



ПРОЕКТ И СОСТОЯНИЕ НИОКР ПО КИТАЙСКОМУ СВИНЦОВОМУ РЕАКТОРУ

Международная академия нейтронных наук (IANS), Циндао

МНТК НИКИЭТ-2023
2023-11-15, Москва, Россия



FDS: Консорциум по инновациям в области ядерных технологий

A1.01
ДАННОЕ



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

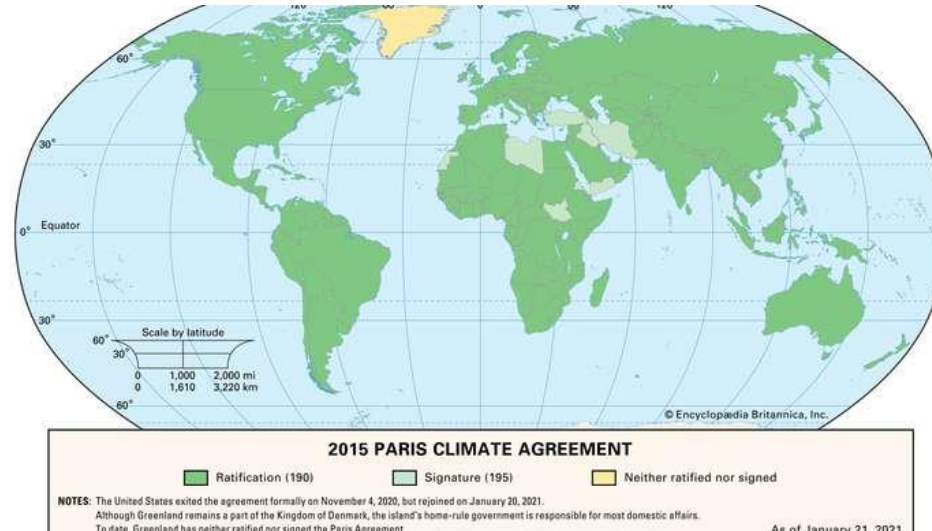
- Цель - НИОКР по ядерной науке, технологиям и областям применения при мощной поддержке правительства
- Создание нескольких научно-исследовательских организаций и серии высокотехнологичных предприятий

- Стратегия и план развития свинцового реактора
- Проектирование китайского свинцового реактора
- Платформы НИОКР по китайскому свинцовому реактору
- Платформы инженерной валидации NIRVANA
- Заключение

1

Стратегия и план развития свинцового реактора

Парижское соглашение: направлено на существенное снижение мировых выбросов парниковых газов и ограничение глобального повышения температуры в этом столетии 2°C с одновременным изучением возможностей ее ограничения $1,5^{\circ}\text{C}$



- Китай стремится достичь углеродного пика к 2030 году и углеродной нейтральности к 2060 году.**
- Президент Си Цзиньпин, сентябрь 2020 года, Ассамблея Организации Объединенных Наций**

Спрос на малую энергетику в Китае

- **Удаленные регионы:** ~12% земельного массива - пустыня без электроснабжения
- **Морские установки:** ~1/4 запасов газа и нефти в море в ожидании разработки
- **Распределенное электроснабжение:** автономная промышленность, на основе ветровой или солнечной энергии
- **Аварийное электроснабжение:** настоящая проблема в некоторых провинциях



Высокие требования

- Автономность
- Гибкость
- Устойчивое развитие
- Экономичность

Преимущества по безопасности

Нейтроника: отрицательный коэффициент, плавающие обломки активной зоны

Теплогидравлика: низкое давление, исключены аварии с потерей теплоносителя, естественная циркуляция

Химия: химическая инертность, отсутствуют реакции с водой и воздухом, нет риска взрыва водорода

Преимущества по устойчивому развитию

Низкое поглощение нейтронов, слабое замедление, позволяет поддерживать **жесткий спектр нейтронов**



Высокий коэффициент использования топлива

Сжигание долгоживущих высокоактивных отходов

Основная программа по китайскому свинцовому реактору

1980-1990-е

Программа "863"
Программа "973"

2000-е

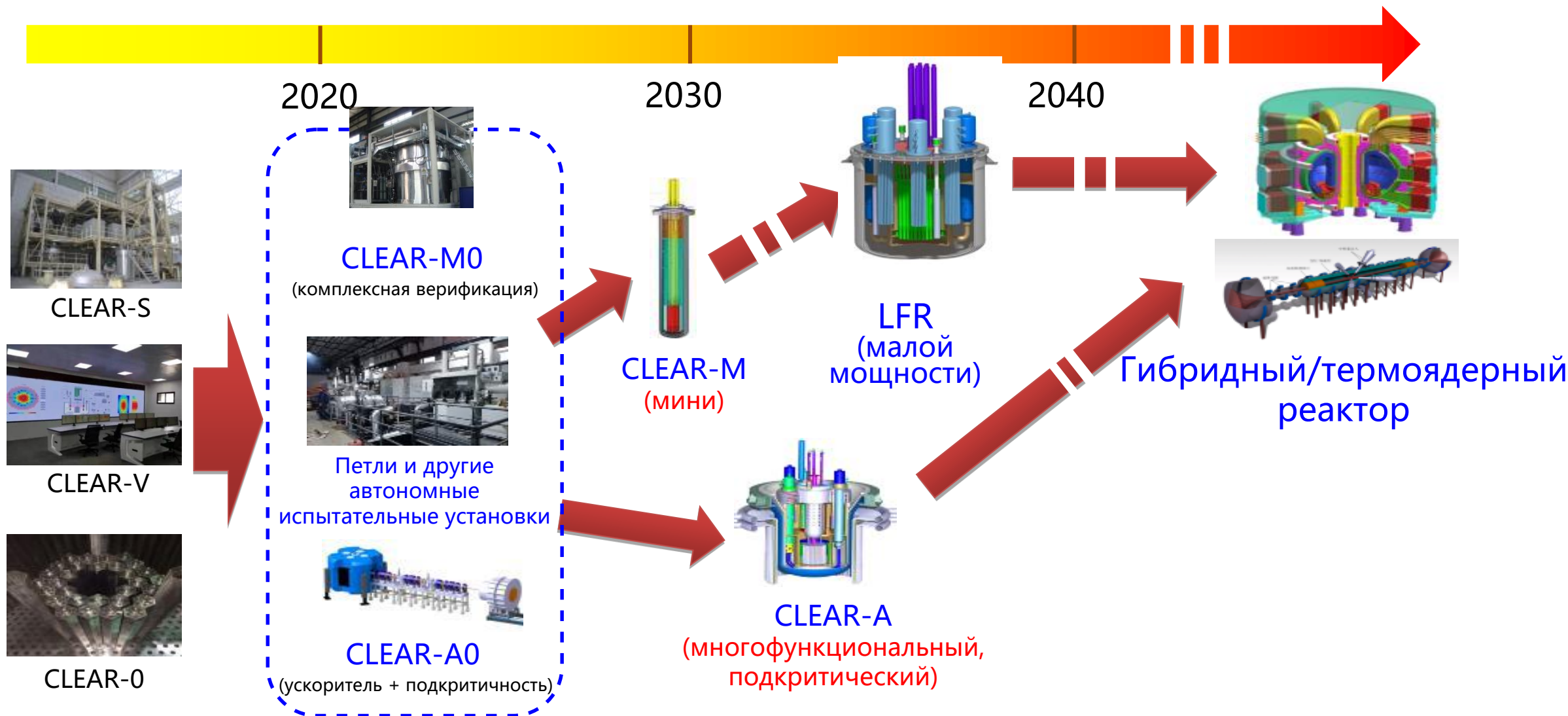
Международная/национальная исследовательская программа по ИТЭР

2010-е

Программа стратегических приоритетных исследований CAS
Национальная основная научно-техническая инфраструктура

- Национальный высокотехнологичный проект: гибридный термоядерный реактор
FDS отвечает за гибридный свинцовый реактор
- Проект ИТЭР: термоядерный реактор
FDS отвечает за китайский бланкет, охлаждаемый жидким свинцом
- Программа стратегических приоритетных исследований CAS: система на основе ускорителя
FDS отвечает за подкритический свинцовый реактор
- Китайский свинцовый мини-реактор (CLEAR-M)
Поддерживается национальным/местным государственным проектом и отраслевыми инвестициями

FDS имеет ~ 30-летний опыт исследований и разработок свинцовых реакторов и был назначен китайским представителем по свинцовым быстрым реакторам на форуме GIF.



2

Проектирование китайского свинцового реактора

Китайские свинцовые реакторы (CLEAR)

CLEAR-M: китайский свинцовый мини-реактор

Небольшой и компактный, с внутренне-присущей безопасностью, простой в транспортировке и монтаже, пригодный для удаленных регионов, морских установок, автономных промышленных парков и т.д.

CLEAR-A: усовершенствованный свинцовый реактор на внешнем источнике нейтронов

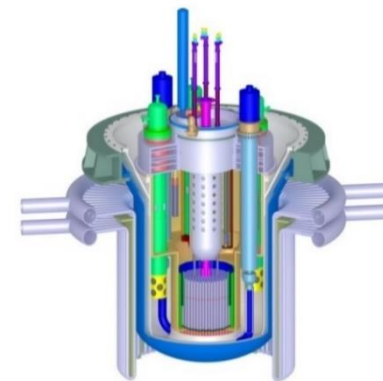
Эксплуатация в подкритическом режиме, рациональное использование ресурсов - обедненные U или Th в качестве топлива, с размножением

CLEAR-400: Малый модульный реактор тепл. мощностью 400 МВт

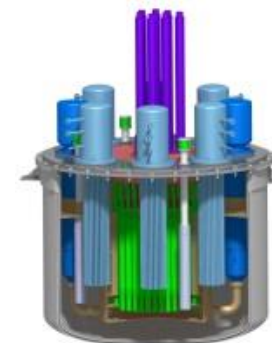
Удовлетворение потребностей в гибкой выработке электроэнергии для более широкого круга пользователей и областей применения, таких как замена существующих электростанций, работающих на ископаемом топливе, опреснение морской воды, центральное отопление



CLEAR-M



CLEAR-A



CLEAR-400

Реактор серии CLEAR разрабатывался при постоянной поддержке национальных программ и инвестиций предприятий

CLEAR-M: свинцовый мини-реактор

Модульность, малый размер

Легкость транспортировки и монтажа

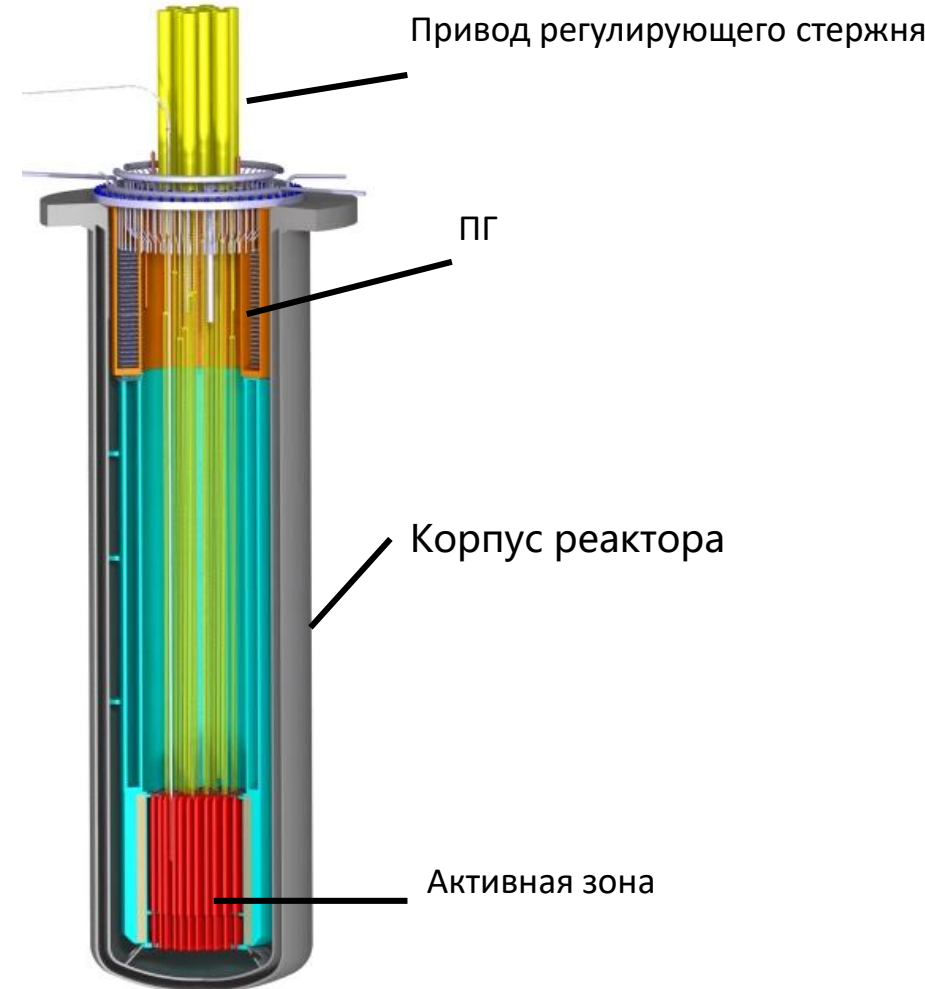
Внутреннеприсущая безопасность

Естественная циркуляция

Длительный период между перегрузками

10-20 лет

Item	Parameters
Thermal power	35MWth
Electrical power	14MWe 10MWe+17MWt
Fuel	Ave.18.5% UO ₂
Core life	10~20 years
Core inlet / outlet temperatures	375/495°C



Гибкая выработка электроэнергии

Замена устаревающих электростанций на ископаемом топливе

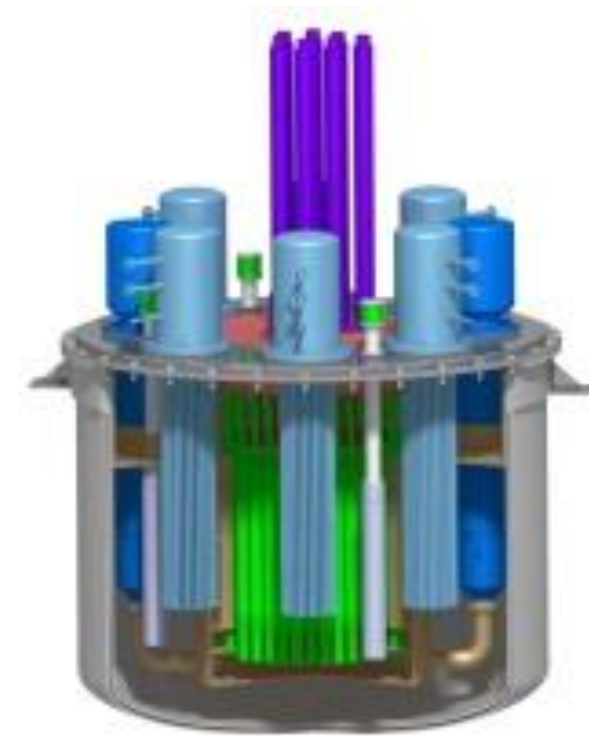
Внутренне-присущая безопасность

Пассивный отвод остаточного тепловыделения

Высокая экономическая ценность

Модульная интеграция и низкая стоимость строительства

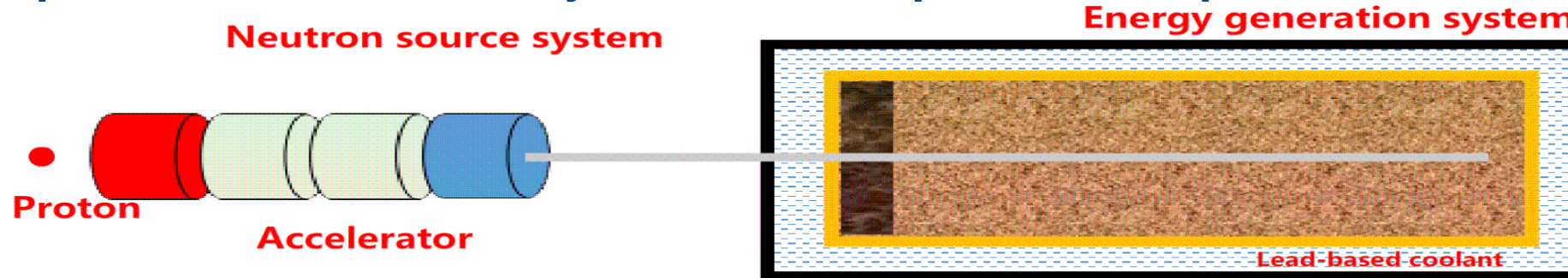
Item	Parameters
Thermal power	400 MWth
Electrical power	150 MWe
Fuel	Ave.19.75% UO ₂
Core life	5~10 years
Core inlet / outlet temperatures	380/480°C



CLEAR-400

CLEAR-A: усовершенствованный свинцовый реактор на внешнем источнике нейтронов

Источник нейтронов деления + эксплуатация в подкритическом режиме + свинцовый реактор



- **Внутренне-присущая безопасность**
- Эксплуатация в подкритическом режиме
 - Свинец в качестве теплоносителя
- **Рациональное использование ресурсов**
 - Обедненный U или Th в качестве топлива с реакцией размножения
 - Период между перегрузками более 10 лет
- **Меньше ядерных отходов**
 - Трансмутация трансурановых элементов нейтронами высокой энергии
 - Из отработавшего топлива удаляются только продукты деления

		A100
Accelerator	Type	Cyclotron
	Proton Energy /MeV	900
	Current /mA	1~10
Target	Material	Lead
	Number of Targets	1
Reactor	Power	400MWt
	Nuclear Fuel	UZr
	Structure Material	HT-9/CLAM
	Coolant	Lead
	Refueling Period /yr	15

3

Платформы НИОКР по китайскому свинцовому реактору

Многофункциональная свинцово-висмутовая экспериментальная петля (KYLIN-II)

- Разработаны и проверены на возможность длительной эксплуатации в серии петель ключевые элементы оборудования, материалы и топливо
- Более 40000 часов эксплуатационных испытаний материалов и ключевых элементов оборудования в петлях с ТЖМТ

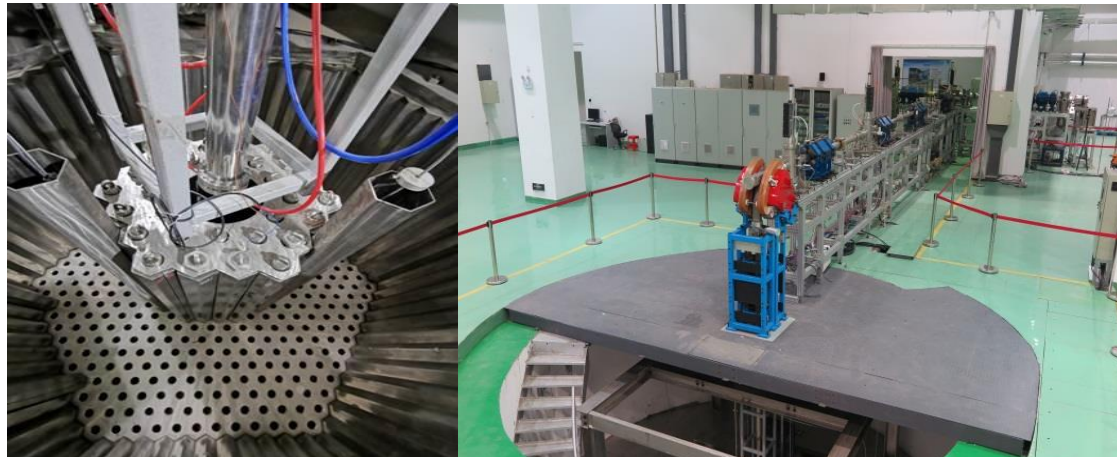


- Теплогидравлические исследования
- Проверка возможности технической реализации ключевого оборудования
- Демонстрация выработки электроэнергии
- Оценка коррозионной стойкости материала

Три комплексные испытательные установки



Цифровое моделирование: CLEAR-V



Испытания физики нейтронов: CLEAR-0



Инженерные испытания: CLEAR-S

Установка цифрового моделирования

—Виртуальная свинцовая установка CLEAR-V

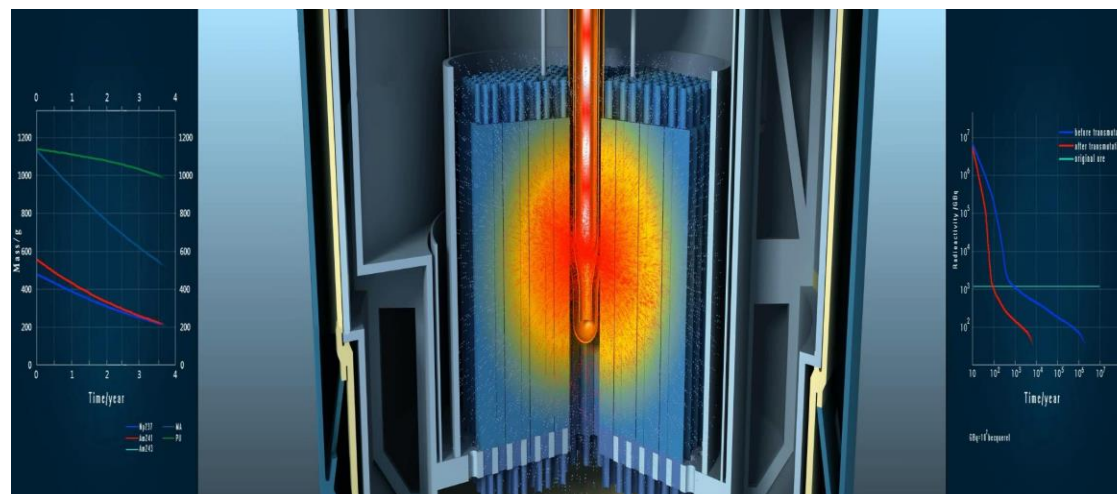
Мультифизическое комплексное моделирование с использованием ~30 кодов

Независимые права на интеллектуальную собственность (> 1000 человеко-лет рабочей силы)

Применяется в более чем 90 странах, более 1000 учреждений

Референтный код расчета физики и техники нейтронов проекта ИТЭР

(Международный термоядерный экспериментальный реактор)



Перечень усовершенствованного ядерного ПО

Усовершенствованное ядерное ПО, которое включает в себя программы интеллектуального проектирования, автоматизации и оценки безопасности, разработано на основе инвестиций в рабочую силу более 1000 лет·человек. Разработано более 20 программных продуктов.

I. Физико-технические расчеты

- TopMC/SuperMC Многофункциональная программа расчета для ядерного проектирования и оценки безопасности
- NTC Программа моделирования связи нейтроники и термогидравлики
- MTC Программа моделирования связи магнитных явлений и термогидравлики
- TAS Программа анализа трития для термоядерной установки
- HENDL Гибридная библиотека оценочных ядерных данных
- FusionDB Система управления термоядерными базами данных

II. Интерактивное проектирование и оптимизация

- RiskA Программа оценки надежности и вероятностной безопасности
- RiskAngel/TQRM Мониторинг рисков для атомной электростанции
- RiskBase Система управления базами данных для анализа надежности
- SYSCODE Проектирование термоядерной установки и программа экономической оценки

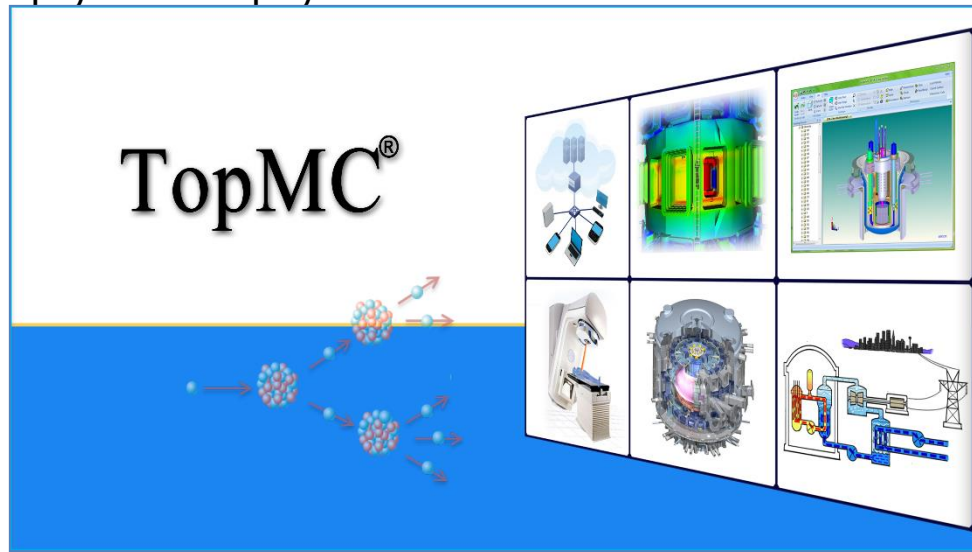
III. Комплексное интегральное моделирование с использованием нескольких процессов

- Virtual4DS Виртуальная атомная электростанция в среде цифрового общества
- VisualBUS Цифровой ядерный реактор
- CLEAR-V Виртуальный свинцовый ядерный реактор
- Fusion-V Виртуальный термоядерный реактор
- CROSS Платформа сотрудничества в области информатизации для научных исследований
- NCloud Ядерная облачная платформа
- NBigData Ядерная платформа больших данных



Функции

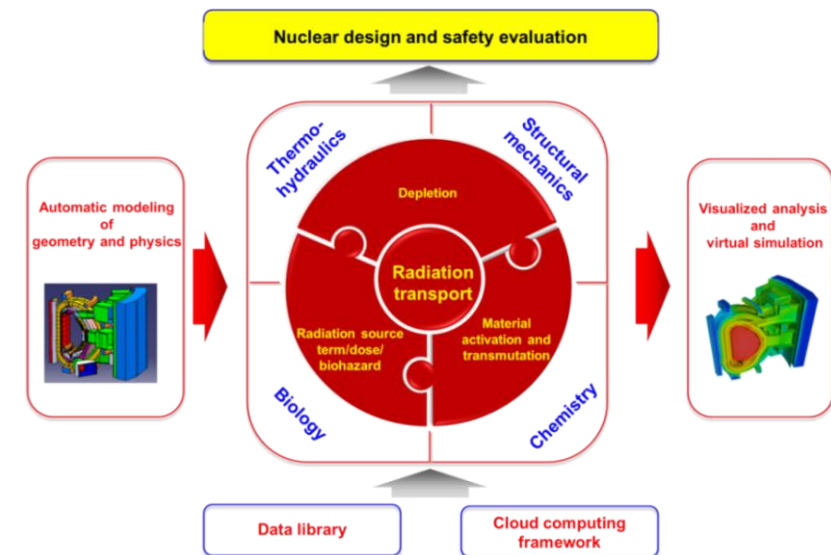
- Расчет переноса излучения
- Расчет обеднения изотопов
- Расчет активации материала
- Расчет мощности дозы при останове
- Моделирование мультифизических связей
- Моделирование развития аварии
- Оценка органической дозы на основе виртуального роуминга



TopMC (обновленная и расширенная версия SuperMC)

Усовершенствованные характеристики

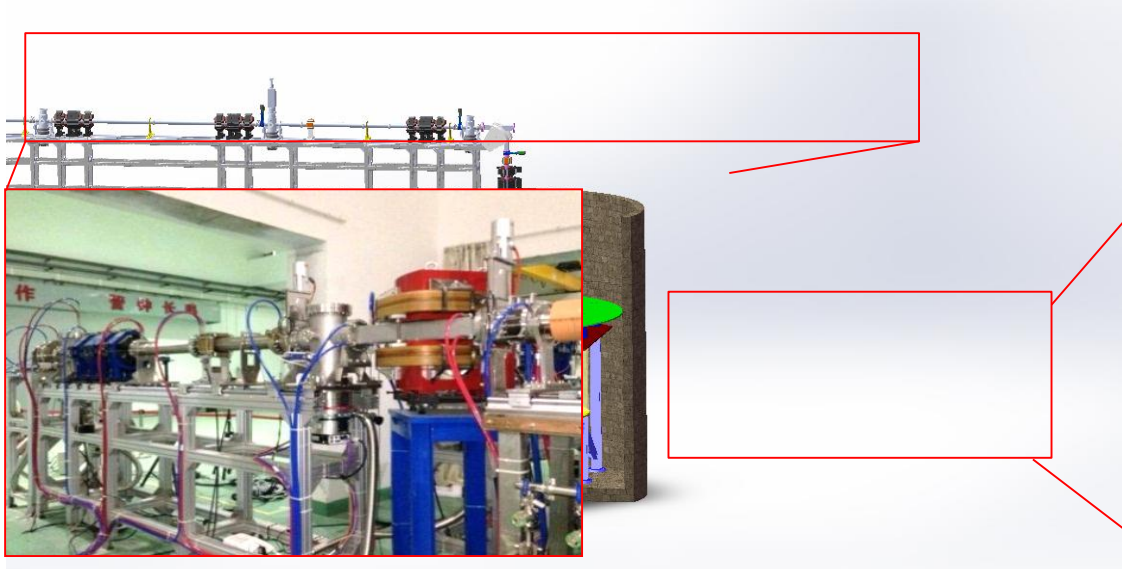
- Полнофункциональный и высокоэффективный расчет физики и техники нейтронов
- Точное моделирование на основе CAD/изображений для сложной неправильной геометрии
- Анализ данных на основе многомерной/многообразной визуализации



Испытательная установка нейтронной физики

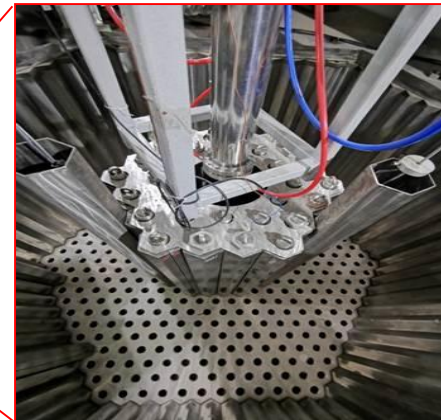
— Критическая/подкритическая свинцовая установка нулевой мощности CLEAR-0

- ❑ Валидация методики, кода и базы данных анализа нейтроники как для критических, так и для подкритических установок
- ❑ Предоставление экспериментальных данных в поддержку лицензирования CLEAR



Дейтерий-тритиевый
источник нейтронов на
основе ускорителя
(HINEG)

Быстрый реактор на
PbBi



Активная зона

CLEAR-0	
Type	Zero-Power Reactor
Neutron source	C _f -252 or Accelerator-based neutron source
Running mode	Critical/Subcritical
Assembly	Hexagonal (Stainless Steel)
Fuel	UO ₂
Coolant	Solid LBE (room temperature)

Установка для комплексных неядерных испытаний

——Свинцовая установка для комплексных испытаний CLEAR-S

- ❑ Испытания прототипов оборудования для CLEAR-I
- ❑ Высота 1:1, диаметр 1: 2,5 относительно CLEAR-I
- ❑ 240 тонн СВЭ, тепловая мощность ~ 2,5 МВт



Y. Wu, FDS Team. CLEAR-S: An Integrated Non-nuclear Test Facility for China Lead-based Research Reactor. International Journal of Energy Research, 2016, 40(14):1951-1956.

4

Платформы инженерной валидации NIRVA

- Оценка материалов (≥ 873 К, ≥ 2 м/с, 10-6-10-8 вес.%)
- Термогидравлические испытания
- Исследования технологии теплоносителя
- Верификация прототипов устройств





Основной контейнер



Насос



Привод регулирующего стержня

- Полномасштабные интегральные установки бассейнового типа мощностью 10 МВт
- Интегральная верификация теплогидравлических характеристик и инженерная валидация полномасштабных прототипов оборудования
- Виртуальный свинцовый реактор для мультифизического комплексного 3D-моделирования с помощью расчетных кодов и кодов анализа безопасности с независимой интеллектуальной собственностью



1. Свинцовый реактор имеет много привлекательных характеристик и может сыграть важную роль в энергоснабжении будущего.
2. Были построены три комплексные испытательные установки серии CLEAR и платформы инженерной валидации NIRVANA.
3. Предлагается более широкое и серьезное международное сотрудничество.



Better Technology, Better Life!

Спасибо за внимание!

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

