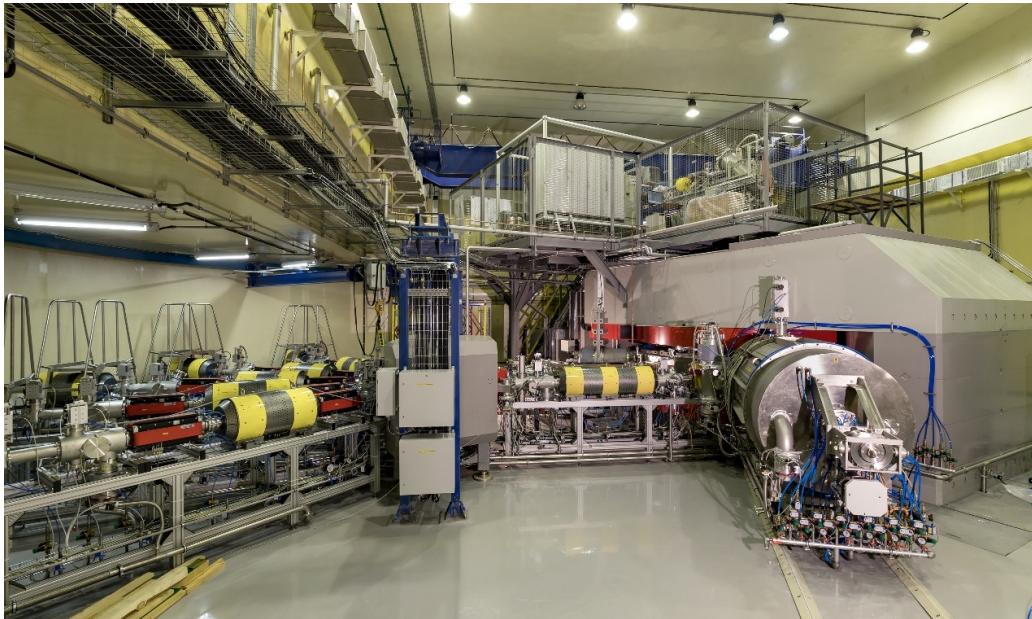
Ключевые Задачи:

- 1) Изготовление и регенерация высокорадиоактивных ускорительных мишеней, для проведения экспериментов по синтезу новых элементов на Фабрике сверхтяжелых элементов.**
- 2) Разработка технологий и методов получения радионуклидов для ядерной медицины и исследований.



- Discovery of new SHE
- High statistics experiments
(chemistry, spectroscopy)

SUPER HEAVY ELEMENT FACTORY: NEW JINR FACILITY FOR SUPER HEAVY ELEMENT RESEARCH



Циклотрон DC-280
Увеличение интенсивности
пучков тяжелых ионов

PHYSICAL REVIEW C 106, L031301 (2022)

Letter

Featured in Physics

First experiment at the Super Heavy Element Factory: High cross section of ^{208}Mc in the $^{249}\text{Am} + ^{40}\text{Ca}$ reaction and identification of the new isotope ^{248}Lr

Yu. Ts. Oganessian,¹ V. K. Utyosov,^{1,2} N. D. Kovrizhnykh,¹ F. Sh. Abdullin,¹ S. N. Dmitriev,¹ D. Isdullaev,^{1,2} M. Karadzhov,¹ D. A. Kurnetsov,¹ O. V. Petruskin,¹ A. V. Podshubin,¹ A. N. Polyakov,¹ A. G. Popko,¹ R. N. Sagidullin,¹ I. Schlather,^{3,4} V. V. Shirkov,¹ A. D. Shvetsov,¹ M. V. Shumilova,¹ V. S. Tsygankov,¹ A. A. Vinogradov,¹ V. G. Subbotin,¹ A. Yu. Bodrov,¹ A. V. Sabel'nikov,¹ A. V. Khuklin,¹ V. B. Zlokazov,¹ K. P. Rykaczewski,¹ T. A. King,⁴ J. B. Roberto,⁴ N. T. Brewer,⁴ R. K. Graywacke,⁴ Z. G. Guo,⁵ Z. Y. Zhang,⁵ M. H. Huang,⁵ and H. B. Yang⁶

¹JINR, Gatchina, Russia; ²Russia; ³JINR, Dubna, Russia; ⁴University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37996, USA; ⁵Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

(Received 11 March 2022; revised 2 May 2022; accepted 17 August 2022; published 29 September 2022)

We present results of the first experiment aimed at the synthesis of Mc isotopes in the $^{249}\text{Am} + ^{40}\text{Ca}$ reaction performed at the new gas-filled separator DC-GRS-2 online to the new cyclotron DC-280 at the Super Heavy Element Factory at JINR. Reactions with a beam current of 10^{-10}A and a charge state of 20^{+} were detected. The yield of ^{208}Mc was $1.6 \pm 0.8 \times 10^{-10}$ atoms per 10^{10} ions. New decay chains were identified for the first time, and a new spontaneously fissioning isotope ^{248}Lr with a half-life of $4.9^{+1.1}_{-0.9}$ s was identified. The cross section for the $^{249}\text{Am} + ^{40}\text{Ca}$, 3σ ^{208}Mc reaction was measured to be $17.1^{+1.1}_{-1.0}$ pb, which is the largest value for the known superheavy nuclei at the island of stability.

PHYSICAL REVIEW C 106, 024612 (2022)

Investigation of ^{40}Ca -induced reactions with ^{242}Pu and ^{238}U targets at the JINR Superheavy Element Factory

Yu. Ts. Oganessian,¹ V. K. Utyosov,¹ D. Isdullaev,¹ S. N. Dmitriev,¹ M. G. Ishaq,¹ O. V. Karpen,¹ N. D. Kovrizhnykh,¹ D. A. Kurnetsov,¹ O. V. Petruskin,¹ A. V. Podshubin,¹ A. N. Polyakov,¹ A. G. Popko,¹ R. N. Sagidullin,¹ I. Schlather,^{3,4} V. V. Shirkov,¹ A. D. Shvetsov,¹ M. V. Shumilova,¹ V. S. Tsygankov,¹ A. A. Vinogradov,¹ V. G. Subbotin,¹ A. Yu. Bodrov,¹ A. V. Sabel'nikov,¹ A. V. Khuklin,¹ V. B. Zlokazov,¹ K. P. Rykaczewski,¹ T. A. King,⁴ J. B. Roberto,⁴ N. T. Brewer,⁴ R. K. Graywacke,⁴ Z. G. Guo,⁵ Z. Y. Zhang,⁵ M. H. Huang,⁵ and H. B. Yang⁶

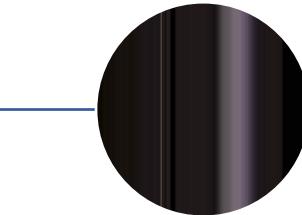
¹JINR, Gatchina, Russia; ²Russia; ³JINR, Dubna, Russia; ⁴University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37996, USA; ⁵Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

(Received 25 May 2022; accepted 1 August 2022; published 22 August 2022)

Experiments using a ^{40}Ca beam on ^{242}Pu and ^{238}U targets to produce superheavy nuclei were performed at the gas-filled separator DC-GRS-2 online to the new cyclotron DC-280 at the Super Heavy Element Factory at JINR. The decay properties of ^{242}Pu and ^{238}U as well as the decay properties of the new superheavy nuclei produced via ^{242}Pu and ^{238}U decay chains, respectively. In addition, 16 decay chains of ^{243}Cs were observed in the $^{242}\text{Pu} + ^{40}\text{Ca}$ reaction. The possibility of forming of isomeric states in the ^{242}Tl consecutive α decays is discussed. A new α line with an intensity of $2.2 \pm 0.5 \times 10^{-10}$ atoms per 10^{10} ions was measured in the $^{242}\text{Pu} + ^{40}\text{Ca}$ reaction. A new α line with an intensity of $1.6 \pm 0.5 \times 10^{-10}$ atoms per 10^{10} ions was measured in the $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ca}$ reaction. A maximum cross section of $10.4^{+1.0}_{-0.9}$ pb was measured for the $^{242}\text{Pu} + ^{40}\text{Ca}$ and $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ca}$ reactions.

(Received 11 March 2022; revised 2 May 2022; accepted 17 August 2022; published 29 September 2022)

NUCLEAR CHEMISTRY @SHE FACTORY



Beams

^{48}Ca and ^{50}Ti , ^{54}Cr for MIVOC



Targets

stable and radioactive enriched isotopes



SHE
Chemistry

behind separator GRAND

Укорительные мишени для синтеза СТЭ

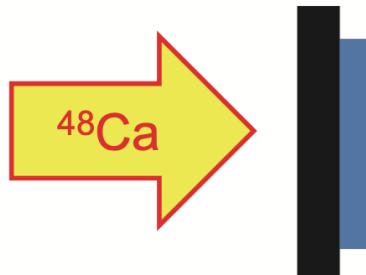
Limited, enriched and radioactive isotopes of actinides

^{235}U , ^{237}Np , $^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , $^{245,248}\text{Cm}$, ^{249}Bk , ^{251}Cf

- Производство и поставка из НИИАР (РОСАТОМ)

Технология облучения

Hot fusion

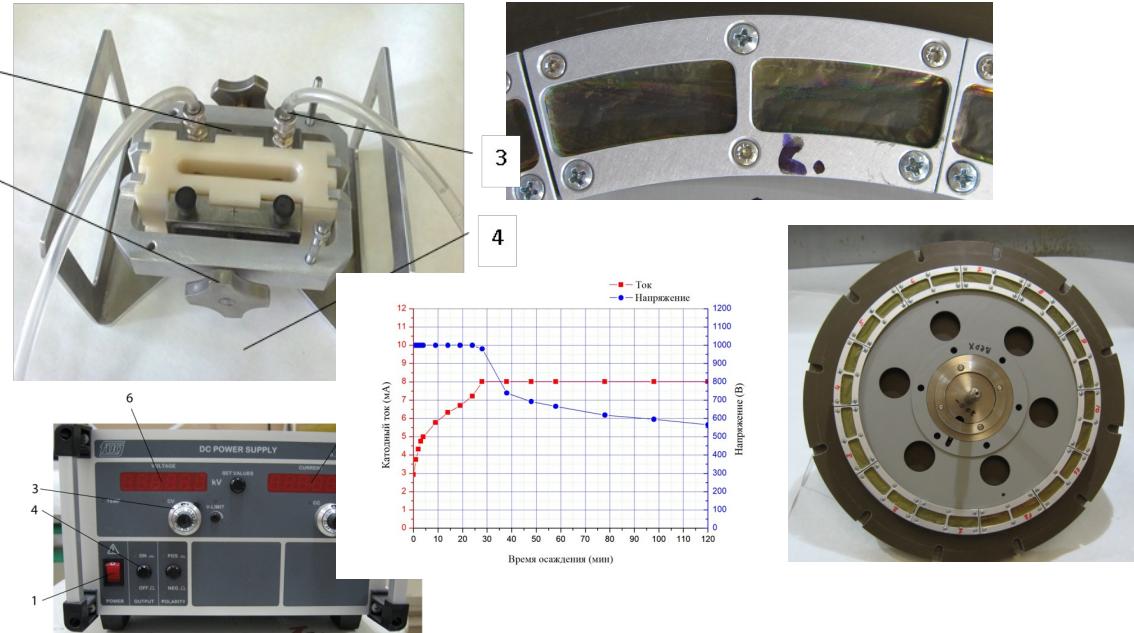


Требования к изготовлению мишени

- Толщина подложки
- Толщина и равномерность слоя соединения актинида
- Высокая эффективность
- Температурная и радиационная устойчивость
- После облучения должна быть сделана регенерация

Технология изготовления

молекулярное осаждение
электрохимическим способом



Новый монтажный участок на Фабрике СТЭ



Проблема:

увеличение тока пучка, заряда иона, времени облучения и др.
ускоряет структурные и химические изменения в материале
мишени приводящие к ее разрушению

Укорительные мишени для синтеза СТЭ

2024:

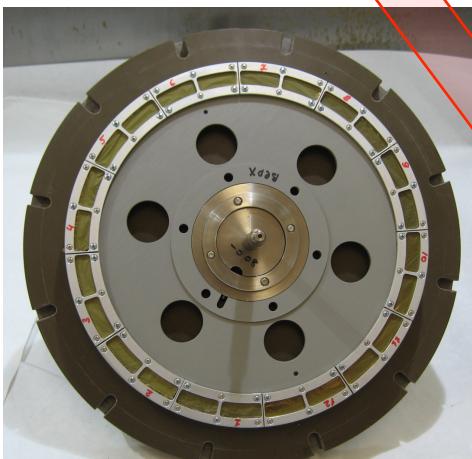
ГРАНД@ДЦ-280

ГНС-1@У-400

ГНС-2@ДЦ-280

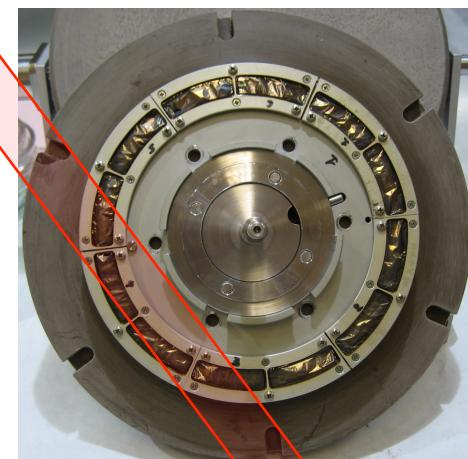


\varnothing 120 мм
6 секторов
12 - 25 мг



До

\varnothing 150, 240 мм
12 секторов
38 - 50 мг



После

Решение: увеличение диаметра мишени позволило
увеличить интенсивность и время облучения,
но привело к увеличению мишенного материала в 2 – 10 раз



\varnothing 480 мм
24 секторов
106 мг

Необходимо соответствие эксп. залов
1 классу работ с открытыми источниками

**Мишенная лаборатория ЛЯР – комплекс помещений
(хим. лаб., 3 кл., 2 кл.) для проведения
радиохимических работ с открытыми источниками**

- Эксплуатируем более 60 лет
- Помещения, технологические системы и основное оборудование устарели
- Чтобы устранить потенциальные нарушения и улучшить условия работы, некоторые помещения и оборудование были отремонтированы или заменены
- РХЛ 2 класса: Сегодня единственная задача это изготовление и регенерация облученных мишеней
- РХЛ 2 класса: Не может соответствовать действующим законам, нормам и правилам РБ по 2 классу?
- РХЛ 2 класса: Не может быть перестроена под 1 класс
- Необходим переход на новый уровень обращения с ЯМ и РВ



Радиохимическая лаборатория в составе исторического здания ЛЯР построенного в 1950-х годах

**Необходимо создание РХЛ
1 класса работ с открытыми источниками**



НАУЧНЫЙ ПЛАН (2021 г.)

- ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ:

«Предусмотрено строительство специализированного комплекса зданий с радиохимическими лабораториями 1-го класса для изготовления и регенерации высокорадиоактивных мишеней, что завершит создание Фабрики СТЭ»

Создание радиохимической лаборатории (РХЛ) в ЛЯР

Цель проекта:

Создание в ЛЯР ОИЯИ специализированного радиохимического исследовательского комплекса

Ключевые Задачи:

- 1) Изготовление и регенерация высокорадиоактивных ускорительных мишеней, для проведения экспериментов по синтезу новых элементов на Фабрике сверхтяжелых элементов.
- 2) **Разработка технологий и методов получения радионуклидов для ядерной медицины и исследований.**

Инновационный исследовательский центр ОИЯИ

- Создание Инновационного центра ОИЯИ осуществляется в соответствии с Долгосрочным стратегическим планом развития ОИЯИ до 2030 года и далее.
- Инфраструктурную платформу Инновационного центра образует ряд экспериментальных комплексов, предназначенных для реализации фундаментальных и прикладных исследований в рамках научной программы Института.

Одна из основных задач: Разработка (ускорительных и радиохимических) технологий и методов в области ядерной медицины

В рамках программы инновационного центра будет построено и введено в эксплуатацию несколько новых объектов:

Один из инфраструктурных блоков:

- **ускоритель электронов с энергией 40 МэВ вместе с радиохимической лабораторией 1-го класса для разработки методов получения радиоизотопов (^{225}Ac , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ и др.) в фотоядерных реакциях для ядерной медицины.**

Радио- нуклид	Получение: Р - реактор У - ускоритель	Применение	Число клинических испытаний	Текущие потребности (число процедур)	Перспективные потребности
<i>Стабильно высокое потребление</i>					
^{99m} Tc	P, У	ОФЭКТ	~500	~10 млн	~11 млн
¹⁸ F	У	ПЭТ	~1000	~1 млн	1,2-1,5 млн
¹³¹ I	P	Терапия	~60	10-50 тыс.	10-50 тыс.
¹²³ I	У	ОФЭКТ	~40	10-50 тыс.	50-100 тыс.
⁹⁰ Y	P	Терапия	~80	10-50 тыс.	10-50 тыс.
²²³ Ra	P	Терапия	~50	20-40 тыс.	20-40 тыс.
<i>Значительный рост уже в ближайшем будущем</i>					
⁶⁸ Ga	У	ПЭТ	~250	20-30 тыс.	0,5-1 млн
¹⁷⁷ Lu	P	Терапия	~90	5-10 тыс.	100 тыс.
⁶⁴ Cu	У	ПЭТ-	~25	< 1 тыс.	50-100 тыс.
⁸⁹ Zr	У	Тераностика	~40	< 1 тыс.	10-50 тыс.
¹²⁴ I	У	ПЭТ	~20	< 1 тыс.	10-50 тыс.
<i>Наиболее перспективные</i>					
⁸² Rb	У	ПЭТ	<10	Ограниченнное количество исследований в клинических испытаниях	100 тыс.
²²⁵ Ac	P, У	Терапия	~15		100-200 тыс.
²¹¹ At	У	Терапия	<10		Зависит от результатов
¹⁸⁸ Re	P	Терапия	<10		клинических испытаний и
⁶⁷ Cu	У	Терапия	<10		возможностей производства
²¹² Pb	P	Терапия	<10		
¹⁶⁶ Ho	P	Терапия	<10		
^{149,152} Tb	У	Тераностика	<10		

Выбор Ускорителя

	Ускоряемые частицы	Энергия частиц, МэВ	Типичные ядерные реакции	Важнейшие получаемые радионуклиды
Медицинские циклотроны	H^+ , H^-	5-19	(p, n) (p, α)	^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O <u>(УКЖ-ультракоротковременные)</u>
Ускорители низких энергий	H^+ , H^-	15-40	(p, n) ($p, 2n$) ($p, 3n$)	^{111}In , ^{67}Ga , ^{68}Ge , ^{85}Sr , ^{103}Pd , ^{99m}Tc , ^{201}Tl , ^{123}I , ^{195}Au , ^{89}Zr , ^{44}Sc , ^{225}Ac
Ускорители средних энергий	H^+ , H^-	66-200	($p, 4-6 n$) ($p, xp\;yn$)	^{82}Sr , ^{68}Ge , ^{72}Se , ^{103}Pd , ^{225}Ac , ^{117m}Sn , ^{67}Cu
Ускорители высоких энергий	H^+ , H^-	500-1000	($p, xp\;yn$)	^{82}Sr , ^{72}Se , ^{225}Ac , ^{67}Cu , ^{225}Ac
Ускорители дейtronов и альфа-частиц	$^2H^+$, He^+ , $^3He^+$	15-40	($\alpha, 2-3 n$)	^{211}At , ^{117m}Sn , ^{64}Cu , ^{99}Mo , ^{199}Tl , ^{67}Ga
Ускорители электронов	e^-	20-40	(n, γ) (γ, n)	^{99}Mo , ^{225}Ac (только разработки)

Выбор Ускорителя

**Компания «Циклотрон» - два циклотрона 23 и 15 МэВ, горячие камеры:
 ^{68}Ge , ^{67}Ga , ^{85}Sr , ^{103}Pd , ^{111}In , ^{195}Au**

Курчатовский институт – горячие камеры, циклотрон - протоны 35 МэВ: ^{201}Tl , ^{123}I

**НИИЯФ Томского политехнического университета –циклотрон- α -частицы 27 МэВ,
дейтероны 14 МэВ, горячие камеры: ^{199}Tl , ^{67}Ga , ^{123}I**

**Радиоинститут им. Хлопина –циклотрон-протоны 18 МэВ, горячие камеры:
 123 , ^{124}I , ^{67}Ga**

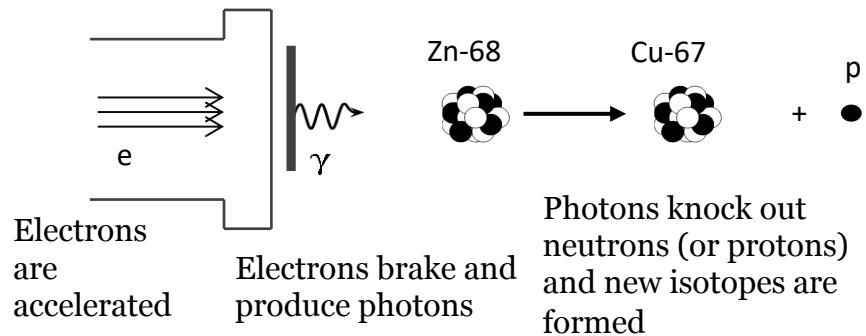
2-й Центральный институт МО РФ – циклотроны - протоны 30 МэВ: ^{67}Ga

**Институт ядерных исследований РАН–линейный ускоритель протонов 160-600 МэВ
 ^{82}Sr , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{103}Pd , ^{68}Ge , ^{225}Ac ; ^{72}Se , $^{64,67}\text{Cu}$, ^{230}Pa - ^{230}U (в разработке)**

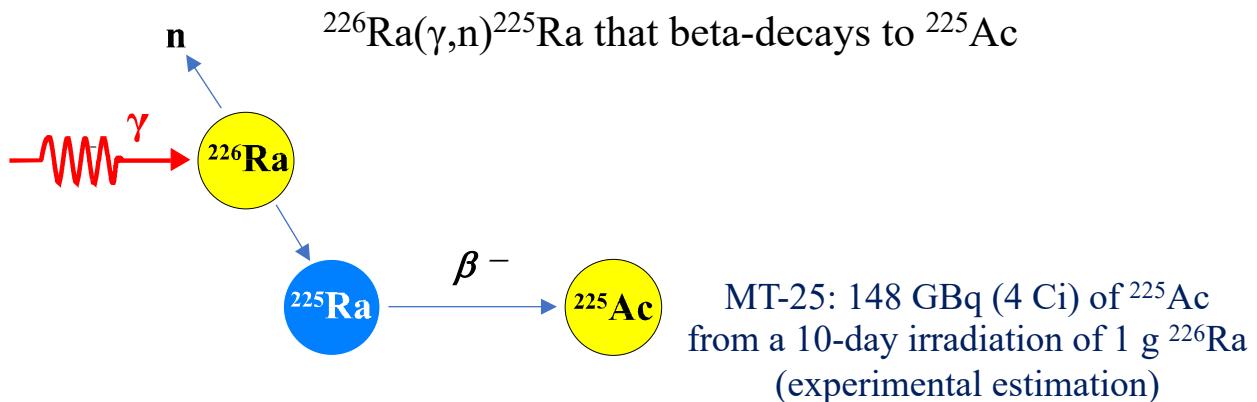
Photonuclear production of radionuclides

Photonuclear reactions to produce medical, industrial, and research isotopes from stable (r.a.) targets:

- (γ, n)
- (γ, p)



Example:



Advantages:

- Increased radionuclide purity product;
- Much simpler radiochemical isolation procedure and purification of the final product;
- More compact and less power consumption accelerator;
- Much less radioactive waste;
- Scalability from science to production on the territory of the clinic;
- Etc.

Инфраструктура прикладных исследований для:

- Развития ускорительных технологий
- Разработки технологий и методов производства радионуклидов
- Инноваций в области радионуклидной терапии

- ✓ Синтез, разработка методов сепарации новых радионуклидов для терапии: эмиттеры альфа-частиц и Оже-электронов ^{99m}Tc , ^{225}Ac etc.
- ✓ R&D по адресной доставке радионуклидов с использованием молекулярных (биологических) векторов

Приоритетные научные направления

Метод (non-uranium) получения с помощью фотоядерных реакций наиболее востребованных реакторных изотопов

^{99m}Tc , ^{177}Lu , ^{188}Re

Один из наиболее ожидаемых на медицинском рынке радионуклидов для терапии.

Фотоядерный метод – перспективная альтернатива, обеспечивающая высокую чистоту и выход радионуклида

^{225}Ac

Инновационные терапевтические радионуклиды, для которых применение фотоядерного метода перспективно, но предполагает R&D в области радиохимии

^{47}Sc , ^{44}Sc , ^{67}Cu , ^{105}Rh

Перспективный радионуклид для терапии – эмиттер Оже-электронов.

Необходимы ядерно-физические данные, разработка технологии радиохимической сепарации и производства

^{195m}Pt

Уникальные (производство – только фотоядерным методом) изотопы высокой чистоты (не для медицинских приложений)

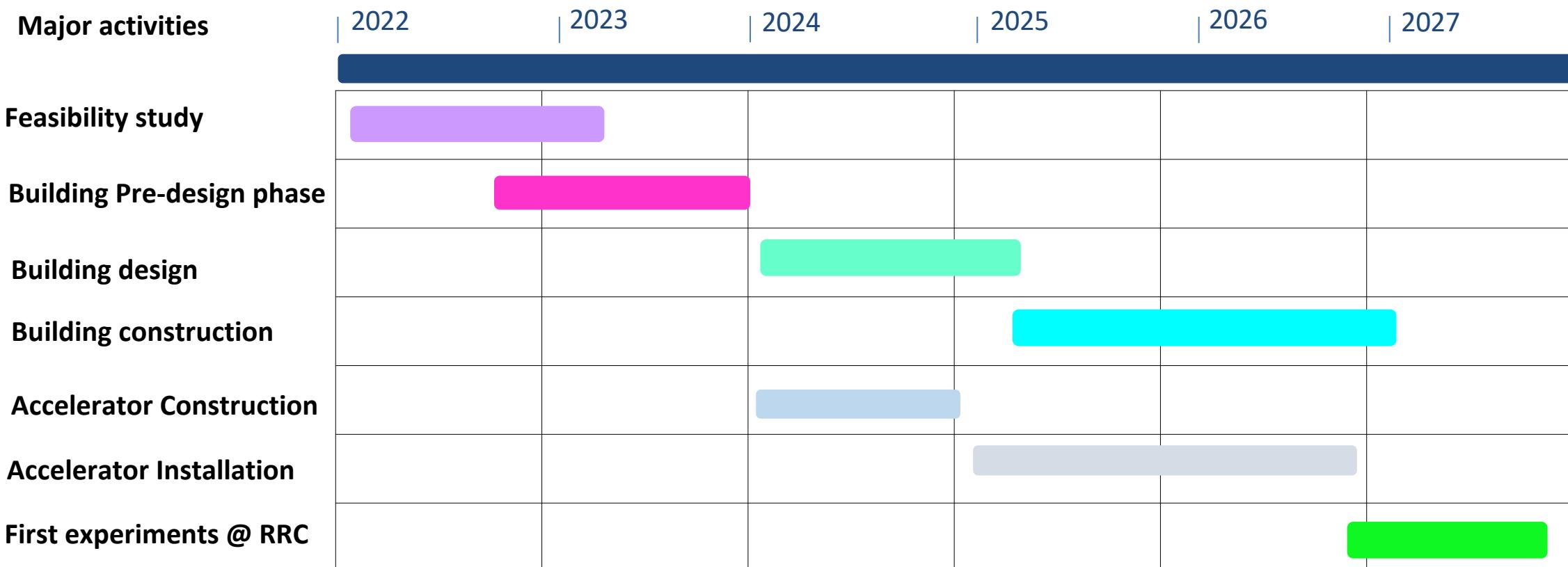
^{236}Pu , ^{237}U

Состав комплекса:

- Отдельно создаваемое здание (потенциально комплекс зданий) с помещениями для проведения работ по 1-му классу
- Ускоритель с мишенными станциями
- Лаборатории с 2 линиями горячих камер
- Специализированные радиохимические и физические лаборатории
- Сепаратор
- Установки и исследовательское оборудование
- Помещения выдержки и временного хранения жидких и твердых радиоактивных отходов
- Технологические помещения
- Офисные помещения



ПЛАН СОЗДАНИЯ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА



Основные положения

Роль нового инфраструктурного объекта:

- Соответствовать развитию научных задач Фабрики СТЭ и ОИЯИ
- Создание необходимой технологической базы
- Actinides Targets: Radiochemical fabrication, separation and purification
- Handling of radioactive materials and Radiation safety
- Разработка новых мишеней: оценивать целостность и поведение материалов мишеней
- Разрабатывать новые ускорительные и радиохимические методы
- Вносить вклад в развитие радиобиологических и медицинских исследований в ОИЯИ и России
- Стратегически важно для развития ОИЯИ, как мирового ядерного центра

Спасибо за внимание!