

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2019–3

Е.Н. Савицкая, В.Н. Пелешко, А.П. Солдатов,
Р.Г. Тертычный¹, А.А. Хасин¹

Оптимизация наработки стронция-82 в рубидиевой мишени при облучении протонами энергией 70 МэВ

Направлено в АЭ

¹ Центр Развития Ядерной Медицины, Протвино

Аннотация

Савицкая Е.Н., Пелешко В.Н., Солдатов А.П., Тертычный Р.Г., Хасин А.А. Оптимизация наработки стронция-82 в рубидиевой мишени при облучении протонами энергией 70 МэВ: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2019-3. – Протвино, 2019. – 14 с., 9 рис., 1 табл., библиогр.: 12.

В настоящей работе показано, что для достижения компромисса между максимальным выходом нуклида Sr82 и минимальными относительными выходами примесных нуклидов Sr83 и Sr85 существует оптимальная толщина рубидиевой мишени, зависящая от энергии протонов на входе в мишень. Определен оптимальный режим облучения и выдержки мишени до химического выделения стронция из нее в условиях работы без простоев ускорителя. Даны рекомендации для работы в условиях неполной загрузки.

Abstract

Savitskaya E.N., Peleshko V.N., Soldatov A.P., Tertychnyy R.G., Khasin A.A. Optimization of strontium-82 production in a rubidium target by irradiation with 70 MeV protons: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2019-3. – Protvino, 2019. – 14 p., 9 figs., 1 table, refs.: 12.

It was shown that to achieve a compromise between the maximum yield of the nuclide Sr82 and the minimum relative yields of the impurity nuclides Sr83 and Sr85, there is an optimal thickness of the rubidium, depending on the proton energy at the entrance to the target. The optimal mode of irradiation and target relaxation before the chemical separation of strontium from target has been determined for operation without accelerator downtime. Recommendations for intermittent work are given.

Введение

Для удовлетворения возрастающей потребности в радионуклидной продукции для практической медицины в настоящее время в Протвино строится Радиоизотопный Центр Ядерной Медицины. Промышленная наработка стронция-82, германия-68 и других изотопов будет проводиться на протонном ускорителе с энергией 70 МэВ и током пучка до 750 мкА. Пучок будет разделяться на два канала по 375 мкА ($2,3 \cdot 10^{15}$ р/с), обеспечивая одновременную работу двух мишенных станций.

Стронций 82 применяется в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) для диагностики сердечно-сосудистых патологий. Его период полураспада $T_{1/2}=25,35$ дня. Дочерним нуклидом распада является β^+ -радиоактивный рубидий 82 ($T_{1/2}=1,258$ м).

Получают Sr82 при облучении протонами мишеней из металлического рубидия или хлорида рубидия. Кроме Sr82 в мишенях образуется большое количество других радионуклидов. После распада короткоживущих изотопов из мишени химическим способом выделяют изотопы стронция. Среди них кроме целевого изотопа Sr82 присутствуют примесные радионуклиды: Sr83 ($T_{1/2}=1,35$ дня) и Sr85 ($T_{1/2}=64,85$ дня). Оба имеют большой выход в реакциях протонов с рубидием. Качество продукции определяется по отношению активности этих изотопов к активности целевого нуклида Sr82. Нарработка в мишени Sr83 из-за небольшого периода полураспада быстро входит в насыщение. Распадается Sr83 в радиоактивный изотоп Rb83 с периодом полураспада $T_{1/2}=86,2$ дня.

Выделенный из облученного рубидия стронций отправляется производителю генератора Sr82/Rb82 в виде раствора соли $SrCl_2$ в слабой соляной кислоте с высокой удельной активностью (> 60 мКи/мл). Генератор [1] представляет собой ионообменную

колонку из гидратированного оксида олова, на которую осаждается стронций. В процессе его использования рубидий, образующийся из распадов стронция, вымывается физиологическим раствором (0,9% NaCl) и вводится пациенту. И хотя большая часть атомов стронция остается в колонке, небольшая часть из них попадает в физраствор. Поэтому необходимо минимизировать количество примесей для уменьшения дозовой нагрузки пациентов.

Радиоизотопная продукция не может производиться впрок и должна использоваться сразу после производства. Потребление ее нестабильно и находится на стадии развития, поэтому следует рассмотреть возможность регулирования количества производимого продукта за счет изменения времени облучения и/или толщины мишени.

Целью настоящей работы была оптимизация толщины мишени и времени облучения для наработки максимального количества Sr82 с минимальным содержанием Sr83 и Sr85.

Методика расчета

Во время облучения мишенной сборки протонами в результате ядерных взаимодействий первичных протонов и вторичных протонов и нейтронов в материалах мишенной образуется большое количество радиоактивных изотопов (радионуклидов). Активность нуклидов i -го типа, накапливаемых в веществе за время облучения T_0 , равна

$$A_i(T_0) = I w_i (1 - \exp(-\lambda_i T_0)), \quad \lambda_i = \ln 2 / T_{1/2}, \quad (1)$$

где I – ток пучка; w_i – выход радионуклида во всем объеме мишени, нормированный на один первичный протон; λ_i и $T_{1/2}$ – постоянная распада и период полураспада нуклида.

После облучения активность спадает по экспоненциальному закону в зависимости от времени выдержки T_1

$$A_i(T_0, T_1) = I w_i (1 - \exp(-\lambda_i T_0)) \exp(-\lambda_i T_1). \quad (2)$$

Вклад w_{ij} в величину $w_i = \sum_j w_{ij}$ от взаимодействий протонов с атомами j -го типа в веществе определяется в приближении непрерывного замедления по формуле

$$w_{ij} = \frac{\xi_j \rho N_A}{\sum_j \xi_j A_j} \int_{E_2}^{E_1} \frac{\sigma_{ij}(E)}{dE/dz} dE, \quad (3)$$

где ξ_j – доля ядер j -го типа в веществе; ρ – плотность вещества; N_A – число Авогадро; A_j – томный вес ядра; E_1 и E_2 – энергия протона в начале и конце траектории, лежащей в объеме мишени; $\sigma_{ij}(E)$ – сечение образования i -го нуклида во взаимодействиях протона с ядром j -го типа; dE/dz – линейные потери энергии протонов в МэВ/см.

Таким образом, параметры геометрии облучения влияют только на выходы нуклидов w_i . Так как качество конечного продукта и срок его использования определяется по относительным активностям $A(\text{Sr83})/A(\text{Sr82})$ и $A(\text{Sr85})/A(\text{Sr82})$, оптимизация геометрии облучения рубидия сводится к поиску значений E_1 и E_2 , при которых выход $w(\text{Sr82})$ будет близок к максимальному, а относительные выходы $dw(\text{Sr83})=w(\text{Sr83})/w(\text{Sr82})$ и $dw(\text{Sr85})=w(\text{Sr85})/w(\text{Sr82})$ малы.

Расчеты взаимодействий протонов и нейтронов с ядрами и транспорт частиц в веществе моделировались методом Монте Карло с использованием пакета программ HADR99 [2] и FAN15 [3, 4].

Выход изотопов Sr в ядерных реакциях

На рис. 1 представлены экспериментальные сечения [5-10] выхода изотопов стронция в реакциях протонов с рубидием в его естественном составе. Данные взяты из базы EXFOR на сайте МАГАТЭ [11]. Линиями на рисунке представлены гладкие зависимости сечений, которые использовались в расчетах. Для Sr82 приведена рекомендованная МАГАТЭ [12] зависимость сечения от энергии протонов. Из рисунка видно, что наработка Sr82 в рубидии происходит при замедлении протонов до 35 МэВ с максимальным выходом при энергии 50 МэВ. Сечения выхода примесных нуклидов Sr83 и Sr85 стремительно возрастают с падением энергии протонов ниже 48 МэВ. Поэтому максимальная наработка целевого нуклида за счет толщины мишени приведет к увеличению количества примесных нуклидов.

Рубидий – мягкий щелочной металл, мгновенно воспламеняется в воздухе, с водой реагирует со взрывом. Поэтому его помещают в прочную герметичную капсулу. Протоны падают на плоскую поверхность цилиндрической капсулы. Ионизационные потери протонов разогревают мишень, плотность рубидия падает. Для предотвращения разгерметизации капсулы во время облучения мишень охлаждается водой. Средняя плотность рубидия зависит от тока пучка, его профиля и от эффективности охлаждения

мишени, поэтому ее толщину приводим в единицах г/см^2 . Вакуум протонного канала и воду разделяет входное окно. В результате протоны попадают в рубидий с энергией E_I меньше 70 МэВ. Ее величина может варьироваться выбором материала окна и толщины слоя воды между окном и капсулой. В данной работе предполагается, что максимальная входная энергия равна 65 МэВ.

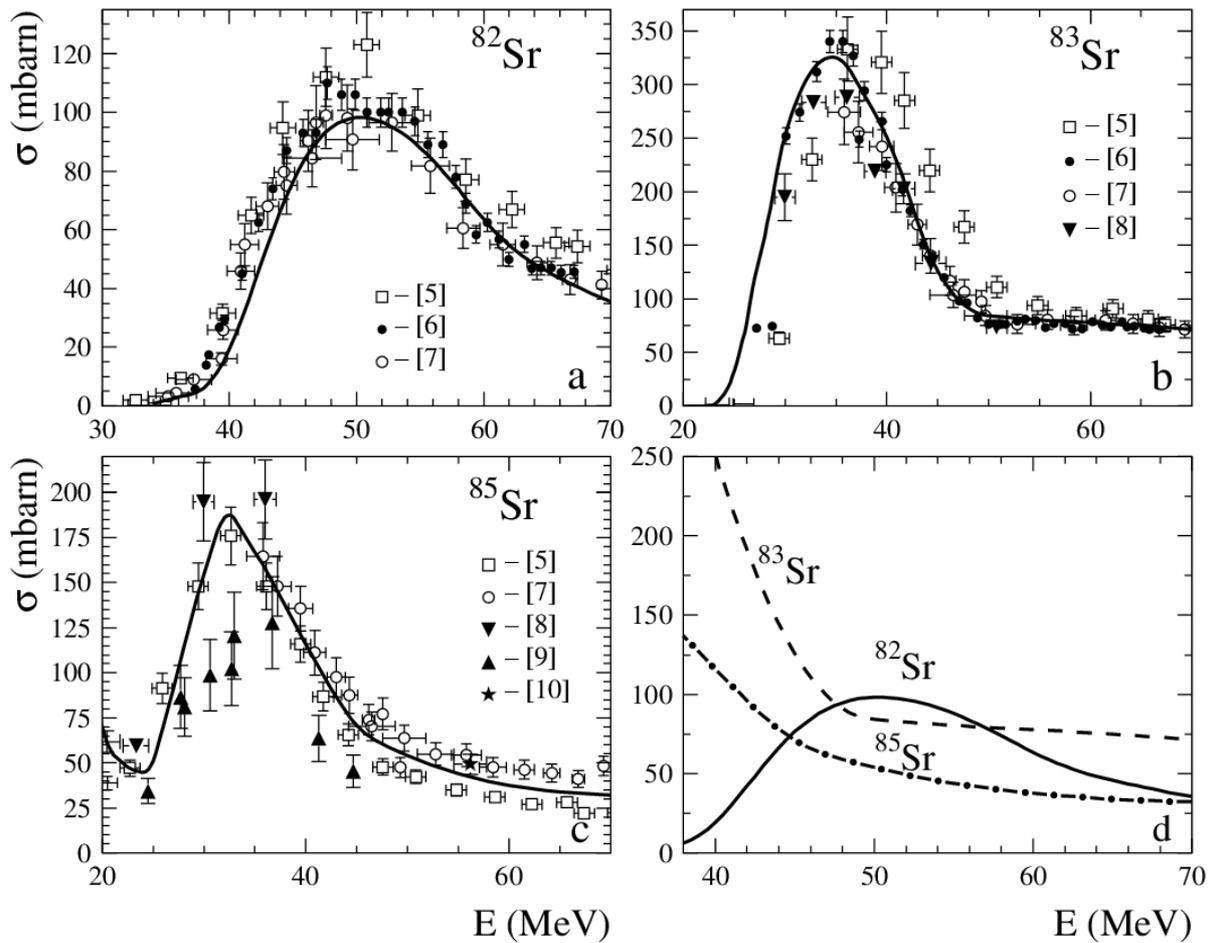


Рис. 1. Сечения выхода изотопов Sr82, Sr83 и Sr85 в реакциях протонов с рубидием в естественном составе: точки – экспериментальные данные [5-10]; линии – гладкие зависимости, использовавшиеся в расчетах. Линии для Sr82 – сечения, рекомендованные МАГАТЭ [12].

Выход нуклида (3) является функцией от входной энергии E_I для мишени фиксированной толщины. Толщина мишени определяет значение энергии протонов на выходе из рубидия E_2 для конкретного значения E_I . Зависимости $w_i(E_I)$ для нуклидов

Sr82, Sr83 и Sr85 были рассчитаны для шести значений толщины рубидия от 1,96 до 3,36 г/см² по формуле 3 для входной энергии до 70 МэВ.

На рис. 2 представлены выход Sr82 и относительные выходы примесных нуклидов Sr83 и Sr85 в зависимости от E_1 . Минимумы примесей сдвинуты относительно максимума выхода Sr82 в сторону больших значений E_1 . Относительный выход Sr85 имеет более плавную зависимость от E_1 . Выход Sr83 в районе его минимума почти в 2 раза больше выхода Sr85.

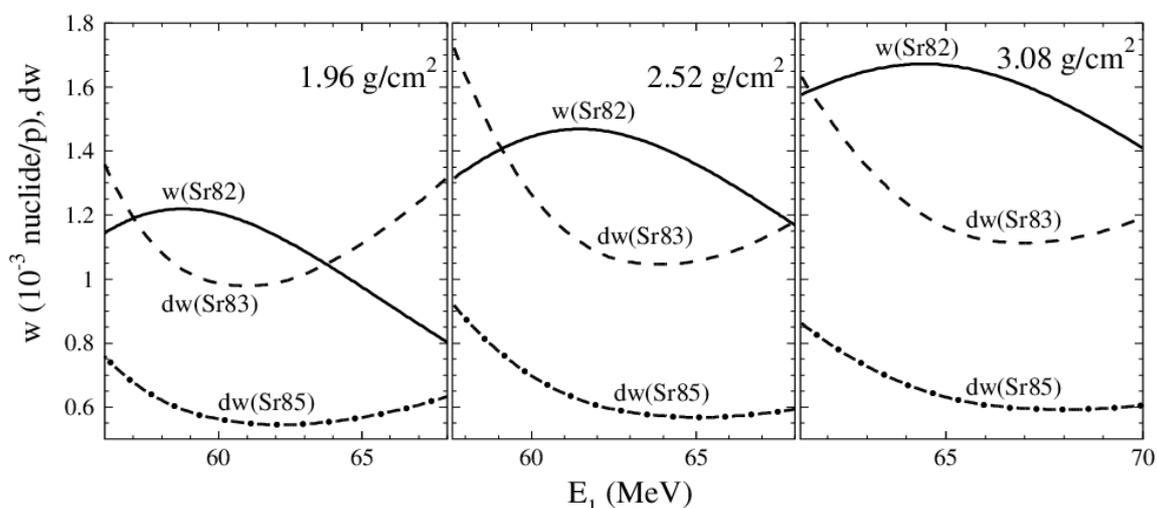


Рис. 2. Выход Sr82 и относительные выходы Sr83 и Sr85 для рубидиевых мишеней толщиной 1,96, 2,52 и 3,08 г/см².

В результате имеем три ориентира для оптимизации, для которых на рис. 3 представлены $w(\text{Sr82})$, $dw(\text{Sr83})$ и $dw(\text{Sr85})$ в зависимости от толщины рубидиевой мишени. Видно, что при максимальном выходе Sr82 больше примесных нуклидов. В минимумах $dw(\text{Sr83})$ и $dw(\text{Sr85})$ количество примесей почти одинаково, но Sr82 нарабатывается больше при ориентире на уменьшение Sr83. Поэтому соответствующую минимуму $dw(\text{Sr83})$ входную энергию считаем оптимальной. Относительное количество примесных изотопов стронция растет с увеличением толщины рубидиевой мишени. Как видно из формул (1-2), максимум активности Sr82 и минимумы относительных активностей Sr83 и Sr85 локализуются при тех же значениях входной энергии.

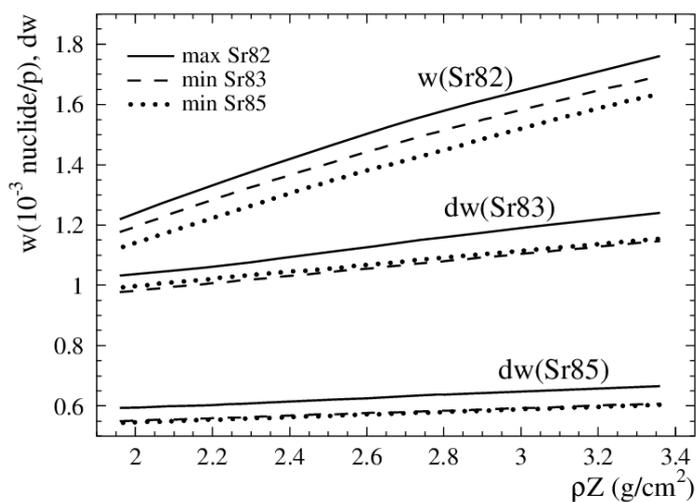


Рис. 3. Выход w целевого нуклида Sr82 и относительный выход dw примесных нуклидов Sr83 и Sr85 в зависимости от толщины рублидия для трех вариантов оптимизации: по максимуму $w(\text{Sr82})$ и по минимумам $dw(\text{Sr83})$ и $dw(\text{Sr85})$.

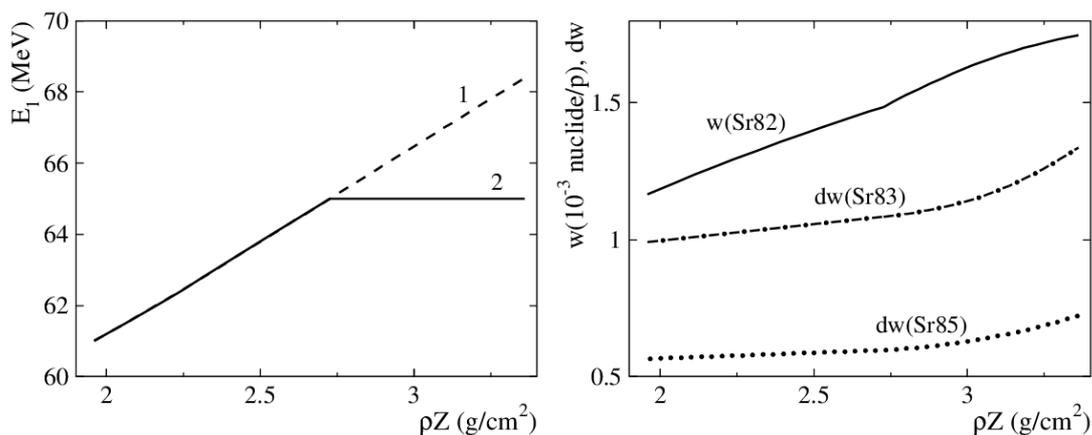


Рис. 4. Слева оптимальная входная энергия протонов в зависимости от толщины рублидия без учета (1) и с учетом (2) ограничений реальной геометрии облучения. Справа выход Sr82 и относительные выходы Sr83 и Sr85 с $E_1 \leq 65$ МэВ.

На левой панели рис. 4 пунктирной линией показана оптимальная входная энергия без учета ограничений реальной геометрии облучения, сплошная линия соответствует $E_1 \leq 65$ МэВ. Для максимальной наработки Sr82 оптимальная толщина определяется максимально возможной входной энергией. Для $E_1=65$ МэВ она равна $2,73 \text{ г/см}^2$.

Выходы нуклидов (см. рис. 4 справа) получены методом Монте Карло по программам HADR99 и FAN15 для $E_1 \leq 65$ МэВ. Учет упругих и неупругих взаимодействий протонов с веществом понижает выход Sr82 менее чем на 1%, при этом относительные выходы Sr83 и Sr85 возрастают на 1,2% и 2,6% соответственно. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Энергия протонов на входе и выходе из рубидия, выход w Sr82 и относительные выходы dw нуклидов Sr83 и Sr85 для $E_1 \leq 65$ МэВ.

ρZ_2 , г/см ²	E_1 , МэВ	E_2 , МэВ	$w(\text{Sr82})$, 10^{-3} нукл/п	$dw(\text{Sr83})$	$dw(\text{Sr85})$
1,96	61,0	47,1	1,167	0,991	0,565
2,24	62,4	46,7	1,294	1,025	0,576
2,52	63,9	46,3	1,408	1,059	0,588
2,73	65,0	46,1	1,485	1,084	0,596
2,80	65,0	45,5	1,528	1,094	0,602
3,08	65,0	43,2	1,664	1,172	0,644
3,36	65,0	40,8	1,747	1,337	0,722

Время облучения и выдержки

Активность нуклидов в мишени зависит от продолжительности облучения (см. формулы 1-2). Обычно облучение Rb-мишени длится до 14 дней. На момент окончания облучения рубидий содержит четыре десятка радионуклидов, большая часть из которых короткоживущие. Через несколько дней после окончания облучения более 99% активности мишени определяется изотопами рубидия и стронция. Суммарная активность нуклидов с зарядовым числом $Z < 37$ снижается до 1% от активности Sr82 через 11-14 дней после облучения в зависимости от продолжительности облучения.

Облученная мишень выдерживается за свинцовой защитой до начала химического процесса выделения из нее изотопов стронция. Конечным продуктом является дихлорид стронция, растворенный в слабой соляной кислоте. Качество продукта, отправляемого изготовителю генератора Sr82/Rb82, определяется по отношению активностей основных примесных изотопов Sr83, Rb83 и Sr85 к активности целевого изотопа Sr82.

На рис. 5 представлены активности основных изотопов стронция в Rb-мишени $2,73 \text{ г/см}^2$ в зависимости от времени в процессе облучения и после него при облучении пучком 375 мкА в течение 7 и 14 дней. Относительно короткий период полураспада Sr83 приводит к его быстрому насыщению в начале облучения и быстрому спаду после облучения.

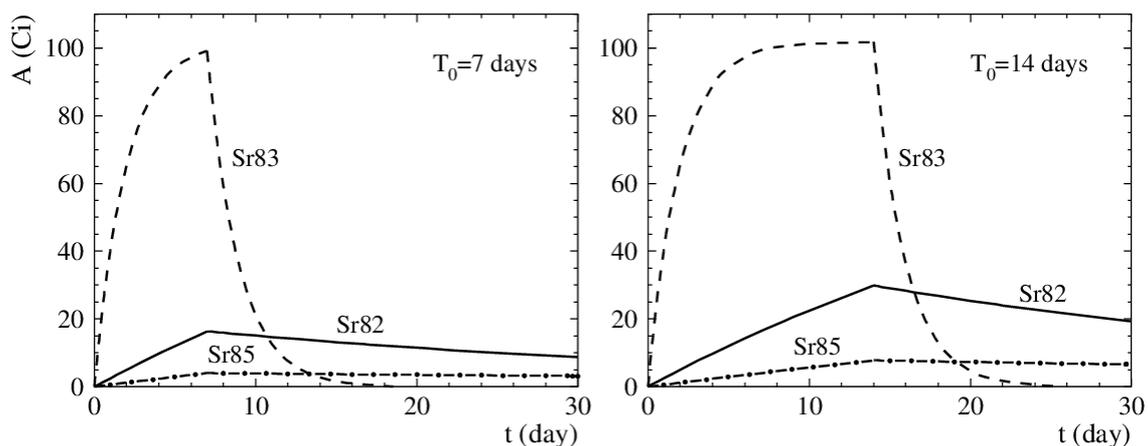


Рис. 5. Активность изотопов Sr82, Sr83 и Sr85 в мишени толщиной $2,73 \text{ г/см}^2$ при облучении 7 и 14 дней при токе пучка 375 мкА .

На момент контроля качества должны выполняться условия: $A(\text{Sr83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$ и $A(\text{Rb83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$. Содержание в продукте Sr85 ограничивает срок использования генератора по условию $A(\text{Sr85})/A(\text{Sr82}) < 5$.

Достаточно жесткие ограничения для Sr83 связаны с тем, что в результате его распада образуется долгоживущий радионуклид Rb83, который беспрепятственно поступает в кровь пациента вместе с Rb82. Изотопы стронция попадают в физраствор в очень малых количествах в результате случайного срыва с колонки генератора. Из пятикратного различия в суммарной энергии радиационного излучения от распадов $\text{Sr82} \rightarrow \text{Rb82} \rightarrow \text{Kr82}$ и $\text{Sr85} \rightarrow \text{Rb85}$ следует ограничение $A(\text{Sr85})/A(\text{Sr82}) < 5$.

Из условия $A(\text{Sr83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$ определяется время от конца облучения до контроля качества продукта:

$$t_p \geq t_p^{\min} = \frac{\ln[0,0015 \cdot A_0(\text{Sr82})/A_0(\text{Sr83})]}{\lambda_{\text{Sr82}} - \lambda_{\text{Sr83}}},$$

где $A_0(\text{Sr82})$ и $A_0(\text{Sr83})$ – активность Sr82 и Sr83 на момент окончания облучения.

Чтобы выполнялось второе условие при контроле качества, необходимо определить время выдержки мишени до химического выделения стронция из рубидиевой мишени. После этого Rb83 в продукте будет образовываться только в результате распада Sr83. Далее активность Sr83 будет падать, относительная активность Rb83 будет возрастать. Для выполнения условия $A(\text{Rb83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$ активности Rb83 и Sr83 должны сравняться не ранее времени контроля. Это означает, что химическое выделение стронция должно проводиться через t_c дней после облучения:

$$t_c > t_c^{\min} = t_p^{\min} - \frac{\ln(\lambda_{\text{Sr83}}/\lambda_{\text{Rb83}})}{\lambda_{\text{Sr83}} - \lambda_{\text{Rb83}}} = t_p^{\min} - 8,2 \text{ д.}$$

Таким образом, процесс выделения стронция должен проводиться не ранее, чем за 8 дней до момента контроля качества продукта.

Минимальное время до контроля качества t_p^{\min} представлено на рис. 6 (слева) в зависимости от продолжительности облучения мишени. Из рисунка видно, что оно сильнее зависит от времени облучения, чем от толщины мишени. При работе без простоев ускорителя нецелесообразно проводить слишком короткие сеансы облучения (менее 8,5 дней), так как это приведет к накоплению облученных мишеней для выдержки до химических процессов. $t_p^{\min} = T_0 + 8$ д. для времени облучения T_0 от 8,5 до 9,1 дней толщине мишени от 1,96 до 3,36 г/см².

Из третьего ограничения $A(\text{Sr85})/A(\text{Sr82}) < 5$ следует максимальный срок работы генераторов Sr82/Rb82 от окончания облучения:

$$t_{\text{end}} = \frac{\ln[5 \cdot A_0(\text{Sr82})/A_0(\text{Sr85})]}{\lambda_{\text{Sr82}} - \lambda_{\text{Sr85}}},$$

где $A_0(\text{Sr82})$ и $A_0(\text{Sr85})$ – активность Sr82 и Sr85 на момент окончания облучения.

Из рис. 6 (справа) видно, что длительность интервала времени, когда выполняются условия для Sr83 и Sr85, мало зависит от продолжительности облучения и гораздо сильнее зависимость от толщины мишени: чем тоньше мишень, тем меньше примесных нуклидов (см. рис. 4) и больше интервал $t_{\text{end}} - t_p^{\min}$.

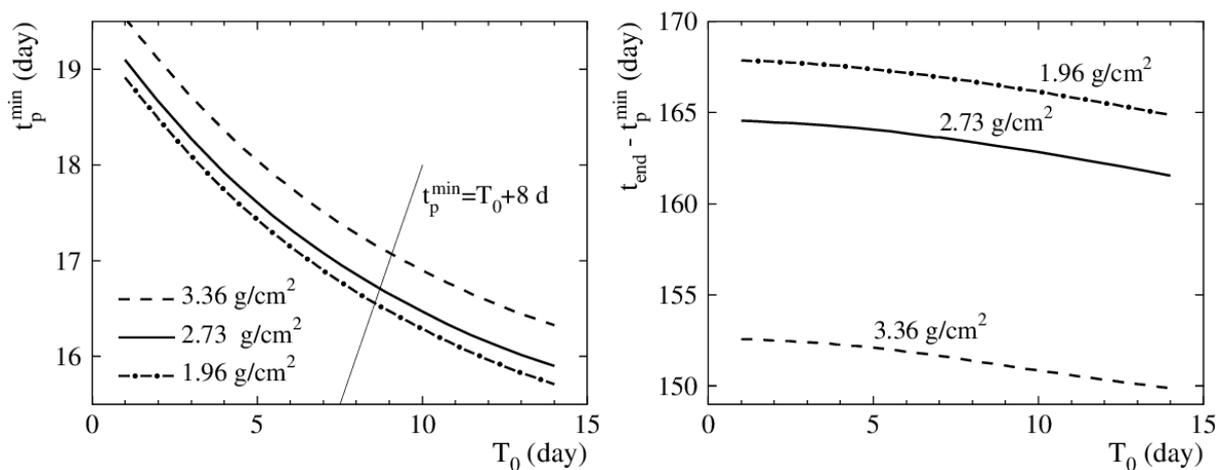


Рис. 6. Время контроля Sr83 (слева) и интервал выполнения условий для Sr83 и Sr85 (справа) в зависимости от времени облучения T_0 для мишеней толщиной 1,96, 2,73 и 3,36 г/см².

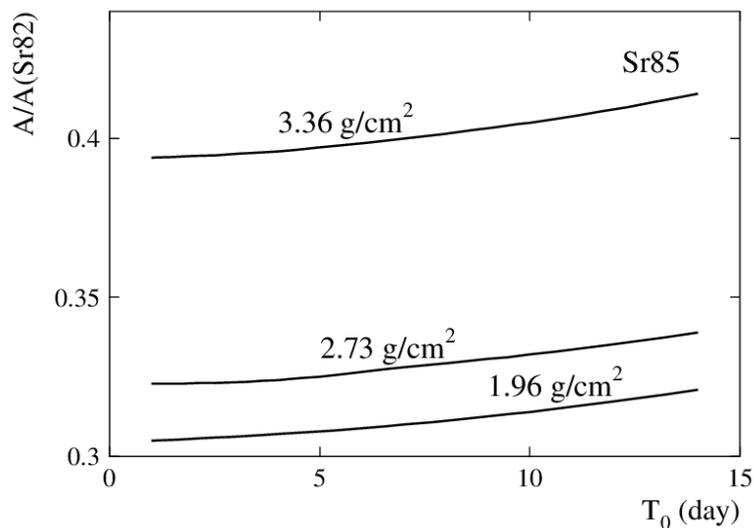


Рис. 7. Относительная активность Sr85 через t_p^{min} дней после облучения.

Относительная активность Sr85 на момент контроля t_p^{min} немного растет с увеличением продолжительности облучения (см. рис. 7) и достигает 5 через t_{end} дней после облучения. На практике изготовленный генератор используется в течение 2-3 месяцев в зависимости от начальной активности Sr82, но чем короче срок от t_p^{min} до клинического использования генератора, тем меньшую дозу получит пациент от примесных нуклидов.

Для облученной в течение 9 дней мишени толщиной $2,73 \text{ г/см}^2$ на рис. 8 показано изменение со временем относительной активности Sr83 и его дочернего нуклида Rb83 в конечном продукте. Активность Rb83 приведена для двух интервалов выдержки до выделения Sr из мишени. Пунктирная линия соответствует минимально необходимому времени выдержки до химического выделения стронция ($t_c=8,5 \text{ д.}$), и в этом случае условия для Sr83 и Rb83 выполняются только в момент времени $t_p^{min}=16,7 \text{ д.}$ При $t_c=9 \text{ д.}$ (штрихпунктирная линия на рис. 8) относительная активность Rb83 достигает значения 0,0015 через 30 дней после облучения.

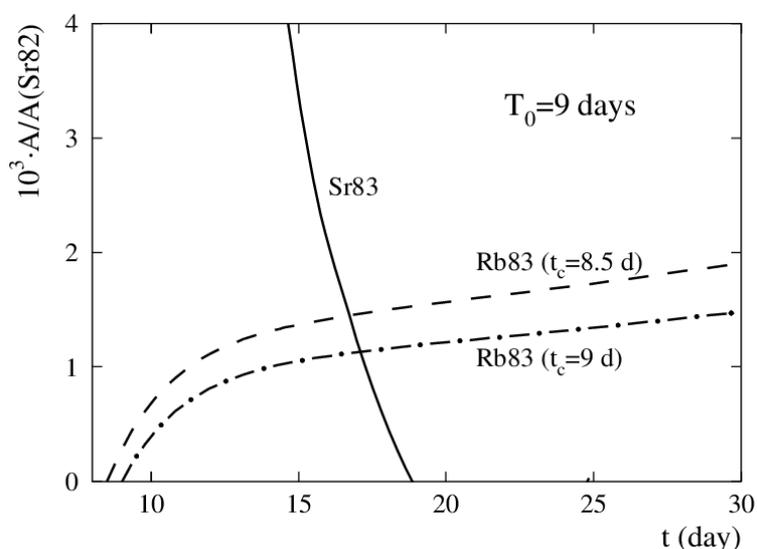


Рис. 8. Относительная активность Sr83 и Rb83 для $2,73 \text{ г/см}^2$ Rb после 9 дней облучения. t_c – время от конца облучения до химического выделения стронция из мишени.

Таким образом, облученная в течение 9 дней мишень выдерживается в горячей камере пока облучается следующая мишень, затем она отправляется на химическую обработку перед выемкой из мишенной станции следующей мишени. Через 16,7 суток после облучения полученный из рубидия продукт будет удовлетворять первому условию: $A(\text{Sr83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$, и в течение еще 13 дней будет выполняться условие $A(\text{Rb83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$, если химическое выделение стронция проводится через 9 дней после облучения. В конце срока годности ($t_{end} = 179 \text{ д.}$) относительная активность Rb83 достигнет значения 0,027.

Эффективность наработки целевого радионуклида обычно оценивают по отношению его активности на момент окончания облучения к току пучка, умноженному на время облучения в часах: $\frac{A}{I \cdot T_0}$. На рис. 9 сплошной линией представлена ее зависимость от времени облучения T_0 для мишени толщиной $2,73 \text{ г/см}^2$. Так как минимальное время до достижения контрольного уровня по Sr83 также зависит от времени облучения, то корректней судить об эффективности через t_p^{min} дней после окончания облучения (пунктирная линия на рис. 9). И в этот момент преимущество коротких периодов облучения менее значительно. Но в режиме работы с неполной загрузкой ускорителя наработку нужного количества Sr82 эффективней производить, уменьшая время облучения, при этом уменьшается относительная активность Sr85 (см. рис. 7). А так как из ускорителя пучок будет выводиться на две мишенные станции, то при неполной загрузке эффективней облучать одновременно две мишени, чем одну в два раза дольше.

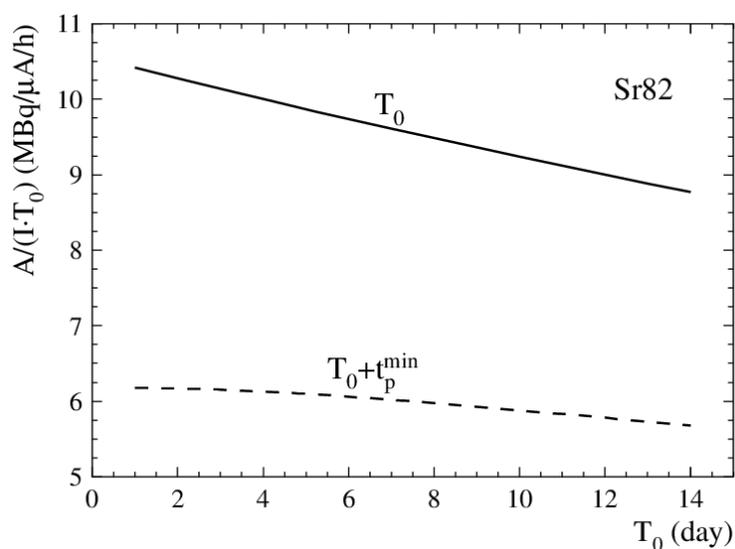


Рис. 9. Эффективность наработки целевого радионуклида в $2,73 \text{ г/см}^2$ Rb: сплошная линия – сразу после облучения; пунктирная – на момент выполнения условия $A(\text{Sr83})/A(\text{Sr82}) = 0,0015$.

Такое представление эффективности привязывает выход нуклида к затратам, связанным с процессом облучения. Но кроме них существуют и другие затраты. И для оценки финансовой эффективности наработки целевого радионуклида в знаменателе должно появиться дополнительное слагаемое, которое ограничит эффективность слишком коротких периодов облучения.

Заключение

В настоящей работе показано, что в зависимости от толщины рубидиевой мишени существует оптимальное значение энергии протонов на входе в рубидий, позволяющее повысить выход Sr82 и минимизировать относительный выход примесных нуклидов Sr83 и Sr85. Компромисс достигается в геометрии с минимальным относительным выходом нуклида Sr83. При этом максимально возможная входная энергия протонов определяет оптимальную толщину мишени с максимальным выходом целевого нуклида Sr82. Для входной энергии 65 МэВ она равна 2,73 г/см².

При работе без простоев ускорителя нецелесообразно проводить сеансы облучения менее 8,5 дней, так как это приведет к накоплению облученных мишеней для выдержки до химических процессов.

Для мишени толщиной 2,73 г/см² непрерывный цикл может быть организован в режиме 9 дней облучения и 9 дней до выделения стронция. В этом случае через 16,7 суток после облучения выполняется условие $A(\text{Sr83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$, и в течение еще 13 дней будет выполняться условие $A(\text{Rb83})/A(\text{Sr82}) \leq 0,0015$. Условие $A(\text{Sr85})/A(\text{Sr82}) < 5$ будет в силе 179 дней после облучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 г. № 14.607.21.0193, идентификатор Соглашения RFMEFI60717X0193.

Авторы выражают благодарность Suzanne V. Smith (ЦРЯМ) за полезную информацию и обсуждения.

Список литературы

- [1] Alvarez-Diez T.M., Dekemp R., Beanlands R., Vincent J. Manufacture of strontium-82/rubidium-82 generators and quality control of rubidium-82 chloride for myocardial perfusion imaging in patients using positron emission tomography. — Appl. Radiat. Isot., 1999, v. 50, p. 1015—1023.

- [2] Sannikov A.V., Savitskaya E.N. Physics of the HADRON code: recent status and comparison with experiment. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 2000, v. A450, p. 127—137.
- [3] Савицкая Е.Н., Санников А.В. Программа FAN15 для расчета переноса низкоэнергетических фотонов и нейтронов в произвольных средах. — Атомная энергия, 2017, т. 122, с. 40—45.
- [4] Савицкая Е.Н., Санников А.В. Моделирование переноса электронов и позитронов по программе FAN15. — Атомная энергия, 2017, т. 122, с. 98—102.
- [5] Buthelezi E.Z., Nortier F.M., Schroeder I.W. Excitation functions for the production of Sr-82 by proton bombardment of ^{nat}Rb at energies up to 100 MeV. — Appl. Radiat. Isot., 2006, v. 64, p. 915—924.
- [6] Lagunas-Solar M. Radionuclide production with >70 MeV proton accelerators Current and future prospects. Nucl. Instrum. Meth., 1992, v. B69, p. 452—462.
- [7] Ido T., Hermanne A., Ditroi F. et al. Excitation functions of proton induced nuclear reactions on Rb-nat from 30 to 70 MeV. Implication for the production of Sr-82 and other medically important Rb and Sr radioisotopes. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 2002, v. B194, p. 369—388.
- [8] Sakamoto K., Dohniwa M., Okada K. Excitation functions for (p,xn) and (p,pxn) reactions natural $^{79+81}\text{Br}$, $^{85+87}\text{Rb}$, ^{127}I and ^{133}Cs upto $E_p=52$ MeV. — Appl. Radiat. Isot., 1985, v. 36, p. 481—488.
- [9] Qaim S.M., Steyn G.F., Spahn I. et al. Yield and purity of ^{82}Sr produced via the $^{nat}\text{Rb}(p,xn)^{82}\text{Sr}$ process. — Appl. Radiat. Isot., 2007, v. 65, p. 247—252.
- [10] Gilabert E., Lavielle B., Neumann S. et al. Cross sections for the proton-induced production of krypton isotopes from Rb, Sr, Y, and Zr for energies up to 1600 MeV. Nucl. Instrum. — Methods Phys. Res., 1998, v. B145, p. 293—319.
- [11] <https://www-nds.iaea.org/>
- [12] IAEA-INDC(NDS)-0675. Nuclear Data for Charged-particle Monitor Reactions and Medical Isotope, 2015, IAEA, Austria.

Рукопись поступила 7 июня 2019 г

Е.Н. Савицкая, В.Н. Пелешко, А.П. Солдатов, Р.Г. Тертычный, А.А. Хасин

Оптимизация наработки стронция-82 в рубидиевой мишени при облучении протонами энергией 70 МэВ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 11.06.2019. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1. Уч.– изд.л. 1,53. Тираж 80. Заказ 4. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2019-3,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2019
