

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:

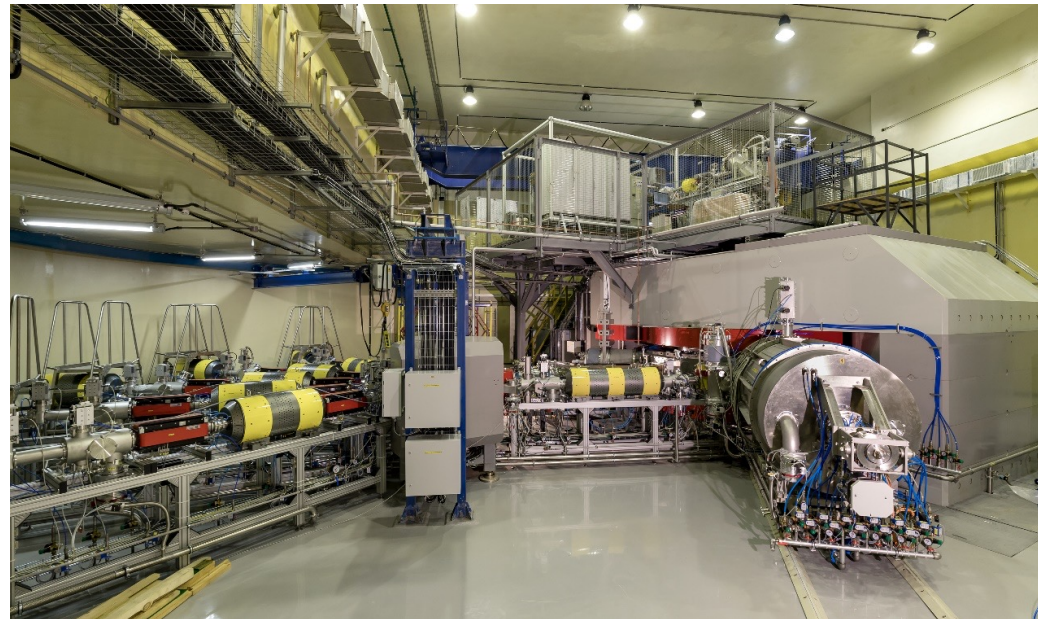
Подготовка концептуального проекта новой РХЛ с горячими камерами («горячая лаб».) для проведения операций с радиоактивными веществами по 1-му классу РБ

Цель проекта:

Создание в ЛЯР ОИЯИ специализированного радиохимического исследовательского комплекса

Ключевые Задачи:

- 1) Изготовление и регенерация высокорadioактивных 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.



PHYSICAL REVIEW C **106**, L031301 (2022)

Letter

Featured In Physics

First experiment at the Super Heavy Element Factory: High cross section of ^{288}Mc in the $^{48}\text{Ca} + ^{240}\text{Ca}$ reaction and identification of the new isotope ^{288}Lr

Yu. Ts. Oganessian,¹ V. K. Utyonkov,^{1,2} N. D. Kovrizhnykh,¹ F. Sh. Abdullin,¹ S. N. Dmitriev,¹ D. Budalov,^{1,3} M. G. Itsk,¹ D. A. Kuznetsov,¹ O. V. Petrovskii,¹ A. V. Podolskiy,¹ A. N. Polyakov,¹ A. G. Popov,¹ R. N. Sagaidak,¹ L. Schlatman,¹ I. V. Shirokovskii,¹ V. D. Shubin,¹ M. V. Shumelko,¹ D. I. Solov'yev,¹ Yu. S. Tsyganov,¹ A. A. Voinov,¹ V. G. Subbotin,¹ A. Yu. Bodrov,¹ A. V. Sabel'nikov,¹ A. V. Khukhri,¹ V. B. Zhokhov,¹ K. P. Rykaczewski,¹ T. T. King,¹ J. B. Roberto,¹ N. T. Brewer,¹ R. K. Grzywacz,^{1,2} Z. G. Gan,¹ Z. Y. Zhang,¹ M. H. Huang,¹ and H. B. Yang^{1,4}

¹Joint Institute for Nuclear Research, RU-141980 Dubna, Russian Federation
²L.N. Gumberg Eurasian National University, 010000 Nur-Sultan, Kazakhstan
³Palacky University Olomouc, Department of Experimental Physics, Faculty of Science, 771 46 Olomouc, Czech Republic
⁴Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA
⁵Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37966, USA
⁶Institute 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 $^{48}\text{Ca} + ^{240}\text{Ca}$ reaction performed at the new gas-filled separator DFGRS-2 online to the new cyclotron DC280 at the Super Heavy Element Factory at JINR. Fifty-five new decay chains of ^{288}Mc and six chains assigned to ^{288}Mc were detected. The α decay of ^{288}Mc with an energy of 7.6–8.0 MeV, half-life of 16(2) s, and a branch of 55(7)% was registered for the first time, and a new spontaneously fissioning isotope ^{288}Lr with a half-life of 4.9(1) s was identified. The cross section for the $^{48}\text{Ca} + ^{240}\text{Ca}$ reaction was measured to be 17(12) pb, which is the largest value for the known superheavy nuclei at the island of stability.

PHYSICAL REVIEW C **106**, 024612 (2022)

Investigation of ^{48}Ca -induced reactions with ^{242}Pu and ^{248}U targets at the JINR Superheavy Element Factory

Yu. Ts. Oganessian,¹ V. K. Utyonkov,^{1,2} D. Budalov,^{1,3} F. Sh. Abdullin,¹ S. N. Dmitriev,¹ M. G. Itsk,¹ A. V. Karпов,¹ N. D. Kovrizhnykh,¹ D. A. Kuznetsov,¹ O. V. Petrovskii,¹ A. V. Podolskiy,¹ A. N. Polyakov,¹ A. G. Popov,¹ R. N. Sagaidak,¹ L. Schlatman,¹ V. D. Shubin,¹ M. V. Shumelko,¹ D. I. Solov'yev,¹ Yu. S. Tsyganov,¹ A. A. Voinov,¹ V. G. Subbotin,¹ A. Yu. Bodrov,¹ A. V. Sabel'nikov,¹ A. Lindner,¹ K. P. Rykaczewski,¹ T. T. King,¹ J. B. Roberto,¹ N. T. Brewer,¹ R. K. Grzywacz,^{1,2} Z. G. Gan,¹ Z. Y. Zhang,¹ M. H. Huang,¹ and H. B. Yang^{1,4}

¹Joint Institute for Nuclear Research, RU-141980 Dubna, Russian Federation
²L.N. Gumberg Eurasian National University, 010000 Nur-Sultan, Kazakhstan
³Palacky University Olomouc, Department of Experimental Physics, Faculty of Science, 771 46 Olomouc, Czech Republic
⁴Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA
⁵Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37966, USA
⁶Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

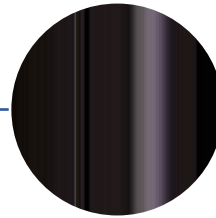
(Received 25 May 2022; accepted 1 August 2022; published 22 August 2022)

Experiments using a ^{48}Ca beam on ^{242}Pu and ^{248}U targets to produce superheavy nuclei were performed at the gas-filled separator DFGRS-2 online to the new cyclotron DC280 at the SHE Factory at JINR. The decay properties of ^{288}Fr and ^{288}Rf as well as their α -decay products, were refined after the detection of 25 and 69 new decay chains, respectively. In addition, 16 decay chains of ^{288}Ca were observed in the $^{48}\text{Ca} + ^{240}\text{Ca}$ reaction. The possibility of existing of isomeric states in the ^{288}Fr consecutive α decay is discussed. A new α line with an energy of 100–200 keV lower than the main one at 10.19 MeV was observed for the first time for even-even ^{288}Fr decay. A maximum cross section of 10.4(4) pb was measured for the $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$ and $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{U}$ reactions.

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

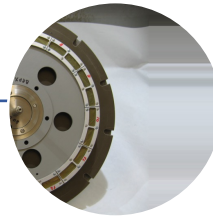
Циклотрон DC-280
 Увеличение интенсивности пучков тяжелых ионов

NUCLEAR CHEMISTRY_@SHE FACTORY



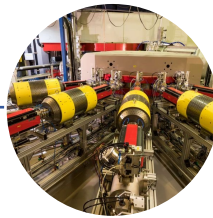
Beams

^{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

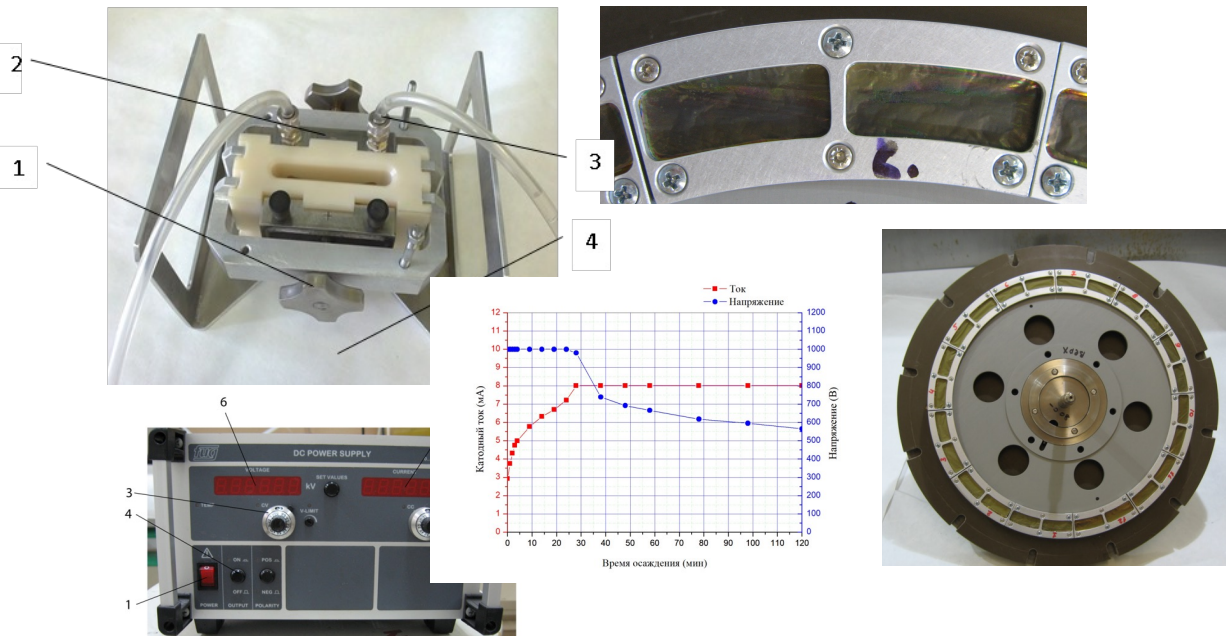


Требования к изготовлению мишени

- 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

Укоротительные мишени для синтеза СТЭ

2024:

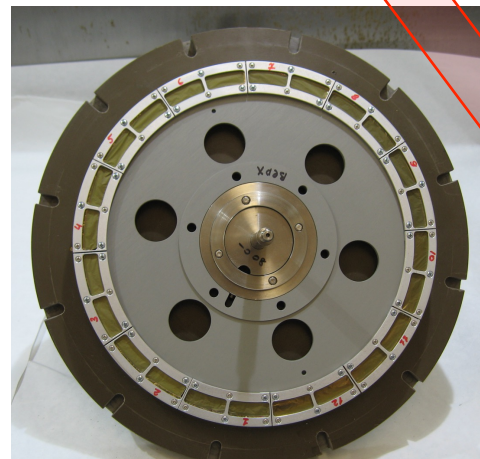
ГНС-1@У-400

ГНС-2@ДЦ-280

ГРАНД@ДЦ-280

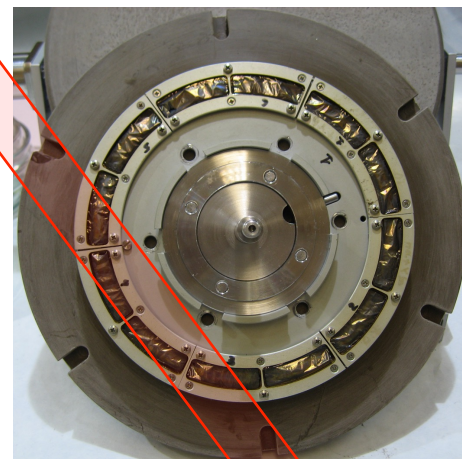


Ø 120 мм
6 секторов
12 - 25 мг



До

Ø 150, 240 мм
12 секторов
38 - 50 мг



После



Ø 480 мм
24 секторов
106 мг

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

**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 высокорadioактивных 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 высокорadioактивных 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	Р, У	ОФЭКТ	~500	~10 млн	~11 млн
¹⁸ F	У	ПЭТ	~1000	~1 млн	1,2-1,5 млн
¹³¹ I	Р	Терапия	~60	10-50 тыс.	10-50 тыс.
¹²³ I	У	ОФЭКТ	~40	10-50 тыс.	50-100 тыс.
⁹⁰ Y	Р	Терапия	~80	10-50 тыс.	10-50 тыс.
²²³ Ra	Р	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	Р	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	Ограниченное количество исследований в клинических испытаниях	100 тыс.
²²⁵ Ac	Р, У	Терапия	~15		100-200 тыс.
²¹¹ At	У	Терапия	<10		Зависит от результатов клинических испытаний и возможностей производства
¹⁸⁸ Re	Р	Терапия	<10		
⁶⁷ Cu	У	Терапия	<10		
²¹² Pb	Р	Терапия	<10		
¹⁶⁶ Ho	Р	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)	$^{18}F, ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O$ (УКЖ-ультракороткоживущие)
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 дейтронов 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, дейтроны 14 МэВ, горячие камеры: ^{199}Tl , ^{67}Ga , ^{123}I

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

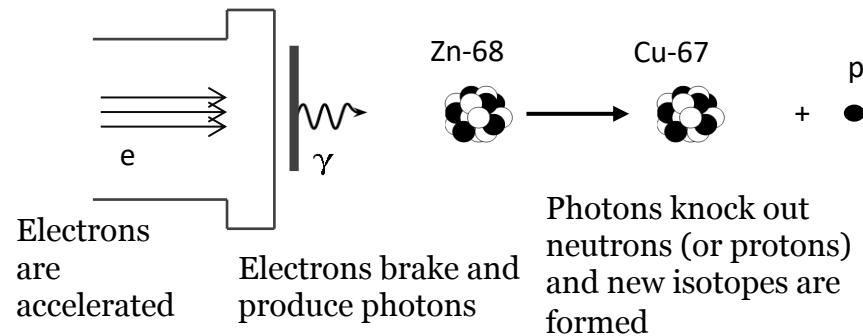
2-й Центральный институт МО РФ – циклотроны - протоны 30 МэВ: ^{67}Ga

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)

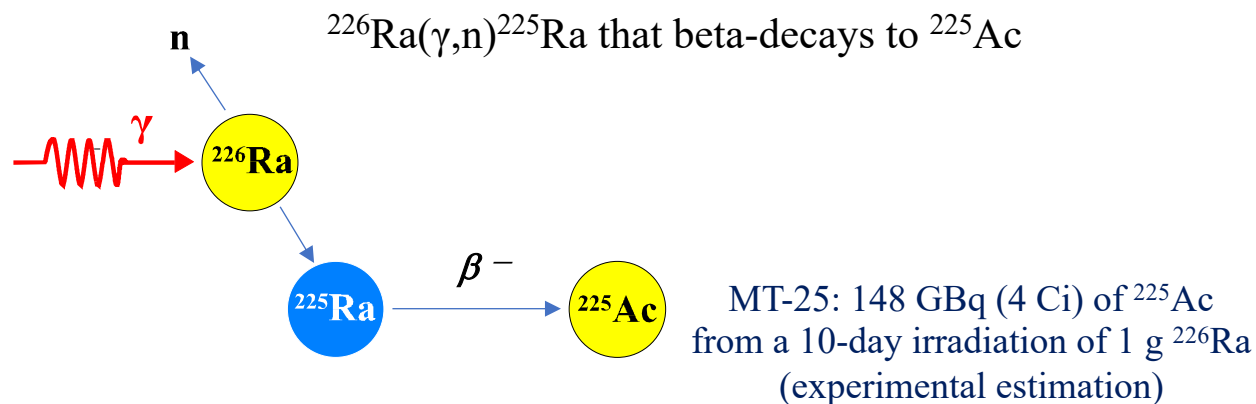
Photonuclear production of radionuclides

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 тераностики: 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 тераностики.

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 тераностики – 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)

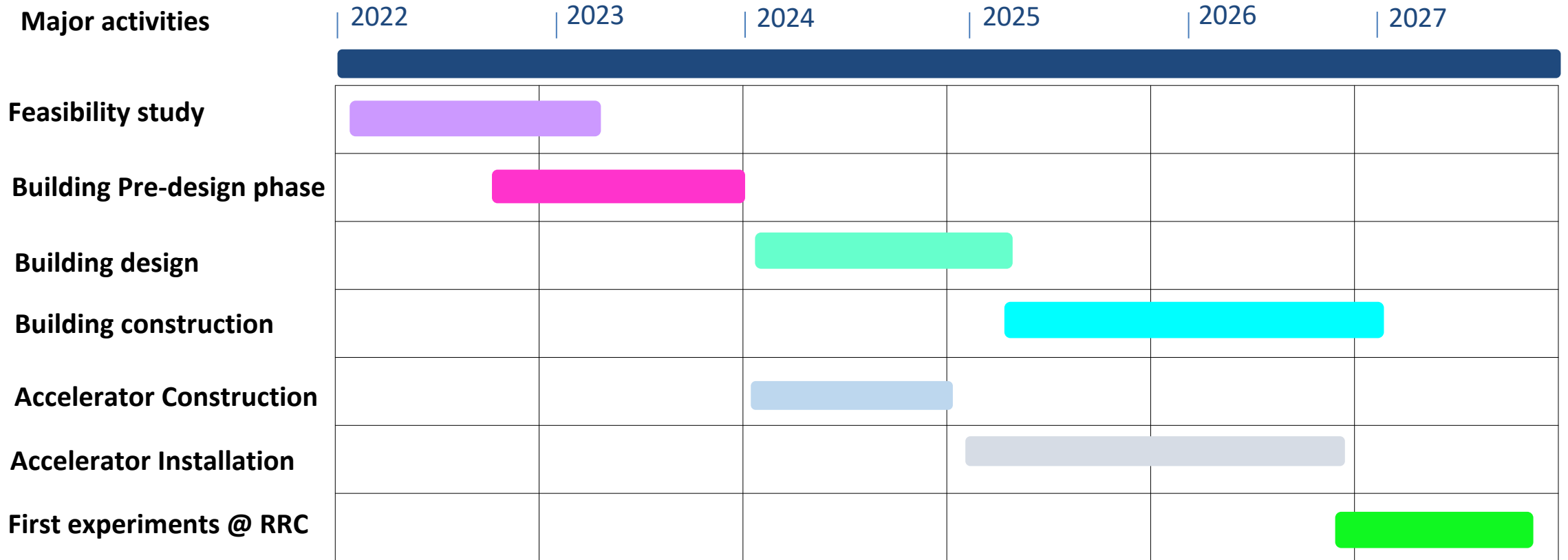
^{236}Pu , ^{237}U

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!