

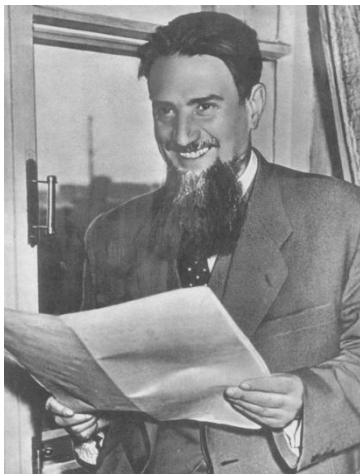


Развитие сверхпроводниковых технологий

С.В. Шавкин

Отделение сверхпроводимости
Курчатовский Комплекс НБИКС-технологий
НИЦ «Курчатовский институт»

Курчатовский институт – признанный лидер в областях ядерной науки и технологий



В XX веке Курчатовский институт сыграл ключевую роль в обеспечении безопасности страны и развитии важнейших стратегических направлений, включая разработку и создание ядерного оружия, атомного подводного и надводного флотов, атомной энергетики страны.

70-летие первого исследовательского реактора в Евразии «Ф-1»: декабрь 1946 г

55-летие начала работ по прикладной сверхпроводимости: май 1961 г.



Мотивация использования сверхпроводимости: все возрастающая потребность атомной науки и техники в устройствах с сильными магнитными полями, генерируемыми наиболее экономичным образом.

Низкотемпературные сверхпроводники – ключ к термоядерной энергетике



В 1969 году совместно с ВНИИНМ им. А.А. Бочвара на Ульбинском металлургическом заводе (г.Усть-Каменогорск, Казахская ССР) был организован промышленный выпуск отечественных сверхпроводящих материалов, сначала Nb-Zr и Nb-Ti, а с конца 1970-х годов – Nb₃Sn.

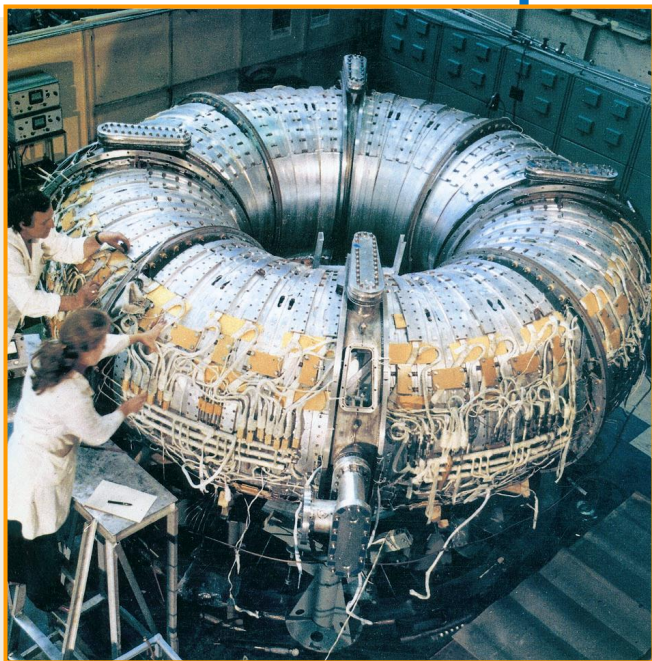
Это было крупнейшее на тот момент производство сверхпроводников в мире.



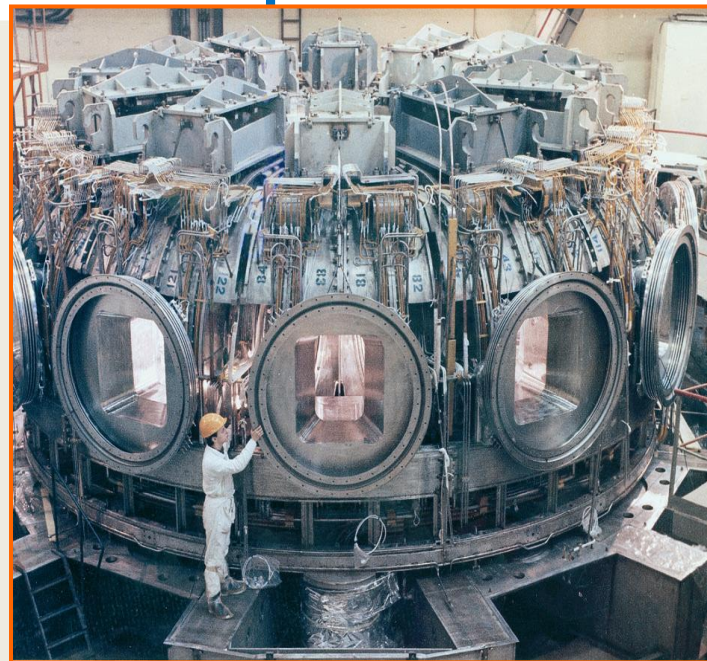
Магнит на 25 Т
в ИАЭ (1973 г.)

К середине 70-х найдены и реализованы в конкретных конструкциях технических сверхпроводящих материалов принципы стабилизации сверхпроводящего состояния. Созданы магнитные системы, доказавшие возможность создания СМС токамаков.

Низкотемпературные сверхпроводники – ключ к термоядерной энергетике

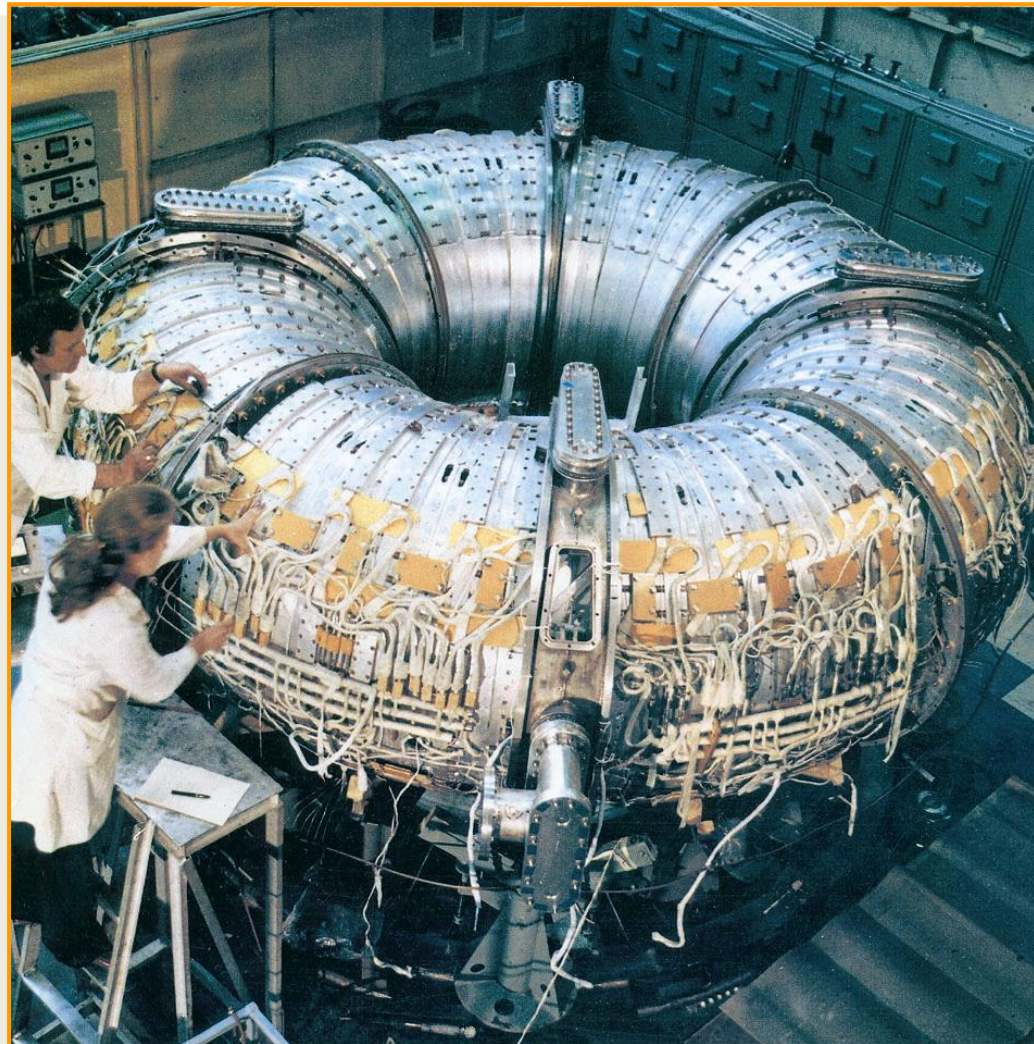


Первый в мире Токамак со
сверхпроводящей магнитной
системой на основе Nb-Ti
сверхпроводника

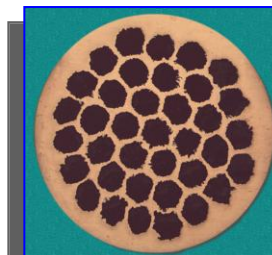


Первый в мире Токамак со
сверхпроводящей магнитной
системой на основе
Nb₃Sn сверхпроводника

Токамак Т-7 (1978 г.)



Первый в мире Токамак со сверхпроводящей магнитной системой на основе сверхпроводника NbTi



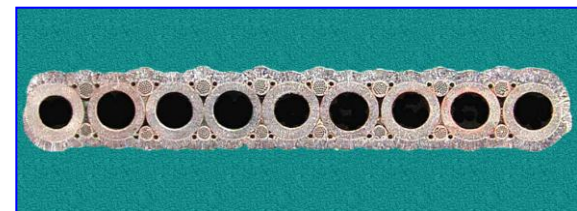
Сверхпроводник:

Диаметр сверхпроводника – 1,0 мм

Количество волокон – 37

Диаметр волокна – 96 мкм

Плотность критического тока (в поле 5 Тл) – 1100 А/мм²



Токонесущий элемент:

Количество 37-волоконных NbTi стрендов – 16

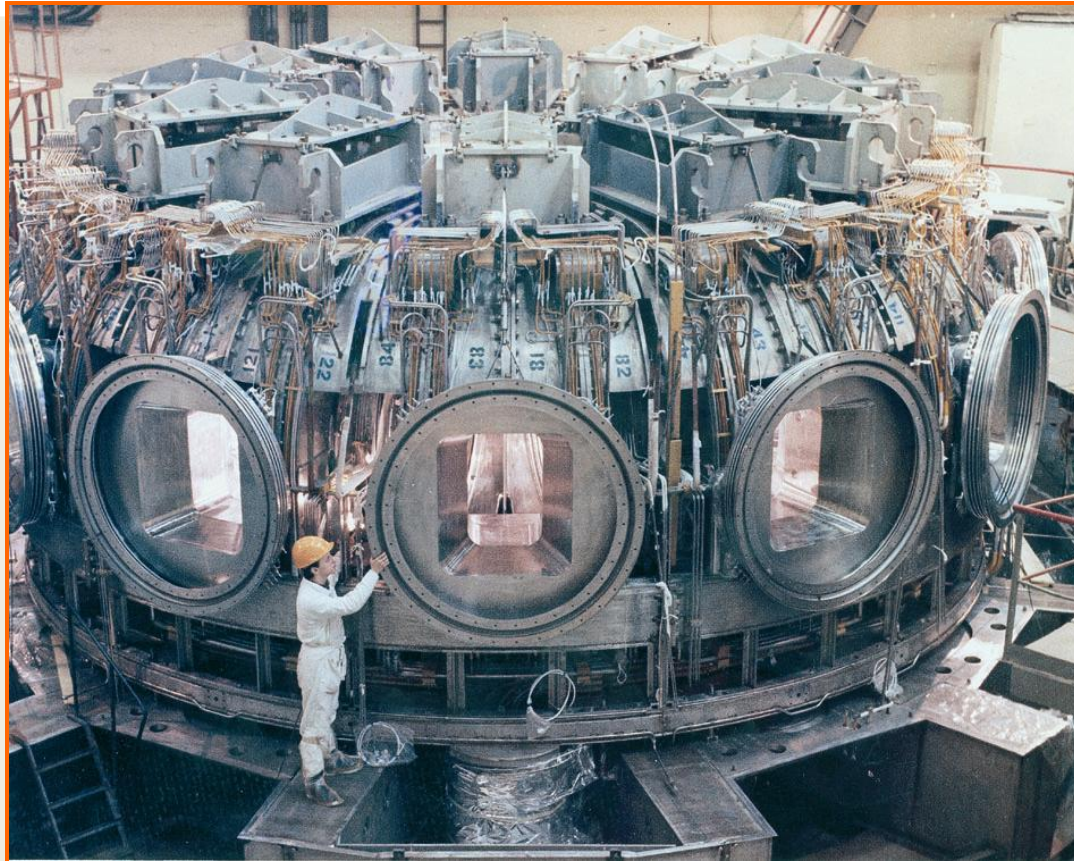
Количество одноволоконных NbTi стрендов – 32

Поперечное сечение ТНЭ – 35,5 x 5,5 мм

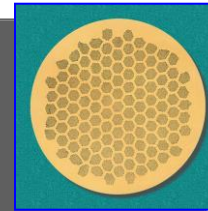
Количество каналов для циркуляции гелия – 9

Критический ток (в поле 6 Тл) – 4400 А
поле 5 Тл) – 1100 А/мм²

Токамак Т-15 (1988 г.)



Первый в мире Токамак со сверхпроводящей магнитной системой на основе соединения Nb_3Sn



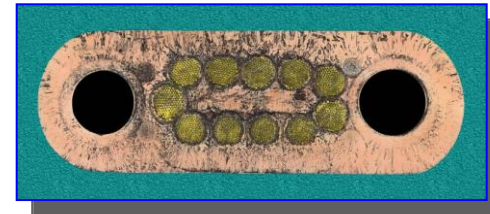
Сверхпроводник:

Диаметр сверхпроводника – 1,5 мм

Количество волокон – 14641

Диаметр волокна – 5 мкм

Плотность критического тока (в поле 8 Тл) – 440 А/мм²



Токонесущий элемент:

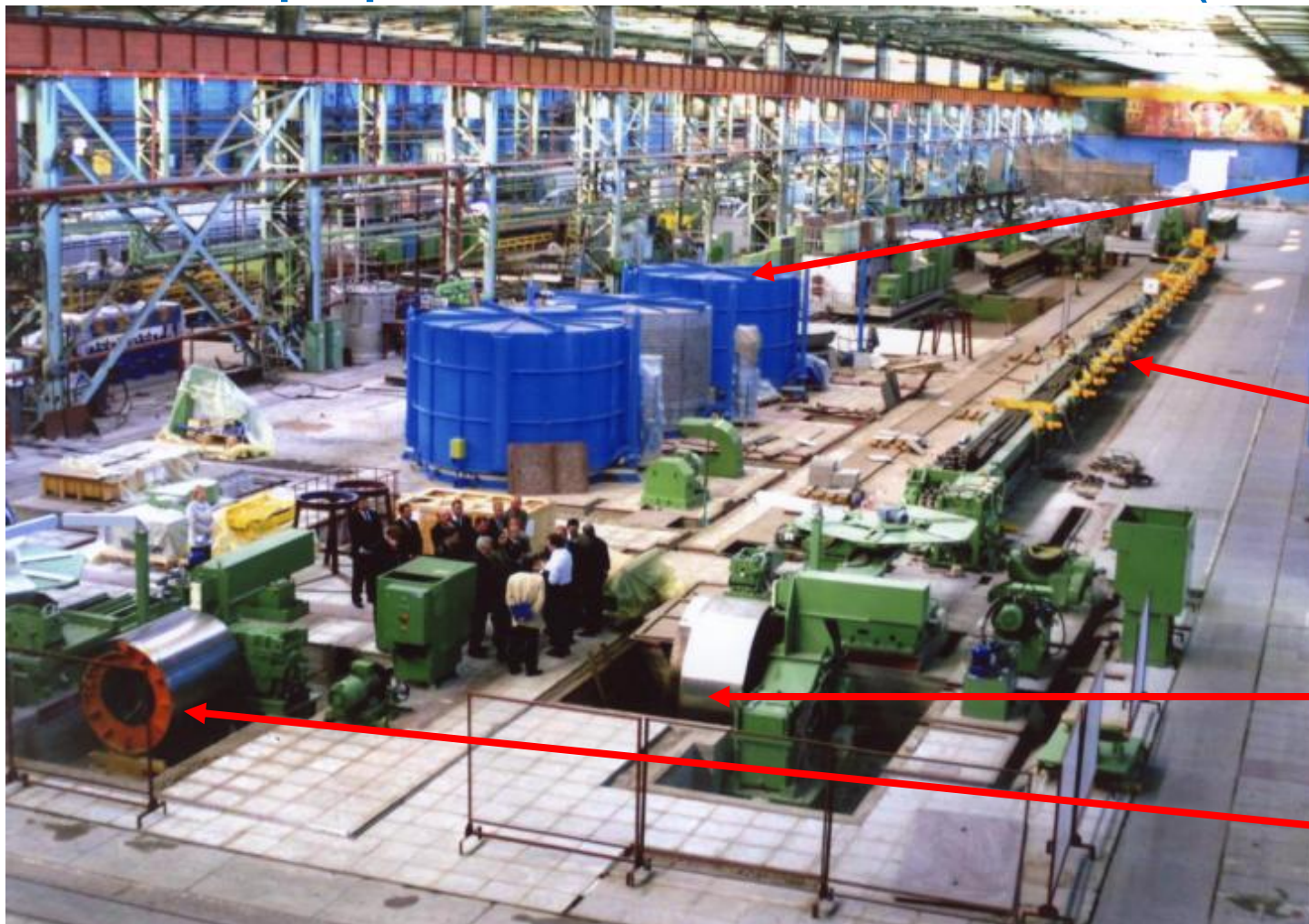
Количество многоволоконных Nb_3Sn стрендов – 11

Поперечное сечение ТНЭ – 17,4 x 6,5 мм

Количество каналов для циркуляции гелия – 2

Критический ток (в поле 8 Тл) – 8,5 кА

Промышленное производство низкотемпературных сверхпроводников воссоздано в России (2009)

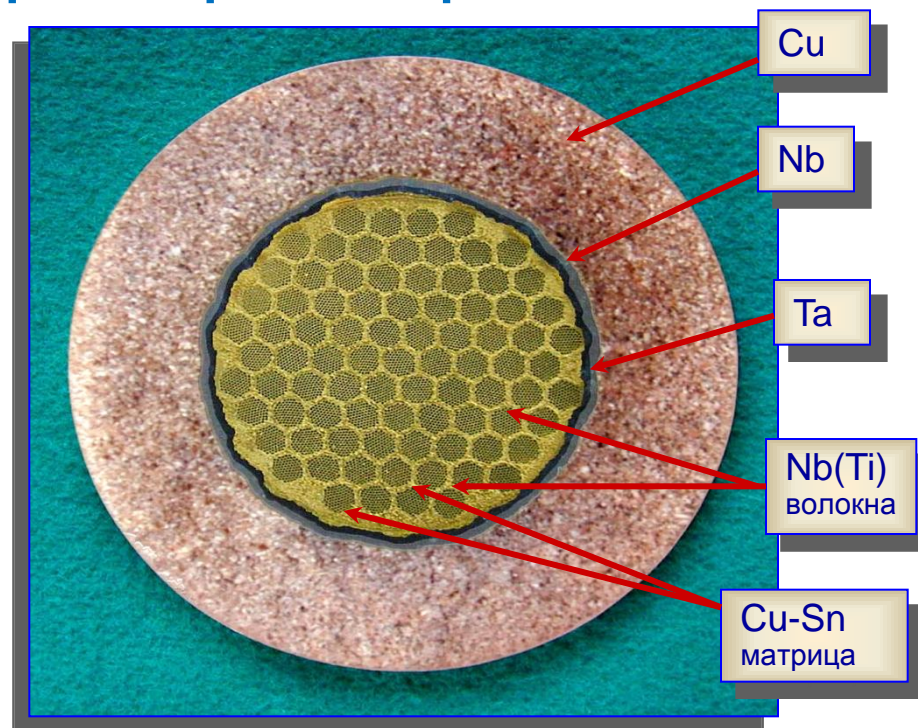
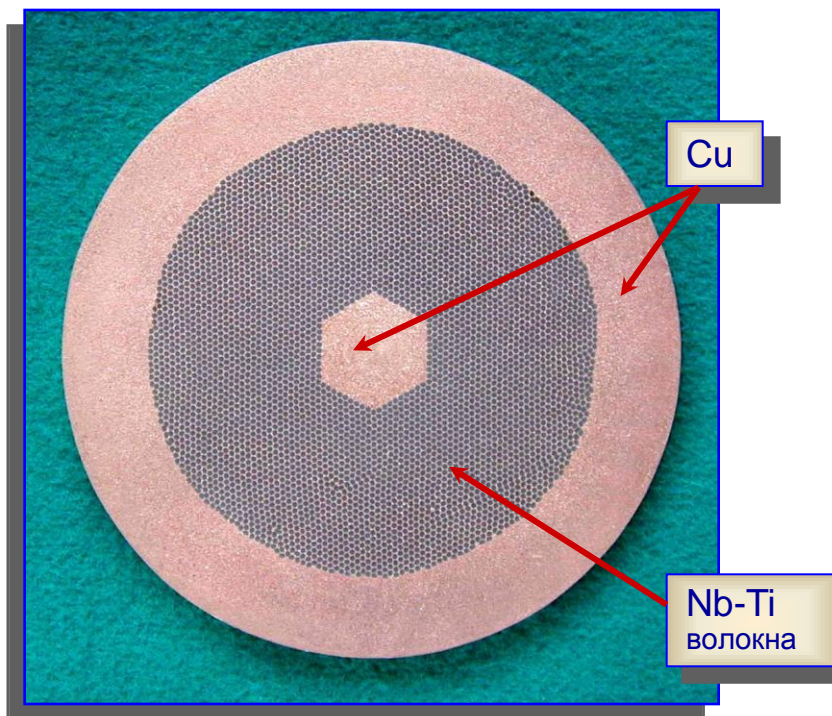


**СТЕНД
КОЛПАКОВЫХ
ПЕЧЕЙ**

**ЦЕПНОЙ
ВОЛОЧИЛЬНЫЙ
СТАН**

**ВОЛОЧИЛЬНЫЕ
СТАНЫ С
БАРАБАНАМИ
ДИАМЕТРОМ
1500 мм и 2500
мм**

ИТЭР – следующий шаг в термоядерной энергетике



Свойства NbTi сверхпроводника для ИТЭР:

Диаметр

сверхпроводника: **0,73 мм**

Количество волокон: **5000**

Диаметр волокна: **6,4 мкм**

Отношение Cu/не Cu: **1,6**

Плотность критического тока (5 Тл, 4,2 К):

>2700 А/мм²

Свойства Nb₃Sn сверхпроводника для ИТЭР:

Диаметр сверхпроводника: **0,81 мм**

Количество волокон: **7225**

Отношение Cu/не Cu: **1,5**

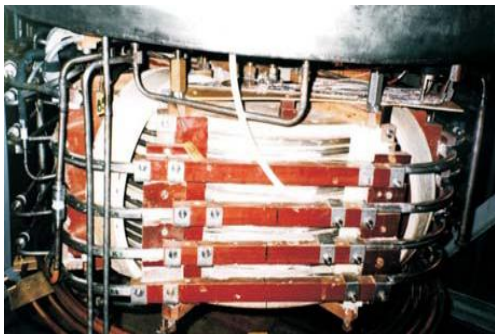
Гистерезисные потери

(±3 Тл; 4,2 К): **200 мДж/см³**

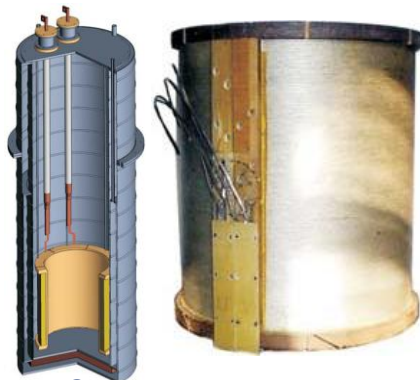
Плотность критического тока (12 Тл; 4,2 К):

>650 А/мм²

Сверхпроводниковые устройства, созданные в НИЦ «КИ»



Модельная катушка для токамака SST-1



Сверхпроводниковый индуктивный накопитель (СПИН) на 0,5 МДж



Магнитная установка МАГДА (исследования МГД эффектов в жидких металлах)



СП магнитная система для ЯМР спектрометра



СП соленоид для гиротрона на 170 ГГц (ИТЭР)

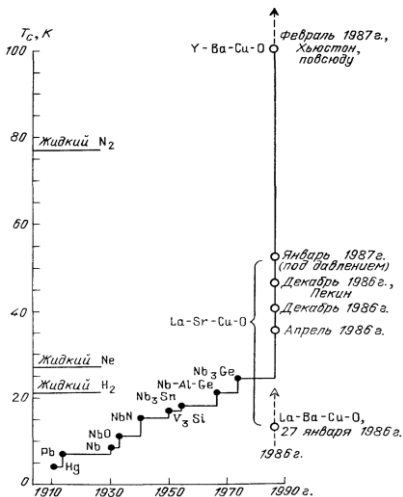


СП соленоид для магнитной сепарации



СП магнит МР-томографа (1990)

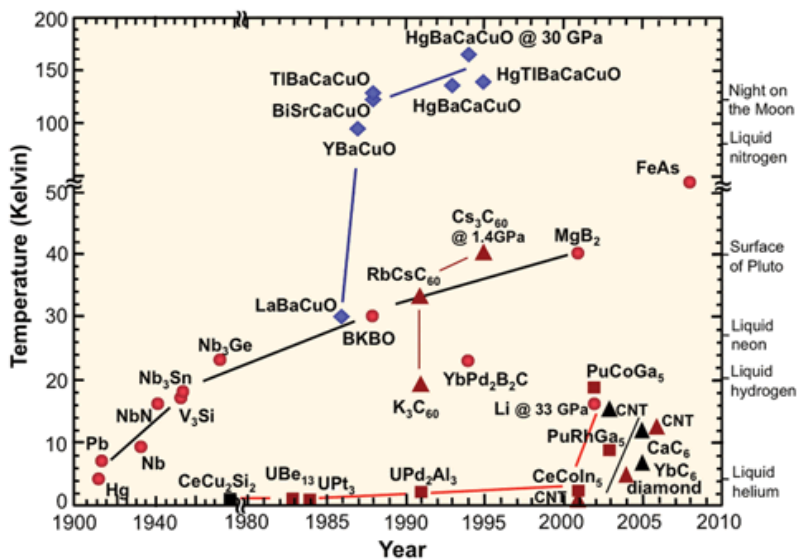
Начало эры высокотемпературных сверхпроводников -1986 г.



Первые шаги ВТСП
(из Нобелевской лекции
И.Г.Беднорца и
К.А.Мюллера, 1987 год)

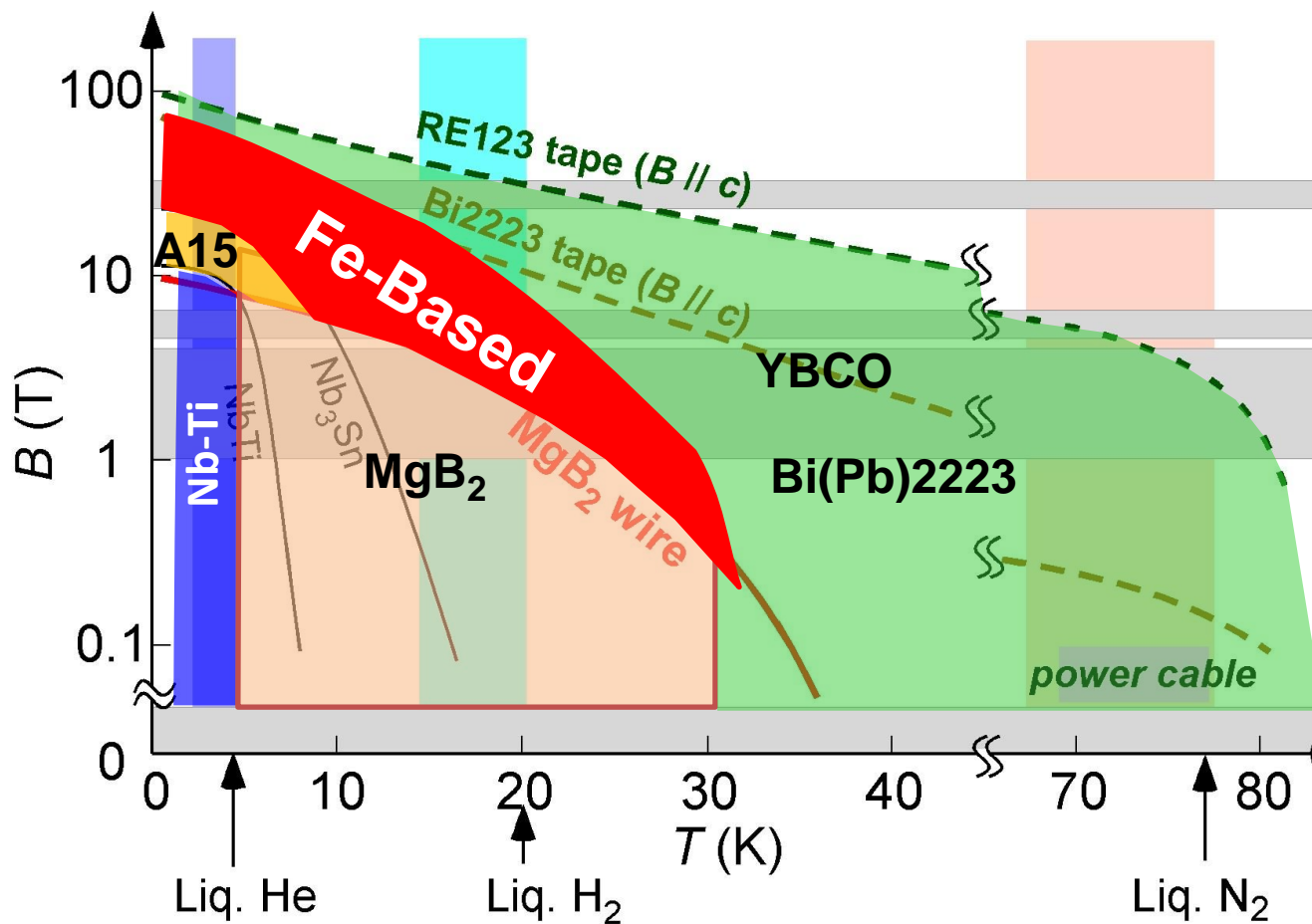
Таблица 1. Критические характеристики сверхпроводящих сплавов и соединений

Материал	Критическая температура, К	Верхнее критическое поле при 4,2 К, Тл
Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП)		
Nb-Zr	9,0–11,0	7–9
Nb-Ti	8,0–10,0	9–13
Nb ₃ Sn	17,0–18,0	23–25
Nb ₃ AlGe	20,7	41
Nb ₃ Ge	23,2	37
Nb ₃ Al	17,0–18,0	29–32
V ₃ Ga	14,5	21
V ₃ Si	17,0	23
V ₂ HfZr	10,0	25
PbMo ₆ S ₈	15,0	60
Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП)		
La-Sr-Cu-O	35–40	90
MgB ₂	37	9
Y-Ba-Cu-O	95–100	190
Bi-Sr-Ca-Cu-O	110–114	–
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125–130	–



Мировой рекорд $T_c \sim 135$ К: $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$
Открыт в 1993 г. С.Н. Путиным и Е.В. Антиповым из МГУ

Применение высокотемпературных сверхпроводников





Преимущества НИЗКО- температурных сверхпроводников (НТСП)

- 1) Относительно простая (металлургическая) технология
- 2) Нет ограничений по длине куска
- 3) Существует промышленное производство в России (десятки тонн в год)
- 4) Относительно дешевы
- 5) Низкое сопротивление места соединения проводов
- 6) Изотропные свойства

Преимущества ВЫСОКО- температурных (керамических) сверхпроводников (ВТСП)

- 1) Высокая рабочая температура (до 77К)
- 2) Более высокие рабочие поля при гелиевых и субгелиевых температурах (4.2-30К)
- 3) Дешевое криогенное обеспечение
- 4) Потенциально более широкий рынок
- 5) Уникальные свойства (например, широкий диапазон сопротивления в нормальных условиях)

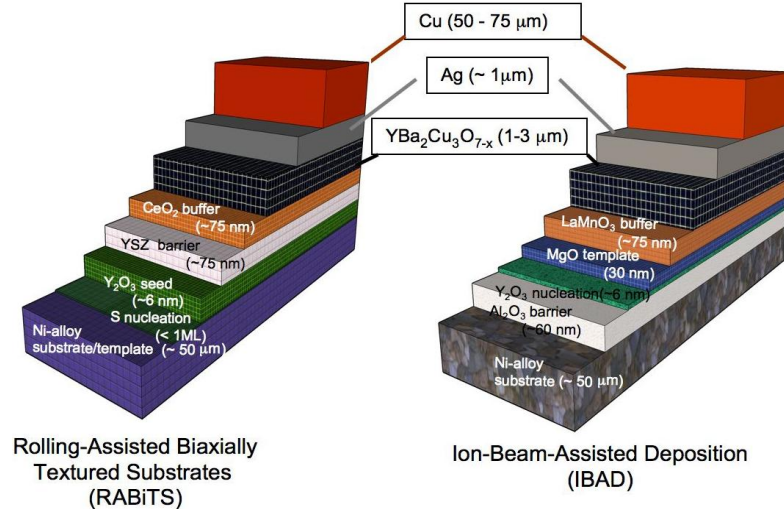
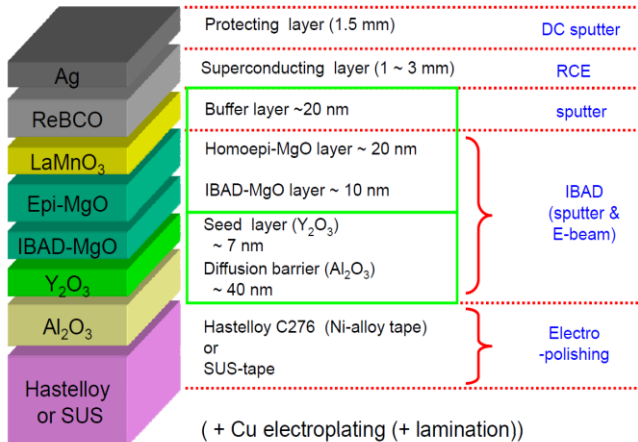


Основные тенденции применения ВТСП-проводников в мире

- **ВТСП-2 ленты** – Промышленное производство
- **Силовые кабельные линии** (Корея – энергосети; Япония – энергосети для железных дорог, ЕС - энергосети)
- **Ограничители токов короткого замыкания - СОР**
- **Ветроэнергетические установки** – 10 МВт и выше
- **Медицина** – томография и протонно-ионные ускорители для онкотерапии
- **Военные применения** – СПИН, Генераторы, размагничивание кораблей, двигатели кораблей, авиационные двигатели

Технологии получения ВТСП - 2 поколения

SuNAM's 2G Wire Architecture



Общая толщина многослойного ленточного проводника – примерно 0,1-0,15 мм
Ширина 4 -12 мм

SuNAM

2

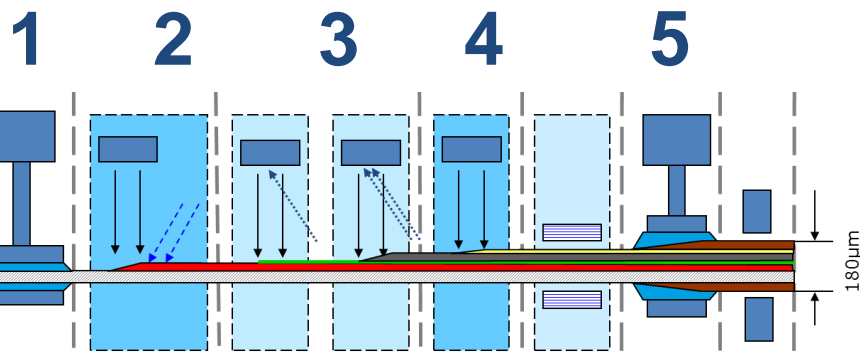
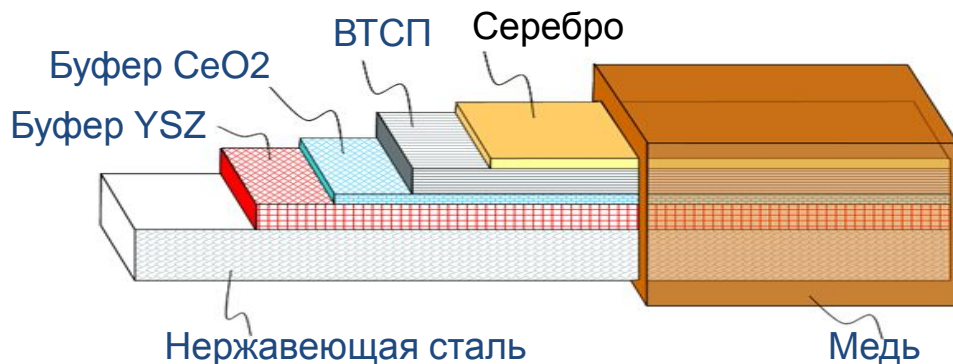
Типовая архитектура сверхпроводника:

- 1) Металлическая лента-носитель (Ni-W, хастеллой, нержавеющей сталь) – **50-100 мкм**
- 2) Буферные слои (2 - 4 слоя, обычно оксиды Y, Ce, La, Zr и т.п.) – суммарная толщина около **1 мкм**.
- 3) Сверхпроводящее покрытие – Y-123 или Dy, Gd, Ho...-123 – **1- 3 мкм**.
- 4) Защитное покрытие (серебро) - толщиной **1-2 мкм** с каждой стороны.
- 5) Шунтирующее медное покрытие – толщиной **20-50 мкм** с каждой стороны.

Основные технологические вызовы при получении:

- 1) Создание качественной поверхности, структуры металлической ленты и буферных слоев (острота текстуры не более **5°**, шероховатость поверхности не более **3 – 5 нм**)
- 2) Однородность и воспроизводимость сверхпроводящих свойств на длинах ~1000 м.

Базовая технология производство ВТСП-2 в НИЦ «КИ»



Процессы:

1

Подготовка поверхности
(механическая полировка,
УЗ-очистка, контроль)

2

Нанесение буферного слоя YSZ
(использование ассистирующего
ионного пучка: ABAD –технология)

3

Нанесение CeO2 и ВТСП слоя
(импульсное лазерное осаждение: PLD
технология)

4

Нанесение защитного
слоя серебра (термическое
осаждение)

5

Нанесение шунтирующего
слоя меди (гальваническое осаждение)

Технические характеристики ВТСП провода:

- Толщина ленты-подложки – 0,1 – 0,05 мм.
- Ширина ленты – 4 мм.
- Длина ВТСП ленты – до 1000 м
- Критический ток – не менее 200 А/см
(в собственном поле при температуре 77К)

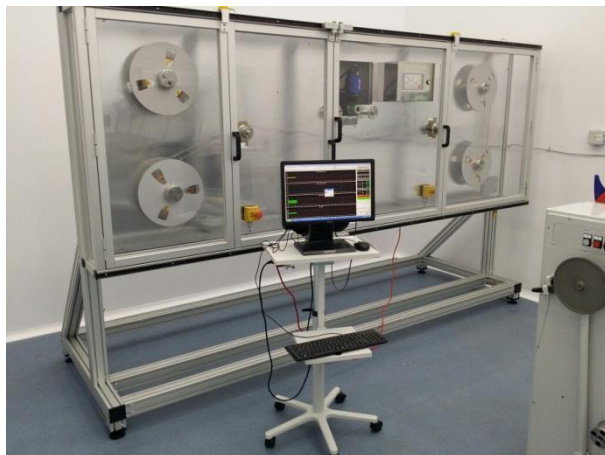
Установки Пилотной линии по выпуску ВТСП -2 в НИЦ «Курчатовский институт» - запущены в октябре 2015



Установка механической полировки



Система УЗ очистки ленты



**Установка лазерного контроля
качества полировки**



**Установка нанесения буферных слоев
методом ионного ассистирования (ABAD)**

Установки Пилотной линии по выпуску ВТСП -2 в НИЦ «Курчатовский институт» - запущены в октябре 2015



Лазерная система осаждения (PLD)



Установка термического осаждения серебра



Печь кислородного отжига



Гальваническая установка
(покрытие медью)



Измерение I_c

ВТСП для электроэнергетики: ограничители токов короткого замыкания

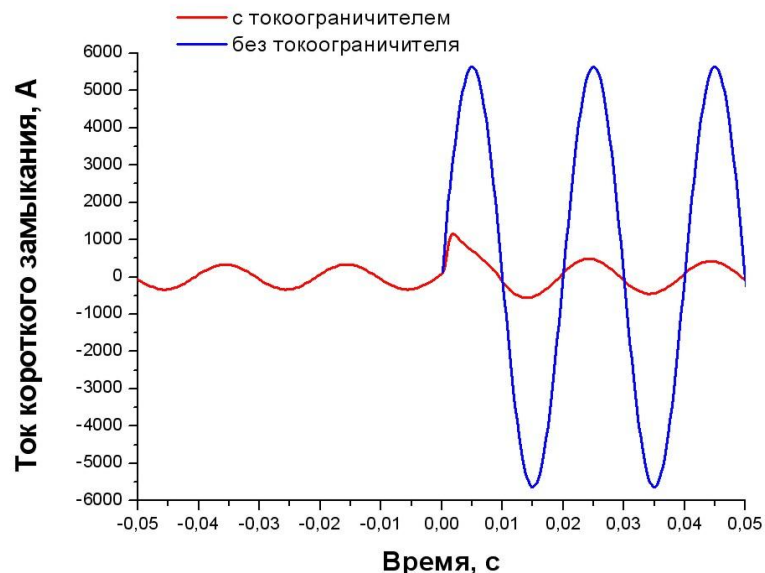
Разработан, изготовлен и испытан СОТ на основе ВТСП 2-ого поколения.

СОТ - одно из наиболее важных и безальтернативных применений ВТСП в электроэнергетике.

Преимущества СОТ: высокое быстродействие (2 мс), резкое снижение ударных токов (в 5-7 раз, см. рис. ниже), продление срока эксплуатации электрических машин и аппаратов (до двух раз).

Основные параметры макета СОТ:

Номинальное напряжение	3,5 кВ
Рабочий ток	250А



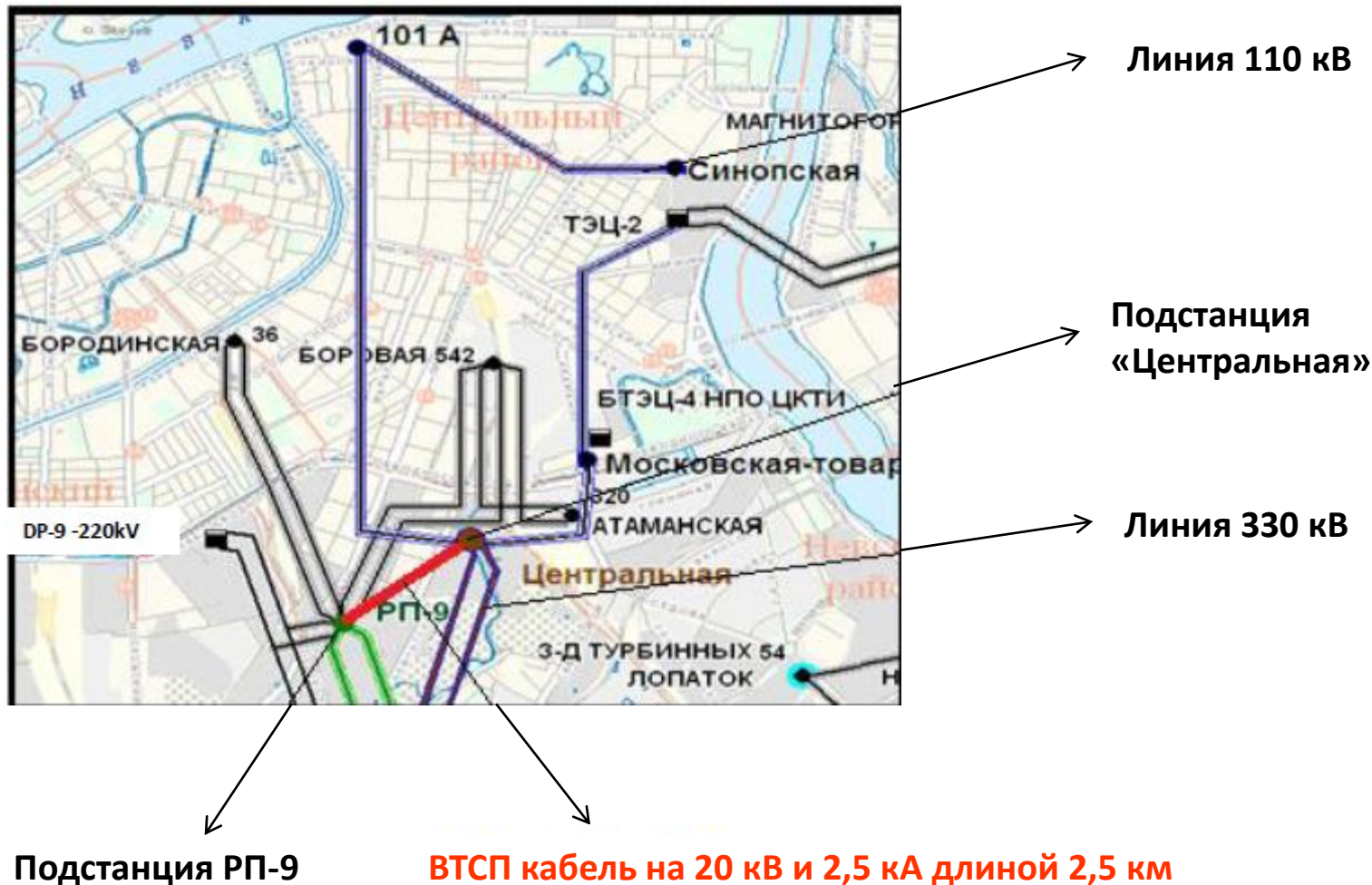
Осциллограмма процесса токоограничения



Макетный образец СОТ

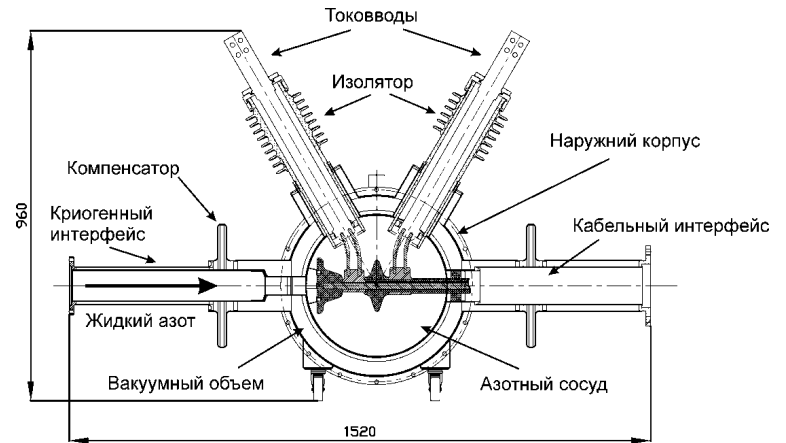
ВТСП для электроэнергетики: силовые кабельные линии

Проект ВТСП кабеля постоянного тока длиной 2.5 км (на 2,5 кА и 20 кВ) в С.-Петербурге



ВТСП для электроэнергетики: силовые кабельные линии

Проект ВТСП кабеля постоянного тока длиной 2.5 км (на 2,5 кА и 20 кВ) в С.-Петербурге



Испытания в НИЦ «КИ»



Токовводные муфты для ВТСП кабеля



Силовые ВТСП токовые вводы для термоядерной энергетики, ускорителей



Токовводы для сверхпроводящего токамака KSTAR

Сильноточные (до 60-80 кА) ВТСП токовводы – высокоэффективные экономичные компоненты всех СП устройств.

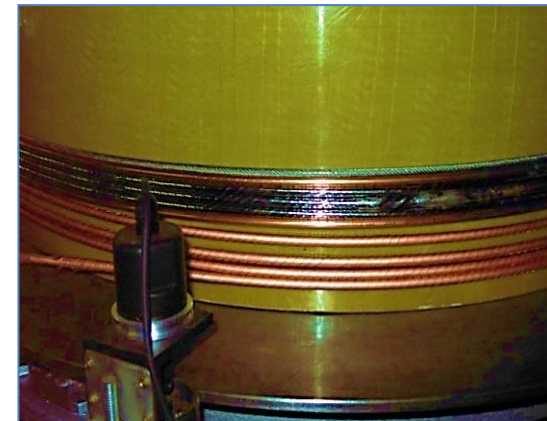
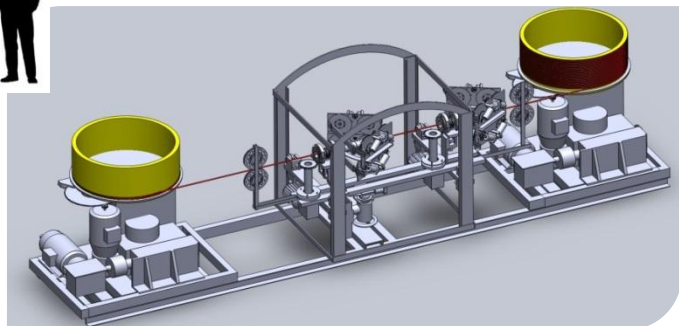
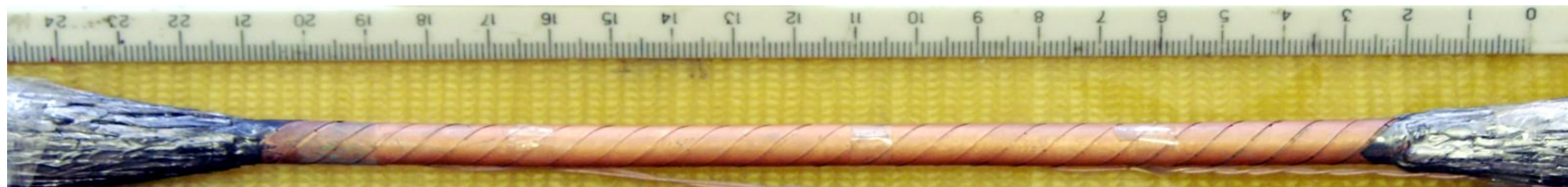


ВТСП токовводы на 12 кА и 1 кВ для коллайдера NICA



Токовводы с током 24 кА

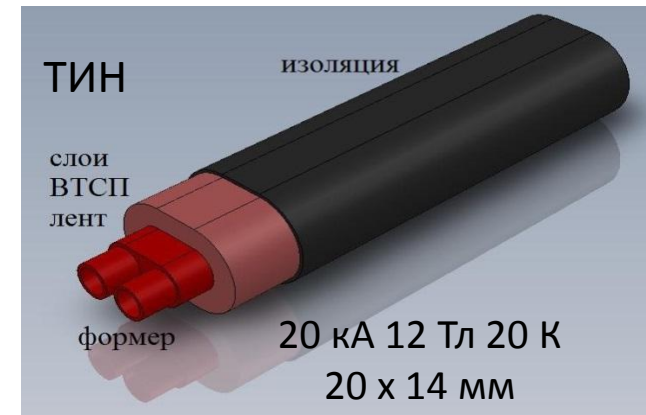
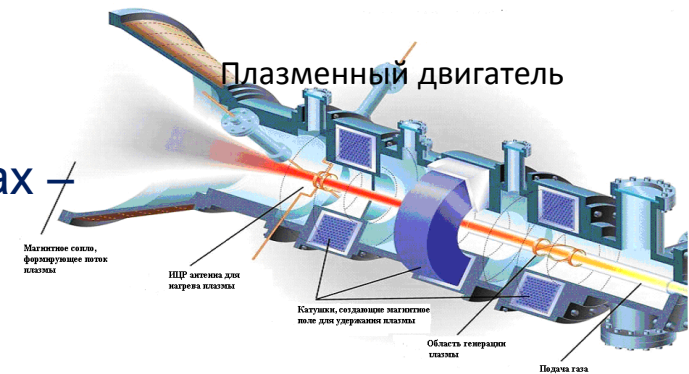
Токонесущие ВТСП элементы – основа будущих магнитных систем



Устройство позволяет наматывать до 16 ВТСП лент одновременно. Общее число лент в ТНЭ, размеры и число слоев принципиально не ограничены.

Крупные и импульсные СП магнитные системы: (от энергетики до космоса)

- Термоядерные установки и гибридеры, в том числе термоядерный источник нейтронов ТИН (у ВТСП ТНЭ выше максимальное поле и стабильность)
- Плазменные космические двигатели 1-100 МВт и затем термоядерные реактивные двигатели – революционный прорыв в межпланетных полетах – скорость космических аппаратов можно будет увеличить на 1-2 порядка
- Защита космических кораблей от радиации магнитным полем
- Индуктивные накопители энергии
- Ускорители частиц – высокополевые вставки
- Лабораторные магниты, импульсные или крупные устройства электроэнергетики:
- Электромшины – генераторы, двигатели
- Индуктивные ограничители тока КЗ
- Гибкие токоподводы (для ускорителей, токамаков)





Выводы

1. В течение всей 55-летней истории технической (прикладной) сверхпроводимости Россия находится на передовых рубежах в мире в области низкотемпературных сверхпроводниковых технологий.
2. В последние годы России осуществлен существенный рывок в технологиях производства высокотемпературных сверхпроводников и устройств на их основе.
3. Сверхпроводимость открывает новые горизонты применения – от электроэнергетики до освоения космического пространства.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

