



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ
ФИЗИКИ

Россия, 188300, Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова доща

В.Н. Пантелеев

Разработка новых методов получения радионуклидов для медицины

Радионуклиды в ядерной медицине

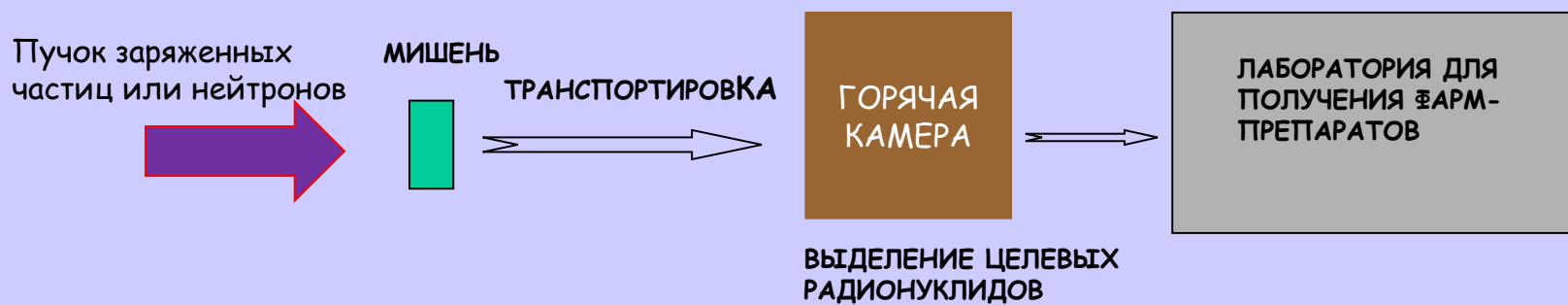
(ускорительные и реакторные)

Только с использованием пучков заряженных частиц могут быть получены нейтронно-дефицитные радионуклиды используемые в ПЭТ диагностике.

На пучках заряженных частиц (циклотроны) также получают радионуклиды используемые в терапии (излучатели мягких гамма-лучей, Оже-электроны, альфа-частицы)

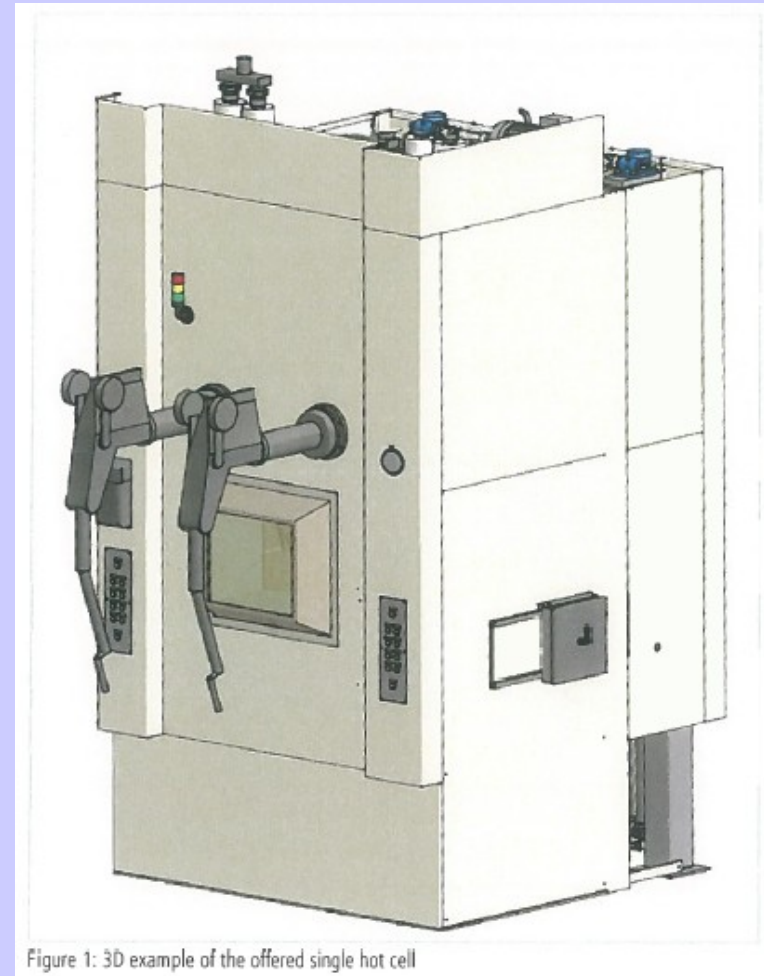
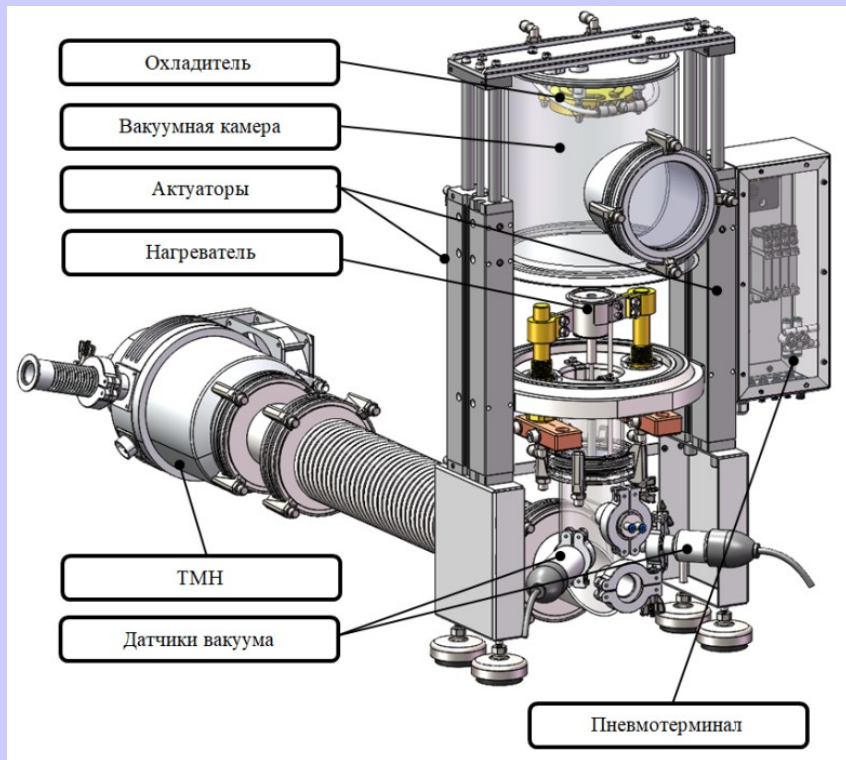
На нейтронах в делении и в (n, γ) реакции в основном получают изотопы распадающиеся β^- распадом, используемые в терапии, реже в диагностике. Однако наиболее используемый в мире диагностический (ОФЭКТ диагностика) генераторный радионуклид $^{99}\text{Mo}/^{99}\text{Tc}$ получают в делении урана-235 тепловыми нейтронами

Схема получения и выделения медицинских радионуклидов без изотопного разделения



Активность обрабатываемых облученных мишеней достигает несколько сотен Кюри, поэтому выделение целевых радионуклидов осуществляется в горячих камерах

Модуль термического выделения радионуклидов (устанавливается в горячую камеру для получения $Sr-82$, $Ge-68$)



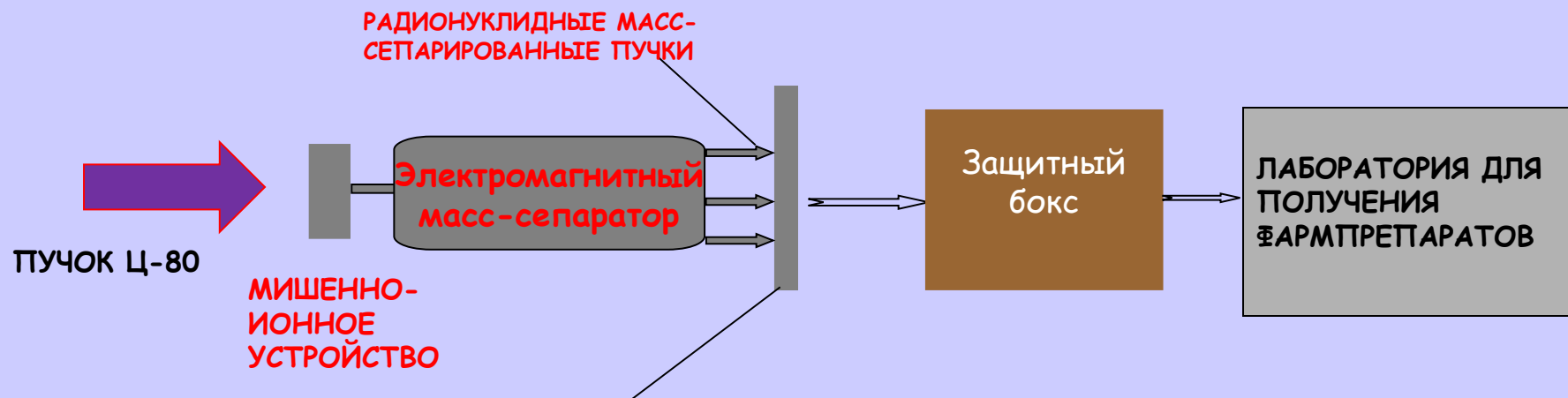
- Использование генератора ^{82}Sr ($T_{1/2}=25.5$ дн) / ^{82}Rb ($T_{1/2}=1.3$ мин) для ПЭТ/КТ исследований позволяет **напрямую измерять миокардиальный кровоток и производить отдельную оценку функции коронарных артерий.**
- Т. к. ^{82}Sr живет достаточно долго, генератор может быть доставлен в любую удаленную точку для проведения соответствующих диагностических обследований.
- Полный протокол обследования в состоянии покоя требует менее получаса.
- Для получения ^{82}Sr используют сильноточные циклотроны с энергией протонов около 70 МэВ в реакции $\text{Rb}(p, xn)^{82}\text{Sr}$.

- Генераторный радионуклид ^{68}Ge ($T_{1/2}=0.74$ г.) / ^{68}Ga ($T_{1/2}= 67,7$ мин.) также используют в позитронно-эмиссионной томографии. Период полураспада ^{68}Ga достаточен для синтеза множества РФП для ПЭТ на основе ^{68}Ga .
- Препараты ^{68}Ga применяют при исследовании кровообращения мозга и для локализации злокачественных опухолей.
- В виду достаточно долгого времени жизни ^{68}Ga используют также как калибровочный источник для настройки сканеров ПЭТ.
- Для получения ^{68}Ge используют реакции $\text{Zn}(\alpha, \text{xn})^{68}\text{Ge}$ и $\text{Ga}(\text{p}, \text{xn})^{68}\text{Ge}$.

План-график запуска установок термического и радиохимического выделения

- Поставка в середине декабря 2023 г.
- Пуско-наладочные работы на комплексе Изотоп будут начаты после готовности здания и установки горячих камер.
- Тестовые испытания установок по радиохимическому и термическому выделению планируется начать в первом квартале 2024 года.
- К модулю изготавливается стойка со вспомогательным оборудованием (размещается за горячей камерой в техническом помещении).

Масс-сепараторный метод получения медицинских радионуклидов, разрабатываемый в НИЦ "КИ"-ТТЯФ



УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИМПЛАНТАЦИИ
МАСС-СЕПАРИРОВАННЫХ
ПУЧКОВ РАДИОНУКЛИДОВ

Режимы получения медицинских радионуклидов с помощью масс-сепаратора

- "On-line" режим (для короткоживущих радионуклидов с $T_{1/2} \sim$ неск. часов)
- "Semi on-line" режим (для радионуклидов с $T_{1/2} \sim$ сутки и более)
- "Off-line" режим (для радионуклидов с $T_{1/2} \sim$ неск. десятков суток и более)

Активность обрабатываемых образцов менее десяти Кюри, поэтому обработка образцов может осуществляться в специальных боксах

Первые радионуклиды, планируемые к получению с использованием масс-сепаратора – радионуклиды, распадающиеся с испусканием α -частиц

Ra-223, Ra-224 и Ac-225.

Фармпрепараты, изготовленные на основе данных радионуклидов, используются для терапии злокачественных образований на самой ранней стадии их развития

План график изготовления масс-сепараторной установки комплекса "Изотоп".

- Выпуск РКД - 2024 г.
- Изготовление масс-сепаратора и сопутствующего оборудования - 2024-2025 гг.
- Монтаж, испытания и запуск масс-сепараторной установки 2025-2026 гг.

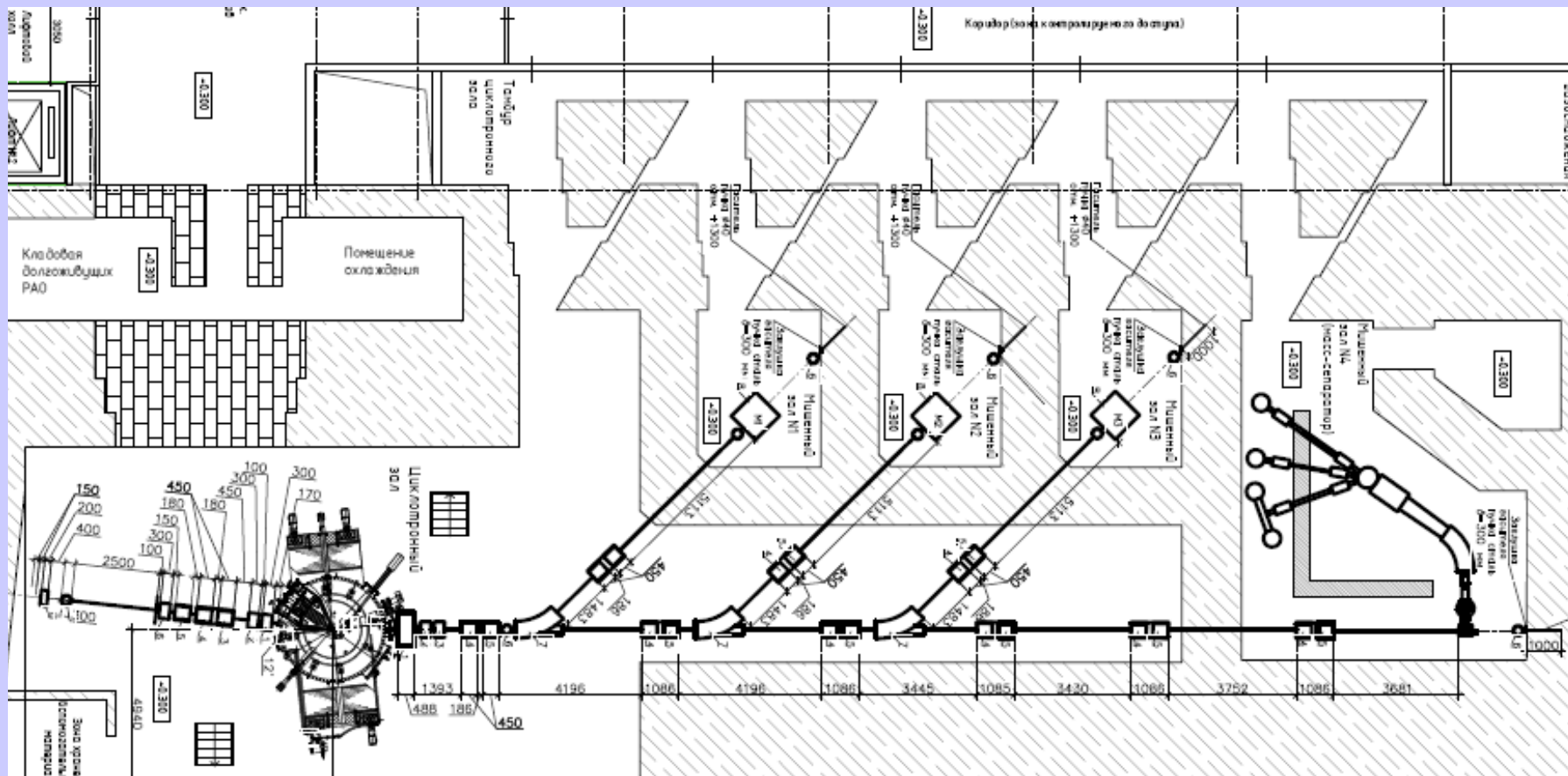
Циклотрон Ц-80 в экспериментальном зале синхроциклотрона СЦ-1000



Циклотрон Ц-80

Энергия протонов 40-80 МэВ, интенсивность выведенного пучка 100 μ А.
Получена интенсивность 100 μ А. Планы : создание радиоизотопного комплекса "Изотоп" и офтальмологического пучка

Радиоизотопный комплекс и офтальмологический центр на пучке циклотрона Ц-80 (новый проект). Первые, планируемые получения, - генераторные радионуклиды Sr-82, Ge-68



В 2023 г. началось изготовление:

- трех мишневых станций,
- систем транспортировки мишеней,
- проектирование горячих камер,
- подготовка РКД на масс-сепаратор и мишенно-ионное устройство.

Проект радиоизотопного комплекса ИЗОТОП

- Комплекс ИЗОТОП обеспечит самые широкие возможности получения медицинских радионуклидов
- Планируется создание трех мишенных станций для производства радионуклидов для диагностики и терапии
- Для получения радионуклидов высокой изотопной чистоты на одной из мишенных станций будет установлен масс-сепаратор

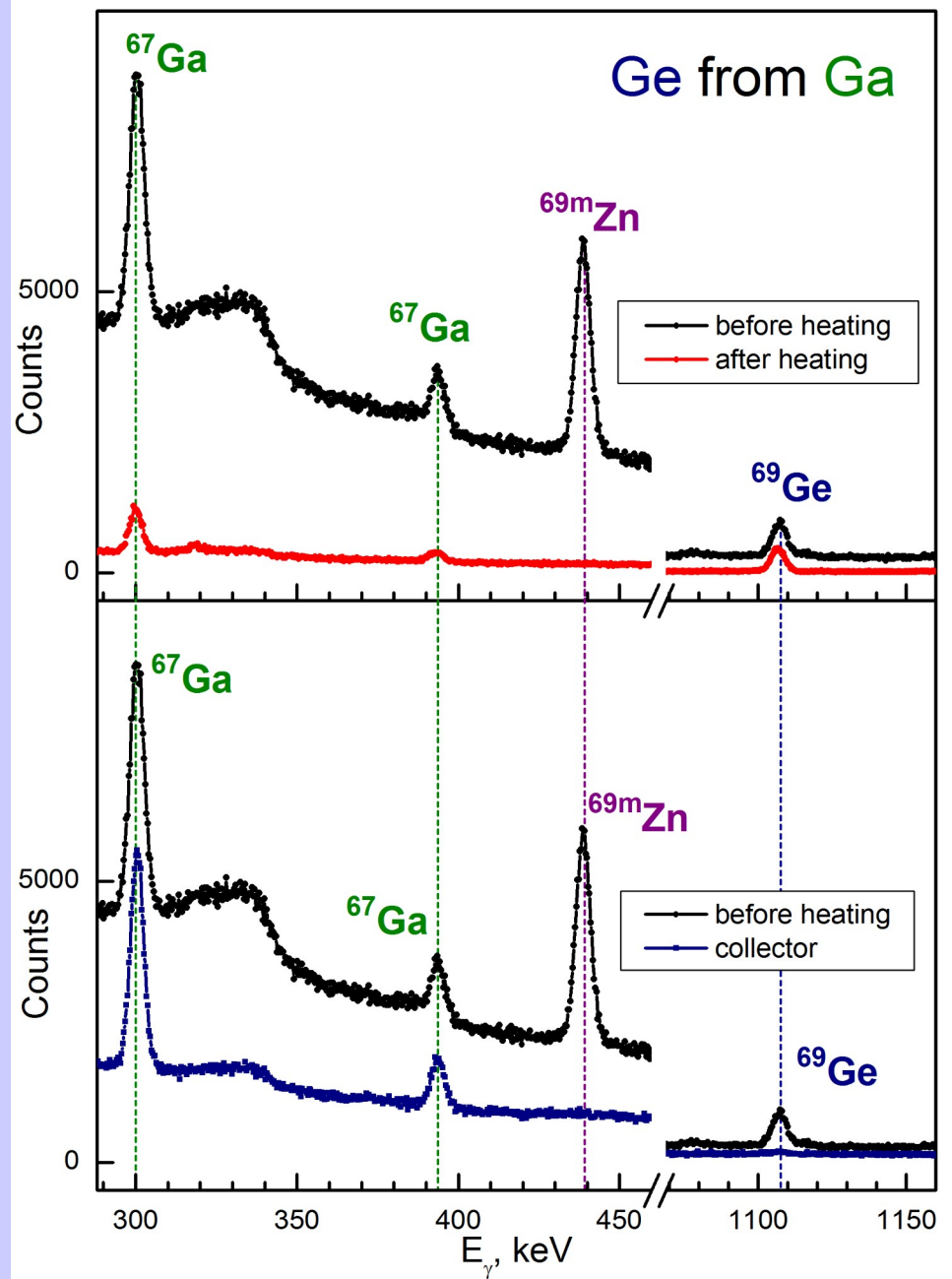
Радионуклиды, планируемые для получения

Ge-68/Ga-68,
Sr-82/Rb-82,
Tc-99,
Cu-64,
Cu-67
In-111,
I-123
I-124,
Tb-149,
Pb-212/Bi-212,
Ra-223,
Ra-224,
Ac-225

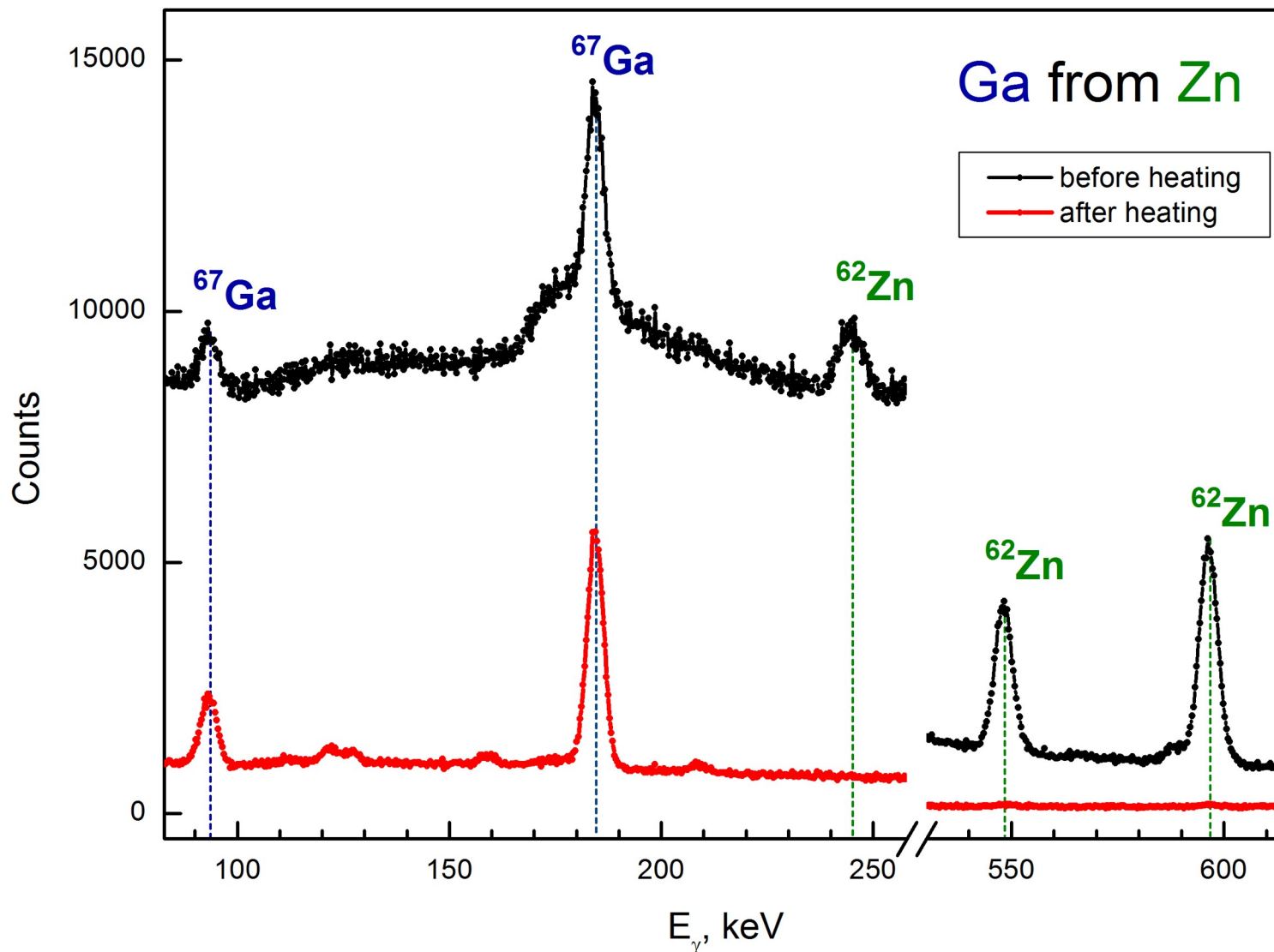
Также разрабатываемые методы были использованы для получения радионуклидов Lu-177, Tc-99, I-131 на нейтронах

Предварительные результаты работ на пучке
СЦ-1000 по выделению изотопов Ge и Ga

Термическое разделение
мишенного вещества
металлического галлия,
облученного протонным пучком
100 МэВ, и целевых
радионуклидов Zn и Ga



Термическое разделение мишенного вещества металлического цинка и целевого радионуклида Ga



Планы работ на будущее

Масс-сепараторное разделение образцов, содержащих Sr-82, полученных методом термического выделения

Масс-сепараторное разделение образцов, содержащих Lu-177, полученных методом термического выделения

**Получение и термическое выделение Cu-64 из мишени металлического никеля
(мишень - обогащенный Ni-64)**

**Получение и термическое выделение Tb-149 из мишени GdCl₂ (хлористого гадолиния)
(мишень - обогащенный Gd-152)**

Получение и термическое выделение изотопов I-123,124 из мишени металлического теллура (мишени - обогащенные Te-123,124)

Ионизация в лазерном ионном источнике

Исследование эффективности источника поверхностной ионизации из монокристалла вольфрама с повышенной работой выхода внутренней поверхности в зависимости от его длины

Получение медицинских радионуклидов на реакторе ПИК.

Разработка методов получения образцов разделенных стабильных изотопов миллиграммовых количеств с использованием имеющихся масс-сепараторных установок. Разработка новых ионных источников и ионной оптики на mA ионные токи.

Спасибо за внимание,

с наступающим Новым Годом!

Возможность получения Lu-177 на реакторе ПИК (альтернативный способ)

Поток нейтронов 10^{15} н/см²сек и выше при сечении поглощения нейтрона $\sigma = 1000$ барн (и выше) дает уникальную возможность получать целевые радиоизотопы высокой чистоты в (n γ) реакции при облучении соседнего изотопа с N-1.

Пример получения Lu-177 в реакции $^{176}\text{Lu} (n\gamma) ^{177}\text{Lu}$

Сечение поглощения нейтрона Lu-176 равно 2000 барн.

$$10^{15} \text{ н/см}^2\text{сек} \times 2000 \times 10^{-24} \text{ см}^2 \times (6 \times 24 \times 3600) \text{ сек} = \mathbf{1.037}$$

Т.е. за 6 сут. весь Lu-176 будет преобразован в Lu-177.

Для сравнения - используемый метод:



Отношение получаемых активностей в одних и тех же условиях равно **740**.

Реактор ТИК



Максимальный поток тепловых нейтронов 5×10^{15} н/см²сек.
На одном из каналов планируется создание масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА для фундаментальных исследований по ядерной физике и разработки новых методов получения радионуклидов для медицины.

Заключение

• Разработаны методы (стадия НИР) получения планируемых к производству на комплексе ИЗОТОП радионуклидов;

• Показано, что разработанные методы также могут быть использованы при облучении мишени нейтронами;

Разрабатываемые методы обеспечивают:

• Сохранение мишенного вещества в его первоначальном виде, что очень важно для мишеней из обогащенных изотопов;

• Снижение до минимальных количеств (неск. см³) ЖРО (жидкие радиоактивные отходы);

• Использование полученных образцов для дальнейшего изотопного разделения с помощью масс-сепаратора.

• Масс-сепараторный метод обеспечивает получение радионуклидов высокой изотопической чистоты, чего не могут дать радиохимические методы.