

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ НАРАБОТКИ БОЛЬШИХ КОЛИЧЕСТВ РАДИОНУКЛИДА ЙОДА-123 ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ НА ЦИКЛОТРОНЕ CV-28

*Ю.Т. Петрусенко, А.Г. Лымарь, Л.И. Николайчук, А.И. Тутубалин,
А.Г. Шенелев, Т.А. Пономаренко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: niki@kipt.kharkov.ua*

Изучается возможность наработки больших количеств изотопов йода-123 высокой чистоты на внутренней и наружной мишенях циклотрона CV-28 в реакциях на протонах и дейтронах. Показано, что при применении специальной технологии приготовления мишеней из теллура и способа отвода тепла, выделяемого на мишени при облучении протонным пучком, возможно за относительно короткое время (1...2 ч) нарабатывать на циклотроне CV-28 большие (порядка кюри) количества изотопов йода-123.

Радионуклиды (РН), произведенные на циклотронах, широко используются как для диагностики заболеваний, так и для радиотерапии [1-3]. Медицинские радиоизотопы должны удовлетворять жестким требованиям по содержанию химических и радионуклидных примесей, так как на их основе изготавливаются радиофармпрепараты для введения внутрь человеческого организма.

Радиационная чистота медицинских радиоизотопов, нарабатываемых на циклотроне, определяется химическим и изотопным составом исходных мишеней, типом облучающих частиц и их энергией, а также временем облучения. Присутствие радионуклидных примесей увеличивает лучевую нагрузку на пациента.

Одним из наиболее важных радиоизотопов для диагностики является радиоизотоп йод-123.

В силу своих почти идеальных ядерно-физических свойств, таких как большой выход низкоэнергетичных фотонов (83%, 159 кэВ), испускаемых после 100% электронного захвата, период полураспада 13,2 ч, йод-123 является идеальным продуктом для радиофармпрепаратов при однофотонной компьютерной томографии (заболевание щитовидной железы, кардиология, нейрология, онкозаболевание). Этот изотоп также широко применяется для многофункциональных исследований *in-vivo*. Огромным преимуществом йода-123 является его малая радиационная нагрузка на организм человека и высокое качество изображения, показывающего распределение РН в организме. Так радиационная доза йода-123, рассчитанная для щитовидной железы и для всего тела, почти на два порядка ниже, чем для других изотопов йода. Энергия испускаемых этим РН γ -квантов позволяет получать хорошее качество сканирования. Известно, что при изменении энергии γ -квантов выше и ниже пределов 60...300 кэВ качество сканирования ухудшается [4].

В большинстве случаев для наработки изотопов йода используются реакции на протонах и дейтронах в области энергий 6...31 МэВ [1, 3]. Величины активности наработанных РН йода и уровень радионуклидной чистоты могут быть вычислены из данных по функциям возбуждения, толщине мишени и

области энергии при облучении, а также зависят от изотопного состава мишени. Эти экспериментальные данные для ядерных реакций на протонах и дейтронах получены для различных стабильных изотопов теллура, которые используются в качестве мишеней [5].

Полученные величины выхода РН йода и уровень их чистоты показывают, что для получения йода из реакций на мишенях из изотопов теллура рекомендуется применять малые циклотроны [6-8].

Авторы работы [7] считают, что проблема получения изотопа йод-123 высокой степени чистоты в больших количествах может быть успешно решена на высокообогащенных мишенях из теллура-123 при использовании протонов с энергией 15 МэВ. Для решения этой проблемы требуется применение специально разработанной технологии приготовления мишеней, которые пригодны для работы с пучками протонов высокой интенсивности.

Преимущество наработки на малых циклотронах РН ^{123}I высокой чистоты в больших количествах с использованием (p,n) -реакции на высокообогащенных мишенях теллура показано в работах [6-8]. Авторы [8] исходят из предположения, что при бомбардировке протонами с энергией 15 МэВ мишени из теллура-123 100%-го обогащения будет произведен чистый йод-123. Однако, поскольку получение теллура-123 100%-й чистоты экономически не может быть осуществлено, авторы исследовали выход йода-123 и радионуклидную чистоту полученного изотопа как функцию изотопного обогащения мишени теллура-123 и энергии падающих протонов. Для этого изучалось значение процентного содержания примеси йода-124 в полученном РН йода-123 при различных отношениях $^{123}\text{Te}: ^{124}\text{Te}$ в мишени теллура-123 и при различных значениях энергии протонов (15 и 11,5 МэВ) [7]. Показано, что при увеличении этого отношения и при уменьшении энергии протонов уменьшается значение процентного содержания йода-124 в полученном изотопе йод-123. Однако при прочих равных условиях при энергии 15 МэВ наработанная активность полученного изотопа йод-123 больше практически в 3 раза по сравнению с энергией 11,5 МэВ. Таким образом,

существует реальная возможность получения йода-123 высокой чистоты при энергии протонов 15 МэВ и увеличении степени обогащения мишени изотопа теллура-123.

В указанных работах исключается необходимость длительного процесса бомбардировки мишени протонами для получения больших количеств активности. Используются высокообогащенные отполированные мишени из теллура, способные выдерживать большие токи протонов. Это дает возможность за короткое время набирать большие активности. Так в работе [7] показано, что на мишени из теллура-123 (приблизительно 96%) при бомбардировке протонами с энергией 15 МэВ при мощности

пучка 2 кВт (133 мкА) возможно наработать РН йода-123 в количестве порядка десятков гигабеккерель (порядка кюри) за два часа облучения протонами при примеси йода-124, равной 0,23% в конце бомбардировки.

В ближайшее время в ННЦ ХФТИ планируется запустить изохронный циклотрон CV-28 с регулируемой энергией [10]. Характеристики циклотрона приведены в таблице [10].

Представляет интерес рассмотреть возможность наработки РН йода высокой чистоты и оценить количество РН йода-123, которые можно получать на этом циклотроне.

Ускоряемые частицы	Энергия ускоренных частиц, МэВ	Ток на наружной мишени, мкА	Ток на внутренней мишени, мкА
p	2...24	40...60	200
d	4...14	50...100	300
³ He	6...36	5...50	135
⁴ He	8...28	6...40	90

ОЦЕНКА АКТИВНОСТЕЙ РН ЙОДА-123, КОТОРЫЕ МОЖНО ПОЛУЧИТЬ НА ЦИКЛОТРОНЕ CV-28 В РЕАКЦИЯХ С ПРОТОНАМИ И ДЕЙТРОНАМИ

Для производства радионуклида йода-123 на циклотронах в области энергий 8...14 МэВ в последнее время наиболее широко применяются реакции ¹²³Te (p, n)¹²³I и ¹²²Te (d, n)¹²³I на мишенях из высокообогащенного теллура.

Сечения реакции ¹²³Te (p,n)¹²³I измерялись в ряде работ [7,8]. Рекомендованные значения сечений в интервале энергий протонов 4,5...20 МэВ приведены в работе [9]. На основании полученных данных рассчитаны выходы РН из толстой мишени. Эти данные использовались нами для оценки активности РН I-123, которые реально можно набирать на наружной и внутренней мишенях циклотрона CV-28, планируемого к запуску в ННЦ ХФТИ.

Так при выбранном диапазоне энергии 14...8 МэВ, максимальном токе протонов на внутренней мишени циклотрона 200 мкА и на наружной мишени 60 мкА нарабатанная за один час облучения активность может составлять ~ 39 ГБк (порядка кюри) на внутренней и ~12 ГБк на наружной мишенях соответственно. Пробег протонов в этом случае будет равен 312 мг/см². Выделяемая пучком протонов мощность будет 2,8 кВт на внутренней мишени и 0,84 кВт на наружной. Для рассеяния этой мощности необходимо, как указывалось выше, осуществить сканирование пучка протонов на мишени, соответствующую полировку мишени и охлаждение ее проточной водой.

РН могут образовываться также и в реакциях дейтронов низких энергий с изотопами теллура. Перечень реакций, для которых имеются экспериментальные данные о сечениях, приведен в работе [5]. В этой работе приводятся оцененные данные об интегральных выходах РН йода-123 из реакции ¹²²Te (d, n)¹²³I для дейтронов до 14 МэВ вместе с данными о выходах реакций дейтронов с изотопами, вхо-

дящими в состав мишени из натурального или слабообогащенного теллура. В природном теллуре содержание ¹²²Te составляет 2,55%. Для получения йода-123 для медицинского применения с допустимым содержанием примесей других РН необходим высокообогащенный теллур. Стоимость получения высокообогащенного теллура (> 90%) очень высока. Поэтому получение йода-123 в указанной реакции с дейтронами экономически не оправдано.

ВЫВОДЫ

Полученные оценки активностей РН йода-123 свидетельствуют о том, что параметры циклотрона CV-28 в ННЦ ХФТИ позволяют получать указанные радионуклиды на внутренней и наружной мишенях циклотрона CV-28 в реакциях на протонах и дейтронах.

Как видно из приведенных данных, за один час облучения полная активность наработанного РН йода-123 будет составлять ~39 ГБк/ч (порядка кюри) на внутренней и ~12 ГБк/ч на наружной мишенях циклотрона CV-28 в реакциях на протонах.

Следовательно, полученные результаты убедительно показывают, что на циклотроне CV-28 в ННЦ ХФТИ реально набирать радионуклиды йода-123 в количествах, которые будут вполне удовлетворять потребностям Украины в этом радионуклиде (около 100 ТБк в год).

ЛИТЕРАТУРА

1. S.M. Qaim. Nuclear data relevant to the production and application of diagnostic radionuclides // *Radiochim Acta*. 2001, v.89, p.223-232.
2. M. Qaim. Therapeutic radionuclides and nuclear date // *Radiochim Acta*. 2001, v.89, p.297-302.
3. В.Ю. Баранов. *Изотопы: свойства, получение, применение*. М.: «Наука», 2005, 600 с.
4. С.Н. Дмитриев, Н.Т. Зайцева. Радионуклиды для биомедицинских исследований. Ядерные данные и методы получения на ускорителях заряженных частиц // *Физика ЭЧАЯ*. 1996, т.27, в.4, с.977.

5. Ferenc Tarkanyi, Sandor Takacs, et al. Status of the Database for Production of Medical Radioisotopes of ^{103}Pd , $^{123,124}\text{I}$, ^{201}Tl by Using Rh, Te and Tl Targets // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2002, St.2, p.1318-1321.
6. B. Scholten, Z. Kovacs, F. Tarkanyi, S.M. Qaim. Excitation Functions of $^{124}\text{Te}(p,xn)^{124,123}\text{I}$ Reactions from 6 to 31 MeV with Special Reference to the Production of ^{124}I at a Small Cyclotron // *Appl. Radiat. Isot.* 1995, v.46, №4, p.255-259.
7. C. Raymond, J. Barrall, et al. Production of Curie Quantities of High Purity I-123 with 15 MeV Protons // *Eur. J. Nucl. Med.* 1981, v.6, p.411-415.
8. I. Mahunka, L. Ando, P. Mikecz, et al. Iodine-123 Production at a Small Cyclotron for Medical Use // *Radioanal. Nucl. Chem. Letters*. 1996, v.213(2), p.135-142.
9. <http://www.ds.iaea.org/medical/te3p23iO.html>
10. А.М. Егоров, А.Г. Лымарь, И.М. Неклюдов, Ю.Т. Петрусенко. Компактный циклотрон CV-28 и перспективы его использования в ННЦ ХФТИ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика и техника ускорителей»(50)*. 2008, №5, с.120.

Статья поступила в редакцию 28.05.2010 г.

ESTIMATION OF POSSIBILITY OF QUANTITY PRODUCTION OF HIGH-PURITY IODINE-123 RADIONUCLIDE AT CV-28 CYCLOTRON FOR NUCLEAR MEDICINE

Yu. T. Petrusenko, A. G. Lymar', L. I. Nikolaichuk, A. I. Tutubalin, A. G. Shepelev, T. A. Ponomarenko

The work discusses the possibility of scale production of high-purity iodine-123 isotopes on internal and external targets of the CV-28 cyclotron through the use of proton/deuteron reactions. It is demonstrated that with the use of both a special process of tellurium target production and the way of removing the heat released on the target that is exposed to the proton beam, great amounts (of curie order) of iodine-123 isotopes can be produced at the cyclotron CV-28 for a relatively short time (1 to 2 hours).

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ НАПРАЦЮВАННЯ ВЕЛИКОЇ КІЛЬКОСТІ РАДІОНУКЛІДА ЙОДУ-123 ВИСОКОЇ ЧИСТОТИ ДЛЯ ЯДЕРНОЇ МЕДИЦИНИ НА ЦИКЛОТРОНІ CV-28

Ю.Т. Петрусенко, А.Г. Лимарь, Л.І. Ніколайчук, А.І. Тутубалін, А.Г. Шепелев, Т.О. Пономаренко

Вивчається можливість одержання великих кількостей ізотопів йоду-123 високої чистоти на внутрішній та на зовнішній мішенях циклотрона CV-28 в реакціях на протонах та дейтронах. Установлено, що при використанні спеціальної технології виготовлення мішеней із теллура, та способу відведення тепла, яке виділяється на мішені при опроміненні пучком протонів за відносно короткий час (1...2 год) можливо одержати на циклотроні CV-28 великі кількості (приблизно кюрі) ізотопів йоду-123.