



Разработка и использование стабильных высокоинтенсивных источников нейтронов

Chao LIU

Международная академия нейтронных наук (Чунцин), консорциум FDS

МНТК-2023, 15 ноября 2023
Москва, Россия



FDS: Консорциум по инновациям в области ядерных технологий

A1.01



База в г. Чунцин

Цель - физика нейтронов и ядерная медицина

Международная академия нейтронных наук (Чунцин)

+ Guozhong Medical Technology (Chongqing) Co., Ltd. ...

База в г. Циндао

Цель - физика нейтронов и усовершенствованная ядерная энергетика

Международная академия нейтронных наук (Циндао)

+ Институт ядерной науки и технологий, Шаньдунский университет
+ SuperRay Technology Co., Ltd., Neutron Health Medical Technology Co., Ltd....

База в г. Нанкин

Цель - производство высококачественного оборудования для рентгенотерапии

+ SuperAccuracy Science & Technology Co., Ltd. ...

База в г. Хэфэй

Цель - физика нейтронов и промышленная безопасность

Международная академия нейтронных наук (Хэфэй)

+ Институт технологий ядерной безопасности INEST)
+ Thinking Neutron Technology Co., Ltd., SuperSafety Science & Technology Co., Ltd....

Другие строящиеся базы (Аньцин, Цзинань, Цзюцюань и др.)

- Консорциум FDS фокусируется на исследованиях и разработках усовершенствованных ядерных установок и применении ядерных технологий.
- Консорциум FDS зарегистрировал более 20 дочерних автономных юридических лиц и создал четыре научно-исследовательские базы, расположенные в Чунцине, Циндао, Нанкине и Хэфэе с дополнительными базами, строящимися в других крупных городах Китая.
- Консорциум FDS насчитывает более 600 сотрудников.

Международная академия нейтронных наук (IANS)

- IANS как пример представителя научно-исследовательских институтов
- Три филиала в Циндао, Чунцине и Хэфэе.
- Президент: академик профессор Икан ВУ

Филиал в Циндао

Международная академия
нейтронных наук (Циндао)

Генеральный директор:
Профессор Фан ВАН

- Институт ядерных материалов и оборудования
- Институт нейтронной радиографии
- Институт усовершенствованных ядерных энергетических технологий
- Нейтронный медицинский центр, больница Цилу Шаньдунского университета
- Институт ядерной науки и технологий Шаньдунского университета
- Шаньдунская ключевая лаборатория нейтронной науки и техники
- Ключевая лаборатория детектирования нейтронов Циндао

Филиал в Чунцине

Международная академия
нейтронных наук (Чунцин)

Генеральный директор:
Профессор Юнфэн ВАН

- Институт нейтронной физики
- Институт ядерной фармацевтики
- Институт ядерных батарей
- Институт нейтронной медицины
- Институт усовершенствованной ядерной энергетики

Филиал в Хэфэе

Международная академия
физики нейтронов (Хэфэй)

Генеральный директор:
Профессор Ликин ХУ

- Институт технологии ядерной безопасности
- Институт нейтронного каротажа
- Институт радиационной медицинской физики



Этап I 1980е~2003

Исслед группа проф. Икана ВУ

- Подразделение исследования гибридных реакторов деления-синтеза
- Цель - исследования термоядерной подкритической установки
- Программа «863»: Национальная высокотехнологичная научно-исследовательская программа Китая

Этап II 2003~2020

Команда FDS

- Совместные учреждения: Школа ядерной науки и технологий, USTC, INEST· CAS
- Цель - разработка ключевых технологий деления и синтеза
- Программы ITER/ADS/973

Этап III 2020~

Консорциум FDS

- Цель - НИОКР по ядерной науке, технологиям и областям применения при мощной поддержке правительства
- Создание нескольких научно-исследовательских организаций и серии высокотехнологичных предприятий

Фундаментальные и прикладные исследования

Нейтронные науки и технологии

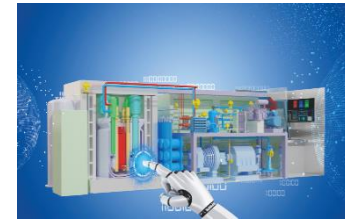
Ядерная информатика и применение программных средств

Детектирование нейтронов и прикладные области

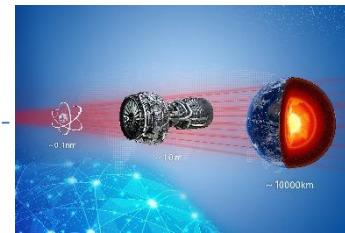
Усовершенствованная ядерная энергетика и безопасность

Радиационная медицина и прикладные области

Ключевые технологии и продукция



Усовершенствованное ядерное ПО



Оборудование обнаружения нейтронов



Китайские свинцовые реакторы (CLEAR)



Точные радиотерапевтические системы (KylinRay)

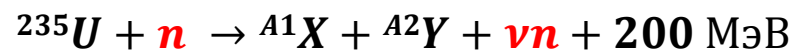
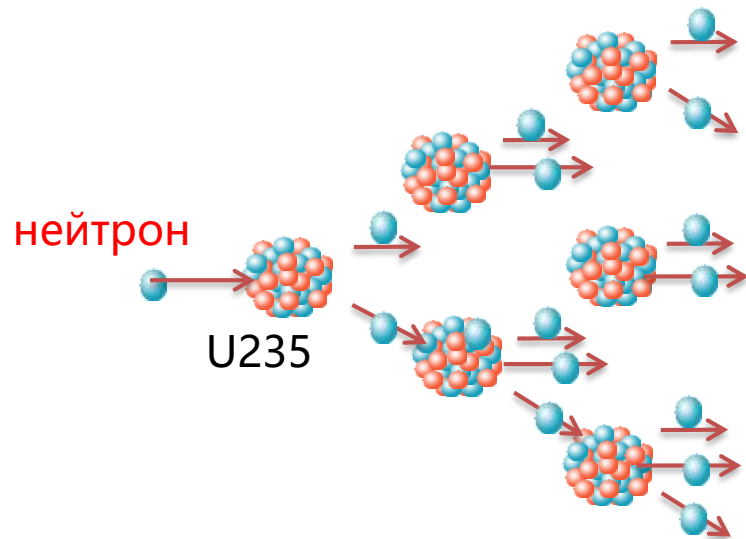
I. Общие сведения

II. Разработка установок

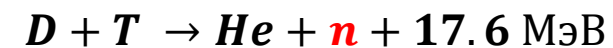
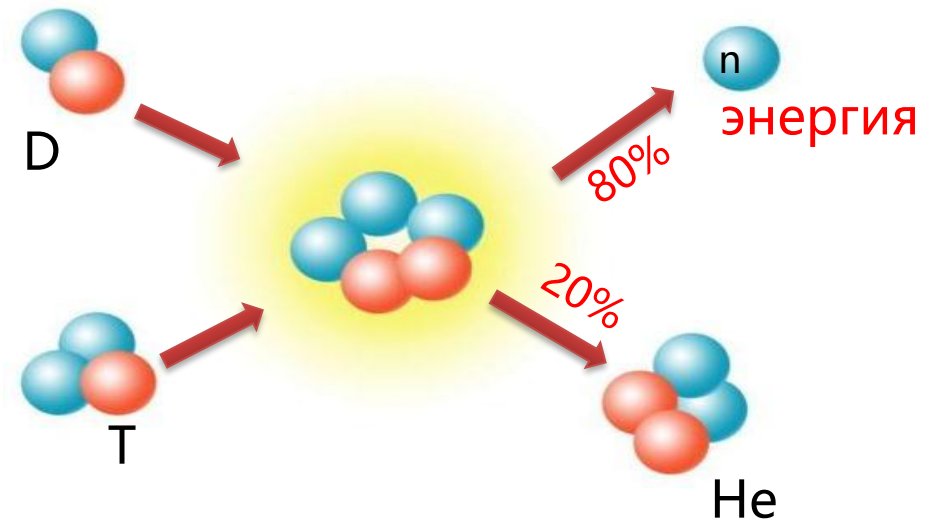
III. Нейтронные эксперименты

IV. Заключение

Деление – вызывает ядерную реакцию

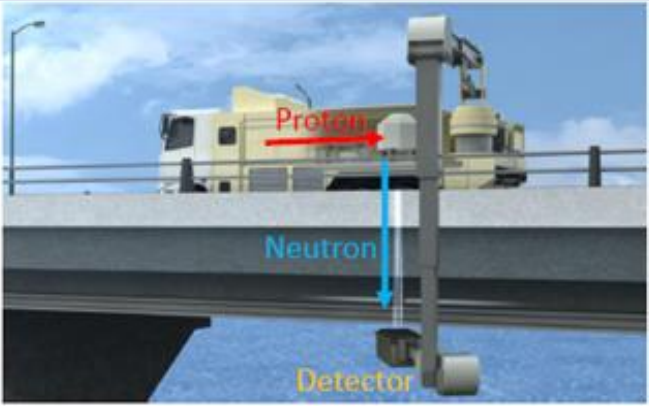


Синтез – основной носитель энергии



Нейтроны имеют большую ценность для расширения областей использования ядерной энергии

Нейтроны обладают преимуществами глубокого проникновения, чувствительности к атомам света, точного определения элементных составов и т.д.



нейтронная радиография



нейтронный каротаж



нейтронная терапия

□ Профессор Иэн Андерсон из ORNL :

«Методы нейтронной визуализации имеют огромный потенциал применения»

□ Доктор Сан-Хюэ Йен, председатель отделения онкологии больницы общего профиля ветеранов Тайбэя :

«Нейтроннозахватная терапия является серьезным прорывом в лучевой терапии и лечении рака»

1. Усовершенствованная теория нейтроники, валидация программ и ядерных данных

- Проектирование сложных конструкций, состава материалов и рад. защиты
- Усовершенствованные нейтронно-физические методы и программы расчета
- Сечения при высоких энергиях, ядерные данные и т.д.

2. Облучение материалов и оборудования

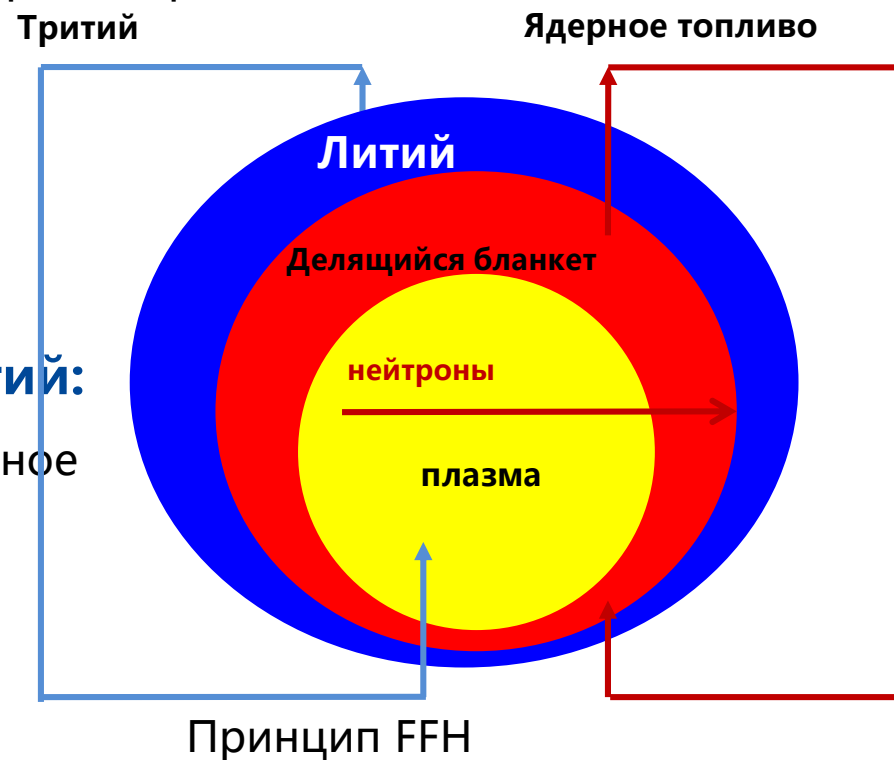
- Активационные испытания и облучение материалов
- Испытания ядерных характеристик оборудования

3. Расширение областей применения ядерных технологий:

- нейтронная рентгенография, нейтронная терапия, радиационное повреждение лазерного кристалла и т.д.

4. Подкритические установки на нейтронах

- Гибридные установки деления-синтеза (FFH)
- Подкритические установки деления (ADS)



Высокоинтенсивный источник нейтронов - ключевая платформа для развития усовершенствованных ядерных технологий

Классификация источников нейтронов



Источник нейтронов деления (SNS)
широкий спектр



Дейтерий-тритиевый источник нейтронов (FNS)
Мононейтронная энергия

Источники на основе ускорителя и реактора способны обеспечить высокую интенсивность нейтронов

HINEG-I

HINEG-II (2021-2024)

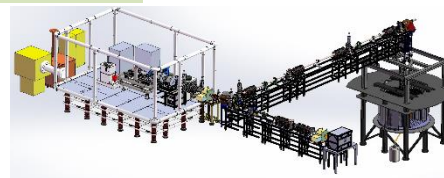
HINEG III/GDT (2025-2035)

Готов



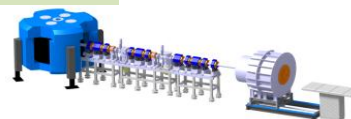
Дейтерий-тритиевый генератор нейтронов
HINEG-I в Хэфэе
(6.4×10^{12} н/с)

Строится



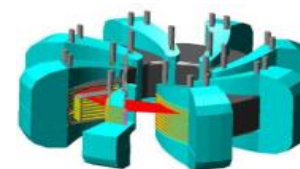
Высокоинтенсивный дейтерий-тритиевый генератор нейтронов
HINEG-IIa в Чунцине
($\geq 10^{13}$ н/с)

Строится



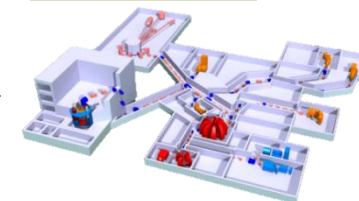
стабильный источник нейтронов на основе циклотрона с регулируемым спектром
HINEG-IIb в Циндао
($\geq 10^{14}$ н/с)

Проектируется



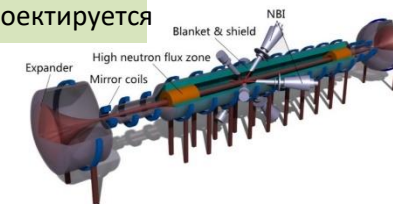
Высокоинтенсивный стабильный источник нейтронов на основе циклотрона с регулируемым спектром
HINEG-IIIa
($\geq 10^{15}$ н/с)

Проектируется



Высокопоточный регулируемый стабильный источник нейтронов широкого спектра
HINEG-IIIb
($\geq 10^{15}$ н/(см²·с))

Проектируется



Объемный источник термоядерных нейтронов на основе газодинамической ловушки
HINEG-GDT
($\geq 10^{18}$ н/с)

Фундаментальные исследования технологии

Обоснование и демонстрация ключевых технологий

Разработка пограничных технологий и расширение областей применения

Обоснование нейтронно-физического проекта и проекта рад. защиты

Обоснование физики а.з. и усовершенствованных реакторных технологий

Инженерное обоснование материалов и оборудования

Расширенное применение ядерных технологий

(Рентгенография, лучевая терапия, производство изотопов, ...)

Усовершенствованные ядерные энергетические установки

(термоядерные, свинц. быстрые реакторы/установки на ускорителе, гибридные...)

I. Общие сведения

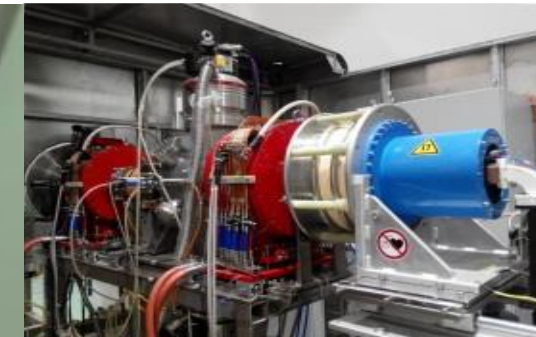
II. Разработка установок

III. Нейтронные эксперименты

IV. Заключение

НINEG-I: Дейтерий-тритиевый генератор нейтронов

Выход нейтронов: 6.4×10^{12} н/с, объединение со свинцовым реактором нулевой мощности CLEAR-0

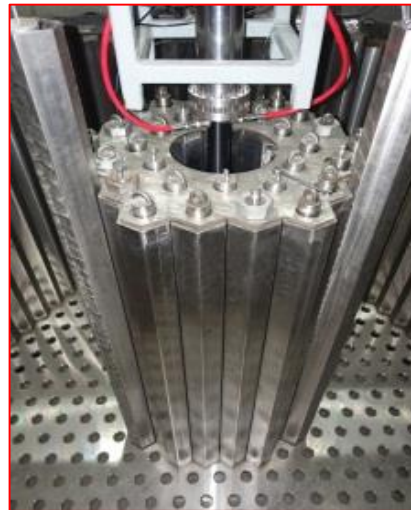


Отмечен в базе данных МАГАТЭ по установкам LMFNS, опубликован в информационном бюллетене ANS-FED и Int. J. Energy Res

- ❑ Валидация методики, кода и базы данных нейтронно-физического анализа как для критических, так и для подкритических установок
- ❑ Предоставление экспериментальных данных в поддержку лицензирования свинцовых критических/подкритических реакторов



Быстрый реактор



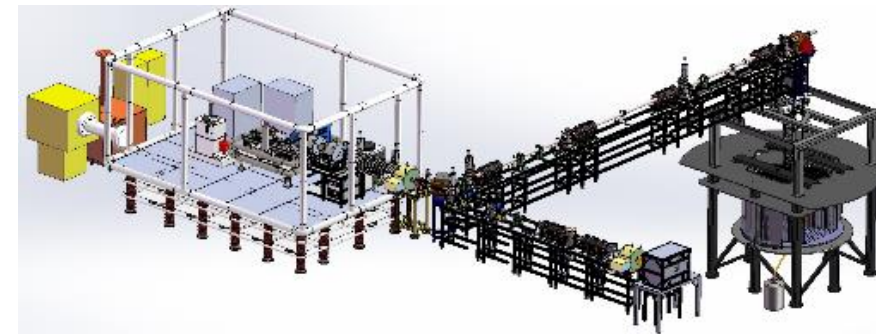
Активная зона

CLEAR-0	
Сборка	Гексагональная (нерж сталь)
Топливо	UO ₂ (19.75%/нат.)
Теплоноситель	Твердая СВЭ (комн. температура)

Сооружение реактора CLEAR-0 закончено

□ Цели

- Обоснование ключевых технологий для рентгенографии, размножения в условиях облучения, обработки в условиях облучения, лучевой терапии быстрыми нейтронами и др.
- Экспериментальное обоснование фундаментальных исследований, включая нейтронно-физическую теорию, механизм повреждения материалов термоядерным нейтронным излучением, измерение ядерных данных и т.д.
- Испытание нейтронно-физических характеристик оборудования термоядерных/ядерных/гибридных установок и других ядерных установок



□ Основные параметры

- **Выход нейтронов: $\geq 10^{13}$ н/с**
- **Дуальный режим эксплуатации Д-Д и Д-Т**



Сооружение и сборка источника НINEG-IIa идет в городе Чунцин, эксплуатация в режиме Д-Д ожидается примерно в конце 2023 г, эксплуатация в режиме Д-Т ожидается в 2024 г

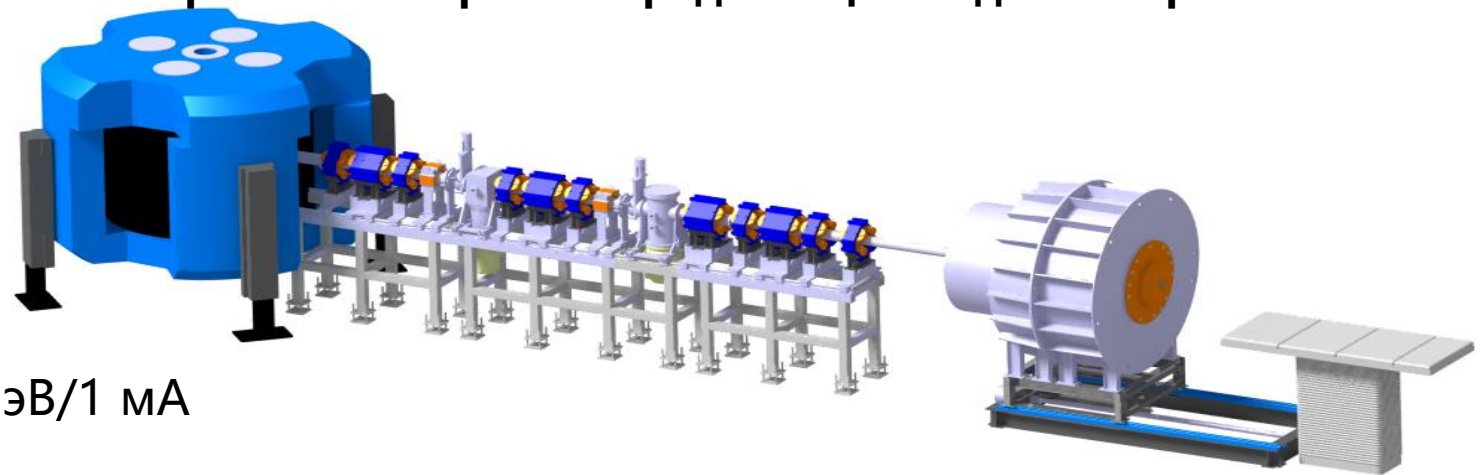
НINEG-IIb: стабильный источник нейтронов с регулируемым спектром основе циклотрона

□ Цели

- Обоснование технологии нейтронной терапии на основе ускорителя и технологии производства изотопов
- Обоснование нейтронно-физического проекта и проекта рад. защиты для современных реакторов

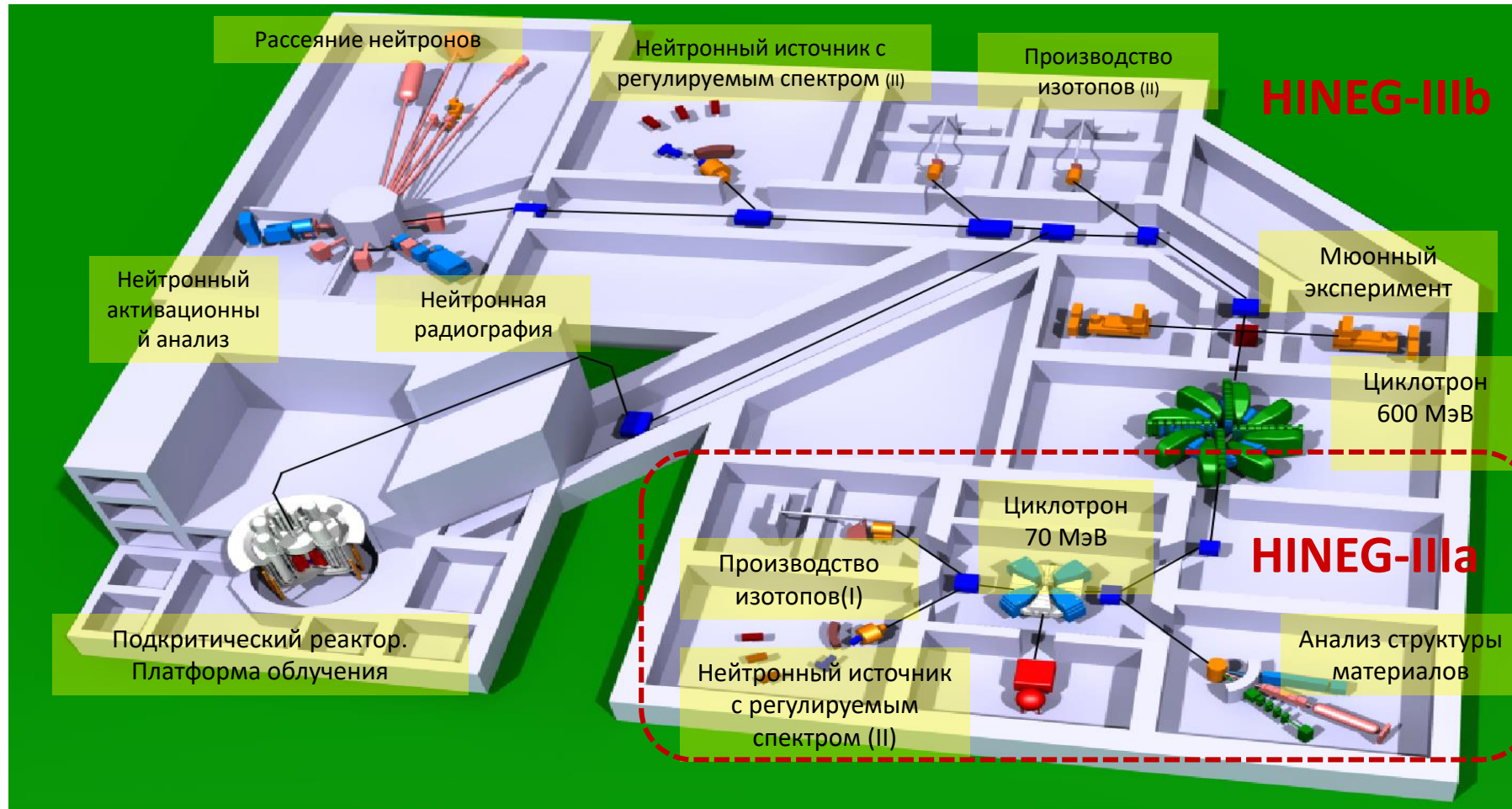
□ Основные параметры

- **Выход нейтронов:** $\geq 10^{14}$ н/с
- **Материал мишени:** Be
- **Ускоритель:** протонный, 30 МэВ/1 мА



**Основное оборудование изготовлено, монтаж и ввод в эксплуатацию источника
НINEG-IIb осуществляются в городе Циндао**

План крупномасштабной научной установки HINEG-III



2023- 2027

HINEG-IIIa

Высокоинтенсивный стабильный источник нейтронов с регулируемым спектром ($\geq 10^{15}$ н/с)

7 млрд. инвестиций

2027- 2035

HINEG-IIIb

Высокопоточный стабильный источник нейтронов широкого спектра ($\geq 10^{15}$ н/(см²•с))

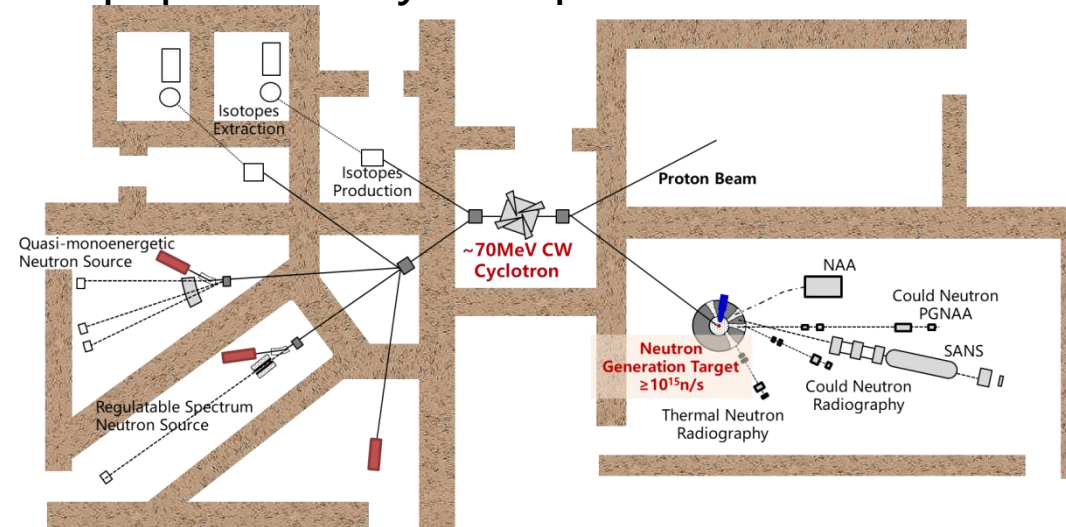
HINEG-IIIa: высокоинтенсивный стабильный источник нейтронов с регулируемым спектром на основе циклотрона

Цели

- Обоснование физики активной зоны и усовершенствованных реакторных технологий
- Разработка пограничных технологий и расширение областей применения
- Техническое обоснование для крупномасштабной научной установки HINEG-IIIb

Основные параметры

- **Выход нейтронов: $\geq 10^{15}$ н/с**
- Ускоритель: 70 МэВ непрерывный пучок протонов



HINEG-IIIa находится на стадии концептуального проекта

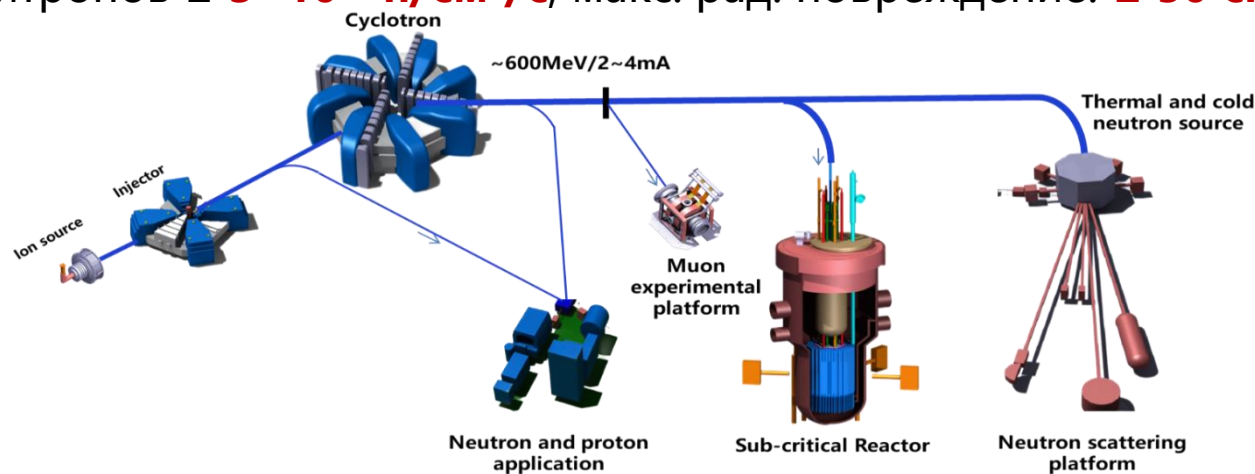
HINEG-IIIb: высокопоточный стабильный источник нейтронов с регулируемым широким спектром

□ Цели: Многофункциональная платформа облучения нейтронами

- Усовершенствованная ядерная установка: облучение топлива, материалов и оборудования
- Расширение области применения ядерной технологии: производство изотопов, нейтронная терапия, активационный анализ и т.д.
- Фундаментальные исследования: рассеяние нейтронов и мюонный эксперимент для исследования структуры и анализа материалов в масштабе атома, обнаружение остаточных напряжений в крупном оборудовании, исследования магнитной структуры и динамических свойств

□ Основные параметры

- **Выход нейтронов** нейтронного источника на основе ускорителя: $10^{17\sim 18}$ н/с
- Макс. флюенс нейтронов $\geq 3 \times 10^{15}$ н/см²/с, макс. рад. повреждение: ≥ 50 сна/а



HINEG-IIIb находится на стадии концептуального проекта

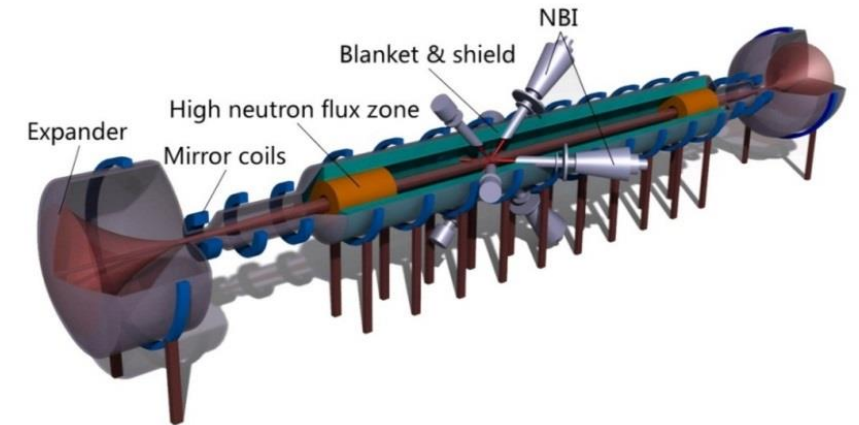
НINEG-GDT: объемный источник термоядерных нейтронов на основе газодинамической ловушки

□ Цели применения

- Облучение материалов для термояд. реакторов для всего срока службы (≥ 20 сна/год на полную мощность)
- Испытание компонентов blankets и дивертора
- Данные по надежности ядерного оборудования
- Обоснование трансмутации радиоактивных отходов
- Техническое обоснование для подкритического реактора с бегущей волной на основе газодинамической ловушки

□ Основные параметры

- Выход нейтронов: $\geq 10^{18}$ н/с, объемный, стабильный
- Интенсивность расхода трития: < 200 г/год на полную мощность
- Флюенс нейтронов и испытательный объем:
 - ≥ 2 МВт/м² (~35 л)
 - ≥ 1 МВт/м² (~100 л)
 - ≥ 0.5 МВт/м² (~1 м³)



- Линейные, простые и компактные конструкции
- Относительно низкие технологические требования

Концептуальное проектирование началось в 2009 году при постоянной поддержке проектов МАГАТЭ, средств местных органов власти и т.д.

MINEG-

MINEG-HT

CONEG-S

CONEG-M



RT-1 Д-Т мини-генератор нейтронов для элементного анализа
(Д-Т: 4500 ч при 1×10^8 н/с, $\phi 102$ мм)



RT-2 Высокоэффективный Д-Д мини-генератор нейтронов для элементного анализа
(Д-Д: 4500 ч при 1×10^7 н/с, $\phi 102$ мм)



RT-3 Мини-генератор нейтронов с детектором α -частиц для нейтронной безопасности
(Д-Т : 1200 ч при 1×10^7 н/с, $\phi 76$ мм)



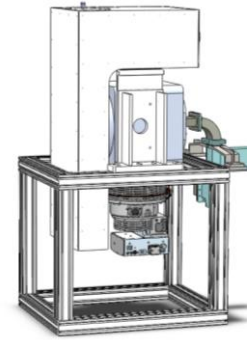
HT-1 Д-Т мини-генератор нейтронов для кабельного каротажа
(Д-Т: 500 ч при 175°C , 1×10^8 н/с)



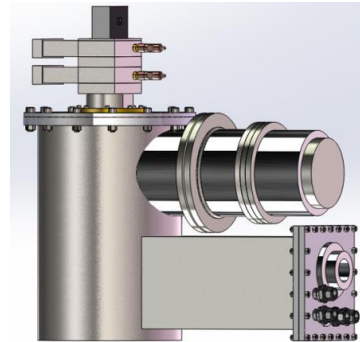
HT-2 Высокоэффективный Д-Д мини-генератор нейтронов для каротажа в необсаженной скважине
(Д-Д: 500 ч при 175°C , $1 \sim 5 \times 10^7$ н/с)



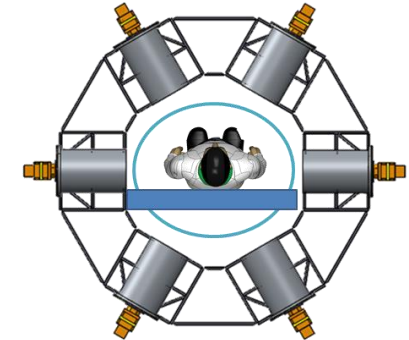
HT-3 мини-генератор нейтронов для каротажа каротажа во время бурения
(Д-Т: 500 ч при 175°C , 1×10^8 н/с, антивибр. 20 гСКЗ, антиудар. 1000 г)



Общий компактный генератор нейтронов S-1
(Д-Д: 5×10^9 н/с в теч. 1000 ч)



S-2 Высокоинтенсивный долговечный компактный генератор нейтронов
(DD: 1×10^{10} н/с в теч. 2000 ч)



М-1 Многопучковый компактный генератор нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии
(Д-Д: $> 1 \times 10^{10}$ н/с в теч. 2000 ч, надтепловые нейтроны)

Элементный анализ промышленных материалов, нейтронной безопасности

Разведка на нефть и газ

Нейтронная радиография, элементный анализ, калибровка детектора, облучение и др.

Бор-нейтронозахватная терапия

I. Общие сведения

II. Разработка установок

III. Нейтронные эксперименты

IV. Заключение

Многофункциональная расчетная программа для ядерного проектирования и оценки безопасности (TopMC: обновленная и расширенная версия SuperMC)

- **Больше мощных функций :**

Перенос заряженных частиц: **электрон, протон, ион и т.д. (не только нейтрон/фотон)**

Высокоэффективный анализ: **подсчет высоты импульса в сочетании с технологией снижения дисперсии**, рациональное ядерное проектирование и т.д.

- **Больше областей применения :** **расширенная версия для использования в ядерной энергетике** проектирование/применение для обнаружения нейтронов и ускорителя ..

- **Больше проф. обслуживания :** **стандартизированное и проф. обслуживание** предпродажная тех поддержка, систематическое обучение, послепродажное обслуживание



- Широко используется в **90+ странах** и **40+ мега-проектах**

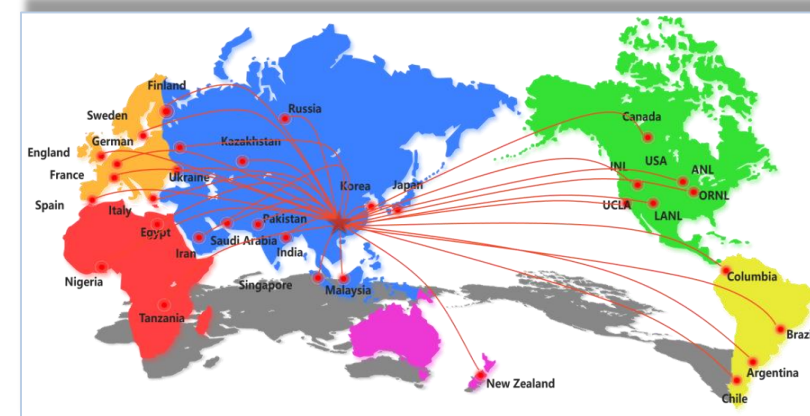
- Выбран референтным кодом ИТЭР

- Прошел процедуру GDA для UK HPR1000

- **Доступен в OECD/NEA и RIST/NCC**

<http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/iaea1437>

<http://www.tokai.rist.or.jp/nucis/codetable.html>



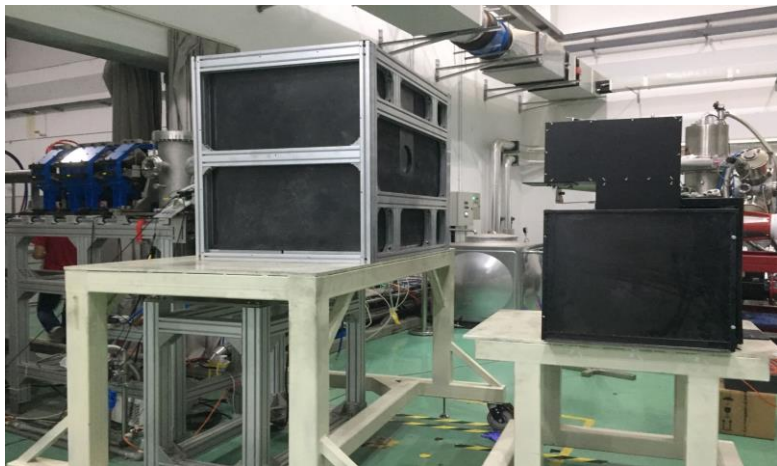
Получите бесплатно демо-версию на стенде #1



Определение нейтронных характеристик
испытательного blankets модуля



Спектры утечки от Pb и СВЭ



Нейтронная радиография



Биологическое действие нейтронов

Пример 1 : нейтронный эксперимент с макетом DFLL-TBM

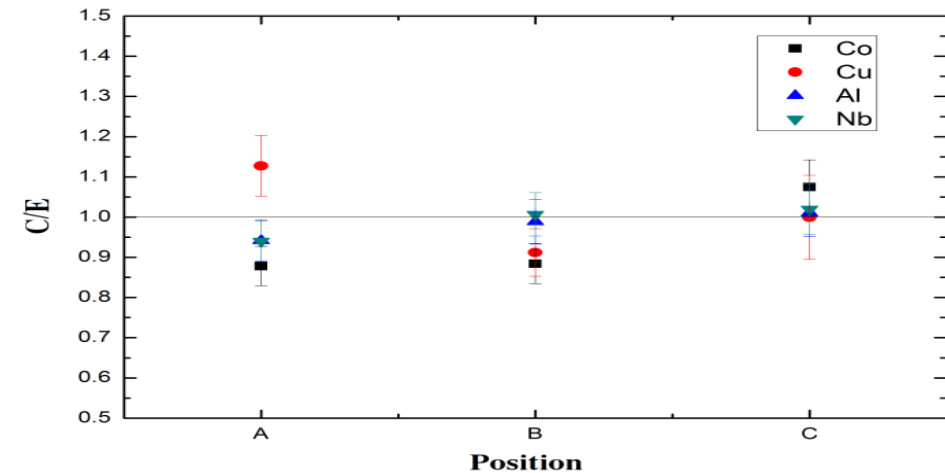
Мотивация: обоснование характеристик размножения трития испытательного модуля blankets со свинцово-литиевым охлаждением с двойной функцией (DFLL TBM) и эффекта глубокого проникновения термоядерных нейтронов



DFLL-TBM

Источник нейтронов

Макет для экспериментов



Экспериментальные результаты

Измерена скорость получения трития и скорость реакции активации.

Расхождение между расчетом по TopMC и результатами эксперимента составляет < 10%

Результаты показывают, что TopMC подходит для расчета DLL-TBM

Пример 2: биологическое действие нейтронов

Мотивация: исследование биологического действия нейтронов 14 МэВ на мышей Balb/c и нематод *C.elegans*.



Облучение нейтронами мышей Balb/c

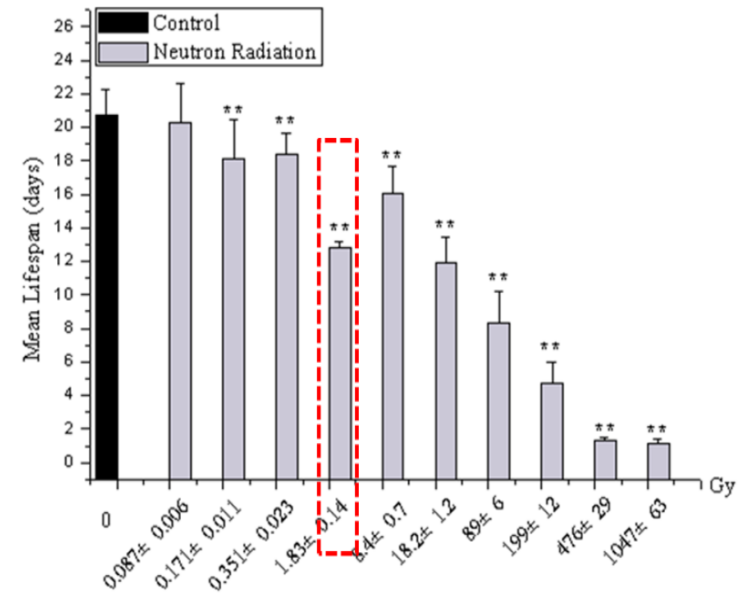


График средней продолжительности жизни нематоды *C. elegans* в зависимости от дозы облучения

На установках HINEG была проведена серия экспериментов по изучению биологического действия нейтронов

Результаты позволяют получить исходные данные для обеспечения радиационной защиты от нейтронов 14 МэВ

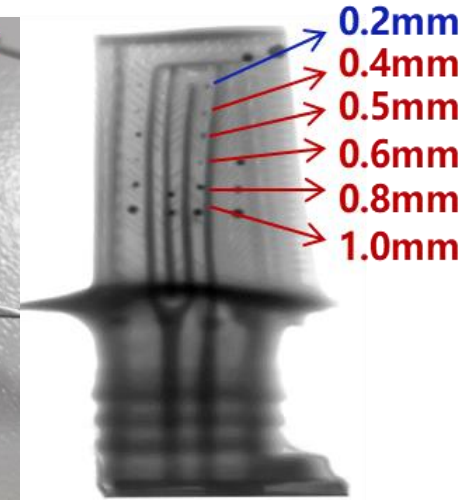
Другие примеры экспериментов



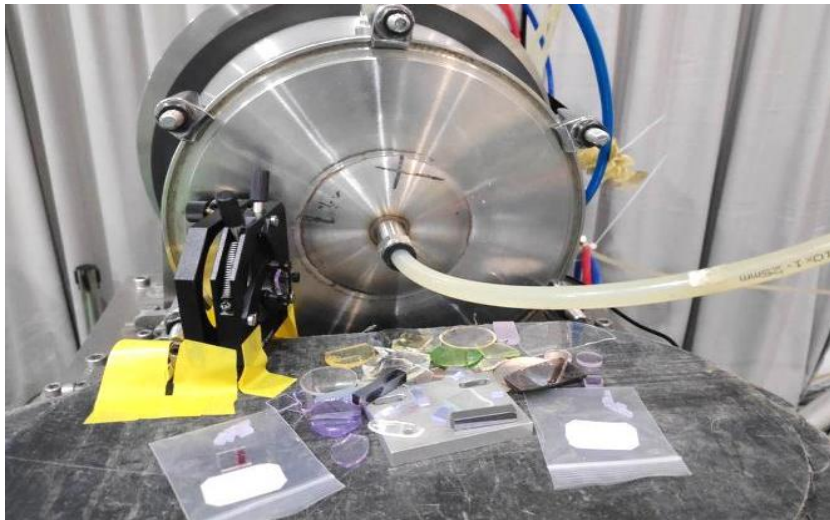
Калибровка детектора нейтронов



Исследования повреждения ДНК в клетках



Обнаружение дефектов лопатки турбины двигателя



Исследование радиационного повреждения лазерного кристалла



Исследование облучения риса и пшеницы



Эксперимент с активацией материалов для оборудования термояд. реакторов

□ Стратегический план разработки установок HINEG :

- **HINEG-I:** дейтерий-тритиевый генератор нейтронов, объединенный с реактором нулевой мощности CLEAR-0, **6.4×10^{12} н/с, сооружен и работает**
- **HINEG-II:** высокоинтенсивный дейтерий-тритиевый источник, стабильный источник нейтронов на циклотроне с регулируемым спектром, **$10^{13 \sim 14}$ н/с, на стадии сооружения**
- **HINEG-III/GDT:** высокоинтенсивный стабильный источник нейтронов на циклотроне HINEG-IIa, высокопоточный стабильный источник нейтронов с регулируемым широким спектром HINEG-IIb, объемный источник термоядерных нейтронов на основе газодинамической ловушки HINEG-GDT, **на стадии проектирования**

□ Закончена/запланирована серия экспериментов:

- Нейтронно-физическая программа и эксперименты в обоснование методики
- Испытание рабочих характеристик оборудования, включая испытательный модуль blankets
- Нейтронная радиография
- Нейтронная терапия
-



Better Technology, Better Life!

Спасибо за внимание !

Website: www.fds.org.cn
E-mail: contact@fds.org.cn





1. Расчет радиационного переноса

- **Для различных частиц:** нейтронов, фотонов, электронов и др
- **Гибкое описание источника:** общий источник, критический источник, поверхностный источник, определенный пользователем источник
- **Физические параметры :** $k_{\text{эфф}}$, поток на поверхности/в ячейке/сетке/детекторе, выделение энергии, скорость реакции, высота импульса и др
- **Адаптивное уменьшение дисперсии на основе GWWG**
- **Различные эффективные параллельные вычисления** MPI, OpenMP, параллельная декомпозиция данных и т.д.
- **Температурно-зависимая обработка поперечного сечения:** тепловая и резонансная, On-line/OTF

2. Расчет обеднения изотопов

- **Метод решения:** метод рационального приближения Чебышева (CRAM) и тд
- **Внутреннее объединение:** приближение постоянного потока начала шага (BOS), метод предиктор-корректор (PC), усовершенствованный метод полупредиктор-корректор (ISPC) и тд

3. Расчет активации материалов и трансмутации

- **Режимы расчета:** расчет активации точки, расчет транспортно-активационной связи и т.д.
- **Свойства активации:** активность, теплота распада, биологическая опасность, мощность дозы, индекс допуска и др.

4. Расчет мощности дозы при останове

- **Метод решения:** метод Rigorous-Two-Step (R2S) и улучшенный метод Direct-One-Step (D1S)

1. Моделирование с мультифизическим объединением

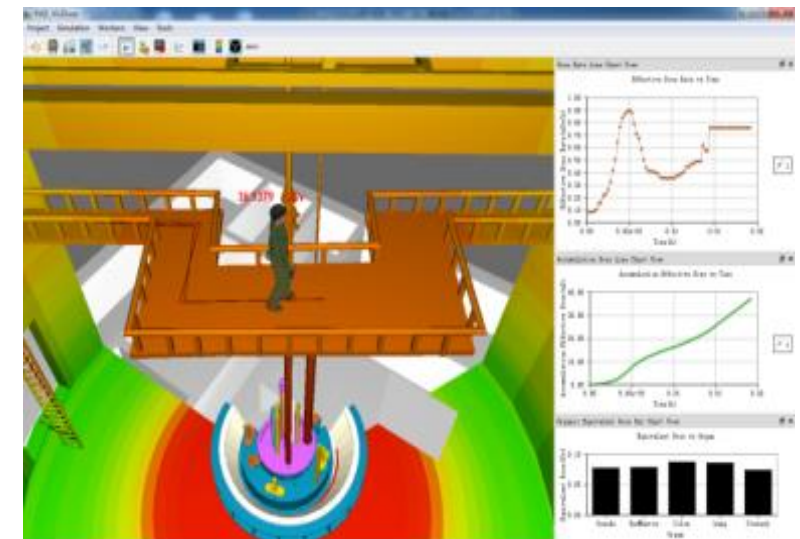
- Объединение нейтронного расчета с термогидравликой, механикой конструкций и др.

2. Оценка тканевой дозы на основе виртуального перемещения

- Виртуальное перемещение персонала в радиационной обстановке
- Оценка в реальном времени тканевой дозы и коллективной дозы
- Автоматическая оптимизация путей перемещения

3. Моделирование развития аварии

- Быстрое прогнозирование процесса развития аварии
- Полномасштабное моделирование диффузии радионуклидов в реальном времени
- Точная инверсия аварийного источника выброса
- Интеллектуальная поддержка принятия решений



Оценка тканевой дозы

Верификация и валидация на 2000+ случаях

Образцы для сравнительного анализа + отдельные эксперименты + комплексные эксперименты

■ Физика активной зоны

- ICSBER (OECD/NEA)
- IRPhEP (OECD/NEA)
- PWR: BEAVRS, ВВЭР и т.д.
- LWR: Hoogenboom & Martin (полная а.з. , постерж.), MNSR-GHARR-1, TRIGA и т.д.
- Быстрые реакторы: IAEA-BN600, TCA Critical Facility, BFS, RBEC-M и т.д.
- ...

■ Медицинская физика

- QUADOS (EURADOS)
- ...

■ Радиационная защита

- SINBAD (OECD/NEA & ORNL/RSICC)
- Реф. модели ИТЭР ITER benchmark model
 - Модель ИТЭР A-lite
 - Модель ИТЭР B-lite
 - Модель ИТЭР C-lite, C
 - Конструктивная модель ИТЭР
 - ...
- Международные эксперименты по интегральной скорости утечки
- ...

- Публикация в *Int. J. Energy Res*
Yican WU. Int. J. Energy Res, 2018,42(1):68-72.
- Публикация в *ANS-FED Newsletter*: (два тома в год)
Статус и перспективы источников нейтронов для использования на термоядерных установках в Китае, 2015
- Отмечен в базе данных МАГАТЭ по установкам LMFNS
Установки LMFNS : установки в поддержку быстрых установок с жидкометаллическим теплоносителем

