

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Электроядерная установка
для уничтожения ядерных отходов

Ж.-П. Риволь

Современный уровень технологии ускорителей заряженных частиц позволяет применить протонные ускорители для эффективного производства энергии и уничтожения отходов ядерной энергетики. Усилитель энергии (Energy Amplifier, EA), предложенный Карло Руббиа и его группой, представляет собой подкритическую сборку на быстрых нейтронах, управляемую протонным ускорителем. EA может оказаться особенно эффективным при уничтожении трансурановых нуклидов, производимых действующими ядерными реакторами. Применение в EA концепции адиабатического резонансного перекрытия (Adiabatic Resonance Crossing, ARC), недавно проверявшейся в ЦЕРНе в эксперименте TARC, позволит эффективно и при минимальных экономических затратах уничтожать также долгоживущие продукты деления. Концепция ARC может быть распространена и на другие области применения (производство радиоактивных изотопов для медицинских и промышленных целей, фундаментальные нейтронные исследования и т.д.).

PACS numbers: 28.41.Bm, 28.50.-k, 89.30.Gg

Содержание

1. Введение (747).
2. Ядерные отходы (748).
3. Усилитель энергии (748).

3.1. Почему быстрые нейтроны? 3.2. Подкритичность и ускоритель. 3.3. Протонная мишень. 3.4. Уничтожение ядерных отходов: ТУИ. 3.5. Почему для использования тория выбрана не критическая система? 3.6. Уничтожение ядерных отходов: долгоживущие продукты деления (ДПД). 3.7. Медицинское применение.

4. Заключение (754).

Список литературы (755).

1. Введение

Данная работа представляет собой несколько необычный результат деятельности такой лаборатории, как ЦЕРН, ориентированной исключительно на фундаментальные исследования. Не удивительно, что концепция "усилителя энергии"¹ (EA) [1], представляющая новый подход к ядерной энергетике, появилась в результате фундаментальных исследований, поскольку фундамен-

тальные исследования всегда служат источником новых идей. Имя таким примерам — легион, и они хорошо известны. Одним из последних является тот факт, что "всемирная паутина" (World-Wide Web) изобретена именно в ЦЕРНе, а не в рамках гораздо более мощной компьютерной индустрии.

Прогресс в технологии ускорителей заряженных частиц, достигнутый в рамках фундаментальных исследований, направленных на изучение строения вещества, делает своевременным рассмотрение возможности применения ускорителей протонов для управления новым типом ядерных систем, обладающих рядом перспективных свойств.

Сегодня мировое сообщество поставлено перед необходимостью решения чрезвычайно сложной проблемы — производства энергии в масштабах, необходимых для обеспечения экономического роста без нарушения экологического баланса планеты. Массовое применение органического топлива позволило западному миру достичь беспрецедентного уровня благосостояния. Однако, если и остальная часть населения Земли применит ту же энергетическую политику, нашу планету будут ожидать серьезные проблемы. Существует, таким образом, некий моральный долг развитых стран по предоставлению всему миру новых источников энергии, позволяющих минимизировать сопутствующие производству энергии эффекты глобального потепления и загрязнения.

Решение этой проблемы будет без сомнения результатом фундаментальных научно-исследовательских работ (НИР), и ядерная энергетика (ЯЭ) должна быть неотъемлемой частью этих НИР. Современная программа развития ЯЭ встречает постоянно растущую оппозицию как в Европе, так и во всем остальном мире, обусловленную,

¹ В переводе сохранен авторский термин EA — Energy Amplifier, русскоязычным аналогом которого является ЭЛЯУ — электроядерная установка.

главным образом, тремя причинами: а) возможностью применения ЯЭ для военных целей и опасением распространения ядерного оружия; б) опасением серьезных аварий, таких как в Чернобыле (1986 г. — авария с разгоном на мгновенных нейтронах) и на "Три-Майл-Айленд" (1979 г. — авария с потерей теплоносителя, приведшая к расплавлению активной зоны); в) проблемой замыкания топливного цикла (обращение с отходами ядерной энергетики: в настоящее время серьезно рассматривается лишь глубокое геологическое захоронение).

Вполне очевидно, что без этих недостатков ЯЭ была бы идеальным решением проблемы. ЯЭ не выделяет ни газов, ответственных за парниковый эффект, ни химических загрязнителей (окислы азота, серы и др.) и выделяет меньше радиоактивности, чем угольные станции (продукты сгорания угля содержат уран и торий). Таким образом, сегодня перед учеными стоит проблема: можно ли изменить процесс производства ядерной энергии таким образом, чтобы сделать его приемлемым для общества? ЯЭ является областью, в которой серьезных фундаментальных НИР не велось с конца 1950-х гг., когда первые гражданские атомные электростанции были введены в эксплуатацию. Разумеется, проводились многочисленные усовершенствования конструкции, главным образом, в сторону повышения безопасности, однако, как мы вынуждены констатировать сегодня, подобных мер оказалось недостаточно.

Концепция ЕА предложена К. Руббиа и его группой именно как ответ на этот вопрос. Представленная в работе версия ЕА оптимизирована на исключение производства ядерных отходов, поскольку в западном мире именно проблема отходов является в настоящее время наиболее острой. Для развивающихся стран, таких как Китай или Индия, где практически нет ядерных отходов, более оптимальной может быть версия ЕА, ориентированная на производство энергии с учетом требований конкретной страны и с минимизацией ядерных отходов.

2. Ядерные отходы

Трансурановые изотопы (ТУИ) и продукты деления (ПД) являются двумя основными компонентами ядерных отходов, составляющими соответственно 1,1 и 4 %

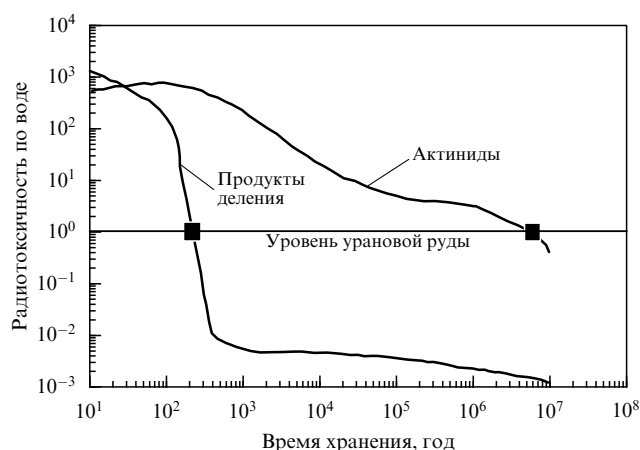


Рис. 1. Зависимость от времени потенциальной радиотоксичности (по отношению к урановой руде) двух основных компонентов ядерных отходов для отработавшего топлива реактора PWR, рассчитанная по программе ORIGEN 2.

массы отработавшего ядерного топлива. ТУИ образуются в результате радиационного захвата нейтронов в топливе и могут быть уничтожены только делением, в то время как ПД накапливаются в результате деления тяжелых ядер и могут быть уничтожены только радиационным захватом нейтронов и, следовательно, для уничтожения компонентов ядерных отходов должны применяться различные методы. Поскольку долговременная радиотоксичность отходов (рис. 1) обусловлена в основном ТУИ, то ЕА оптимизирован именно на их эффективное уничтожение.

3. Усилитель энергии

ЕА представляет собой подкритическую систему с быстрым спектром нейтронов, управляемую протонным ускорителем (рис. 2). Детальное описание ЕА можно найти в [1]. Одной из главных особенностей установки является наличие 10^4 т расплавленного свинца, используемого в качестве мишени для производства нейтронов при бомбардировке протонами, в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя, снимающего

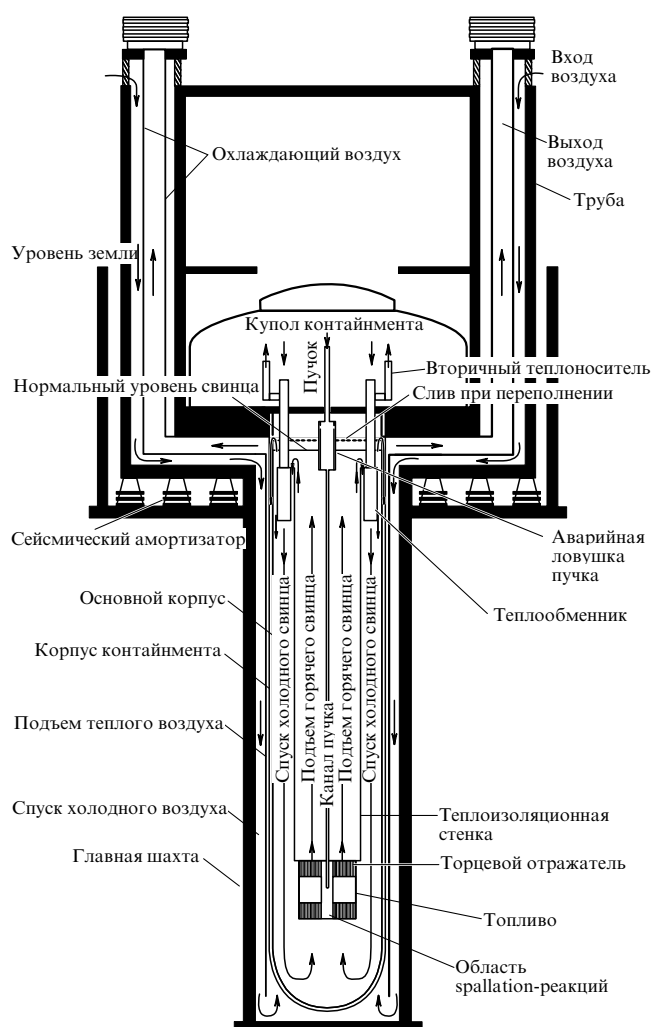


Рис. 2. Принципиальная схема стандартного блока ЕА тепловой мощностью 1500 МВт. Высота корпуса ~ 25 м, диаметр ~ 6 м. Пучок протонов вводится вертикально по вакуумной трубке для производства spallation-нейтронов на уровне активной зоны.

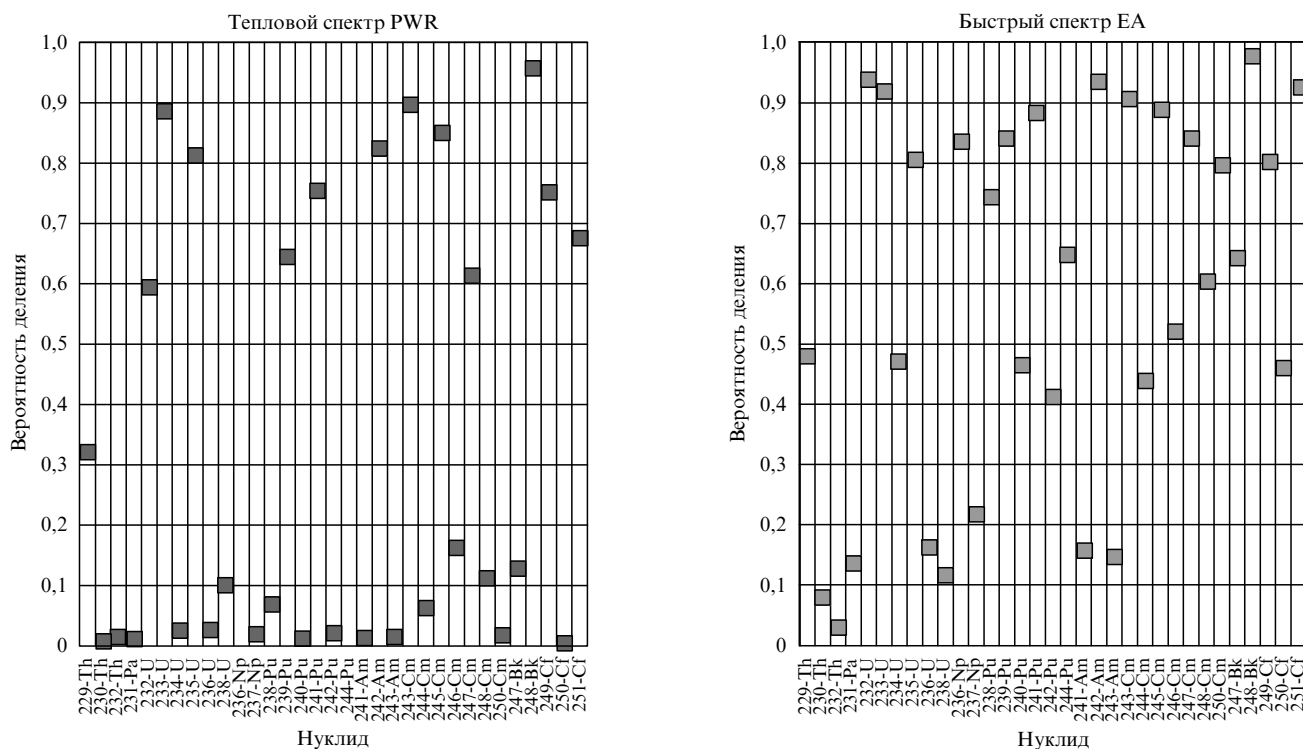


Рис. 3. Вероятности деления в актинидах для теплового и быстрого нейтронных потоков. В отличие от теплового нейтронного потока в быстром потоке все ТУИ могут делиться.

выделяющееся тепло посредством естественной циркуляции, и в качестве барьера выходу радиоактивности.

3.1. Почему быстрые нейтроны?

Свинец выбран в качестве замедлителя нейтронов для получения как можно более жесткого нейтронного спектра, поскольку быстрые нейтроны могут инициировать деление во всех ТУИ. В быстром нейтронном спектре ЕА все ТУИ могут делиться, тогда как в тепловом спектре реакторов PWR (водо-водяной энергетический реактор, российский аналог — ВВЭР) многие ТУИ не делятся и накапливаются как отходы (рис. 3).

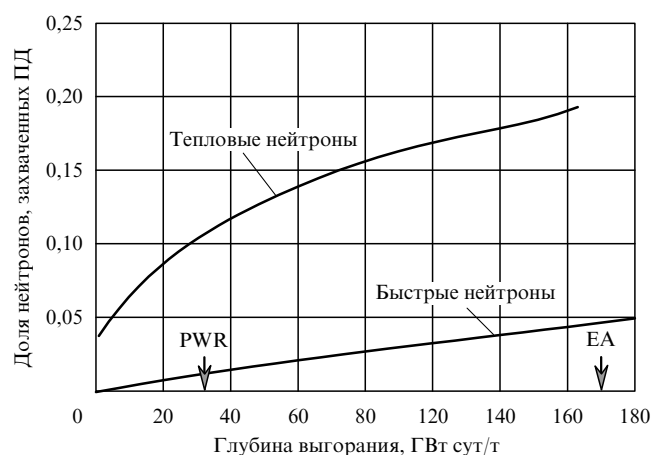


Рис. 4. Доля нейтронов, захваченных продуктами деления в быстром и тепловом нейтронных потоках как функция выгорания. Отмечены максимальная глубина выгорания в PWR и глубина выгорания, предполагаемая в ЕА.

Кроме того, поскольку сечение захвата для быстрых нейтронов в ПД меньше, чем для тепловых (рис. 4), а поглощение в ПД является основным фактором, лимитирующим глубину выгорания топлива, в системах с быстрым спектром эффективность использования ядерного топлива намного выше, чем в PWR. В частности, в системах с быстрым спектром возможно достижение глубины выгорания порядка 150 ГВт сут/т (более высокая глубина выгорания ~ 200 ГВт сут/т была получена в быстром реакторе EBR2 Аргонской национальной лаборатории).

3.2. Подкритичность и ускоритель

Предлагаемая система [1] имеет коэффициент размножения нейтронов $k \sim 0,98$. Постоянство ядерной реакции деления обеспечивается присутствием внешнего нейтронного источника, питаемого протонным пучком. Рабочее состояние системы далеко от критичности во все время эксплуатации, т.е. сама конструкция установки гарантирует невозможность аварии типа Чернобыльской. Значение традиционного коэффициента размножения самой системы k_{eff} (когда пучок отключен) даже ниже, чем значение k (приблизительно 0,97). Умножение энергии системой, определенное как отношение энергии, производимой ЕА, к энергии пучка, может быть выражено как $G_0/(1 - k)$, где G_0 — константа, характеризующая процесс взаимодействия протонов с мишенью, приводящий к "скалыванию" нейтронов с внешних оболочек ядер мишени (spallation-реакция). Этот параметр был исследован в эксперименте FEAT (First Energy Amplifier Test) [2] в ЦЕРНе, где было достигнуто понимание процессов, приводящих к энергетическому выигрышу, и показано, что величина выигрыша не зависит ни от мощности пучка, ни от энергии протонов (для области

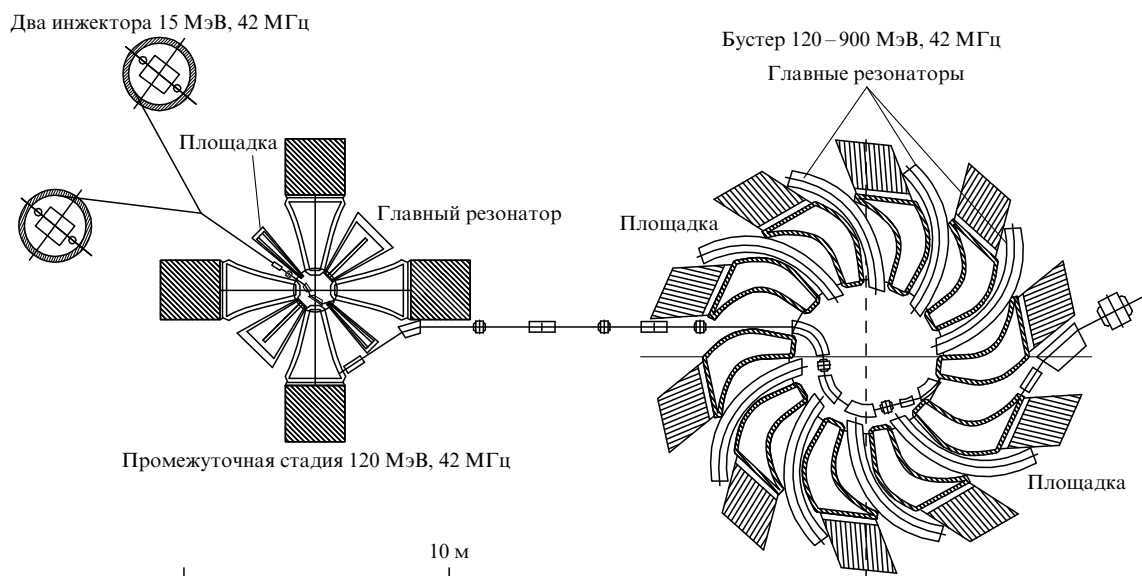


Рис. 5. Схема циклотрона с большим током, предложенного для управления ЕА с коэффициентом размножения $k = 0,98$ [1].

энергий выше 900 МэВ). Этот вывод является весьма важным, поскольку он означает возможность применения ускорителей сравнительно небольших размеров (рис. 5). Специалисты пришли к единому выводу, что существующая технология как линейных ускорителей, так и циклотронов [3], может обеспечить требуемую мощность пучка (от 10 до 20 мА при энергии 1 ГэВ). Вывод сделан на основе анализа действующих ускорителей и проектов, разрабатываемых в различных странах:

- циклотрон PSI (Швейцария), работающий в настоящее время с параметрами: ток 1,4 мА, энергия частиц 500 МэВ, энергия пучка 0,826 МВт [4];

- протонный линейный ускоритель в Лос-Аламосе (LANL), работающий с параметрами: 1,5 мА, 0,8 ГэВ, 1 МВт [5];

- в США и в Европе разработаны проекты линейных ускорителей протонов для производства трития: TRISPAL [6] в CEA (Франция), 40 мА, 600 МэВ, 24 МВт и APT [7] в LANL (США), 100 мА, 1 ГэВ, 100 МВт. Хотя в настоящее время задача производства трития не стоит на повестке дня, разработка проектов продолжается для других областей применения;

- в Японии также рассматривают протонный ускоритель большой мощности как часть программы нейтронных исследований [8].

Параметры ускорителя для управления ЕА являются разумной экстраполяцией параметров, уже достигнутых современной ускорительной технологией.

На практике выбор ускорительной технологии может быть связан со стратегией применения ЕА. Если задачей ЕА является уничтожение отходов одной станции на самой площадке АЭС, то предпочтение следует отдать циклотрону малой мощности (см. рис. 5) (отсутствие необходимости расширять площадку АЭС, простота контроля и высокая безопасность ускорителя, в конечном счете, реализуются в более высокой экономичности).

Ряд других технических аспектов свидетельствуют о преимуществе циклотронов по сравнению с линейными ускорителями:

- в циклотронах возможно достижение высокого КПД (50 %), поскольку большая часть высокочастотной мощности передается пучку, а потери в меди сравнительно малы. Современная технология ВЧ резонаторов позволяет получить КПД по ВЧ до $\sim 70\%$. Энергия, расходуемая в магнитах и других элементах, мала по сравнению с энергией, потребляемой ВЧ резонаторами;

- нет необходимости использовать сверхпроводящие резонаторы, что упрощает конструкцию циклотронов. В сверхпроводящем линейном ускорителе (ЛУ) линейные резонаторы с ниобиевым покрытием, аналогичные разработанным в ЦЕРНе, могут использоваться только для значений скорости $\beta = v/c$ выше примерно 0,7. Работа в области более низких значений β требует разработки новой технологии резонаторов;

- в "теплых" вариантах ЛУ КПД мал, и малая апертура (диаметр канала ускорителя) представляет проблему с точки зрения потерь пучка, которые к тому же не являются локализованными. В циклотронах апертура магнита сравнительно большая (7–8 см), и потери пучка могут быть существенными только в канале вывода и транспортировки пучка. Главной задачей является достижение эффективности вывода $\geq 99,9\%$. Однако даже если потери окажутся выше ожидаемых, активироваться будет лишь ограниченная область установки. Большинство элементов конструкции останутся доступными сразу после остановки циклотрона (как в случае циклотрона PSI);

- надежность может быть выше, чем в протонных ускорителях, которые требуют значительно большего числа систем, контролируемых параметрами ускорителя (надежность существенно снижается с ростом количества отдельных элементов конструкции).

Важным результатом эксперимента FEAT является практическое обоснование разработанного в ЦЕРНе группой ЕЕТ математического моделирования процесса умножения энергии в подкритической системе, управляемой ускорителем. Это дает уверенность в правильности выбора основных параметров установки, в которой на

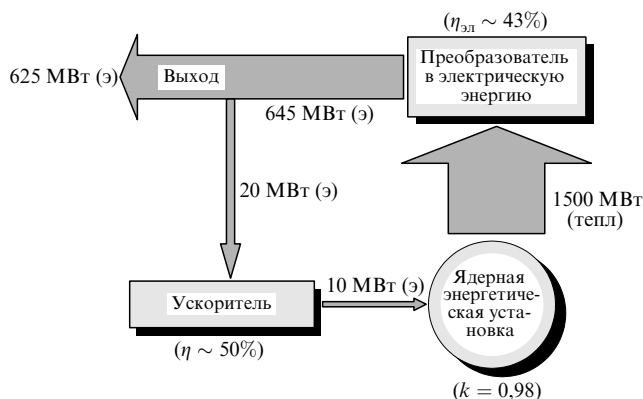


Рис. 6. Схема производства энергии в стандартном ЕА, предложенная в [1].

питание ускорителя расходуется менее 5 % вырабатываемой электрической энергии (рис. 6).

3.3. Протонная мишень

Нейтроннопроизводящая мишень должна обеспечить максимальный выход нейтронов при бомбардировке протонами за счет spallation-реакции, быть прозрачной для нейтронов и в то же время выдерживать протонные пучки мощностью 10–20 МВт. С учетом этих требований расплавленный свинец является практически идеальным материалом. Кроме того, он обладает превосходными термодинамическими свойствами и может существенно упростить проблему отвода тепла от мишени. Тенденция к применению жидких мишеней прослеживается в настоящее время во многих проектах нейтронных источников (например, в проектах ESS [9] и SNS [10] разрабатываются жидкие ртутные мишени, а в SINQ [11] планируется переход на жидкую свинцово-висмутую мишень). Вольфрам хотя и обладает хорошими характеристиками по выходу нейтронов, однако не может считаться подходящим материалом из-за поглощения нейтронов и активации. Кроме этого, из-за очень высокой температуры плавления (3422 °C) он может использоваться только в твердой форме, а его высокая хрупкость в области температур 600–700 °C может привести к разрушению, а в случае импульсного источника даже к взрыву мишени.

По нейтронно-физическим характеристикам мишени как с жидким свинцом, так и с жидкой эвтектикой свинец-висмут (Pb-Bi) удовлетворяют требованиям ЕА. Смесь Pb-Bi имеет преимущество из-за более низкой рабочей температуры и может быть выбрана на первом этапе для демонстрационного ЕА. Максимальная температура окна между мишенью и вакуумным трактом ускорителя для Pb-Bi системы при токе пучка 6 мА и энергии протонов 600 МэВ составляет примерно 500 °C. Такая температура допускает применение традиционных конструкционных материалов, в частности, ферритных сталей с содержанием хрома около 9 %. Переход к чистому свинцу повысит температуру окна примерно на 200 °C, что потребует проведения обширных НИР по созданию новых конструкционных материалов.

Поскольку в Pb-Bi мишени образуется значительно больше радиотоксичных изотопов (^{210}Po), чем в чисто свинцовой, в долгосрочной перспективе предпочтительным является применение свинцовых мишеней. Мы

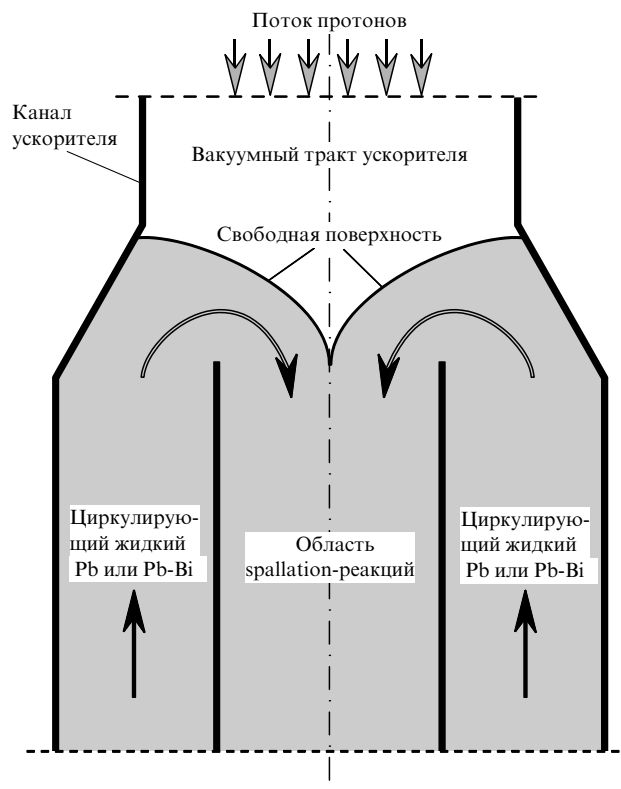


Рис. 7. Эскиз безоконного раздела между ускорителем и нейтронно-производящей мишенью. Благодаря низкому давлению паров свинца, расплавленный свинец может находиться в прямом контакте с вакуумом пучка. Холодная ловушка (не показана) может захватывать остаточный пар.

отсылаем читателя к работе [1, с. 77–82], где этот вопрос подробно обсуждается. Предполагается, что в результате НИР будут разработаны конструкционные материалы, устойчивые к высоким температурам, в том числе с точки зрения коррозии.

В настоящее время интенсивные НИР по проблемам мишени проводятся в Европе. Особенно активно работает в этой области группа Benchmark Working Group, объединяющая 16 институтов [12].

Все проекты мишеней включают в себя разработку конструкции окна между ускорителем и мишенью. Очень низкое давление насыщенного пара чистого свинца делает возможным прямой контакт мишени с вакуумным трактом ускорителя, что открывает перспективы создания безоконного проекта свинцовой мишени [13] (рис. 7).

3.4. Уничтожение ядерных отходов: ТУИ

Для ЕА общая стратегия состоит в том, чтобы использовать в качестве топлива смесь ТУИ с торием, в отличие от топлива из смеси урана и плутония, как предполагается в быстрых реакторах, таких как "Суперфеникс".

Наличие внешнего источника нейтронов с ускорителем, а также быстрый спектр нейтронов благодаря применению свинца в качестве замедлителя обеспечивают высокую гибкость выбора топлива в подкритической установке. По причинам, изложенным далее, применение тория более предпочтительно по сравнению с плутонием. Чистый торий не делится, однако ^{233}U , образующийся при захвате нейтронов в ^{232}Th , делится и

может производить энергию при делении. На практике при запуске системы необходима загрузка делящегося материала, и для этой цели годятся любые делящиеся материалы: ^{233}U из предыдущей загрузки ЕА, ^{235}U , извлеченный из природного урана, оружейный ^{239}Pu или просто ТУИ, которые являются основной частью уничтожаемых отходов. Таким образом, в ЕА возможно уничтожение ТУИ делением с получением энергии. Это делает метод экономически привлекательным. Энергия, содержащаяся в ТУИ выгруженного из реактора PWR топлива, составляет примерно 40 % энергии, выработанной за время выгорания этого топлива в PWR.

Торий является привлекательным топливом, поскольку он существует в сравнительно больших количе-

ствах в земной коре (по меньшей мере, в пять раз превышающих запасы урана). Кроме того, природный торий состоит из одного изотопа ^{232}Th , так что в ЕА может быть использован весь природный торий. По сравнению с ним ^{235}U , используемый в PWR, содержится в природном уране в количестве всего лишь 0,7 %. Торий отделяют от трансурановых изотопов примерно пять нейтронных захватов. Поэтому он легко может работать в таком режиме, когда уничтожается больше ТУИ, чем образуется, с низкими равновесными концентрациями ТУИ.

Легко видеть, почему ториевые системы могли бы быть более эффективны при уничтожении ТУИ, чем урановые. Высокие равновесные концентрации плутония (15 %) в урановых системах (рис. 8) приводят к необходимости исключительно высокого содержания плутония, что существенно усложняет проблемы управления системой, тогда как в ЕА равновесные концентрации порядка 10^{-5} (рис. 9) естественным образом обеспечивают высокую скорость сгорания при разумных концентрациях ТУИ.

Исследование [15], проведенное для испанского правительства, на примере практической установки тепловой мощностью 1500 МВт показало, что ЕА может уничтожить до 298 кг ТУИ на 1 ГВт год выработанной тепловой энергии. Для сравнения укажем, что один реактор PWR производит 123 кг ТУИ на 1 ГВт год.

Предполагается, что переработка, необходимая для извлечения ТУИ из облученного топлива, будет намного проще, чем переработка при извлечении плутония из облученного топлива для изготовления МОХ-топлива, как это делается, например, на фабрике La Hague

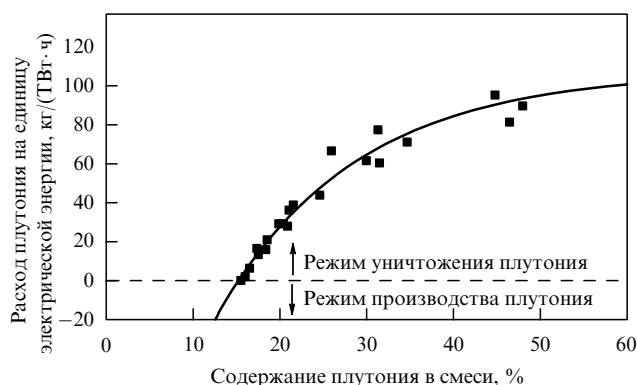


Рис. 8. Расход плутония на единицу электрической энергии в уран-плутониевом быстром реакторе (CAPRA [14]) как функция концентрации плутония.

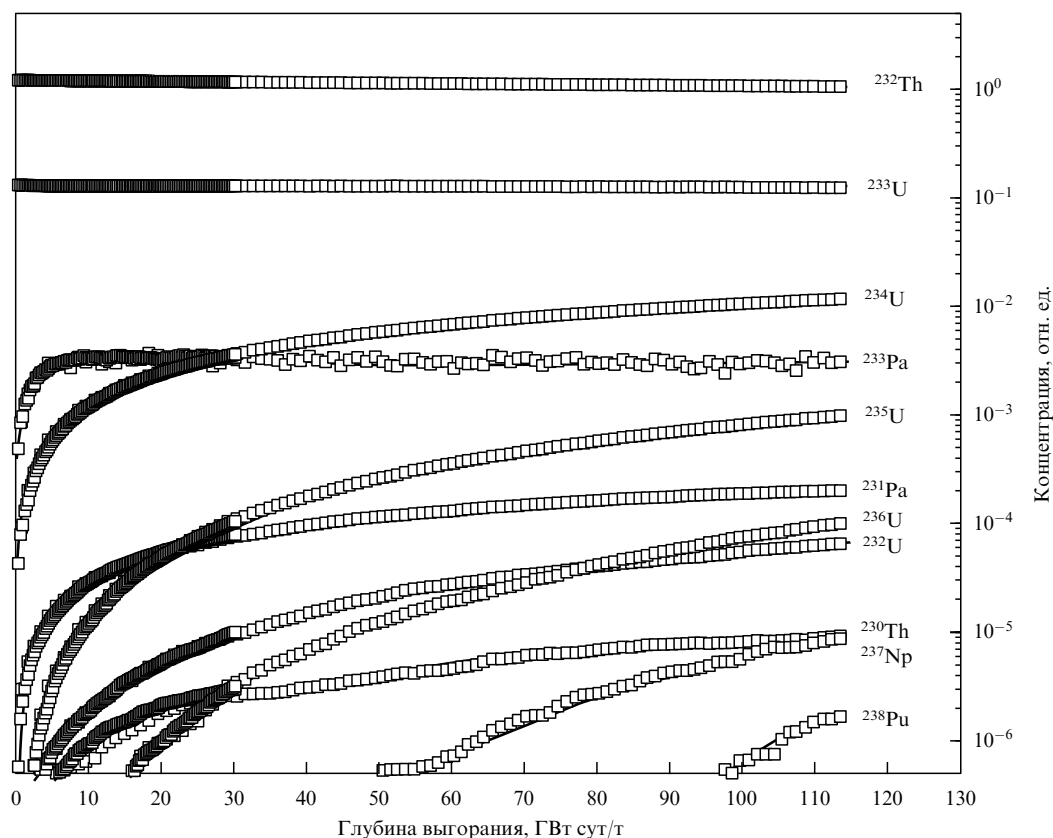


Рис. 9. Содержание основных элементов в топливе ЕА как функция выгорания [1].

(PUREX-процесс). В пироэлектрическом методе переработки [16], разработанном в Аргоннской национальной лаборатории в США, все ТУИ собираются на одном электроде. Такой процесс вполне приемлем, поскольку все ТУИ делятся в спектре ЕА и нет необходимости их отделения друг от друга.

3.5. Почему для использования тория выбрана не критическая система?

При создании в недалеком прошлом критических реакторов на ториевом топливе² ожидалось, что выход вторичных нейтронов при делении ^{233}U во всей энергетической области будет достаточно высок и будет приближаться к выходу нейтронов при делении ^{239}Pu на быстрых нейтронах. Однако при образовании ^{233}U негативную роль играет ^{233}Pa , имеющий большое сечение захвата нейтронов, что приходится компенсировать высокими концентрациями делящихся нуклидов. К тому же, при делении ^{233}U образуется больше ^{135}Xe (прямой выход 1,4 % для ^{233}U по сравнению с 0,3 % для ^{235}U) и предшественников самария (^{147}Nd , ^{149}Pm), чем при делении ^{235}U . Эти изотопы вносят существенный вклад в полное поглощение нейтронов продуктами деления. В середине топливной кампании они ответственны более чем за 50 % полного поглощения в ПД.

Кроме того, эффективная доля запаздывающих нейтронов (β_{eff}) для ^{233}U вдвое меньше, чем для ^{235}U , что приводит к более жестким границам безопасности. Этот фактор весьма важен для критических систем, а для конструкции или эксплуатации подкритических установок, управляемых ускорителем, он не имеет абсолютно никакого значения. В критической системе эффективный коэффициент размножения нейтронов k_{eff} поддерживается равным единице органами управления и имеющимися обратными связями. Безопасность системы определяется вероятностью выхода (или не выхода) системы в надкритическое состояние ($k_{\text{eff}} > 1$), как это было в Чернобыле в 1986 г. Вероятность такого события может быть очень мала, однако она все же не нулевая. В подкритической системе эффективный коэффициент размножения меньше единицы, и это определяется ее конструкцией. Таким образом, проблема безопасности подкритической системы переводится в детерминистическую категорию. Система остается подкритической все время, и авария типа Чернобыльской попросту невозможна.

Более того, в критическом реакторе, какое бы топливо не использовалось, урановое или ториевое, добавление ТУИ в топливо приводит к уменьшению β_{eff} , что снижает уровень безопасности. В подкритических системах, как отмечалось выше, значение β_{eff} несущественно.

² Elk River Reactor: демонстрационный реактор с кипящей водой тепловой мощностью 58 МВт, использующий $^{232}\text{ThO}_2$ - ^{235}U (1962–1968), остановлен из-за коррозионных разрушений в стенках бака; Indian Point No 1 Reactor: реактор типа PWR электрической мощностью 270 МВт, использующий $^{232}\text{ThO}_2$ - ^{235}U , остановлен из-за того, что уран с обогащением 95 % слишком дорог; высокотемпературный газоохлаждаемый реактор электрической мощностью 40 МВт, использующий $^{232}\text{ThO}_2$ - ^{235}U , Peach Bottom, США (1966–1974); легководный реактор-размножитель электрической мощностью 60 МВт, использующий ^{232}Th - ^{233}U , Shippingport, США (остановлен в 1982 г. после достижения глубины выгорания 60 ГВт сут/т).

3.6. Уничтожение ядерных отходов: долгоживущие продукты деления (ДПД)

В таких системах, как ЕА, в которых уничтожаются ТУИ, долговременная (≥ 500 лет) радиотоксичность определяется долгоживущими продуктами деления (рис. 10). Этот остаточный уровень радиотоксичности можно было бы считать допустимым, так как он ниже уровня радиотоксичности продуктов сгорания угля, соответствующего такому же количеству энергии, вырабатываемому на угольных станциях. Однако поскольку основные ДПД (^{99}Tc и ^{129}I) растворимы в воде и поэтому имеется ненулевая вероятность заражения биосферы в долговременной перспективе с трудно предсказуемыми последствиями, может быть разумным их уничтожение.

Для этой цели Карло Руббиа предложил использовать концепцию Adiabatic Resonance Crossing (ARC) [18] (рис. 11). При реализации принципа ARC повышается вероятность резонансного поглощения нейтронов ядрами при превращении, например ^{99}Tc , имеющего период полураспада $2,1 \times 10^5$ лет, в ^{100}Tc , который быстро распадается ($T_{1/2} \sim 15,8$ с) в стабильный ^{100}Ru . Эксперимент TARC, проводившийся в ЦЕРНе [19], показал, что использование специальной кинематики нейтронов (малая длина упругого рассеяния $\lambda \sim 3$ см и малые потери энергии при упругом рассеянии) в чистом свинце, наиболее прозрачном для нейтронов из всех

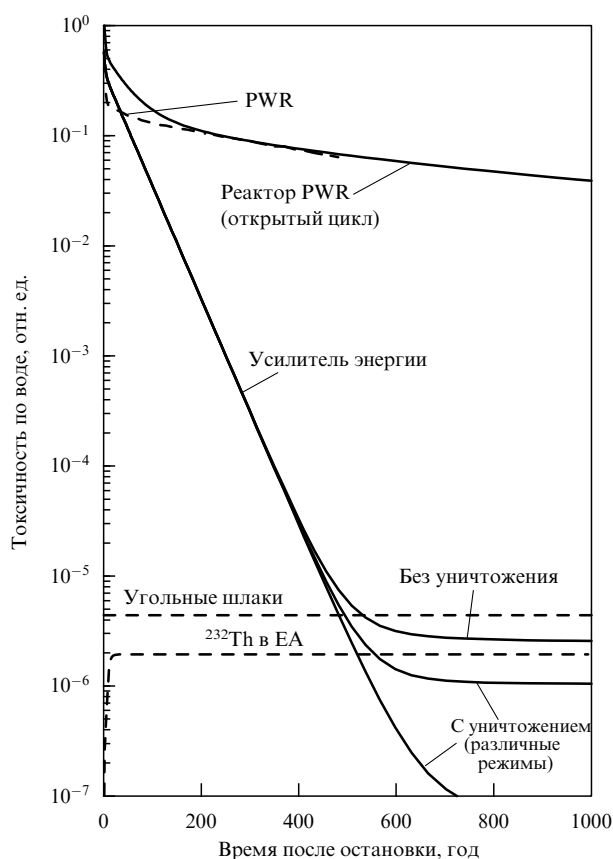


Рис. 10. Оценка потенциальной радиотоксичности ядерных отходов PWR, ЕА и угольных станций, показывающая, что в ЕА долговременная радиотоксичность может быть на четыре порядка ниже, чем в PWR в открытом топливном цикле (см. [17]). Асимптотический характер после 600 лет обусловлен ДПД. Отметим, что радиотоксичность отработавшего MOX-топлива реактора PWR была бы примерно в 10 раз выше, чем топлива обычного PWR.

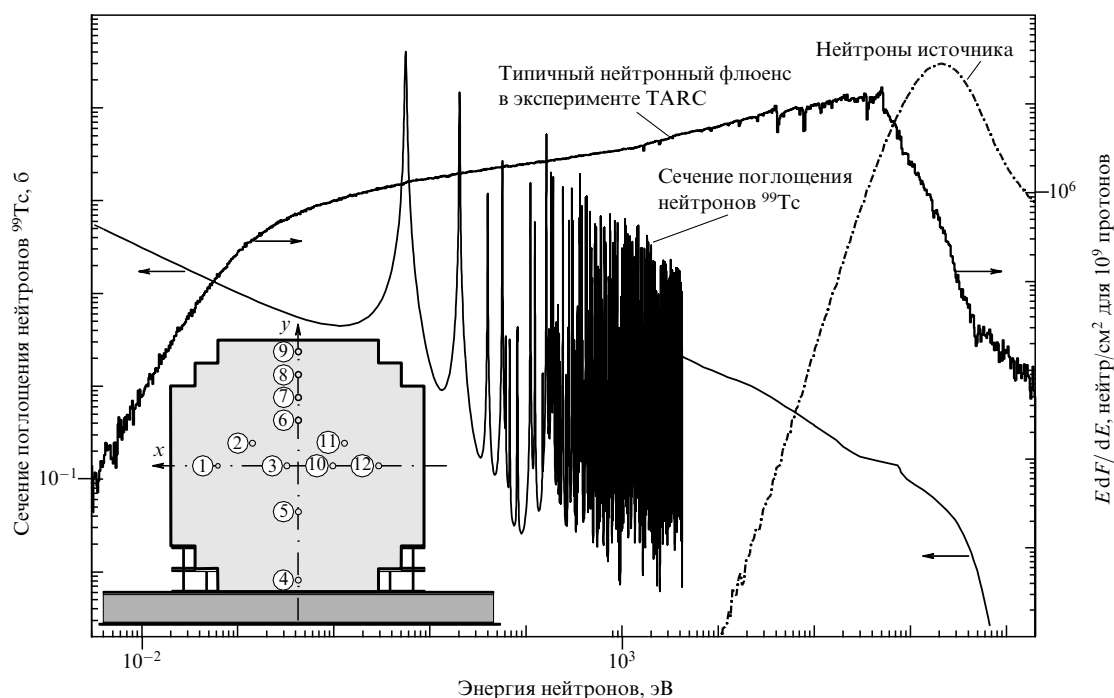


Рис. 11. Иллюстрация принципа ARC, показывающая, как наличие свинца трансформирует энергетическое распределение нейтронов spallation-реакции в плоское распределение замедляющихся нейтронов с шагом замедления меньше, чем ширина резонансов, где они могут поглощаться с высокой вероятностью. Слева внизу — принципиальная схема 334-тонной свинцовой сборки TARC.

тяжелых элементов, повышает вероятность нейтронного захвата за счет оптимального использования главных резонансов в сечении нейтронного захвата. Отметим, что ^{129}I и ^{99}Tc , которые исследовались в эксперименте TARC, занимают 95 % объема хранилища класса А для долгоживущих радиоактивных отходов. Результаты эксперимента TARC показывают, что в свинце вблизи активной зоны ЕА возможно уничтожение вдвое большего количества ^{99}Tc и ^{129}I , чем производится за это же время. Тот факт, что трансмутация может быть осуществлена попутно, практически даром, может служить дополнительным стимулом к уничтожению ДПД, несмотря на то, что в этом процессе, в отличие от уничтожения ТУИ, энергия не производится.

3.7. Медицинское применение

Другой важной областью применения принципа ARC является получение изотопов медицинского назначения [17]. Дело в том, что принцип ARC, очень эффективный для уничтожения продуктов деления, можно также использовать для инициирования любых других типов ядерных превращений (например, производство радиоизотопов). Управляемая ускорителем установка, служащая для этой цели и использующая принцип ARC, могла бы стать заманчивой альтернативой ядерным реакторам. Сравнительно малая установка, свободная от всех сложностей эксплуатации критических ядерных реакторов, имеет многие преимущества:

- возможность производства изотопов на месте (прямо в больнице), благодаря малым размерам установки;

- возможность применения более короткоживущих изотопов, дающих существенно более низкую дозу облучения пациента, например, ^{128}I (25 мин) вместо ^{131}I (8 сут);

- исключение длительной (дорогостоящей) транспортировки, более низкие дозы облучения при производстве;

- гибкость выбора источника нейтронов в соответствии с потребностями: от ускорителя с достаточно большим током (циклотрон), например, для широко-масштабного производства $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ($T_{1/2} = 6$ ч) из радиоактивного ^{99}Mo ($T_{1/2} = 65$ ч), до радиоактивных нейтронных источников (получение низкоактивных изотопов). Здесь была с успехом проверена идея использования природного молибдена, содержащего 24,13 % стабильного изотопа ^{98}Mo , для производства ^{99}Mo простым нейтронным захватом вместо извлечения ^{99}Mo из облученного топлива ядерных реакторов.

Эта область приложения принципа ARC рассматривается как весьма важная, и ЦЕРН к настоящему времени получил патент [20] на производство медицинских радиоизотопов по этому принципу.

4. Заключение

Фундаментальные исследования являются источником для разработки и последующего внедрения новых идей, принципов и технологий, которые потенциально могут решить некоторые из наиболее сложных проблем, возникших перед обществом в начале третьего тысячелетия. В частности, ядерная энергетика может внести важный вклад в решение энергетической проблемы, и было бы ошибкой исключать априори эту тематику из фундаментальных научно-исследовательских работ.

Протонный ускоритель, необходимый для управления новыми типами ядерных установок, предназначенных для уничтожения ядерных отходов и производства энергии, может быть создан на базе современной ускорительной техники.

ЕА, основанный на физических принципах, подтвержденных экспериментами в ЦЕРНе, является результатом оптимизационных исследований, проведенных с применением новых расчетных программ, протестированных в экспериментах FEAT и TARC.

ЕА может уничтожить ТУИ делением со скоростью, вдвое превышающей скорость их образования в PWR. Долгоживущие продукты деления, такие как ^{129}I , ^{99}Tc , можно трансмутировать в стабильные нуклиды с использованием принципа ARC, располагая их вокруг активной зоны ЕА.

Эта экспериментальная программа выявила новые возможные приложения концепции ЕА: применение в медицине, для которого ЦЕРН получил собственный патент; исследования по измерению нейтронных сечений, проведенные в ЦЕРНе на установке NTOF [21]. Есть также другие интересные идеи, такие как ядерный двигатель [22] для исследований в космосе. Все это доставило огромное удовлетворение всем участвующим в этом проекте.

Автору хотелось бы выразить благодарность Карло Руббиа, который познакомил его с этой восхитительной областью исследований и поделился с ним своим энтузиазмом, а также S. Buono, Y. Kadi и P. Mandrillon за полезные обсуждения.

Список литературы

1. Rubbia C et al., CERN-AT-95-44-ET (Sept. 29, 1995); Rubbia C, in *Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications: Proc. of the Conf., Las Vegas, NV, July 1994* (AIP Conf. Proc., Vol. 346, Eds E D Arthur, A Rodriguez, S O Schriber) (Woodbury, NY: American Institute of Physics, 1995) p. 44
2. Andriamonje S et al. *Phys. Lett. B* **348** 697 (1995)
3. Mandrillon P et al., High-Intensity Cyclotron Drivers for ADS, EET Group (in press); Schriber S O, Mandrillon P, in *Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 3rd–7th, 1996* Vol. 2 (Ed. H Condé) (Stockholm: Uppsala Univ., 1997) p. 1163
4. Stambach S et al., in *Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 3rd–7th, 1996* Vol. 2 (Ed. H Condé) (Stockholm: Uppsala Univ., 1997) p. 1013
5. Schriber S O, in *Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 3rd–7th, 1996* (Ed. H Condé) (Stockholm: Uppsala Univ., 1997); <http://www.lansce.lanl.gov/>
6. Flament J L "General overview of the trispal project", <http://www.zam.kfa-juelich.de/iff/termine/IWSMT2/Abstract/flament.html>
7. Drell S D "Accelerator Production of Tritium (APT)", JSR-92-310 (Jan., 1992); <http://apt.lanl.gov/index.html>
8. Mizumoto M et al., in *Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications: ADTT'99, Prague, Czech Republic, June 7th–11, 1999*
9. Gardner I S K et al., in *The European Spallation Source: ESS Study*, ESS 97-75-M. Vol. 1st–2nd (March, 1997); <http://www.ess-europe.de/documentation/ESSvol2b.pdf>
10. Kustom R L, in *Proc. of the 20th Intern. Linac Conf., Monterey, CA, USA, Aug. 21st–25, 2000*; eConf (C000821) TU101 (2000); physics/0008212; <http://www.sns.gov/contacts/contacts.htm>
11. "Swiss Spallation Neutron Source SINQ", Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland; <http://sinq.web.psi.ch/>
12. Buono S et al., in *Proc. of the Workshop on Heavy Liquid Metal Thermal-Hydraulics, April 12th–13, 1999, Brasimone, Italy* (Brasimone: ENEA, 1999); <http://www.crs4.it>
13. ANSALDO, CRS4, ENEA, INFN, Energy Amplifier Demonstration Facility, Reference Configuration ANSALDO Summary Report, EA B0.00 1 200 — Rev. 0 (Jan., 1999)
14. Rouault J et al., in *Proc. ANS Topical Meeting on Advances in Reactor Physics, Knoxville, Tennessee, USA, April 11th–15, 1994* (La Grande Park, Ill.: American Nuclear Society)
15. Rubbia C et al., CERN-LHC-97-01-EET (Feb., 1997)
16. Hijikata T et al., in *Proc. of the Intern. Conf. and Technology Exposition on Future Nuclear Systems: Emerging Fuel Cycles and Waste Disposal Options, Global'93, Sept. 12–17, 1993, Seattle, Washington, USA* Vol. 2 (La Grande Park, Ill.: American Nuclear Society, 1993) p. 1074
17. Rubbia C, CERN-AT-95-58-ET (Dec. 29, 1995)
18. Rubbia C, CERN-LHC-97-04-EET (June 22, 1997)
19. Arnould H et al. *Phys. Lett. B* **458** 167 (1999); Arnould H et al., CERN-SL-99-036-EET (July 26, 1999); Report to the European Union, DGXII, EUR 19117 EN
20. "Neutron-Driven Element Transmuter", PCT/EP97/03218
21. Rubbia C et al., CERN-LHC-98-02-EET (May 30, 1998); CERN-LHC-98-02-EET-ADD-1 (June 15, 1998); Abramovich S et al., CERN-SPSC-99-8, CERN-SPSC-P-310 (17 March, 1999)
22. Rubbia C "Report of the Working Group on a Preliminary Assessment of a New Fission Fragment Heated Propulsion Concept and its Applicability to Manned Missions to the Planet Mars", Italian Space Agency, Rome, April 1, 1999; private communication

An accelerator-driven system for the destruction of nuclear waste

J.-P. Revol

CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland

Progress in particle accelerator technology enables the use of the proton accelerator as an effective tool for energy production and nuclear waste destruction. The Energy Amplifier (EA) proposed by Carlo Rubbia and his group — a subcritical fast neutron system driven by a proton accelerator — may prove particularly effective in destroying, through fission, transuranic elements produced by current nuclear reactors. Combined with the Adiabatic Resonance Crossing (ARC) concept recently tested in the TARC experiment at CERN, the EA provides an efficient and cost-effective method for transforming long-lived fission fragments. A number of other application areas (production of radioactive isotopes for medicine and industry; fundamental neutron research, etc.) may benefit from the extension of the ARC concept as well.

PACS numbers: 28.41.Bm, **28.50. – k**, 89.30.Gg

Bibliography — 22 references

Received 3 October 2002