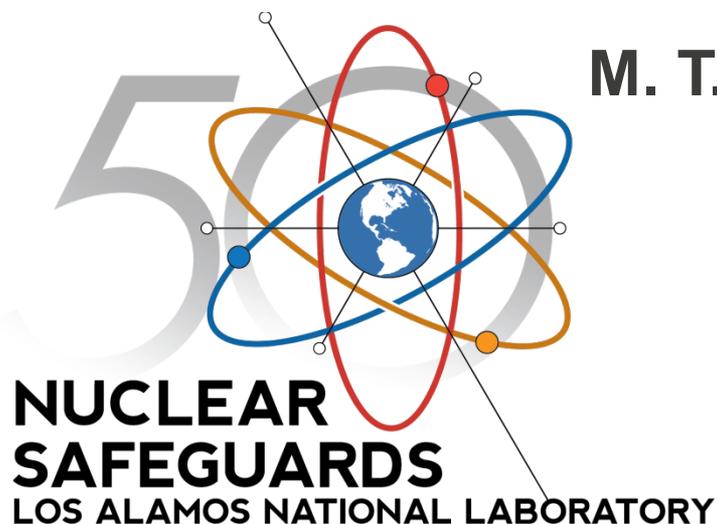




 **Los Alamos**
NATIONAL LABORATORY
— EST. 1943 —

Вклад в развитие науки и технологий для укрепления безопасности нации и мировой стабильности

Активное зондирование ОЯТ



М. Т. Свинхо, Г. Треллуе и А. Фавалли

*Лос-Аламосская национальная
лаборатория*

13-я Международная конференция
ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

20-24 марта 2017 г.

Снежинск, Челябинская область,
Российская Федерация

LA-UR-17-20749

ЗАДАЧИ/ЦЕЛИ:

- Общее количество ОЯТ, накопленного во всем мире, составляет 240 тыс. тонн (в т. ч. примерно 20 тыс. тонн плутония). 90% ОЯТ размещено в бассейнах выдержки (по данным 2009 г.*).
- Целью исследовательского проекта по неразрушающему контролю отработавшего ядерного топлива является разработка и испытание комплексных методов для совершенствования неразрушающего контроля отработанных ТВС.
- Техническими целями данного проекта являются:
 1. *подтверждение данных по начальному обогащению, выгоранию и времени выдержки, заявленных для данной установки;*
 2. *определение отклонений или замены ТВЭЛов;*
 3. *оценка массы Pu в отработавшем ядерном топливе [которая также является функцией переменной в (1)];*
 4. *оценка количества теплоты, выделенной ТВС;*
 5. *измерение реактивности (коэффициента размножения) каждой ТВС.*

Активное зондирование

Принципы метода дифференциального затухания

- **Активный метод**, использующий нейтронные импульсы (обычно от дейтерий-тритиевого генератора нейтронов) для инициирования деления в ядерных материалах (например, изотопов ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu), присутствующих в (отработанном) ядерном топливе.
- **Система зондирования:** обычно - замедляющие материалы для обеспечения деления тепловыми нейтронами
- **Обнаружение:** детекторы обычно представлены пропорциональными счетчиками на основе изотопа ^3He .
- **Принцип действия:** после зондирующего импульса плотности нейтронов деления затухают с течением времени. Время затухания является функцией от содержания делящегося вещества (и коэффициента размножения в отработанном ядерном топливе) в исследуемых материалах. При анализе ядерного материала дифференциальные сигналы соответствуют наиболее медленному сигналу затухания по сравнению с сигналом затухания нейтронов, испущенных системой зондирования, при отсутствии ядерного материала.

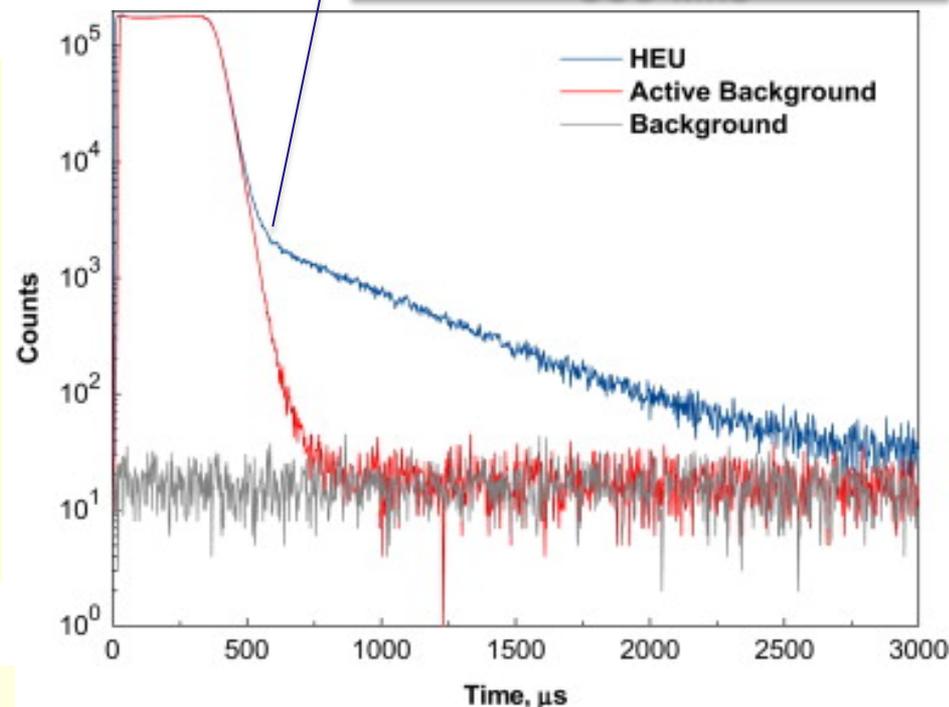
Стандартный метод дифференциального затухания

Принципы

Сигнал дифференциального затухания: нейтронные детекторы синхронизированы с каждым зондирующим импульсом. Кривые дифференциального затухания получают путем записи числа импульсов деления как функции от времени после каждого импульса зондирующих нейтронов и суммирования этих чисел для всего периода измерений.

Примечание: пассивный фон и активный фон, обусловленный использованием нейтронного источника

Данные для обработки
>500 мкс



Пример дифференциального затухания: Затухание плотности нейтронов при зондировании 9,4 кг высокообогащенного урана в деревянном ящике⁽¹⁾. Дейтерий-тритиевый генератор нейтронов с частотой 300 Гц, коэффициент заполнения 10%, 4×10^7 нейтронов/с

(1) Р. Ц. Ранкл, Д. Л. Чичестер, С. Дж. Томпсон, NIM 663, 2012.

Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива

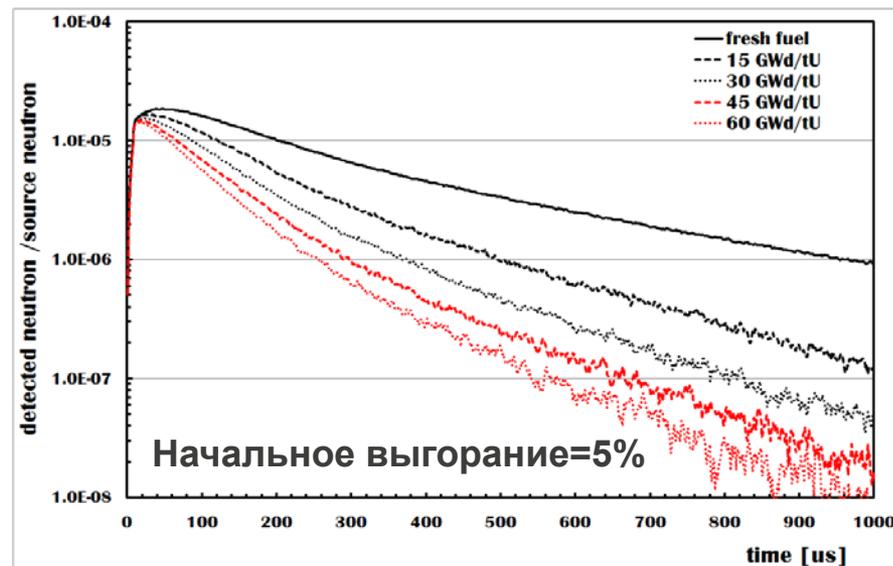
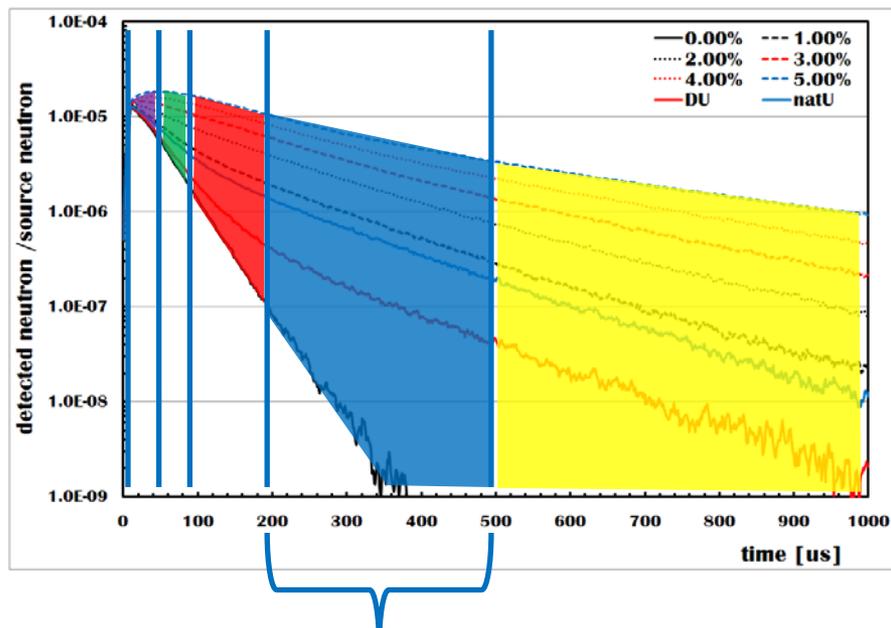
ЦЕЛЬ: оценка массы делящегося вещества в отработанной ТВС

- Методы дифференциального затухания для сред с **высоким коэффициентом размножения**.
- Используйте короткий импульс (~20-50 мкс) нейтронов, испускаемый внешним дейтерий-тритиевым генератором нейтронов
- Время затухания индуцированной плотности нейтронов составляет порядка сотен микросекунд
- Измеренный сигнал позволяет определить характеристики ТВС, главным образом **коэффициент размножения**, а также косвенно определить **функцию начального обогащения (IE)**, **выгорание (BU)**, и **время выдержки (CT)** отработанной ТВС
- Результаты моделирования методом Монте-Карло показали, что **содержание плутония** в отработанной ТВС может быть определено с высокой точностью

Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива:

Сравнение свежего ядерного топлива с отработавшим ядерным топливом

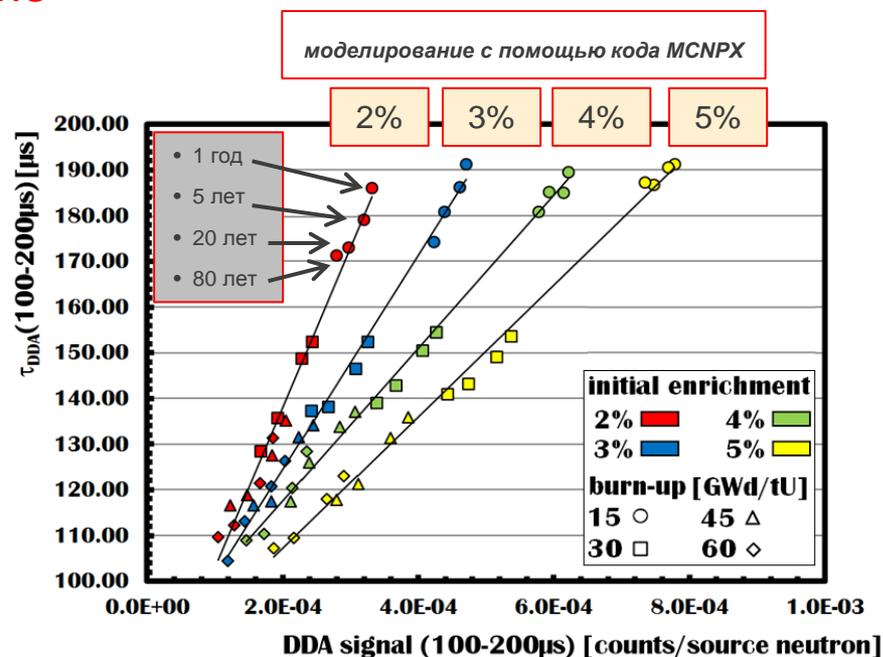
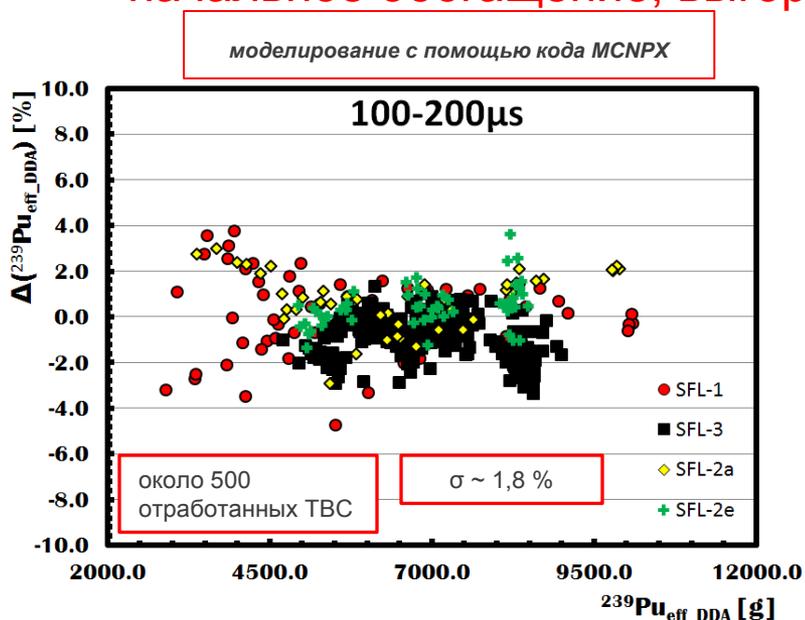
- **Свежее топливо** : При использовании метода дифференциального затухания отклик возрастает (время затухания дольше) с увеличением содержания делящегося вещества
- **Отработавшее топливо** : При использовании метода дифференциального затухания отклик уменьшается (время затухания короче) с увеличением выгорания (т.е. присутствует больше поглотителей нейтронов)



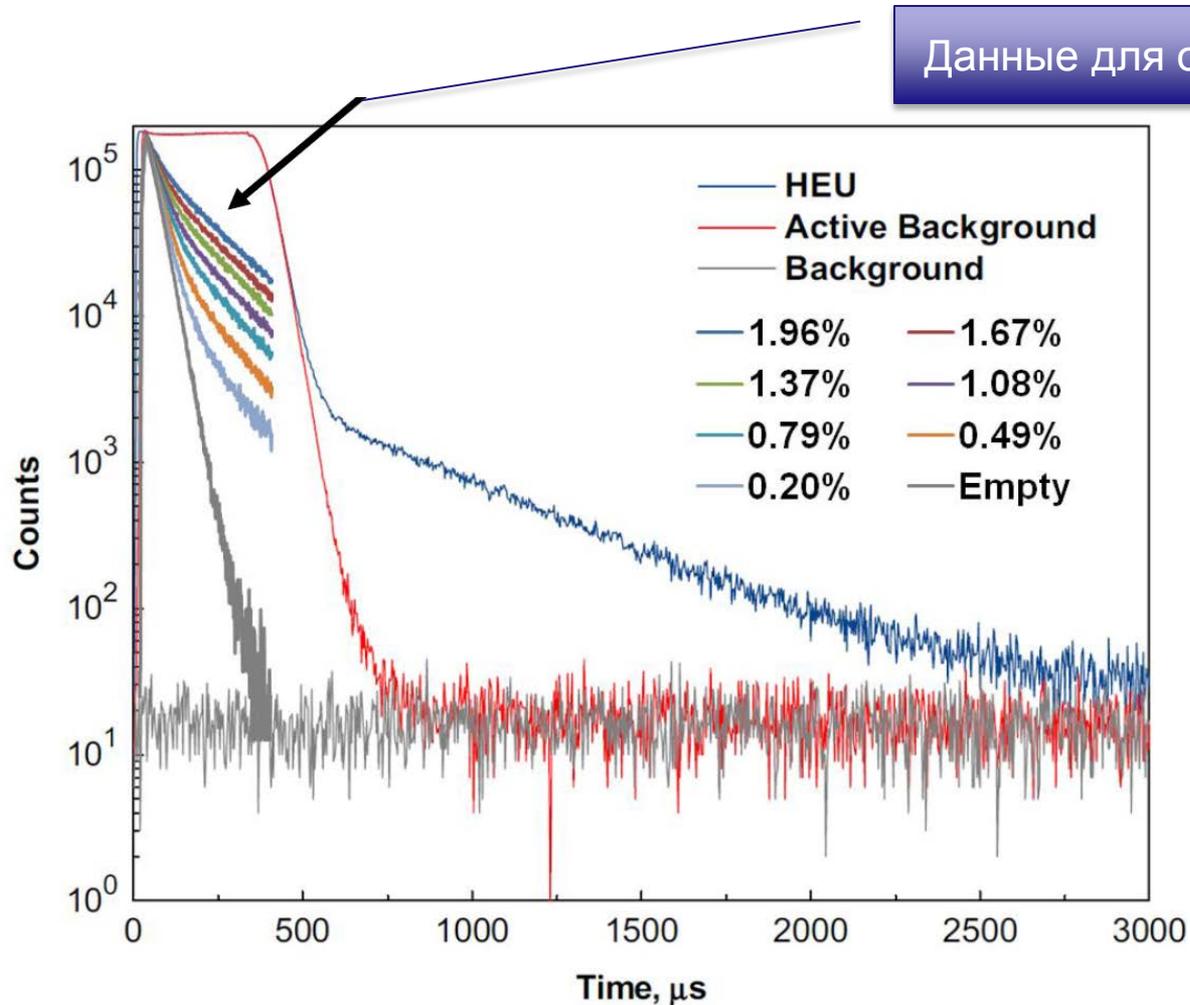
Сигнал дифференциального затухания = интегральное число импульсов за данный промежуток времени (без учета вклада нейтронов зондирующего импульса)

Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива

- Возможность определения различных характеристик отработавшей тепловыделяющей сборки (ТВС):
 - коэффициент размножения (M_{act})
 - общее содержание плутония (m_{Pu})
 - **общее содержание делящегося вещества ($^{239}Pu_{eff} \sim ^{235}U + ^{239}Pu + ^{241}Pu$)**
 - **начальное обогащение, выгорание**

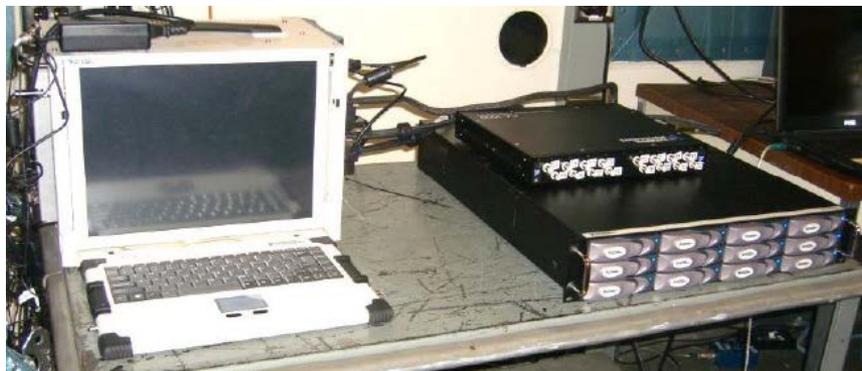
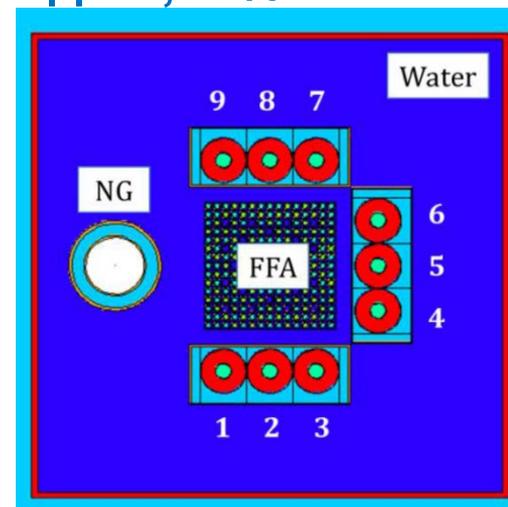


Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива: Дифференциальное затухание для свежего ядерного топлива с обогащением до 1,96%



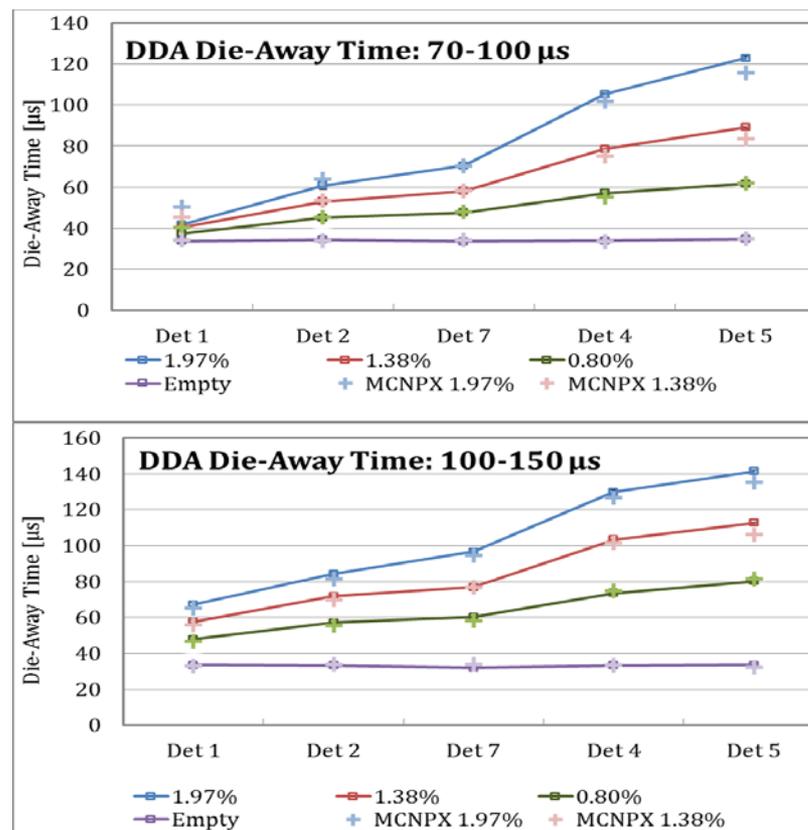
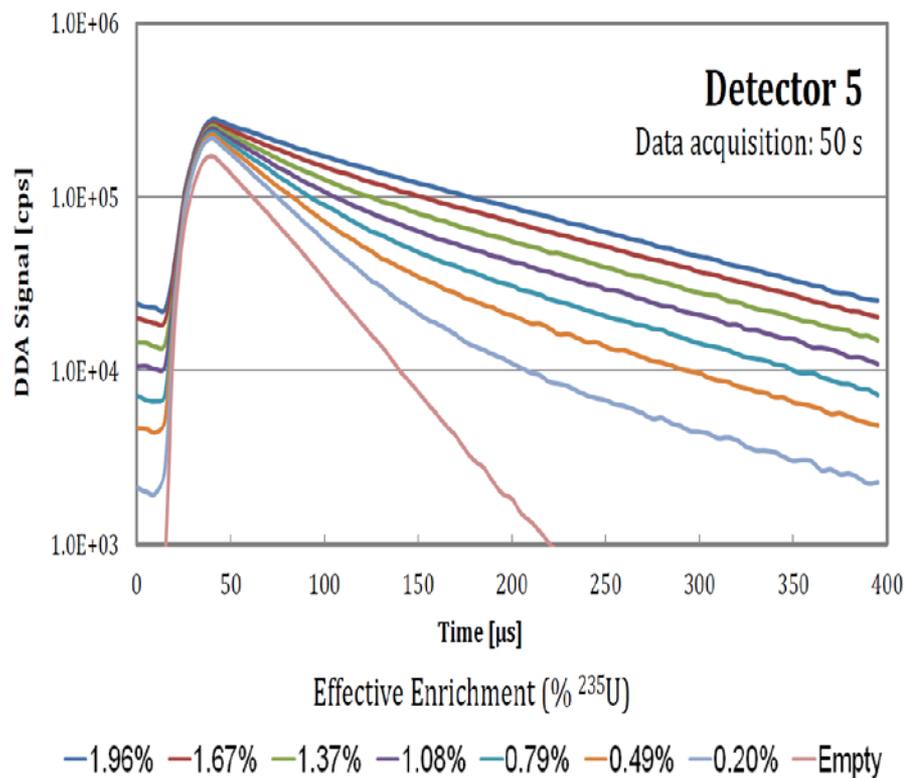
Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива: Дифференциальное затухание для свежих ТВС с обогащением до 1,96%

- ТВС 15x15 реактора типа PWR со свежим ядерным топливом (обогащение от 1,97% до обедненного урана)
- 9 детекторов на основе изотопа ^3He в 3 корпусах из нержавеющей стали с открытым верхом
- Дейтерий-тритиевый генератор нейтронов мощностью 14,1 МэВ, размещенный в емкости, заполненной водой
- Сбор изменяющихся во времени пространственных данных со всех 9 детекторов производится с использованием реестровой системы сбора данных (состоящей из покупных комплектующих изделий).

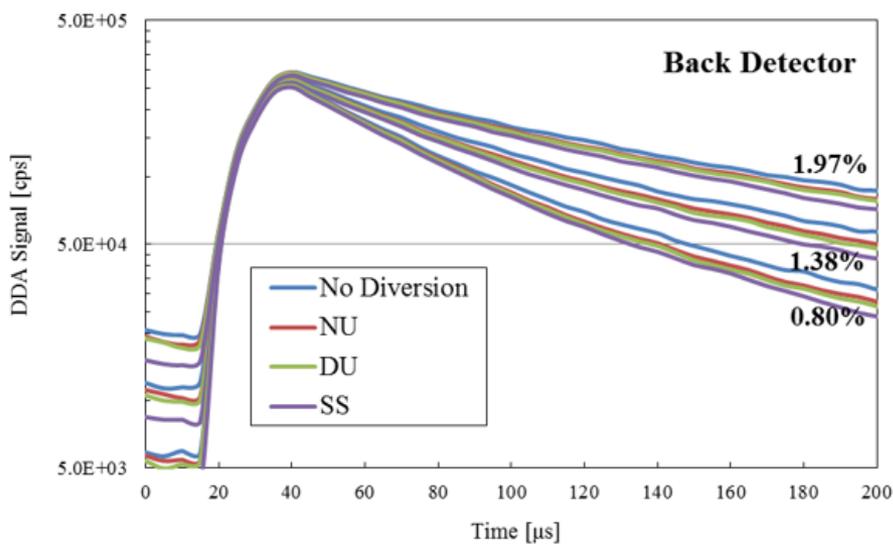
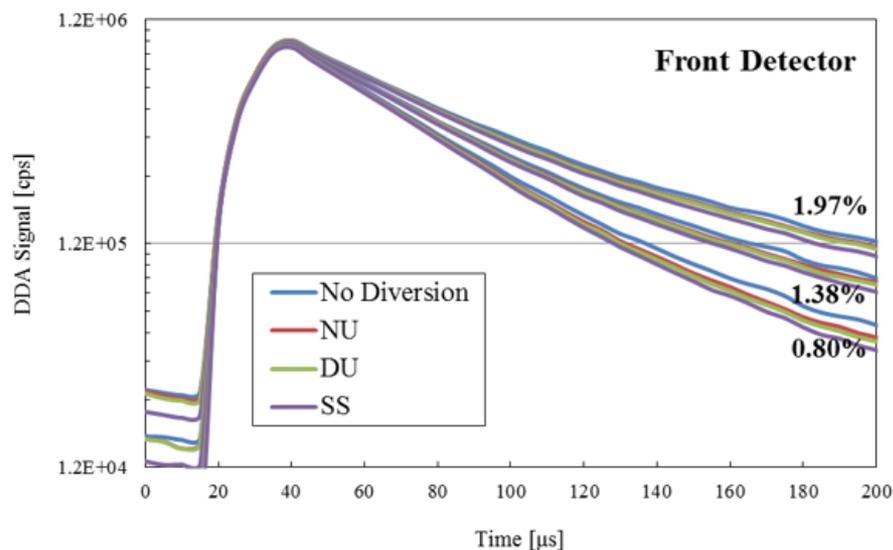


Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива: Дифференциальное затухание для свежих ТВС с обогащением до 1,96%

Экспериментальные данные как функция от обогащения (скорость счета и время затухания, сравнение с расчетными данными)



Дифференциальное затухание для свежих ТВС с отсутствием топливных стержней на выбранных позициях

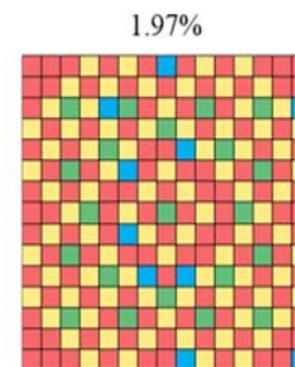
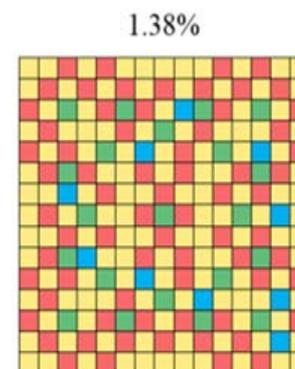
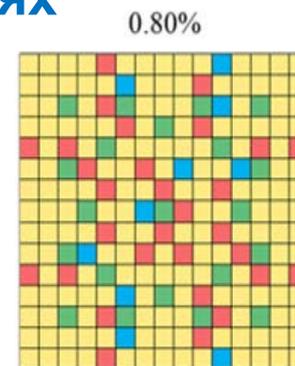


Красный =
Топливный
стержень с
низкообогащенным
ураном

Желтый =
Топливный
стержень с
обедненным
ураном

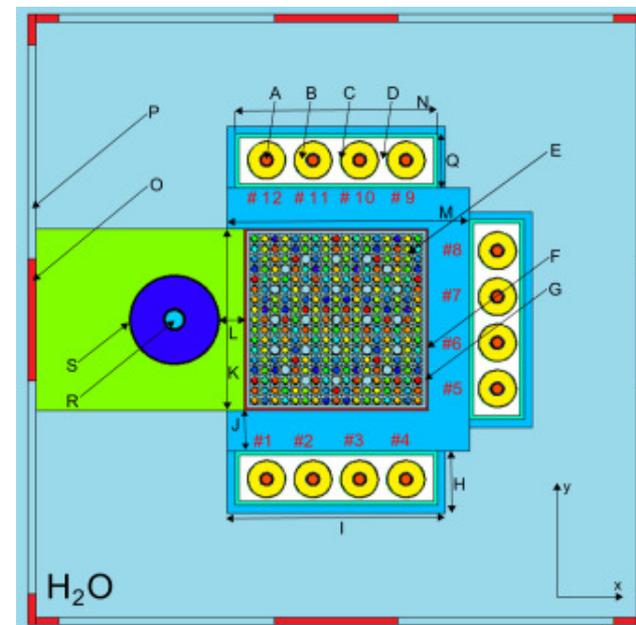
Зеленый =
Направляющий
канал

Голубой = Позиции
с «отклонением»
(топливные
стержни с
природным ураном,
топливные стержни
с обедненным
ураном или
стержни из
нержавеющей
стали), (для случая
отсутствия
отклонений: синий
= топливные
стержни с
низкообогащенным
ураном)



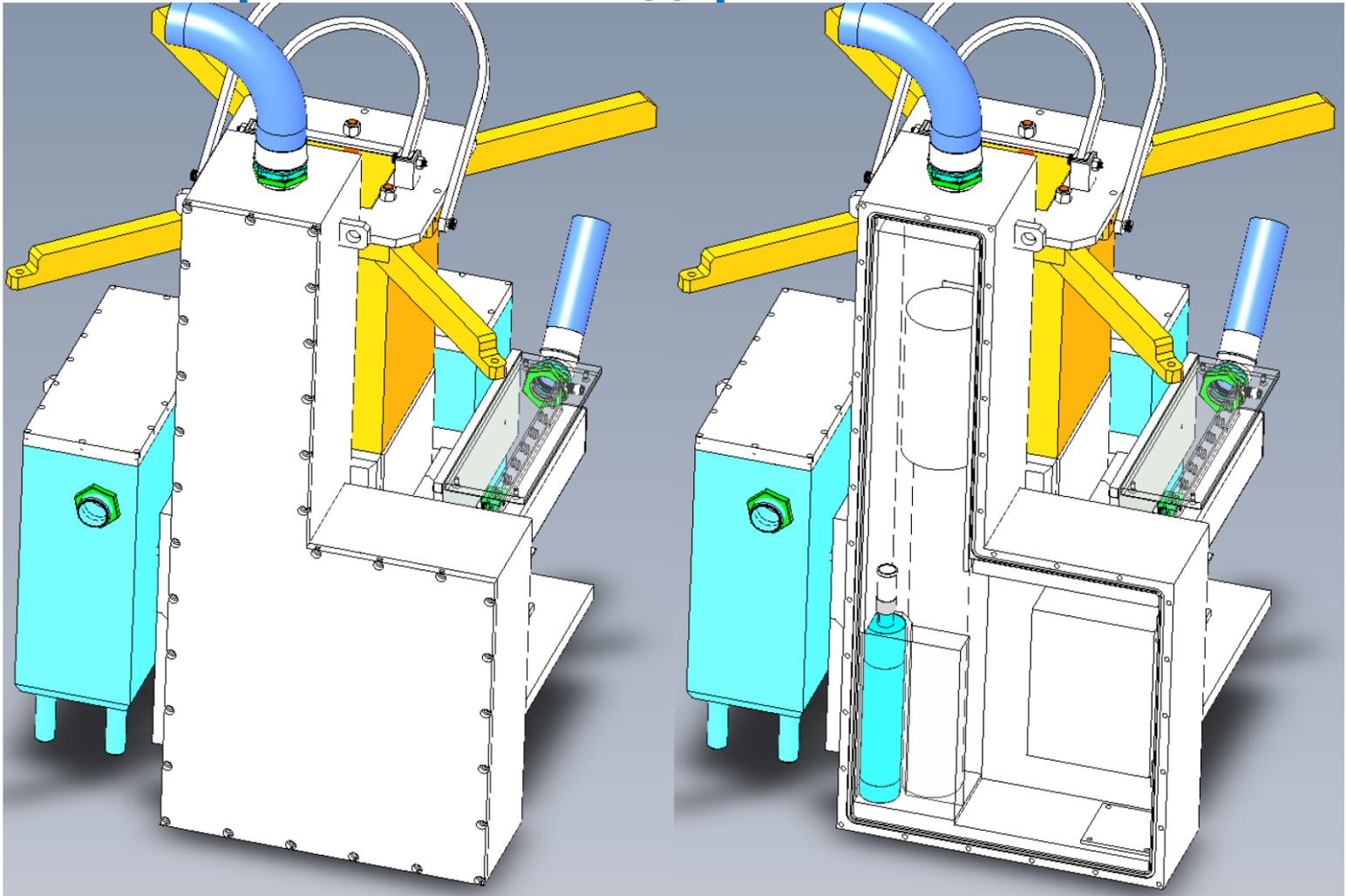
Разработка метода дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива

- Длительность импульса генератора нейтронов 50 мкс (частота импульсов 1 кГц) при эмиссионном выходе $\sim 3 \times 10^8$ нейтронов/с
- Экранирование генератора нейтронов от гамма-излучения (также подбор источника) вольфрамом
- 12 детекторов на основе изотопа ^3He , активная длина 5 см, диаметр 1,27 см, давление ^3He 7,5 атм.
- Замедлитель ^3He детектора: слой полиэтилена толщиной 1,4 см с кадмиевым экраном толщиной 0,1 см
- Свинцовый экран для ^3He детекторов толщиной 5 см
- Максимальная скорость счета импульсов 2 МГц с поправкой на мертвое время
- Кадмиевый экран вокруг образца топлива.
- Для ТВС реакторов типа BWR и PWR (разные методики анализа)

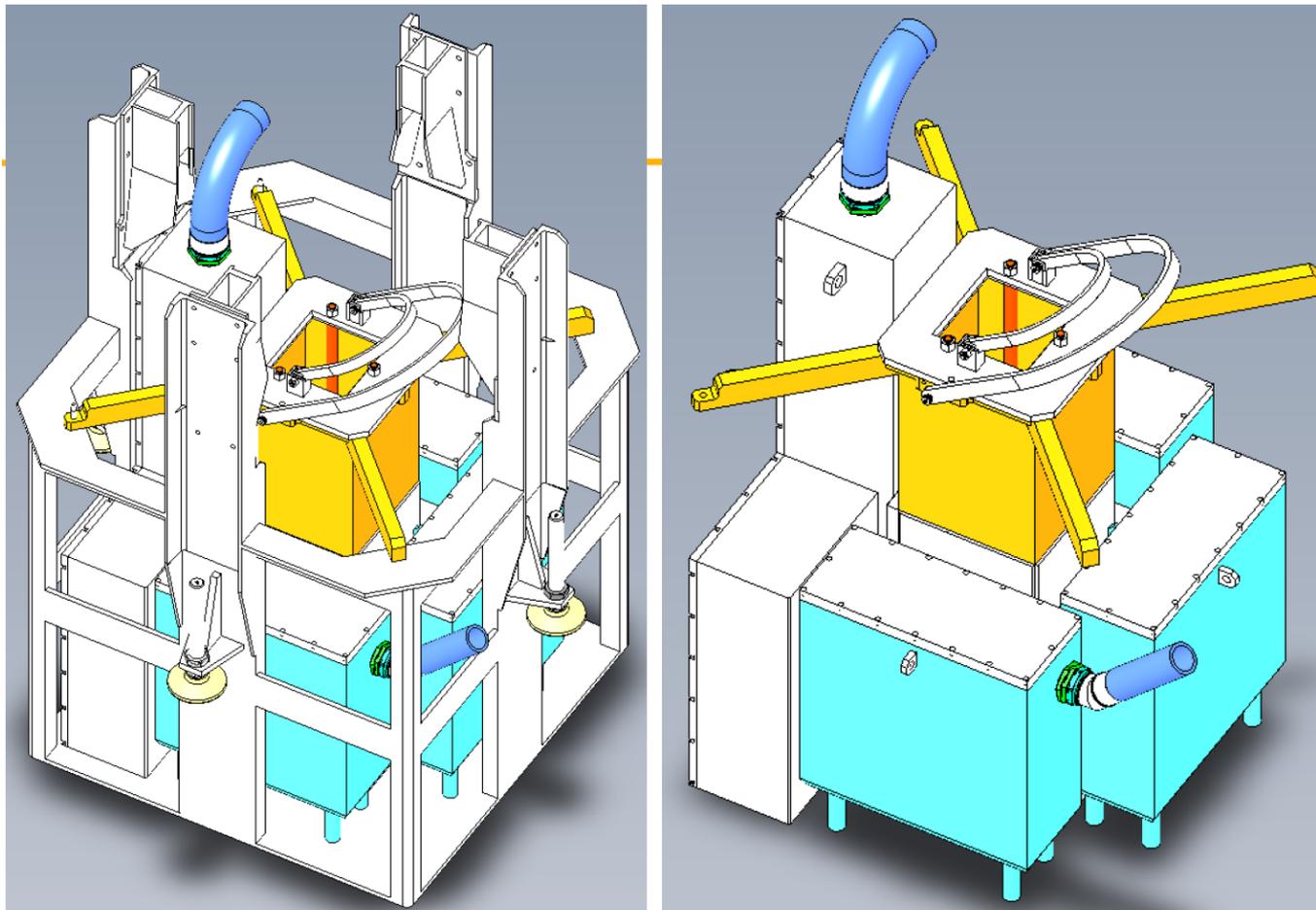


Модель(1) MCNP

Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива

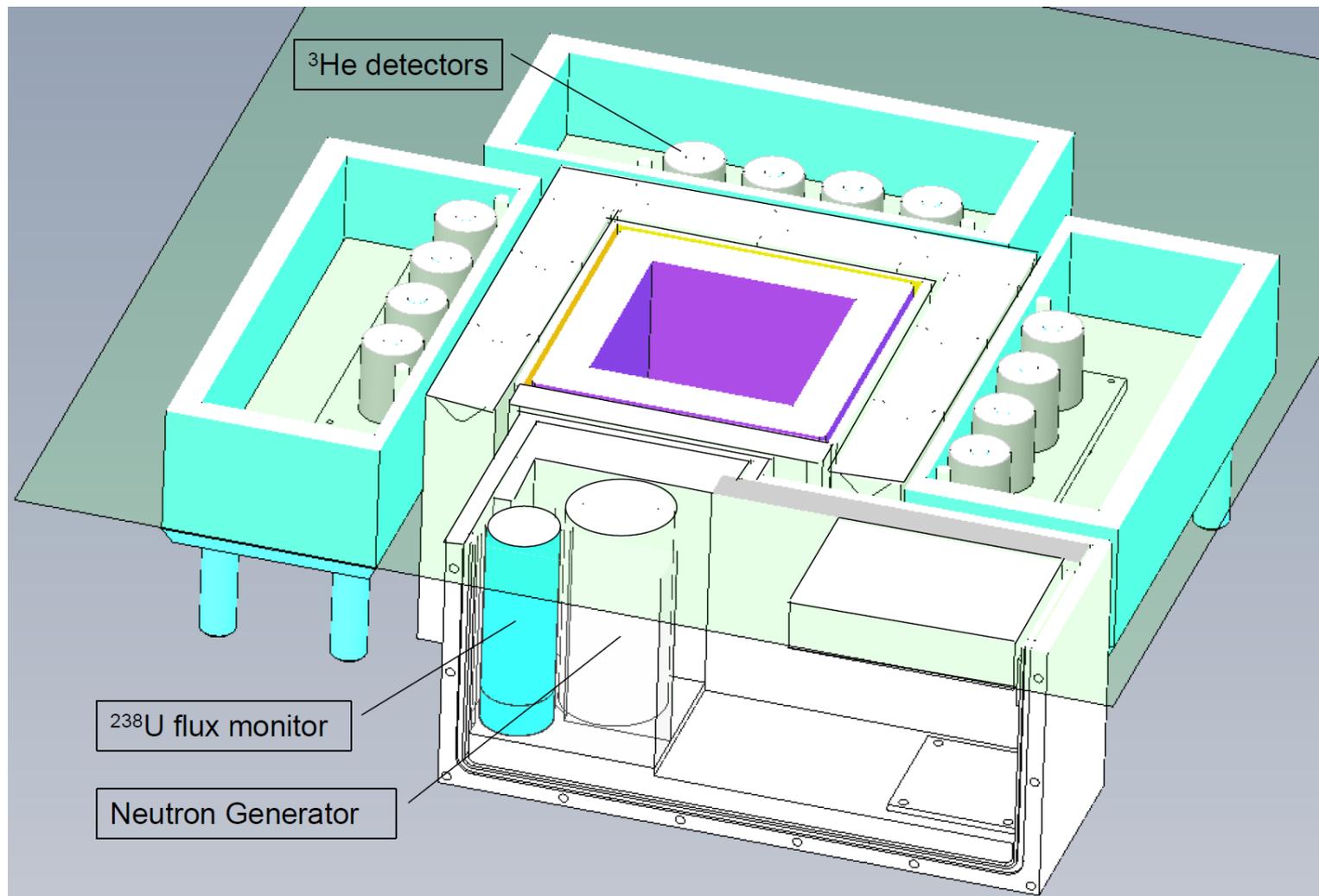


Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива



Собран в Лос-Аламосской национальной лаборатории, предназначен для транспортировки в хранилище отработавшего ядерного топлива Clab (Швеция) для проведения измерений (2017 г.)

Метод дифференциального затухания для анализа отработавшего ядерного топлива



Установка для анализа отработавшего ядерного топлива методом дифференциального затухания (январь 2017 г.)



Выводы

- Представлены метод дифференциального затухания и обсуждение результатов, полученных для свежих ТВС.
- Представлен метод для отработавшего ядерного топлива
- Система детектирования для анализа ОЯТ методом дифференциального затухания прошла испытание с использованием свежего топлива в Лос-Аламосской национальной лаборатории.
- Система детектирования предназначена для транспортировки в хранилище отработавшего ядерного топлива Clab (Швеция).
Проведение измерительных мероприятий в Швеции запланировано на 2017 г.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за поддержку Департаменту по нераспространению и контролю над вооружениями и Национальному управлению ядерной безопасности.