



50 лет применения неразрушающего контроля в науке и технологии обеспечения безопасности ядерных материалов в Лос-Аламосской национальной лаборатории

Джозеф Кузмински, Роберт Рейновски и Мартин Свинхо, Лос-Аламосская национальная лаборатория, Лос-Аламос, шт. Нью-Мексико, США
Пол Сингх, Окриджская национальная лаборатория, Оук-Ридж, шт.Теннесси, США

**13-я Международная конференция «Забабахинские научные чтения»
20-24 марта 2017 г.**

Снежинск, Челябинская область, Российская Федерация

Структура

- Введение
- Гамма-излучение
 - Методы неразрушающего анализа на основе гамма-спектрометрии
 - Низкого разрешения (NaI, LaBr)
 - Пример: Анализ урана (измеритель обогащения)
 - Высокого разрешения (HPGe)
 - Пример: Анализ плутония (FRAM)
 - Тепловое излучение - калориметрия
 - Нейтронное излучение
 - Счетчик нейтронов с перемещающимся источником Cf-252
 - Активный колодезный счетчик нейтронных совпадений (активный и пассивный)
 - Выводы

Введение

- Работы по методам измерений с целью выполнения ядерных гарантий в Лос-Аламосской национальной лаборатории были начаты Бобом Кипиным после его возвращения из МАГАТЭ в 1966 г.
- В 2016-2017 г. Лос-Аламосская национальная лаборатория отмечает 50-ю годовщину работ по ядерным гарантиям.
- В рамках данного выступления будет представлено обсуждение некоторых методов, разработанных и используемых для измерения и контроля ядерных материалов по всему миру.



Методы неразрушающего контроля на основе гамма-спектрометрии – «Измеритель обогащения»

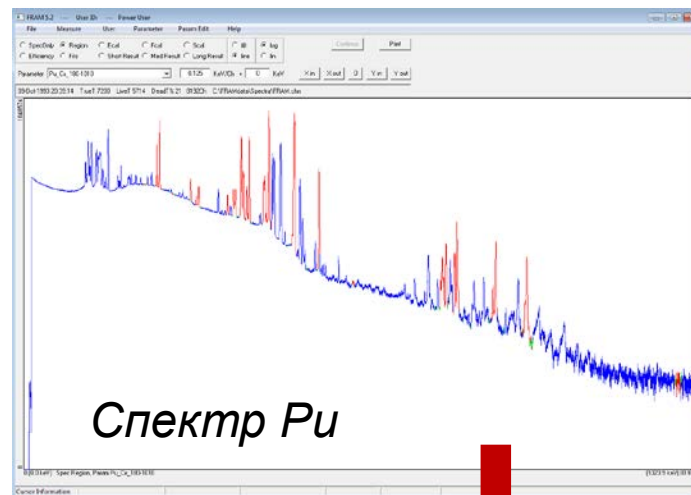
- Анализ изотопного состава образцов материала путем измерения гамма-излучения является, вероятно, лучшим примером практического применения гамма-спектрометрии.
- Данный метод основан на принципе «бесконечно толстого» образца урана и вытекающем из него *принципе* «видимого объема», который определяется относительным расположением измерительного оборудования и образца, коллиматором, детектором и средней длиной свободного пробега гамма-квантов с энергией 186 кэВ в образце.
- Данный метод впервые был использован для измерения UF_6 в транспортных цилиндрах.



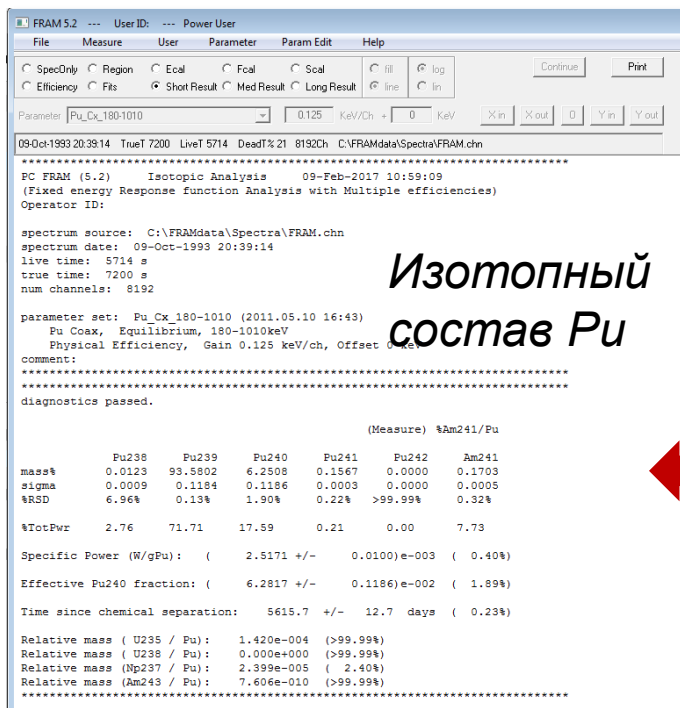
1969

Гамма-спектрометрия высокого разрешения

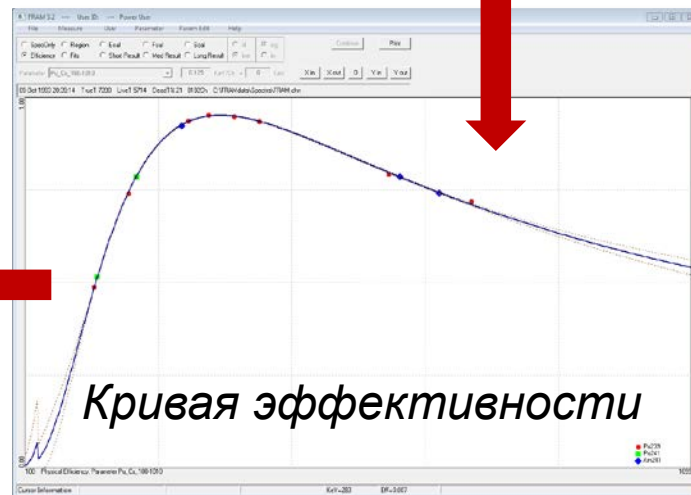
- В программе **FRAM** в качестве исходных данных для определения кривой относительной эффективности и вычисления изотопного состава Pu и U используется непосредственно спектр.



Спектр Pu



Изотопный состав Pu



Кривая эффективности

Калориметрический анализ

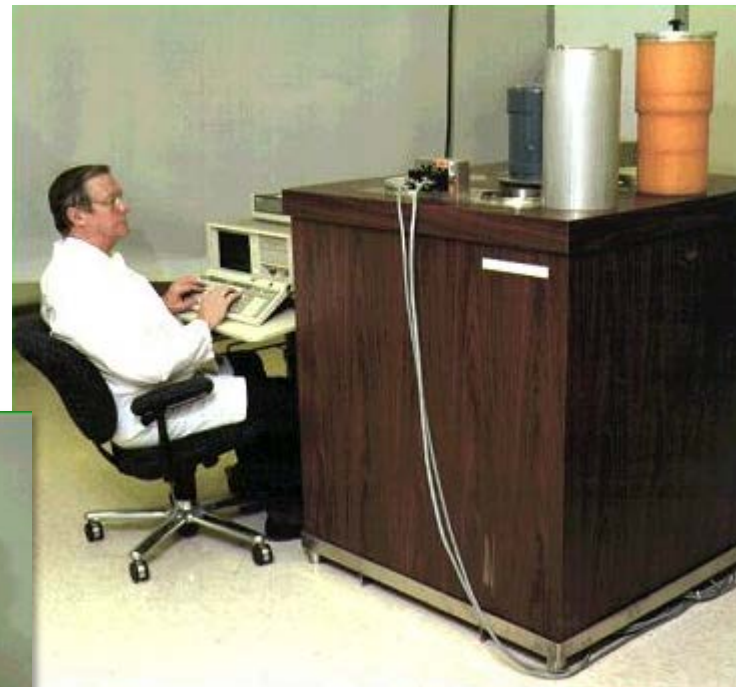
- Калориметрия – это метод измерения количества теплоты.
- Данный метод используют в системе ядерных гарантий, для учета и контроля ядерных материалов, подтверждения данных отправителя и получателя ядерных материалов, контроля технологических процессов и качества и характеристики радиоактивных отходов.
- В рамках учета и контроля ядерных материалов с помощью калориметрического анализа определяют интенсивность тепловыделения (мощность) радиоактивных ядер, анализ также включает в себя калориметрические измерения ядерных материалов.
- Впервые данный метод был использован в 1903 г. для измерения количества теплоты, выделенного радием.

Первый в мире ледяной калориметр был использован зимой 1782-1783 г. Антуаном Лавуазье и Пьером-Симоном Лапласом для определения тепловых эффектов различных химических превращений.

Научно-исследовательские работы по калориметрии



Калориметр для определения стандартных тепловых эффектов



Калориметр с водяной баней



Счетчик нейтронов с перемещающимся источником Cf-252

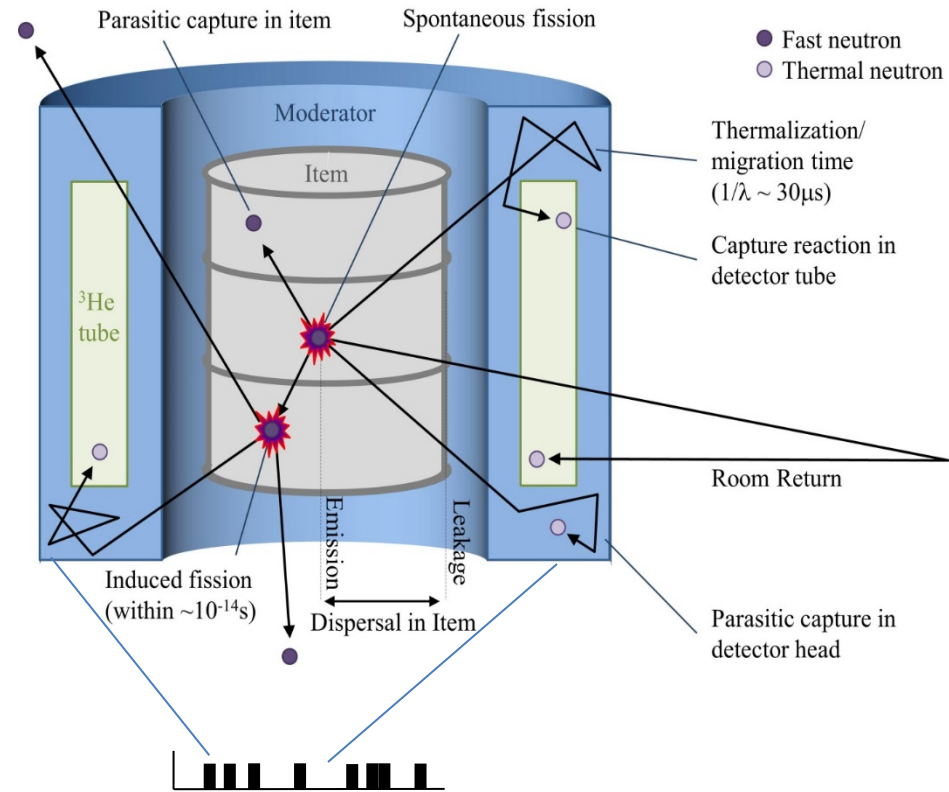
- Источник Cf-252 перемещают между защитой и измерительной камерой с анализируемым образцом.
- Источник размещают для измерения фона и затем, после облучения, для счета запаздывающих нейтронов.
- Стадии облучения и счета повторяются много раз до достижения необходимой точности. Благодаря такому перемещению источника между двумя положениями устройство и получило свое название.
- Для регистрации запаздывающих нейтронов вокруг устройства расположены детекторные трубки. (Лит. 6)



Прецизионность измерения с помощью этого цилиндрического счетчика нейтронов с перемещающимся источником равнялась 0,25% (1σ), точность – 0,5% (1σ) даже несмотря на то, что время измерения (в том числе фона) составило всего 10 минут. Такие показатели были достигнуты благодаря большой загрузке U-235 (1,7 кг) и полый конструкции цилиндрического счетчика.

Пассивный счет нейтронов

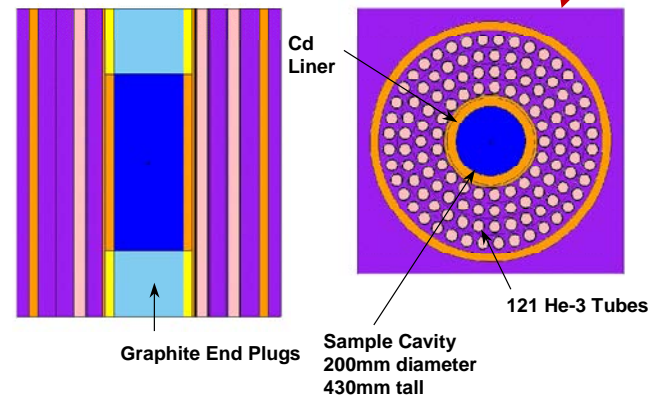
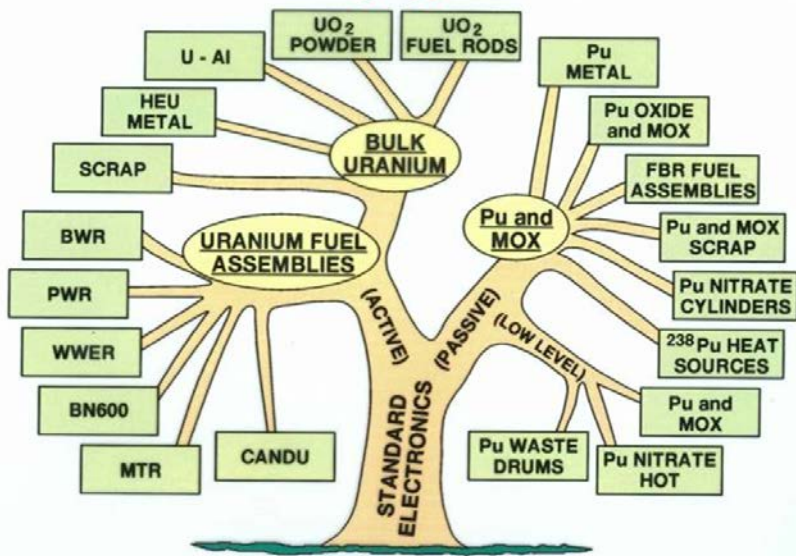
- Вокруг образца Pu расположены детекторы на основе изотопа He-3, размещенные в слое полиэтилена.
- Всплески нейтронов деления можно отличить от одиночных нейтронов, возникших за счет (α, n) реакций, путем измерения степени корреляции в последовательности импульсов.
- При счете общего числа нейтронов регистрируют все нейтроны.
- С помощью пассивного счета нейтронных совпадений измеряют массу и коэффициент размножения (M) Pu.
- Пассивный счет числа многократных нейтронных совпадений позволяет определить массу Pu, M и количество нейтронов, возникших в результате (α, n) реакции. Этот метод хорошо подходит для образцов с примесями.



Поток нейтронных импульсов

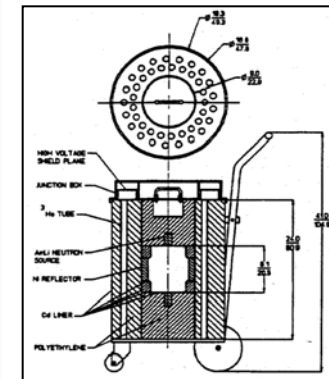
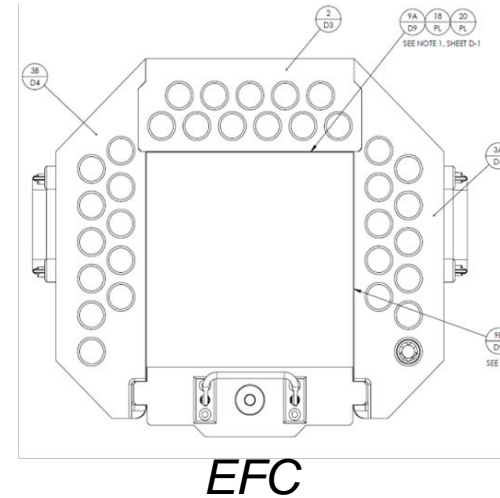
Класс нейтронных детекторов

Neutron Assay Applications Tree

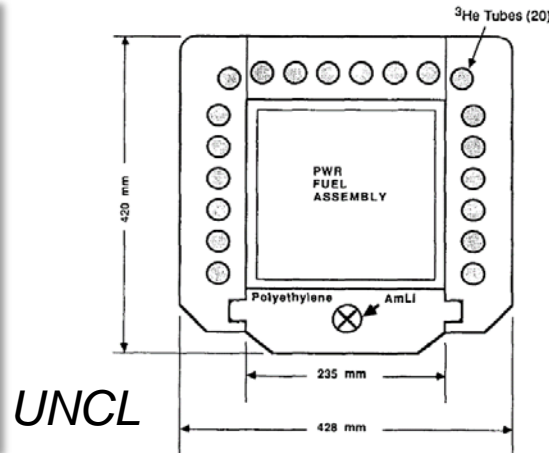


Активные счетчики нейтронных совпадений

- Активный счет нейтронных совпадений: использование америций-литиевого источника нейтронов для инициирования деления в делящемся материале (используется для измерения массы U-235).
- Воротниковый счетчик нейтронных совпадений для урана (UNCL) (1982 г.) для свежих ТВС реакторов типа PWR и BWR.
- Активный колодезный счетчик нейтронных совпадений (AWCC) (1985 г.) для металлического урана и оксида урана.
- Воротниковый счетчик для быстрых нейтронов (EFC) (Евроатом) (2015 г.) для ТВС реакторов типа PWR с выгорающим поглотителем.



AKCC



Измерение радиоактивных отходов



Сверхэффективный счетчик нейтронов (2000 г.)

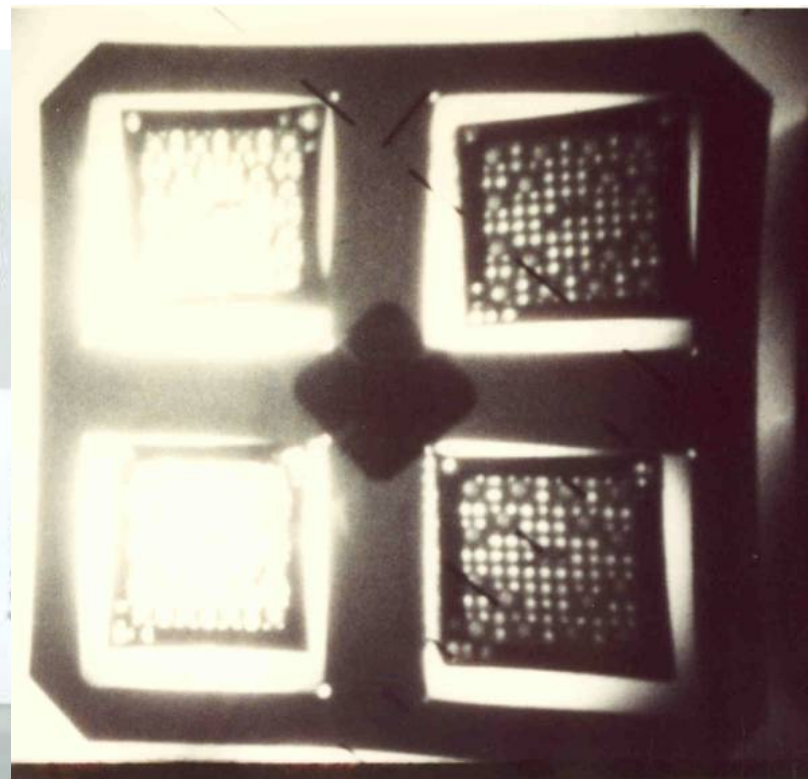
Самый большой счетчик для измерения отходов на предприятии по переработке ОЯТ в Роккашо



WCAS-B

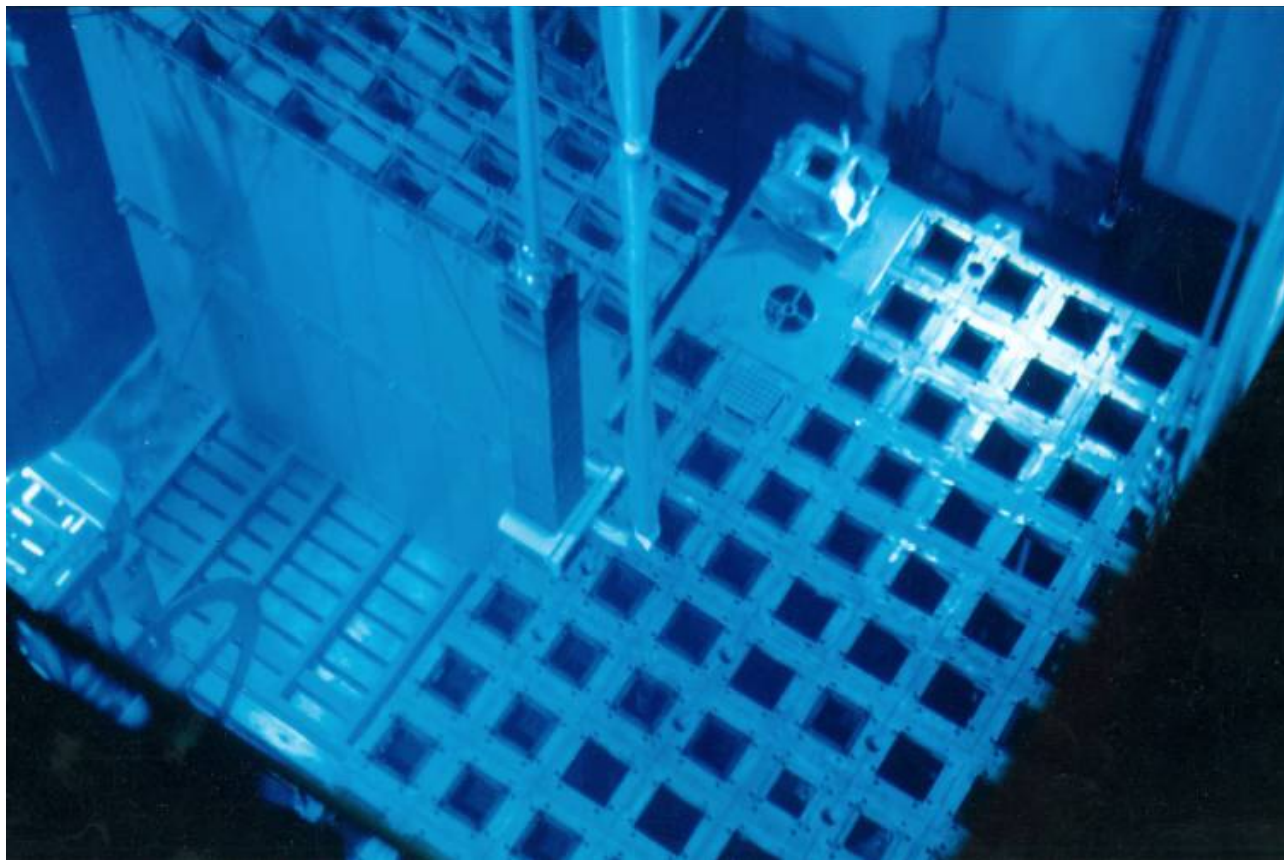
*Испытания при
нагрузении бетонным
блоком
Альбукерке,
шт. Нью-Мексико
Октябрь 2001 г.*

Измерения ОЯТ



Прибор наблюдения черенковского свечения (CVD) для осуществления контроля ОЯТ (примерно 1979 г.)

Вилочный детектор для осуществления контроля ОЯТ – 1978 г.



Детекторы для счета общего количества нейтронов и гамма-квантов для определения выгорания и времени выдержки

Улучшенный счетчик нейтронных совпадений для топлива экспериментального реактора (AEFC) (Лос-Аламос) – 2007 г.



Свинхо



*Испытания в бассейне
выдержки*

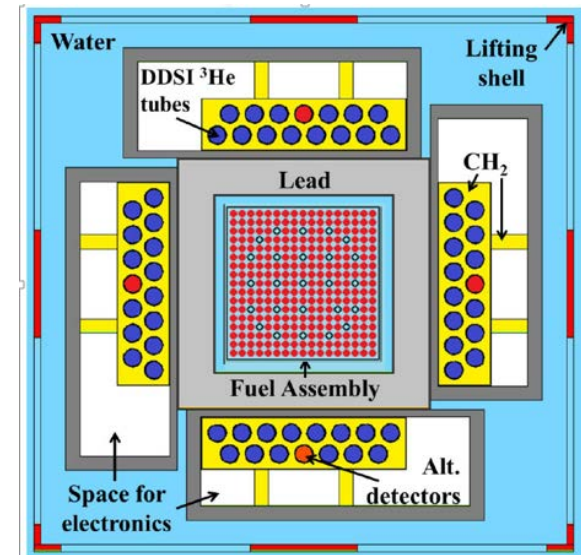
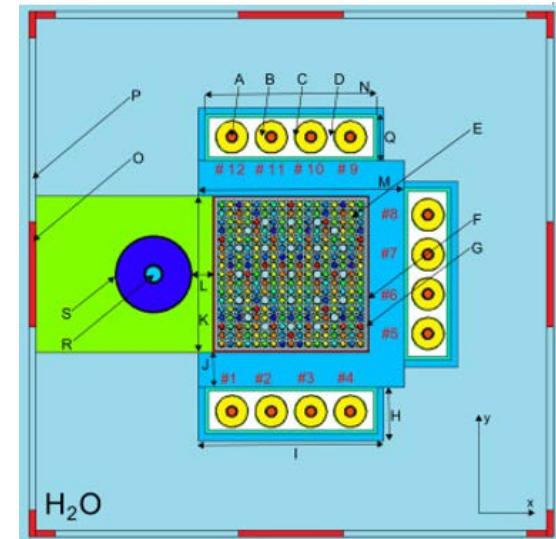


*Калибровка под водой с топливом
для реактора типа MTR*



Современные системы для неразрушающего контроля ОЯТ – 2017 г.

- Обеспечивают измерение начального обогащения, выгорания и времени выдержки и выявление отклонений
- Метод дифференциального затухания: для инициирования деления в топливе используется генератор нейтронов с энергией 14 МэВ.
- Метод дифференциального затухания с «самозондированием»: пассивная регистрация совпадений для нейтронов, замедленных до тепловых энергий и снова попавших в топливо

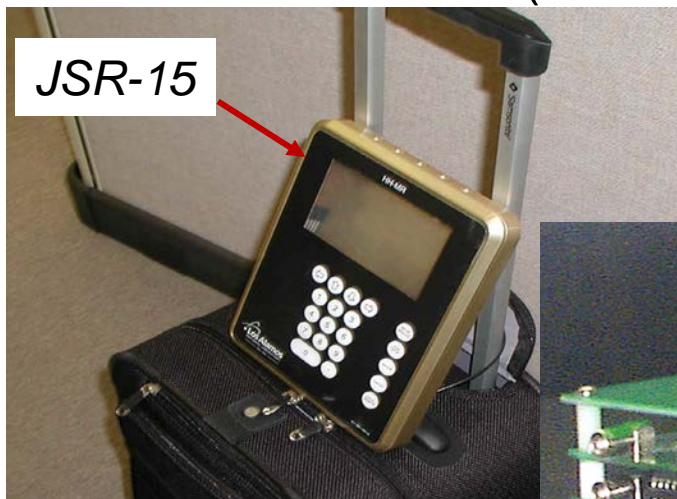


Развитие электронных систем

- многоканальный анализатор
- нейтронные совпадения
- общее количество нейтронов
- общее количество гамма-квантов (поток)



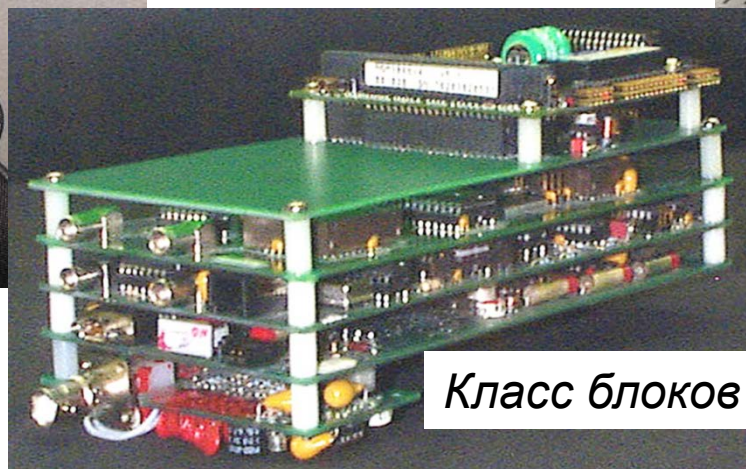
*портативный многоканальный
анализатор*



JSR-15

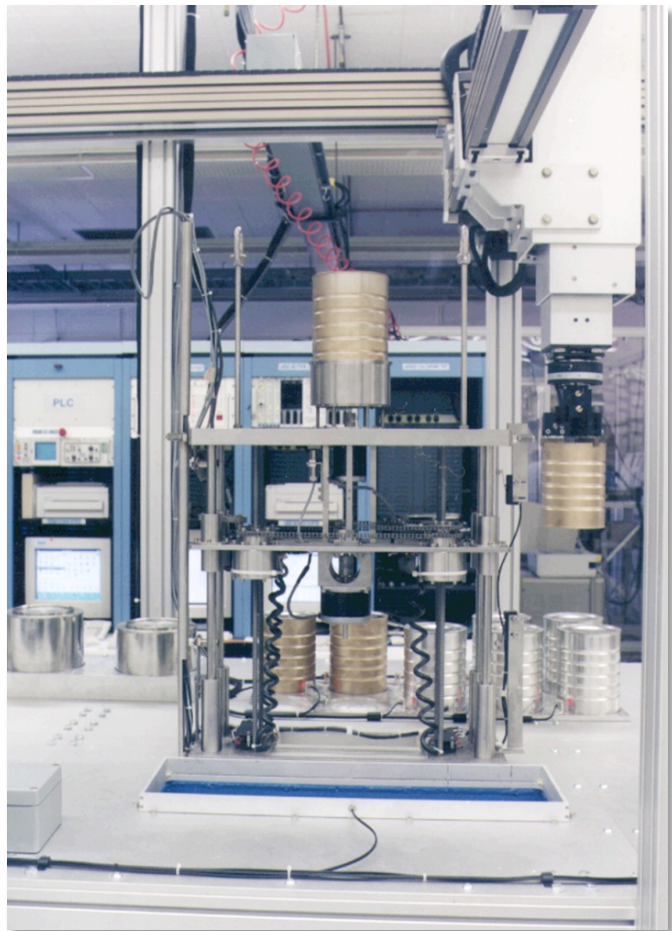


AMSR



Класс блоков MiniGRAND

Усовершенствованная система регенерации и комбинированной экстракции (ARIES)

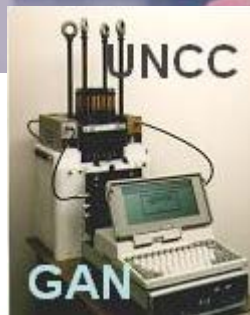
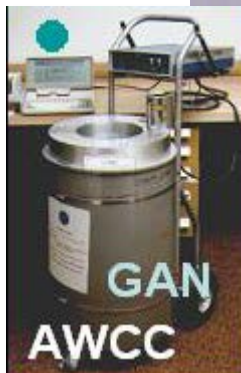
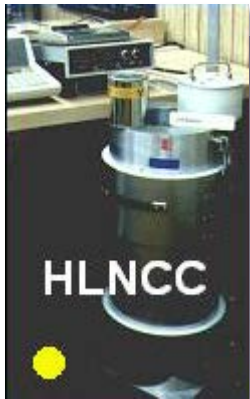


Методы неразрушающего анализа на основе измерения нейтронного и гамма-излучения широко используются для учета ядерных материалов при демонтаже плутониевых сердечников.



Российская программа 1987-2007 г.

Места проведения совместных мероприятий по учету, контролю и физической защите ядерных материалов



БН-350, 1988-2007 г., Актау, Казахстан

- Измерение потока нейтронов отработанных ТВС под водой
- Мониторинг контейнеров с ОЯТ путем измерения нейтронного и гамма-излучения



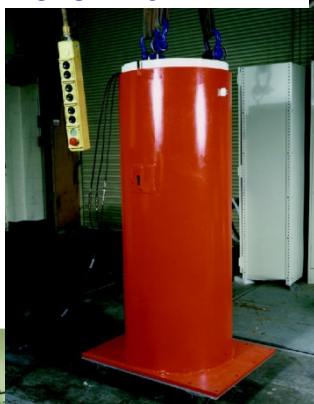
Развитие методов неразрушающего контроля и удаленного мониторинга

Установка для производства плутониевого топлива



Портативные системы для неразрушающего анализа

1973 г.

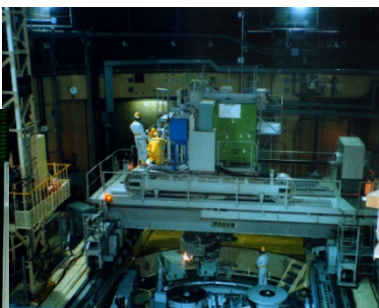


Автономные системы для неразрушающего анализа

1987 г.

Количество

Реактор JOYO

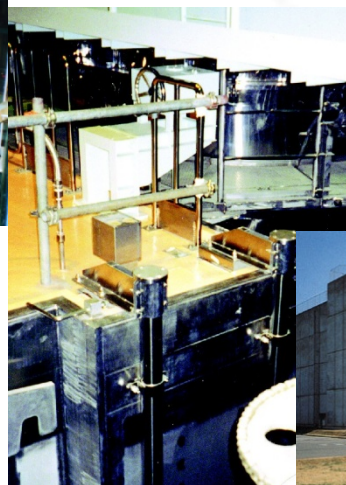


Системы для неразрушающего анализа и радиационного мониторинга

1992 г.

Изменения количества

Предприятие в Роккаш



Системы для видеонаблюдения и радиационного мониторинга

1997 г.

Количество операций

Установка для производства плутониевого топлива



Удаленная передача данных

2000 г.

Удаленная эксплуатация

Обучение технологиям обеспечения гарантий



50th Nondestructive Assay Inspector Training Course
Los Alamos, New Mexico
August 12 - 22, 2008



- Комплексная программа, включающая ряд курсов по методам измерений для обеспечения гарантий и основным принципам учета и контроля ядерных материалов с упором на практические занятия.
- С 1973 г. было проведено более 324 обучающих курсов по гарантиям, которые посетило более 5600 студентов.
- Программа курсов охватывала все три типа методов неразрушающего контроля (измерения нейтронного излучения, измерения гамма-излучения и калориметрия) с использованием оригинального и широкого набора стандартных образцов ядерных материалов.
- Курсы проводятся для международных клиентов (МАГАТЭ, Китай, Индонезия, Казахстан и др.), так и для внутренних клиентов (лаборатории Министерства энергетики США и Национальной администрации по ядерной безопасности, Комиссия по ядерному регулированию, частные компании).

Современные приоритетные направления развития систем обеспечения гарантий

- Системы следующего поколения для контроля соблюдения договора о нераспространении ядерных материалов
- Анализ ОЯТ
- Гарантии для высокопроизводительных предприятий
- Высокоточные методы неразрушающего контроля, заменяющие методы разрушающего контроля для крупных технологических объектов
- Возможность измерения баланса массы ядерных материалов для предприятий по обогащению урана
- Системы сбора данных нового поколения
- Трудновыполнимые задачи в области гарантий

Система верификации атрибутов путем измерения нейтронного и гамма-излучения (AVNG) была разработана в России в тесном сотрудничестве с ЛАНЛ и установлена на предприятии ВНИИЭФ по производству ядерного оружия (Саров, Россия). Работающие детекторы (на переднем плане) размещены в экранированном помещении (на заднем плане) для предотвращения утечки секретных данных.



Система измерения радиоактивных материалов в бочках для Чернобыля (CDAS) на TA-35 перед разворачиванием в Чернобыле для выявления и определения количества специального ядерного материала, обнаруженного в ходе земляных работ в рамках строительства Нового безопасного конфайнмента (NSC).




Портативный ручной регистратор нейтронных совпадений (JSR-15), серийно выпускаемый с 2008 г.

Благодарности

- В настоящей презентации использовались материалы различных публикаций и обучающих программ ЛАНЛ. Авторы благодарны следующим коллегам из ЛАНЛ за информативные обсуждения:
 - Трейси Венц
 - Линн Фостер
 - Джеймс Вендельбергер
 - В. Рик Салазар
 - Майкл Кауфман

Справочные материалы

1. «Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов», отчет Комиссии по ядерному регулированию NUREG/CR-5550, отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-UR-90-732 (Март 1991 г.).
2. Д. Рейли и др., Дополнение к документу «Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов» (2007 г.).
3. Дж. Паркер «Измерения обогащения урана методом гамма-спектроскопии: обзор истории, методов, возможностей и ограничений». Выступление в ЛАНЛ 15 августа 1997 г.
4. Т. Д. Рейли, Р. Б. Уолтон и Дж. Л. Паркер, «Метод измерителя обогащения: простой способ измерения изотопного обогащения», отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-4605 (1970 г.).
5. Т. Сэмпсон, Т. Келли и Д. Во, «Руководство по применению изотопного анализа на основе измерения гамма-излучения с использованием программного обеспечения FRAM», отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-14018 (2003 г.).
6. Т. Сэмпсон, «Проверка и подтверждение программного обеспечения FRAM для анализа изотопного состава», отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-14057 (2003 г.).
7. Д. С. Брэкен и С. Р. Руди, «Принципы и области применения калориметрического анализа», отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-UR-07-5226 (2007 г.).
8. П. М. Ринард, «Счетчики нейтронов с перемещающимся источником для неразрушающего анализа делящихся материалов», отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-12105 (1991 г.).
9. П. М. Ринард, «Счетчик нейтронов с перемещающимся источником», отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-UR-03-4404 (2003 г.).
10. Х. Менвол, «Описание и руководство по эксплуатации для активного колодезного счетчика нейтронных совпадений», отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-7823-M (1979 г.).

An aerial photograph of a large, modern complex of buildings, likely a government or research facility, situated in a valley. The buildings are surrounded by dense evergreen forests, many of which are covered in a light layer of snow. In the background, a range of mountains is visible, with some peaks partially obscured by low-hanging clouds or mist. The overall scene is a winter landscape.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**
josephk@lanl.gov